

LABO

**Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft
Bodenschutz**

Arbeitshilfe zur Expositionsabschätzung in der Detailuntersuchung für den Wirkungspfad Boden-Mensch

**Boden-Mensch/Direktkontakt
Boden-Bodenluft-Mensch
Boden-Nutzpflanze-Mensch
Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch**

Ständiger Ausschuss „Altlasten“ (ALA)

Impressum

Herausgeber:

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO)

unter dem Vorsitz des Ministeriums für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz
des Landes Brandenburg

Henning-von-Tresckow-Straße 2-13, Haus S
14467 Potsdam

Tel.: +49 331 866-7379

E-Mail: labo@mluk.brandenburg.de

Homepage: www.labo-deutschland.de

Bearbeitung und Redaktion:

Gesprächskreis Schadstoffbewertung des Ständigen Ausschusses Altlasten (ALA)
bestehend aus folgenden Personen (erweiterter Personenkreis, z. T. zeitweise):

- Dr. Martin Biersack (BY, LfU)
- Dr. Cilia Derese (RP, LfU)
- Dr. Urs Dippon-Deissler (UBA)
- Dr. Stefan Feisthauer (HE, ehem. HLNUG)
- Dr. Andrea Hädicke (NW, LANUV)
- Cosima Hillmert (BW, LUBW)
- Gudrun Klemm (SN, LfULG)
- Jörg Leisner (NW, LANUV)
- Dr. Ingo Müller (SN, LfULG)
- Anja Nebelsiek (HH, BUKEA)
- Dr. Philipp Roth (NW, LANUV)
- Margit Salzmann (NI, GAA-HI)
- Dr. Gerhard Schmiedel (ehem. RP, LfU)
- Dr. Claudia Strobel (UBA)
- Ireen Werner (BB, LfU)
- Dr. Andreas Zeddel (SH, LfU)
- Volker Zeisberger (HE, HLNUG)

Obschaft (jeweils zeitweise im Zeitraum der Erarbeitung):

Cosima Hillmert, Dr. Stefan Feisthauer

Anja Nebelsiek (komm.), Dr. Andreas Zeddel (komm.)

Federführung:

LFP-Projekt (2019):

Gudrun Klemm

1. Auflage (2020):

Dr. Andreas Zeddel

2. überarbeitete Auflage (2023):

Anja Nebelsiek

Unter Mitwirkung von:

Dieser Arbeitshilfe inklusive der Anhänge liegt der gleichnamige LFP-Abschlussbericht der IFUA-Projekt-GmbH Bielefeld vom Dezember 2019 zu Grunde, der auf der Seite des Länderfinanzierungsprogrammes (LFP) veröffentlicht wurde (<http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/projektberichte/labo/>, LFP-Projekt B 3.17).

Das LFP-Projekt wurde bearbeitet von:

Monika Machtolf
Gerald Krüger
Dr. Dietmar Barkowski

Stand:

Dezember 2023

2. überarbeitete Auflage:

Das Papier wurde durch die 65. LABO am 20./21. März 2024 in Potsdam beschlossen. Die UMK hat der Veröffentlichung des Papiere im Umlaufbeschluss ... zugestimmt.

[1. Auflage:

Zur Anwendung empfohlen gemäß LABO-Umlaufbeschluss am 10. August 2020 und Beschluss der UMK im Umlaufverfahren]

Lizensierung:

Der Text dieses Werkes wird, wenn nicht anders vermerkt unter, der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International zur Verfügung gestellt.

CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>)

Quellenangaben siehe jeweilige Abbildung, Abbildungen von der LABO haben keine Angaben.

Zitiervorschlag:

LABO (2023): Arbeitshilfe zur Expositionsabschätzung in der Detailuntersuchung für den Wirkungspfad Boden-Mensch. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz, 2. überarbeitete Auflage. Online: <https://www.labo-deutschland.de/Veroeffentlichungen-Altlasten.html>

Veranlassung und Vorbemerkungen zur Arbeitshilfe

Die vorliegende Arbeitshilfe wurde im Auftrag des Ständigen Ausschusses Altlasten (ALA) der LABO mit dem Ziel erarbeitet, ein bundeseinheitliches Vorgehen bei der Expositionsabschätzung innerhalb der Detailuntersuchung zu etablieren.

Sie behandelt die **Expositionen**, denen **Menschen** als Nutzer von Flächen ausgesetzt sein können. Im Rahmen der **Detailuntersuchung** wird dabei die verfügbare Menge eines Schadstoffes, denen ein Mensch unter den Bedingungen des betrachteten Einzelfalls ausgesetzt sein kann, abgeschätzt. Dazu werden auf Grundlage der BBodSchV die verschiedenen Methoden zur Expositionsabschätzung dargestellt, um die Mobilität und Verfügbarkeit der Schadstoffe im Boden sowie die Nutzungsbedingungen am Standort zu ermitteln. Dies beinhaltet auch indirekte Aufnahmen über Nutzpflanzen (Boden-Nutzpflanze-Mensch) oder Nutztiere (Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch).

Nicht behandelt werden die Schutzgüter Nutzpflanze/Pflanzenqualität (landwirtschaftliche und erwerbsgärtnerische Nutzung) und Grundwasser sowie Deponiegase.

Aufgrund fehlender vollzugsleitender bundeseinheitlicher Hinweise zur Expositionsabschätzung in der Detailuntersuchung wurde in den Jahren 2017 bis 2019 aus Mitteln des Länderfinanzierungsprogrammes „Wasser, Boden und Abfall“ – unter fachlicher Begleitung einer projektbegleitenden Arbeitsgruppe aus Vertretern der Fachbehörden der Länder – durch die IFUA-Projekt-GmbH Bielefeld die Grundlage für die vorliegende Arbeitshilfe erarbeitet. Ausgangspunkt des Projektes waren Veröffentlichungen einzelner Bundesländer sowie Befragungen von Behördenvertretern, Gutachtern und Sachverständigen zur aktuellen Vollzugspraxis. Auf der Grundlage von Rückmeldungen aus Schulungsveranstaltungen zu dieser Arbeitshilfe hat die projektbegleitende Arbeitsgruppe die hier veröffentlichte weiterentwickelte Fassung erarbeitet.

Die Arbeitshilfe soll Behörden, Sachverständigen, Ingenieurbüros und Untersuchungsstellen eine fundierte Hilfestellung für die praktische, transparente und nachvollziehbare Bearbeitung vor Ort bieten.

Die zuständigen Bodenschutzbehörden sollen darüber hinaus in die Lage versetzt werden, bei Prüfwertüberschreitungen die vertiefenden Expositionsabschätzungen sachverständiger Gutachter in der Detailuntersuchung hinsichtlich Plausibilität und Vollständigkeit qualifiziert zu prüfen und eine abschließende Gefährdungsabschätzung vorzunehmen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Anhänge	VIII
Verzeichnis der Abbildungen	VIII
Verzeichnis der Tabellen	VIII
Verzeichnis der Gleichungen	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
Quellennachweis	XV
1. Zielsetzung und Anwendungsbereich	1
2. Detailuntersuchung im Ablauf der Gefährdungsabschätzung	3
2.1. Erfassung und orientierende Untersuchung	3
2.1.1. Abgleich mit Prüfwerten	5
2.1.2. Überschreitung von Maßnahmenwerten	6
2.2. Detailuntersuchung	7
2.2.1. Wesentliche Bestandteile der Detailuntersuchung	8
2.3. Planungsrechtlich zulässige / aktuelle Nutzung	9
3. Vorgehensweise zur Expositionsabschätzung	11
3.1. Das Prinzip	11
3.2. Ablauf	11
3.3. Grundsätze der Standortcharakterisierung	13
3.3.1. Prüfung der Expositionsbedingungen	14
3.3.2. Gefahrenbeurteilung und abschließende Gefährdungsabschätzung	16
3.3.2.1 Akute Toxizität und sofortiger Handlungsbedarf	17
3.3.2.2 Schnittstellen zu anderen Sach- und Rechtsbereichen	18
3.4. Entbehrlichkeit von Expositionsabschätzungen	18
4. Standortcharakterisierung	20
4.1. Charakterisierung des Schadstoffinventars	20
4.1.1. Schadstoffe mit Bewertung nach BBodSchV	22
4.1.2. Weitere Schadstoffe mit konsentierten Prüfwertvorschlägen	24
4.1.3. Schadstoffe ohne Prüfwertvorschläge	25
4.1.4. Stoffgruppen	25
4.1.5. Stoffgemische	27
4.2. Nutzungsszenarien	27
4.2.1. Kinderspielflächen	27
4.2.2. Wohngebiete	28
4.2.2.1 Wohngebiete mit weniger sensibler Nutzung	29
4.2.2.2 Nutzgärten (Obst- und Gemüsegarten)	29
4.2.2.3 Haus- und Kleingärten	30
4.2.3. Park- und Freizeitanlagen	32

4.2.4.	Sport- und Bolzplätze	33
4.2.5.	Industrie- und Gewerbegrundstücke.....	33
4.3.	Auswahl des zutreffenden Nutzungsszenarios	33
5.	Durchführung von Expositionsabschätzungen für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt.....	38
5.1.	Ermittlung relevanter Aufnahmepfade	38
5.1.1.	Orale Aufnahme von Schadstoffen aus dem Boden.....	40
5.1.2.	Inhalative Aufnahme partikulär gebundener Schadstoffe	40
5.1.3.	Dermale Aufnahme von Schadstoffen aus dem Boden (perkutan).....	42
5.2.	Ermittlung bodenabhängiger Expositionsbedingungen als Beurteilungsgrundlage für die planungsrechtlich zulässige Nutzung	43
5.2.1.	Gesamtgehalte	44
5.2.2.	Oxidationsstufen.....	44
5.2.3.	Bindungsform	45
5.2.4.	Resorptionsverfügbarkeit (orale Aufnahme)	48
5.2.5.	Schadstoffanreicherung in der Feinkornfraktion < 63 µm (inhalative Aufnahme)	53
5.2.6.	Staubkonzentration in der Luft (inhalative Aufnahme).....	56
5.2.7.	Dermale Verfügbarkeit.....	57
5.2.8.	Beurteilung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen auf Grundlage der planungsrechtlich zulässigen Nutzung	57
5.3.	Zusätzliche Ermittlung nutzungsabhängiger Expositionsbedingungen als Beurteilungsgrundlage der aktuellen Nutzung.....	58
5.3.1.	Bodenaufnahmemenge/-rate – Zugänglichkeit des Bodens	59
5.3.2.	Aufenthaltshäufigkeit sensibler Nutzergruppen bei oraler und inhalativer Aufnahme	63
5.3.3.	Aufenthaltsdauer sensibler Nutzergruppen bei inhalativer und dermalen Aufnahme	65
5.3.4.	Weitere Expositionsstandards	66
5.3.5.	Beurteilung der Expositionsbedingungen auf Grundlage der aktuellen Nutzung.....	66
5.4.	Abschließende Gefährdungsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt.....	68
6.	Durchführung von Expositionsabschätzungen für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch	70
6.1.	Grundlagen.....	70
6.1.1.	Aufnahme über die Außenluft.....	71
6.1.2.	Aufnahme über die Innenraumluft	72
6.2.	Ermittlung bodenabhängiger Expositionsbedingungen als Beurteilungsgrundlage für die planungsrechtlich zulässige Nutzung	73
6.2.1.	Gehalte im Bodenfeststoff	73
6.2.2.	Konzentrationen in der Bodenluft	74
6.3.	Zusätzliche Ermittlung nutzungsabhängiger Expositionsbedingungen als Beurteilungsgrundlage der aktuellen Nutzung.....	76
6.3.1.	Art und Zustand des Gebäudes.....	76
6.3.2.	Gebäudenutzung	77
6.4.	Innenraumluftmessungen	78

6.5.	Abschließende Gefährdungsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch.....	79
7.	Durchführung von Expositionsabschätzungen für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch.....	82
7.1.	Grundlagen.....	82
7.1.1.	Schadstoffübergang vom Boden in und auf Nutzpflanzen.....	84
7.1.2.	Schadstoffaufnahme Nutzpflanze-Mensch.....	87
7.2.	Ermittlung bodenabhängiger Expositionsbedingungen.....	88
7.2.1.	Gesamtgehalte.....	88
7.2.2.	Pflanzenverfügbare Gehalte.....	90
7.2.3.	Pflanzenverfügbarkeitsbestimmende Bodenfaktoren.....	93
7.2.4.	Transferabschätzung Boden-Nutzpflanze.....	95
7.3.	Ermittlung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen.....	96
7.3.1.	Nutzpflanzenspektrum.....	97
7.3.2.	Anbaufläche pro Person.....	98
7.4.	Pflanzenuntersuchungen.....	100
7.5.	Abschließende Gefährdungsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch.....	101
8.	Durchführung von Expositionsabschätzungen für den Wirkungspfad Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch.....	104
8.1.	Bodenuntersuchungen.....	104
8.2.	Untersuchung von Futterpflanzen.....	106
8.3.	Untersuchung tierischer Produkte.....	106
9.	Sonderfälle der Expositionsbetrachtung.....	108
9.1.	Integrative Betrachtung der Wirkungspfade Boden-Mensch/Direktkontakt und Boden-Nutzpflanze-Mensch.....	108
9.2.	Weiterführende Expositionsbetrachtungen.....	111
9.2.1.	Neue Nutzungsszenarien.....	111
9.2.2.	Mischexpositionen und Kombinationswirkungen.....	112
9.2.3.	Hintergrundexposition.....	114
9.3.	Bewertung großflächiger Belastungen.....	115
9.3.1.	Statistischer Kennwert aus Datenkollektiv statt Messwert.....	116
9.3.2.	Festlegung der Aussagesicherheit.....	116
9.3.3.	Ableitung gebietsbezogener Beurteilungswerte.....	117
9.3.4.	Anwendung der gebietsbezogenen Beurteilungswerte.....	118
9.4.	Human-Biomonitoring.....	119
10.	Methodische Anforderungen.....	121
10.1.	Vorgaben zu Probennahme und Analytik.....	121
10.2.	Anforderungen an Gutachten und Auswertungen.....	124
10.3.	Anforderungen an Sachverständige.....	126
	Literaturverzeichnis.....	128

Rechtsnormenverzeichnis	138
Glossar	139

Anhänge

- Anhang 1: Checkliste zur Expositionsabschätzung
- Anhang 2: Datenblätter zur Expositionsabschätzung
- Anhang 3: Methoden und Konventionen
- Anhang 4: Fallbeispiele (A: Kinderspielfläche; B: Hausgarten; C: LCKW-Schaden)
- Anhang 5: Mustergliederung
- Anhang 6: Materialsammlung

Zu Anhang 4: Die Fallbeispiele wurden frei erfunden. Ähnlichkeiten mit realen Projekten oder Gegebenheiten sind zufällig.

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Ablauf der Gefährdungsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch	5
Abbildung 2: Mögliche Schritte der Expositionsabschätzung auf dem Weg zur abschließenden Gefährdungsabschätzung in der Detailuntersuchung	12
Abbildung 3: Prozesse im Vorfeld zur Resorption am Beispiel cadmiumverunreinigter Bodenpartikel (LANUV 2014)	49
Abbildung 4: Schematische Darstellung der relevanten Teilpfade beim Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze (LANUV 2014)	84

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Nutzungsszenarien mit relevanten Wirkungspfaden	35
Tabelle 2: Wirkungspfade mit Zuordnung der beurteilungsbestimmenden Aufnahmepfade	36
Tabelle 3: Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (in mg/kg TM) mit beurteilungsbestimmenden Aufnahmepfaden (Farben) und Besonderheiten bei der Bewertung (Buchstaben)	39
Tabelle 4: Ableitung der Prüfwerte für das Nutzungsszenario ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ gemäß BBodSchV und UBA (1999ff) (Gesamtgehalte in mg/kg TM)	41
Tabelle 5: Prüfwerte für Chrom (Oxidationsstufe) für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt gemäß BBodSchV (Gesamtgehalte in mg/kg TM), ergänzt um beurteilungsbestimmende Aufnahmepfade	45
Tabelle 6: Spezifizierte Prüfwerte ‚Bindungsform‘ für Quecksilber für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt gemäß BBodSchV / UBA 1999ff (Gesamtgehalte in mg/kg TM), ergänzt um beurteilungsbestimmende Aufnahmepfade	47
Tabelle 7: Subnutzungen und Bodenaufnahmemengen in Gärten ohne intensives Kinderspiel (Quelle: LANUV 2014)	61

Tabelle 8:	Berechnung der täglichen Bodenaufnahmemenge in Gärten ohne intensives Kinderspiel (Beispiel)	62
Tabelle 9:	Regelannahmen zur Relevanz der verschiedenen Aufnahmepfade für ausgewählte Schadstoffe (nach LANUV 2014)	85
Tabelle 10:	Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze, Szenario ‚Nutzgärten‘, zur Beurteilung von Gesamtgehalten (in mg/kg TM)	89
Tabelle 11:	Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze ¹⁾ , Szenario ‚Nutzgärten‘, zur Beurteilung von pflanzenverfügbaren Gehalten (in mg/kg TM)	91
Tabelle 12:	Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze auf Grünlandflächen im Hinblick auf die Pflanzenqualität (in mg/kg TM)	105

Verzeichnis der Gleichungen

Gleichung 1:	Beurteilungswert (BW_{SRV}) für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt, orale Aufnahme	50
Gleichung 2:	Expositionsquotient Resorptionsverfügbarkeit (EQ_{RV}) für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt, orale Aufnahme	51
Gleichung 3:	Resorptionsverfügbare Anteil für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt, orale Aufnahme	52
Gleichung 4:	Beurteilungswert Gesamtgehalt ($BW_{S_{gesamt}}$) für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt, orale Aufnahme	52
Gleichung 5:	Beurteilungswert ($BW_{S_{Feinkornfraktion}}$) für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt, inhalative Aufnahme	54
Gleichung 6:	Beurteilungswert ($BW_{S_{gesamt}}$) für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt, inhalative Aufnahme	55
Gleichung 7:	Expositionsquotient EQ_{BA} für die Bodenaufnahmemenge, oraler Aufnahmepfad	63
Gleichung 8:	Expositionsquotient EQ_{AH} für die Aufenthaltshäufigkeit, oraler und inhalativer Aufnahmepfad	65
Gleichung 9:	Expositionsquotient EQ_{AD} für die Aufenthaltsdauer, inhalativer Aufnahmepfad	65
Gleichung 10:	Beurteilungswert für die aktuelle Nutzung (BW_a) für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt, orale Aufnahme	66
Gleichung 11:	Beurteilungswert für die aktuelle Nutzung (BW_a) für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt, inhalative Aufnahme	67
Gleichung 12:	Expositionsquotient EQ_{AF} zur Berücksichtigung der im Einzelfall ermittelten Anbaufläche pro Person	100
Gleichung 13:	Einzelfallbezogener Beurteilungswert (BW_{PI}) für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch	101
Gleichung 14:	Berechnung der maximal tolerablen Anbaufläche (AF_{max}) für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch	102
Gleichung 15:	Berechnung der Schadstoffzufuhr über den Direktpfad	109
Gleichung 16:	Berechnung der Schadstoffzufuhr über den Verzehr von Nutzpflanzen	109
Gleichung 17:	Summe der Schadstoffzufuhr	110
Gleichung 18:	Beurteilung der Schadstoffzufuhr	110
Gleichung 19:	Gebietsbezogener Beurteilungswert (gBW) unter der beispielhaften Berücksichtigung der Resorptionsverfügbarkeit	117

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
A	Aufnahmemenge
AD	Aufenthaltsdauer
AF	Anbaufläche
AF _{max}	maximal tolerable Anbaufläche für den Einzelfall
AH	Aufenthaltshäufigkeit
AIR	Ausschuss für Innenraumrichtwerte
AL	aliphatisch
ALA	Altlastenausschuss der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
AN	Ammoniumnitratextraktion
anorg	anorganisch
AR	aromatisch
As	Arsen
BA	Bodenaufnahmemenge
BaP	Benzo(a)pyren
BauGB	Baugesetzbuch
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BBK	Bodenbelastungskarte
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BfR	Bundesinstitut für Risikobewertung
BG	Bestimmungsgrenze
BKleingG	Bundeskleingartengesetz
BMDL	benchmark dose lower bound
BTEX	aromatische Kohlenwasserstoffe Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol
BW	Beurteilungswert
BWa	Beurteilungswert für die aktuelle Nutzung
BWa _{Feinkornfraktion}	Beurteilungswert für die aktuelle Nutzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (inhalative Aufnahme), bezogen auf gemessene Gehalte in der Feinkornfraktion < 63 µm
BWa _{gesamt}	Beurteilungswert für die aktuelle Nutzung, bezogen auf gemessene Gesamtgehalte (< 2 mm)
BWa _{RV}	Beurteilungswert für die aktuelle Nutzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (orale Aufnahme), bezogen auf gemessene resorptionsverfügbare Gehalte (< 2 mm)
BW _{Pfl}	Beurteilungswert für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch, bezogen auf gemessene Gehalte im Boden (Bodenfraktion < 2 mm)

BWs	Beurteilungswert für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung
BW _{SFeinkornfraktion}	Beurteilungswert für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (inhalative Aufnahme), bezogen auf gemessene Gehalte in der Feinkornfraktion < 63 µm
BW _{Sgesamt}	Beurteilungswert für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung, bezogen auf gemessene Gesamtgehalte (< 2 mm)
BW _{SRV}	Beurteilungswert für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (orale Aufnahme), bezogen auf gemessene resorptionsverfügbare Gehalte (< 2 mm)
C _B	Gehalt im Boden
C _{B-AN}	Bodengehalt im Ammoniumnitratextrakt
Cd	Cadmium
CLP-VO	classification, labelling and packaging of substances and mixtures (Verordnung über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen)
cm	Zentimeter
cm ²	Quadratcentimeter
C _{pfl}	Gehalt in der Pflanze
Cr	Chrom
d	Tag
d/a	Tage pro Jahr
d/w	Tage pro Woche
DDT	Dichlordiphenyltrichlorethan
DIN	Deutsches Institut für Normung
dl-PCB	dioxinähnliche („dioxin-like“) polychlorierte Biphenyle
DNT	Dinitrotoluol
DU	Detailuntersuchung
ECN	äquivalente Kohlenstoffzahl (EC-Zahl)
EFSA	european food safety authority
EG	Europäische Gemeinschaft
EN	Europäische Norm
EQ	Expositionsquotient
EQ _{AD}	Expositionsquotient Aufenthaltsdauer (inhalative (und dermale) Aufnahme)
EQ _{AF}	Expositionsquotient für die einzelfallbezogene Anbaufläche
EQ _{AH}	Expositionsquotient Aufenthaltshäufigkeit (orale und inhalative Aufnahme)
EQ _{BA}	Expositionsquotient Bodenaufnahmemenge (orale Aufnahme)
EQ _{Feinkornfraktion}	Expositionsquotient für die Anreicherung in der Feinkornfraktion < 63 µm (inhalative Aufnahme)
EQ _{RV}	Expositionsquotient Resorptionsverfügbarkeit (orale Aufnahme)
EU	Europäische Union

Ex ^a	äußere Exposition gegenüber einem Schadstoff
Ex ⁱ	innere Exposition gegenüber einem Schadstoff
FAO	food and agriculture organisation
FBU	Fachbeirat Bodenuntersuchungen
F _{Gef}	Gefahrenfaktor
FM	Frischmasse
F _{TM}	Faktor zur Umrechnung von Frisch- auf Trockenmasse
f _{Wirksamkeit}	Faktor für bodenabhängige Expositionsbedingungen
g	Gramm
G	Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der anteiligen Aufenthaltszeit
g/a	Gramm pro Jahr
g/d	Gramm pro Tag
gBW	gebietsbezogener Beurteilungswert
gBW _o / m / u	oberer / mittlerer / unterer gebietsbezogener Beurteilungswert
GD	gefahrenbezogene Körperdosis
GIS	Geografisches Informationssystem
GOK	Geländeoberkante
h	Stunden
h/d	Stunden pro Tag
HBM	Human-Biomonitoring
HCB	Hexachlorbenzol
HCH	Hexachlorcyclohexan (mit t-HCH = technisches HCH und α -/ β -/ γ -/ δ -/ ϵ -HCH = HCH-Isomere)
HCN	Cyanwasserstoff
Hg	Quecksilber
IARC	international agency for research on cancer
IEC	internationale electrotechnical commission
IRK-UBA	Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes
ISO	internationale Organisation für Normung
ISQAB	Informationssystem zur Qualitätssicherung bei der Altlastenbearbeitung
JECFA	joint FAO/WHO expert committee on food additives
KA 5	Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage
K _{as} -Wert	Boden-Bodenluft-Verteilungskoeffizient
KD	gefahrenbezogene Körperdosis
kg	Kilogramm
KG	Körpergewicht

KiTa	Kindertagesstätte
KW	Königswasserextraktion
KW-Index	Kohlenwasserstoff-Index
L	Expositionszeitfaktor für kanzerogene Substanzen
LABO	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LCKW	leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe
LFGB	Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch
LFP	Länderfinanzierungsprogramm ‚Wasser, Boden und Abfall‘
LOAEL _E	lowest observed adverse effect level für die Allgemeinbevölkerung
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
m ³ /h	Kubikmeter pro Stunde
MAK	maximale Arbeitsplatz-Konzentration
mg	Milligramm
mg/kg	Milligramm pro Kilogramm
mg/l	Milligramm pro Liter
mg/m ²	Milligramm pro Quadratmeter
mg/m ³	Milligramm pro Kubikmeter
mm	Millimeter
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
µg	Mikrogramm
µg/dl	Mikrogramm pro Deziliter
µg/kg	Mikrogramm pro Kilogramm
µg/l	Mikrogramm pro Liter
µg/m ³	Mikrogramm pro Kubikmeter
µm	Mikrometer
n	Anzahl der Erhebungen
N	Expositionshäufigkeit
ndl-PCB	nicht dioxinähnliche („non-dioxin-like“) polychlorierte Biphenyle
ng	Nanogramm
ng/g	Nanogramm pro Gramm
ng/m ³	Nanogramm pro Kubikmeter
NOAEL _E	no observed adverse effect level für empfindliche Personen
NRV	nutrient reference values (Nährstoffbezugswerte)
NRW	Nordrhein-Westfalen

Arbeitshilfe zur Expositionsabschätzung in der Detailuntersuchung

org	organisch
OU	orientierende Untersuchung
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe mit PAK ₁₆ bzw. PAK-EPA (16 Verbindungen aus der Gruppe der PAK (nach U.S. EPA))
Pb	Blei
PbB	Blutbleikonzentration
PCB	polychlorierte Biphenyle mit PCB ₆ (PCB-Kongenere 28, 52, 101, 138, 152 und 180 (nach Ballschmiter))
PCDD/F	polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane
PCP	Pentachlorphenol
PER	Tetrachlorethen
PFAS	per- und polyfluorierte Alkylverbindungen
PFCA	Perfluorcarbonsäuren
PFOA	Perfluoroctansäure
PFOS	Perfluoroctansulfonat
PFSA	Perfluorsulfonsäuren
pg	Pikogramm
PM10	Feinstaub, Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 Mikrometer (µm)
POP	persistent organic pollutants
ppm	parts per million
PTMI	provisional tolerable monthly intake
PTWI	provisional tolerable weekly intake
RfD	chronic reference dose
RV	Resorptionsverfügbarkeit
RW	Richtwert
RW I	Richtwert I
RW II	Richtwert II
RW II K	Richtwert II als Kurzzeitwert
RW II L	Richtwert II als Langzeitwert
SF	Sicherheitsfaktor
TCDD	Tetrachlordibenzodioxin
TDI	tolerable daily intake
TEF	Toxizitätsäquivalentfaktor
TEQ	Toxizitätsäquivalent
TF _{BR}	Transferfaktor Bodenluft-Raumluft
TM	Trockenmasse
TNT	Trinitrotoluol

TOC	total organic carbon (gesamter organischer Kohlenstoff)
TRD	tolerierbare resorbierte Dosis
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
TU	Technische Universität
TWI	tolerable weekly intake
UBA	Umweltbundesamt
UPB	Umweltprobenbank des Bundes
UR-	unit risk nicht geeignet
UR+	unit risk geeignet
UR++	unit risk gut geeignet
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency
V	vorläufig
VM	Verzehrsmenge
w/a	Wochen pro Jahr
Wdh.	Wiederholung
WHO	World Health Organization
Z	Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der Arbeitszeit

Quellennachweis

Fotos, Karten, Abbildungen:

IFUA-Projekt-GmbH, LANUV NRW, Dr. Andreas Zeddel, Dr. Cilia Derese, Anja Nebelsiek

1. Zielsetzung und Anwendungsbereich

Wer sind die Adressaten der Arbeitshilfe?

Was ist der Anwendungsbereich der Arbeitshilfe?

Welche Wirkungspfade werden behandelt?

Die vorliegende Arbeitshilfe wendet sich an alle, die mit der systematischen Bearbeitung von altlastverdächtigen Flächen und Verdachtsflächen befasst sind, insbesondere an Behörden, Sachverständige, Ingenieurbüros und Untersuchungsstellen.

Adressaten

Sie soll Anwendenden und Entscheidenden alle notwendigen Werkzeuge zur konkreten Ausgestaltung der Expositionsabschätzung und für die abschließende Gefährdungsabschätzung innerhalb der Detailuntersuchung an die Hand geben und so helfen, die **Regelungen der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)** umzusetzen.

**Anwendungs-
bereich der
Arbeitshilfe**

Ist eine Detailuntersuchung bezüglich des Wirkungspfades Boden-Mensch erforderlich, ist die **konkrete Schadstoffbelastung** der diese Fläche nutzenden Menschen zu erfassen und zu bewerten. Nach § 15 Abs. 5 BBodSchV sind dabei auch Teilflächen zu bewerten, die empfindlicher genutzt werden als andere. Nach § 4 Abs. 4 BBodSchG ist zudem die planungsrechtlich zulässige Nutzung des Grundstücks und das sich daraus ergebende Schutzbedürfnis zu beachten. Die Beziehung zwischen aktueller, planungsrechtlich zulässiger und denkbar empfindlichster Nutzung (**sensibelste Nutzung**) wird dargestellt und in den Ablauf einer Detailuntersuchung eingebunden.

**Ermittlung
der Belas-
tung von
Menschen**

...

Nach § 13 Abs. 1 BBodSchV ist in der Detailuntersuchung (DU) im Einzelfall ein Fokus auf die Mobilisierbarkeit und die Ausbreitungsmöglichkeiten der Schadstoffe aus dem Boden zu legen, die zur **direkten oder indirekten Aufnahme von Schadstoffen durch Menschen** führt.

Die Umstände des Einzelfalles werden bestimmt durch die örtlichen Gegebenheiten und die Grundstücksnutzung (vgl. *Kapitel 4*). Örtliche Gegebenheiten unterscheiden sich beispielsweise teilweise deutlich in der Verfügbarkeit der Schad-

**...unter
Beachtung
örtlicher
Gegeben-
heiten**

stoffe. Ebenfalls sehr unterschiedlich können die Kontaktmöglichkeiten des Menschen zu belasteten Böden oder anderen dadurch betroffenen Schutzgütern, wie Nutzpflanzen oder Nutztieren sein (Exposition).

Die Quantifizierung der Expositionen erfolgt für verschiedene Wirkungspfade. Wirkungspfade sind definiert als Wege eines Schadstoffes von der Schadstoffquelle bis zu dem Ort einer möglichen Wirkung auf ein Schutzgut. Die direkte Bodenaufnahme wird beim **Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt** betrachtet (vgl. *Kapitel 5*).

In Abhängigkeit von der Flüchtigkeit eines Schadstoffes ist auch die Relevanz des **Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch** zu prüfen, der ebenfalls Gegenstand dieser Arbeitshilfe ist (vgl. *Kapitel 6*).

In privat genutzten Gärten können, zumeist zusätzlich zum Direktpfad Boden-Mensch, Schadstoffe aus dem Boden in Nutzpflanzen gelangen, die anschließend vom Menschen verzehrt (**Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch**, vgl. *Kapitel 7*) oder als Futterpflanze vom Nutztier (private Kleintierhaltung) aufgenommen und dann vom Menschen verzehrt werden (**Wirkungspfad Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch**, vgl. *Kapitel 8*). Daher werden diese Wirkungspfade in der vorliegenden Arbeitshilfe ebenfalls behandelt.

Nicht Gegenstand dieser Arbeitshilfe ist der Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze, soweit dessen Betrachtung allein auf **landwirtschaftliche** und **erwerbsgärtnerische Nutzungen** und die Bewertung der Nutzpflanzenqualität nach Maßgabe lebens- und futtermittelrechtlicher Regelungen und im Hinblick auf deren **Vermarktungsfähigkeit** bzw. das Inverkehrbringen abzielt. Hierzu wird auf bereits bestehende Arbeitshilfen verwiesen (LUA BB 2003, LUA BB 2010).

Ebenfalls nicht Gegenstand dieser Arbeitshilfe ist die Betrachtung des **Wirkungspfad Boden-Grundwasser**, für den bereits ausführliche Arbeitshilfen (LABO 2003, LABO 2006) erstellt wurden.

**Relevante
Wirkungs-
pfade**

**NICHT
betrachtet:
landwirt-
schaftliche
Nutzung!**

2. Detailuntersuchung im Ablauf der Gefährdungsabschätzung

Was sind die Rahmenbedingungen der Detailuntersuchung?

Wie sind die Zuständigkeiten?

Wie sieht der Ablauf der Gefährdungsabschätzung aus?

Wo findet sich die Expositionsabschätzung im Untersuchungsablauf?

Warum sind planungsrechtlich zulässige und aktuelle Nutzung zu unterscheiden?

Der Ablauf der Gefährdungsabschätzung ist im Überblick in *Abbildung 1* veranschaulicht und wird im Folgenden erläutert.

2.1. Erfassung und orientierende Untersuchung

Die ersten Stufen im **Ablauf der Altlastenbearbeitung** dienen dazu, den Standort zu erfassen und zu charakterisieren.

Erfassung

Liegen **Anhaltspunkte** für eine Verdachtsfläche oder altlastverdächtige Fläche vor, werden im Rahmen **der orientierenden Untersuchung** i. d. R. Bodenuntersuchungen durchgeführt. „Ziel der orientierenden Untersuchung ist, [...] festzustellen, ob ein hinreichender Verdacht für das Vorliegen einer Altlast oder einer schädlichen Bodenveränderung besteht“ (§ 12 Abs.1 BBodSchV).

Orientierende Untersuchung

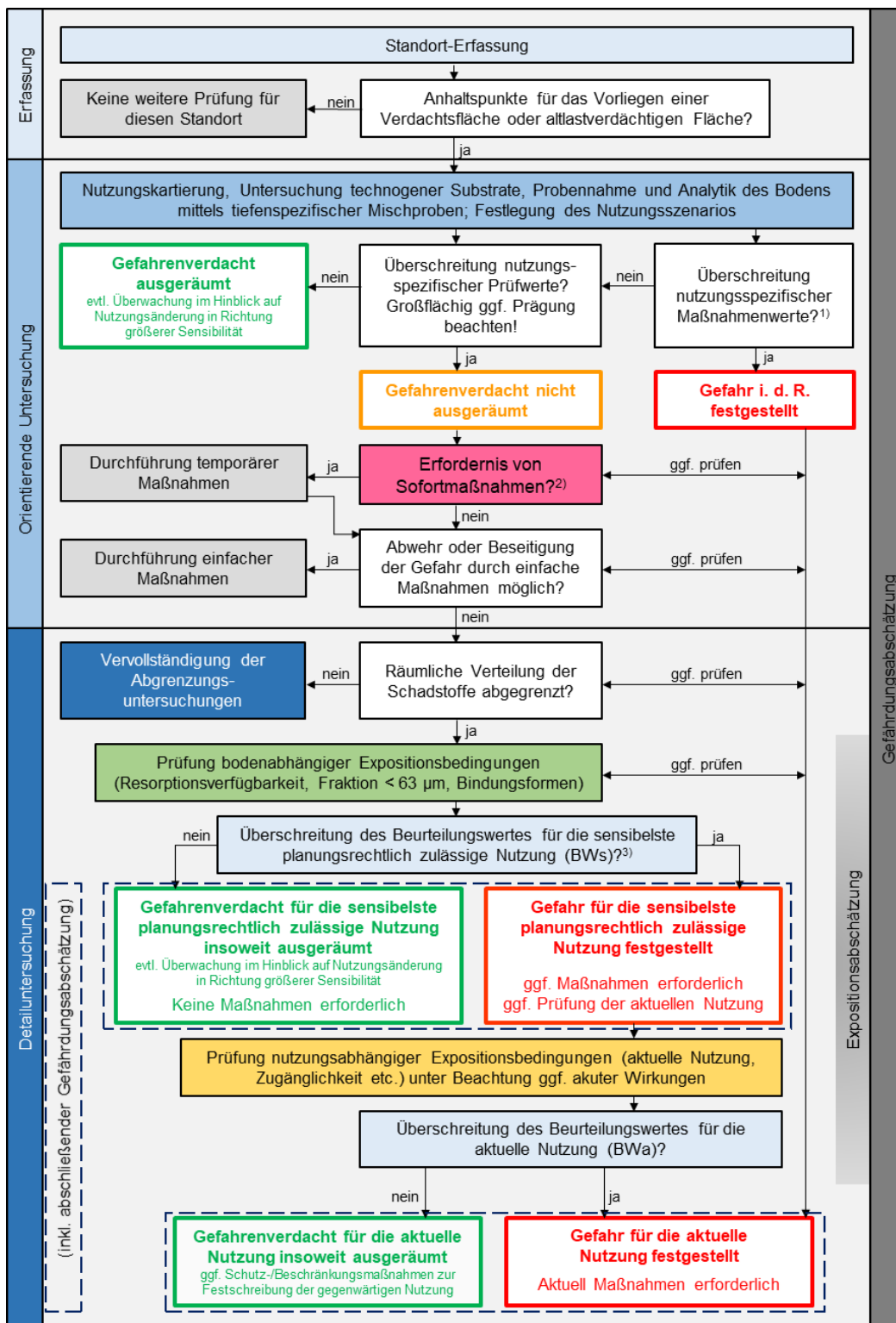
Definitionen

Zur Beurteilung schädlicher Bodenveränderungen sind bodenschutzrechtlich Prüf- und Maßnahmenwerte definiert (§ 8 Abs. 1 Nr. 2 BBodSchG):

Prüfwerte: „Werte, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der Bodennutzung eine einzelfallbezogene Prüfung durchzuführen und festzustellen ist, ob eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast vorliegt.“

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

Soweit in der BBodSchV für einen Schadstoff keine Prüf- oder Maßnahmenwerte angegeben sind, „[...] sind für seine Bewertung die zur Ableitung der festgelegten Prüf- und Maßnahmenwerte dieser Verordnung herangezogenen Methoden und Maßstäbe zu beachten.“ Diese „sind im Bundesanzeiger Nummer 161a vom 28. August 1999 veröffentlicht“ (§ 15 Abs.4 BBodSchV).



1) Wirkungspfad Boden-Mensch (Summe Dioxine/Furane und dl-PCB) und Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch (Cadmium); ggf. Überprüfung der Annahmen, die der Ableitung des Maßnahmenwertes zugrunde liegen (Kapitel 2.1.2) sowie generell Überprüfung auf das Erfordernis von Sofortmaßnahmen (vgl. Kapitel 3.3.2.1) oder die Möglichkeit der Anwendung einfacher Maßnahmen (vgl. Kapitel 2.1.1); Wirkungspfad Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch (Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Thallium, PCB₆) vgl. Kapitel 8.

- | |
|---|
| <p>²⁾ Bei Stoffen, für die der Prüfwert auf der Betrachtung akuter Wirkungen basiert (z. B. Cyanide) oder bei hohen Schadstoffgehalten im Boden auch akute Wirkungen parallel betrachten (vgl. <i>Kapitel 3.3.2.1</i>)</p> <p>³⁾ Großflächig ggf. ortsübliche Expositionsbedingungen zur Beschreibung der Prägung / sensibelsten planungsrechtlich zulässigen Nutzung beachten!</p> |
|---|

Abbildung 1: Ablauf der Gefährdungsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch

Für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt liegen in der BBodSchV für eine Auswahl von Schadstoffen **Prüfwerte** für verschiedene Nutzungsszenarien (vgl. *Tabelle 3*) vor, während **Maßnahmenwerte** lediglich für die Summe der Dioxine/Furane und dl-PCB abgeleitet wurden.

Beurteilungsmaßstäbe für Wirkungspfade

Für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze beinhaltet die BBodSchV ebenfalls Prüf- und Maßnahmenwerte (vgl. *Tabelle 10* und *Tabelle 11*), wobei lediglich für Cadmium Maßnahmenwerte für Ackerbauflächen und Nutzgärten im Hinblick auf die Pflanzenqualität abgeleitet wurden (vgl. Anlage 2, Tabelle 6 BBodSchV). Maßnahmenwerte für den Schadstoffübergang Boden-Nutzpflanze auf Grünlandflächen im Hinblick auf die Pflanzenqualität (vgl. *Tabelle 12*) können im Rahmen der Kleintier- und privaten Nutztierhaltung Bedeutung erlangen (vgl. *hierzu Kapitel 8*).

Für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch kann für flüchtige Stoffe orientierend auf Prüfwerte im Feststoff sowie in der Bodenluft (vgl. LABO 2008) zurückgegriffen werden.

Falls für einen Stoff kein Prüf- oder Maßnahmenwert vorliegt oder sich fachliche Grundlagen (z. B. zur Toxikologie) seit der Ableitung verändert haben, finden sich Hinweise zum weiteren Vorgehen im Rahmen der Detailuntersuchung in *Kapitel 4.1.3*.

2.1.1. Abgleich mit Prüfwerten

Werden bereits in der orientierenden Untersuchung **alle relevanten Prüfwerte** (vgl. *Kasten zu Prüf- und Maßnahmenwerten*) **unterschritten**, ist der Gefahrenverdacht in Bezug auf die betrachteten Schadstoffe insoweit ausgeräumt. Bei einer **Überschreitung** von einem oder mehreren nutzungsbezogenen Prüfwerten kann der Gefahrenverdacht nicht ausgeräumt werden und es ist i. d. R. eine Detailuntersuchung erforderlich.

Gefahrenverdacht?

In diese erste Beurteilung sollte das jeweils **sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzungsszenario** einbezogen werden (z. B. ‚Kinderspielfläche‘ statt ‚Wohngebiet‘ in Bereichen mit Wohngärten), um auch eine mögliche, ggf. künftige sensiblere Nutzung nicht außer Acht zu lassen. Bei großflächigen Belastungen kann hier ggf. auch die Prägung oder ortsübliche Nutzung definiert werden und Eingang in die Bewertung finden (vgl. auch *Kapitel 9.3*).

**Wahl des
Nutzungs-
szenarios**

Grundsätzlich sollte nach Überschreitung eines Prüfwertes zunächst **das Erfordernis von Sofortmaßnahmen** geprüft werden, das sich beim Vorkommen von Stoffen mit akuter Wirkung, wie beispielsweise Cyaniden, oder bei sehr hohen Stoffgehalten, wie beispielsweise Arsen, ergeben kann (vgl. *Kapitel 3.3.2.1*). In dem Fall kann sich die Durchführung einer Expositionsabschätzung in Abhängigkeit der ergriffenen Sofortmaßnahmen ggf. erübrigen oder vereinfachen.

**Akute
Wirkun-
gen?**

Von Detailuntersuchungen kann nach § 10 Abs. 5 Satz 2 BBodSchV auch abgesehen werden, „wenn Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen nach Feststellung der zuständigen Behörde mit einfachen Mitteln abgewehrt oder auf andere Weise beseitigt werden können“. Dazu zählen z. B. **Nutzungsbeschränkungen, Nutzungsänderungen oder Betretungsverbote sowie ggf. andere (einfache) Maßnahmen**, auf die sich die Beteiligten ohne eine Detailuntersuchung verständigen. Lässt sich der Gefahrenverdacht im Rahmen der orientierenden Untersuchung insoweit nicht ausräumen und sind keine einfachen Maßnahmen zur Abwehr oder Beseitigung der Gefahr möglich, ist eine Detailuntersuchung durchzuführen.

**Einfache
Maßnah-
men
möglich?**

2.1.2. Überschreitung von Maßnahmenwerten

Werden Maßnahmenwerte überschritten, ist in der Regel vom Vorliegen einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast auszugehen. In diesem Fall ist zu prüfen, ob das Erfordernis von **Sofortmaßnahmen** besteht (vgl. *Kapitel 3.3.2.1*), die Durchführung **einfacher Maßnahmen** zur Abwehr oder Beseitigung der Gefahr möglich und ausreichend ist (vgl. *Kapitel 2.1.1*) oder ob zur Entscheidung noch **weitere Informationen** zu erheben sind, z. B. zur räumlichen Ausdehnung der Belastung.

**Welche
Maßnah-
men?**

Sollten sich Hinweise darauf ergeben, dass die den Maßnahmenwerten zugrundeliegenden Annahmen von den Gegebenheiten im konkreten Einzelfall abweichen, sind ggf. – vergleichbar zum Vorgehen bei Prüfwertüberschreitung – spezielle Untersuchungen anzuraten. Beispielsweise lassen sich im Falle von Überschreitungen des Maßnahmenwertes für Cadmium für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch durch die Bestimmung der pH-Werte Maßnahmen konkretisieren (vgl. *Kapitel 7.2.2* und *Kapitel 7.2.3*).

**Prüfung
des Einzel-
falls?**

**Beispiel
Cadmium**

2.2. Detailuntersuchung

Nach § 13 Abs. 1 BBodSchV ist es Ziel der Detailuntersuchung „[...] mit Hilfe vertiefender und weitergehender Untersuchungen eine abschließende Gefährdungsabschätzung zu ermöglichen. Sie dient insbesondere der Feststellung von Menge und räumlicher Verteilung von Schadstoffen, ihrer mobilen oder mobilisierbaren Anteile, ihrer Ausbreitungsmöglichkeiten im Boden, in Gewässern und in der Luft sowie der Möglichkeit ihrer Aufnahme durch Menschen, Tiere und Pflanzen.“

**Vertiefende
und weiter-
gehende
Untersu-
chungen**

Voraussetzung für die Anordnung einer Detailuntersuchung ist der hinreichende Verdacht einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast gemäß § 9 Abs. 2 Satz 1 des BBodSchG.

Liegen die Voraussetzungen nach § 9 Abs. 2 Satz 1 vor, kann die zuständige Behörde anordnen, dass **die Pflichtigen** nach § 4 Abs. 3, 5 und 6 BBodSchG die notwendigen Untersuchungen durchführen. Die Pflichtigen tragen i. d. R. auch die Kosten der Untersuchungen.

**Zuständig-
keit**

Die Behörde kann dabei gemäß § 9 BBodSchG auch verlangen, dass die Untersuchungen durch **Sachverständige** und **Untersuchungsstellen nach § 18 BBodSchG** durchgeführt werden. Gemäß vorliegender Arbeitshilfe sollte die Behörde auch bei der Durchführung von Expositionsabschätzungen entsprechende Anforderungen stellen (vgl. *Kapitel 10*). Die abschließende Bewertung der Ergebnisse der Detailuntersuchung zur Prüfung der Rechtsfolgen, zur Ermessensausübung und Entscheidung ob bzw. welche Maßnahmen erforderlich sind, obliegt der zuständigen Behörde.

**Qualitäts-
anforderun-
gen**

2.2.1. Wesentliche Bestandteile der Detailuntersuchung

Der Schwerpunkt dieser Arbeitshilfe liegt in der **Prüfung der Expositionsbedingungen** zur Beurteilung von schädlichen Bodenveränderungen im Hinblick auf den Wirkungspfad Boden-Mensch (vgl. *Kapitel 3*). Die auch in der Detailuntersuchung durchzuführende **räumliche Eingrenzung** der Schadstoffverteilung ist hingegen nicht Gegenstand dieser Arbeitshilfe – hierzu liegen andernorts Arbeitsmaterialien vor (vgl. *Anhang 6*).

*Prüfung der
Exposition*

Auf Grundlage der Expositionsabschätzung werden in dieser Arbeitshilfe **Beurteilungswerte (BW)** für Bodenbelastungen berechnet. Diese verstehen sich als **Maßnahmenwerte**, anhand derer die abschließende Gefährdungsabschätzung durchzuführen ist. Weitere Ausführungen dazu finden sich im *Kapitel 3.3.2* und bei den entsprechenden Wirkungspfaden in den *Kapiteln 5 bis 8* sowie im *Kapitel 9.3*.

*Beurteilung
der
Exposition*

Zur Ableitung **einzelfallbezogener Beurteilungswerte (BW)** wird zunächst die **sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung (s)** betrachtet. Da hierbei die sensibelste Nutzungsart zu Grunde gelegt wird, gehen in die Berechnung von Beurteilungswerten für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung (**BWs**) folgerichtig nur **bodenabhängige Expositionsbedingungen** ein (vgl. *Kapitel 3.3.1*).

*BWs für
sensibelste
planungs-
rechtlich
zulässige
Nutzung*

Vorgaben des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG)

BBodSchG, § 4 Abs. 4: „Bei der Erfüllung der boden- und alllastenbezogenen Pflichten nach den Absätzen 1 bis 3 ist **die planungsrechtlich zulässige Nutzung** des Grundstücks und das sich daraus ergebende Schutzbedürfnis zu beachten, soweit dies mit dem Schutz der in § 2 Abs. 2 Nr. 1 und 2 genannten Bodenfunktionen zu vereinbaren ist. Fehlen planungsrechtliche Festsetzungen, bestimmt die Prägung des Gebiets unter Berücksichtigung der absehbaren Entwicklung das Schutzbedürfnis. [...]“.

Werden die für den Einzelfall ermittelten Beurteilungswerte **BWs** für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung **unterschritten**, ist der Gefahrenverdacht insoweit ausgeräumt.

Bei **Überschreitung von BWs** gilt die Gefahr für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung als festgestellt. In diesem Fall ist zu entscheiden, ob zusätzlich die **aktuellen nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen (a)** zu

*BWa für
aktuelle
Nutzung*

betrachten sind und **Beurteilungswerte BWa** zur Beurteilung der aktuellen Nutzung ermittelt werden sollen.

Ist bei festgestellter Gefahr für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung der **Gefahrenverdacht für die aktuelle Nutzung** durch die Detailuntersuchung **insoweit ausgeräumt**, sind ggf. Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen zur Festschreibung des Status quo der aktuellen Nutzung notwendig.

Wird die **Gefahr auch für die aktuelle Nutzung festgestellt**, sind Maßnahmen zur Gefahrenabwehr erforderlich.

In bestimmten Fällen, wie beispielsweise auf Kinderspielplätzen, können die aktuelle und die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung gleichgesetzt werden (**BWs = BWa**).

2.3. Planungsrechtlich zulässige / aktuelle Nutzung

Während sich die planungsrechtlich zulässige Nutzung aus dem **Baurecht** in Verbindung mit der **Bauleitplanung** ergibt, kann sich die aktuelle Nutzung in der Praxis insbesondere für den Wirkungspfad Boden-Mensch davon unterscheiden (vgl. *Kapitel 3.3*). Die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung bildet die auf der Fläche potenziell mögliche, sensibelste Nutzung ab, während die aktuelle Nutzung eine Momentaufnahme für die gegenwärtige Nutzung der zu untersuchenden Fläche darstellt.

Definition

Nutzungsabgrenzungen:

Planungsrechtlich zulässige Nutzung

In Flächennutzungsplänen werden nach Baugesetzbuch (BauGB § 5 und BauNVO) Bauflächen differenziert nach Wohnbauflächen, gemischte Bauflächen, gewerbliche Bauflächen und Sonderbauflächen z. B. für Erholung, Kuranlagen, Einkaufszentren. Davon abgegrenzt werden Gemeinbedarfsflächen (z. B. Schulen, Kirchen, soziale und gesundheitliche Einrichtungen) sowie Grünflächen (Parkanlagen, Kleingärten, Sport- und Spielplätze).

Den Wohnbauflächen können je nach Art der Bebauung und Gestaltung der Freiflächen (Ausprägung des Gebietes) vornehmlich die Nutzungsszenarien ‚Wohngebiete‘ oder ‚Hausgärten‘ zugeordnet werden, wobei dort ggf. für Freiflächen, die beispielsweise Geschäften, Handwerksbetrieben oder Anlagen des Gemeinbedarfs zugeordnet werden können, andere Nutzungsszenarien zur Bewertung heranzuziehen sind.

Für gemischte Bauflächen, die durch ein Nebeneinander verschiedener wohnbaulicher und gewerblicher Nutzungen gekennzeichnet sind, ist eine Verallgemeinerung in Bezug auf die Nutzungsszenarien nicht möglich.

Den gewerblichen Bauflächen entspricht in erster Linie das Nutzungsszenario ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ (auch bei Flächen für Versorgungs- und Entsorgungsanlagen ist diese Zuordnung naheliegend), wenngleich in Teilbereichen als Ausnahmen auch andere Nutzungsszenarien zutreffen können (z. B. Wohngärten oder Kinderspielflächen, die Wohnungen für Aufsichts- und Bereitschaftspersonen, Betriebsinhaber oder Betriebsleiter angegliedert sind).

Diese Einschränkung, dass neben vorherrschenden Nutzungen Teilbereiche mit anderen Szenarien anzusprechen sind, gilt generell; so können Kinderspielflächen in die verschiedensten planungsrechtlichen Nutzungen integriert sein, also auch in Wohnbauflächen, Kleingärten oder Park- und Freizeitanlagen.

Nutzgärten werden in der BauNVO explizit als zulässige Nutzungen innerhalb von Kleinsiedlungs- und Dorfgebieten genannt.

Aktuelle Nutzung

Als aktuelle Nutzung wird die tatsächliche gegenwärtige Nutzung bezeichnet, die im Einzelfall von der planungsrechtlich zulässigen Nutzung abweichen kann.

Grundsätzlich gibt das Planungsrecht zwar Hinweise auf die vorherrschenden Nutzungsszenarien, im Einzelfall sind jedoch Abweichungen möglich, so dass immer eine Prüfung erforderlich ist, vor allem auch im Hinblick auf die Auswahl der sensibelsten planungsrechtlich zulässigen Nutzung (siehe dazu auch die Ausführungen und Beispiele in *Kapitel 4.3*). Es ist darauf hinzuweisen, dass sich ein Gefahrenverdacht grundsätzlich auch erneut einstellen kann, insbesondere wenn eine Fläche eine Nutzungsänderung (hin zu einer vergleichsweise sensibleren Nutzung) erfährt. Dieses gilt auch, wenn neue Erkenntnisse zum Schadstoffinventar bzw. zur Bewertung von Schadstoffwirkungen vorliegen. Diese Problematik kann jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeitshilfe sein.

Kurz gesagt:

Die Detailuntersuchung ist fester Bestandteil des Untersuchungsablaufes im Falle des hinreichenden Verdachts schädlicher Bodenveränderungen oder Altlasten. Steht aufgrund der Nutzung der Fläche der Wirkungspfad Boden-Mensch im Fokus der Betrachtung, muss im Rahmen der Detailuntersuchung i. d. R. eine Expositionsabschätzung durchgeführt werden. Die Expositionsbedingungen für die Betroffenen werden vor dem Hintergrund der sensibelsten planungsrechtlich zulässigen sowie ggf. auch der aktuellen Nutzung geprüft und fließen in die abschließende Gefährdungsabschätzung mit ein.

3. Vorgehensweise zur Expositionsabschätzung

Was ist mit Expositionsabschätzung gemeint?

Was sind die Schritte der Expositionsabschätzung?

Was ist bei der Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen?

Wann sind Expositionsabschätzungen verzichtbar?

Unter Expositionsabschätzung wird in der vorliegenden Arbeitshilfe die Abschätzung der verfügbaren Menge eines Stoffes verstanden, der ein Mensch unter den Bedingungen des betrachteten Einzelfalls ausgesetzt sein kann.

Definition

3.1. Das Prinzip

Im Rahmen der Expositionsabschätzung werden die Expositionsbedingungen am Standort geprüft und mit den Standardannahmen, die bei der Prüfwerteableitung nach UBA (1999ff) angesetzt wurden, abgeglichen. So kann abschließend beurteilt werden, ob der entstandene Gefahrenverdacht in Bezug auf die betrachtete Nutzung letztlich ausgeräumt werden kann, oder ob die Gefahr festzustellen ist und Maßnahmenbedarf besteht.

***Vergleich
mit
Standard-
annahmen***

3.2. Ablauf

Eine Expositionsabschätzung umfasst die Standortcharakterisierung und die Prüfung der standörtlichen Expositionsbedingungen. Die Expositionsabschätzung bereitet die abschließende Gefährdungsabschätzung als letzten Baustein der Detailuntersuchung vor.

***Schritte
der Expositi-
onsabschätzung***

Allen Schritten der Expositionsabschätzung ist grundsätzlich immer die Frage nach dem Erfordernis von Sofortmaßnahmen voranzustellen. Im Falle zu befürchtender **akuter Wirkungen für die menschliche Gesundheit**, entweder aufgrund der akuten Wirkungen von Schadstoffen oder der Höhe der vorkommenden Schadstoffgehalte, kann möglicherweise Gefahr im Verzug sein, die ein sofortiges Handeln erzwingt und die Dringlichkeit sowie ggf. die Planung weiterer Untersuchungsschritte oder auch die Durchführung temporärer Maßnahmen zur Sicherung bestimmt.

***Akute
Wirkung
prüfen!***

Abbildung 2 veranschaulicht die einzelnen Arbeitsschritte und gibt Verweise auf die jeweiligen Kapitel in dieser Arbeitshilfe.

Standortcharakterisierung	Charakterisierung des Schadstoffinventars (vgl. <i>Kapitel 4.1</i>)	Charakterisierung der Nutzung bzw. der Nutzungsszenarien (vgl. <i>Kapitel 4.2</i>)	Untersuchungen an Transfer-/Aufnahmemedien oder am Schutzgut (vgl. <i>Tabelle 2</i>)
Prüfung der Expositionsbedingungen und Planung und Durchführung von Untersuchungen	Prüfung von Sofortmaßnahmen aufgrund akuter Wirkungen oder hoher Schadstoffgehalte/-konzentrationen		Innenraumluftmessungen (vgl. <i>Kapitel 6.4</i>) Pflanzenuntersuchungen (vgl. <i>Kapitel 7.4; 8.2</i>) Untersuchung tierischer Produkte (vgl. <i>Kapitel 8.3</i>) Human-Biomonitoring (vgl. <i>Kapitel 9.4</i>)
	bodenabhängige Expositionsbedingungen (vgl. <i>Kapitel 5.2; 6.2; 7.2</i>) Gesamtgehalte im Boden (vgl. <i>Kapitel 5.2.1; 6.2.1; 7.2.1; 8.1</i>) Oxidationsstufen (vgl. <i>Kapitel 5.2.2</i>) Bindungsformen (vgl. <i>Kapitel 5.2.3</i>) Resorptionsverfügbarkeit (vgl. <i>Kapitel 5.2.4</i>) Gehalte in der Fraktion < 63 µm (vgl. <i>Kapitel 5.2.5</i>) Staubkonzentration (vgl. <i>Kapitel 5.2.6</i>) Konzentrationen in der Bodenluft (vgl. <i>Kapitel 6.2.2</i>) Pflanzenverfügbarkeit (vgl. <i>Kapitel 7.2.2</i>) verfügbarkeitsbestimmende Bodenfaktoren (vgl. <i>Kapitel 7.2.3</i>) Transferabschätzung Boden-Nutzpflanze (vgl. <i>Kapitel 7.2.4</i>)	nutzungsabhängige Expositionsbedingungen (vgl. <i>Kapitel 5.3; 6.3; 7.3</i>) Zugänglichkeit des Bodens (vgl. <i>Kapitel 5.3.1</i>) Aufenthaltshäufigkeit und -dauer (vgl. <i>Kapitel 5.3.2; 5.3.3</i>) Art und Zustand von Gebäuden (vgl. <i>Kapitel 6.3.1</i>) Gebäudenutzung (vgl. <i>Kapitel 6.3.2</i>) Nutzpflanzenspektrum (vgl. <i>Kapitel 7.3.1</i>) Anbaufläche (vgl. <i>Kapitel 7.3.2</i>) Vorhandensein von Nutztieren (vgl. <i>Kapitel 8</i>)	
Abschließende Gefährdungsabschätzung	Beurteilung der Ergebnisse und abschließende Gefährdungsabschätzung Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (vgl. <i>Kapitel 5.4</i>) Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch (vgl. <i>Kapitel 6.5</i>) Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch (vgl. <i>Kapitel 7.5</i>) Wirkungspfad Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch (vgl. <i>Kapitel 8</i>) Integrative Betrachtung der Wirkungspfade (vgl. <i>Kapitel 9.1</i>)		

Abbildung 2: Mögliche Schritte der Expositionsabschätzung auf dem Weg zur abschließenden Gefährdungsabschätzung in der Detailuntersuchung

Die jeweiligen Farben werden als Kennzeichnung im Folgenden in der Arbeitshilfe weiterverwendet.

Zur Durchführung einer Expositionsabschätzung ist die **Kenntnis des Schadstoffinventars** sowie der (planungsrechtlich zulässigen und ggf. aktuellen) **Nutzung der Fläche** notwendig. Diese Informationen werden oftmals bereits im Rahmen der orientierenden Untersuchung erfasst und sind im Rahmen der **Standortcharakterisierung** (vgl. *Kapitel 4*) abschließend zu erheben.

Die anschließend zu prüfenden standörtlichen Expositionsbedingungen sind zu differenzieren nach **bodenabhängigen Expositionsbedingungen** und **nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen**. Die Prüfung der Expositionsbedingungen kann deshalb einerseits die Untersuchung bodenabhängiger Einflüsse (vgl. *Kapitel 5.2, 6.2 und 7.2*) auf die Verfügbarkeit der Schadstoffe (vgl. § 13 Abs. 3 BBodSchV), andererseits aber auch die Ermittlung relevanter Nutzergruppen und deren Nutzungsverhalten (Gestaltung der Fläche, Nutzungsdauer, -häufigkeit und -intensität, Anbaugewohnheiten etc.) beinhalten (vgl. *Kapitel 5.3, 6.3 und 7.3*). Dabei ist zunächst die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung zu betrachten und von der ggf. zusätzlich zu bewertenden aktuellen Nutzung zu unterscheiden (vgl. *Kapitel 2.2.1*).

Zusätzliche Informationen können **Untersuchungen an Transfer-/Aufnahmemedien oder an Schutzgütern** liefern (vgl. *Kapitel 6.4, 7.4, 8.2, 8.3 und 9.4*).

Alle Ergebnisse zusammen bilden schließlich die Grundlage für eine wirkungspfadbezogene Gefahrenbeurteilung auf dem Weg zur abschließenden Gefährdungsabschätzung (vgl. *Kapitel 5.4, 6.5, 7.5, 8 und 9.1*). Hierzu erfolgt die Berechnung von **einzelfallbezogenen Beurteilungswerten (BW)**.

In *Anhang 1* findet sich eine Checkliste zur Prüfung der einzelnen Arbeitsschritte einer Expositionsabschätzung.

**Checkliste
zur Expositions-
abschätzung**

3.3. Grundsätze der Standortcharakterisierung

Fundierte Kenntnisse zum standortspezifischen Schadstoffinventar (vgl. *Kapitel 4.1*) sowie dessen physikalisch-chemischer sowie humantoxikologischer Eigenschaften sind erforderlich, um für den weiteren Untersuchungsablauf zu erkennen, welche Wirkungs- und Aufnahmepfade zu beachten sind (vgl. *Kapitel 4.2*,

**Schadstoff-
inventar**

4.3 und *Anhang 2*). Ist ein Stoff beispielsweise leichtflüchtig, ist der Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch zu beachten (vgl. *Kapitel 6*).

Nutzungsszenarien zur Charakterisierung des Standortes werden i. d. R. bereits bei der Probennahmestrategie der orientierenden Untersuchung zugeordnet (vgl. *Kapitel 4.3*). Bei Detailuntersuchungen ist die Festlegung des Nutzungsszenarios entscheidend für die vertiefende Sachverhaltsermittlung. Spätestens zu diesem Zeitpunkt ist zu klären, welches Nutzungsszenario als das sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzungsszenario zur Bewertung heranzuziehen ist (vgl. *Kapitel 2*).

Dies ist insbesondere im Falle einer wohnbaulichen Nutzung relevant, wenn Fragen hinsichtlich der planungsrechtlichen Zulässigkeit des Nutzpflanzenanbaus oder der Nutzung als ‚Kinderspielfläche‘ zu klären sind (vgl. *Kapitel 4.2*).

Die Benennung des Schadstoffinventars und die Festlegung der relevanten Nutzungsszenarien entscheiden über die in der Expositionsabschätzung relevanten Wirkungs- und Aufnahmepfade am Standort (vgl. *Kapitel 4.2* und *Kapitel 4.3* sowie *Tabelle 1* und *Tabelle 2*).

So zeigen sich beispielsweise für die Nutzungsszenarien ‚Kinderspielflächen‘, ‚Wohngebiete‘ und ‚Park- und Freizeitanlagen‘ für Blei die sensibelsten Wirkungen nach langfristiger oraler Aufnahme, während für Chrom die inhalative Aufnahme ausschlaggebend ist (vgl. *Tabelle 3* und *Anhang 2* und insbesondere die dort zitierte Quelle UBA 1999ff). Danach richten sich Planung und Durchführung zur Prüfung der Expositionsbedingungen.

3.3.1. Prüfung der Expositionsbedingungen

Zur Ableitung der Prüfwerte der BBodSchV wurden **Standardannahmen** sowohl zur Mobilität und Verfügbarkeit der Schadstoffe im Boden als auch für Aufnahmemengen und Expositionshäufigkeiten getroffen, die in der Bekanntmachung der Ableitungsmethoden und -maßstäbe im Bundesanzeiger Nr. 161 a veröffentlicht sind (vgl. auch UBA 1999ff). Details hierzu finden sich auch in *Anhang 3*. Diese Annahmen sind für eine Gefahrenbeurteilung **im Einzelfall zu überprüfen**.

**Nutzung
und Nut-
zungs-
szenarien**

**Prüfung der
Expositi-
onsbedin-
gungen**

In Abhängigkeit der relevanten Wirkungs- und Aufnahmepfade (vgl. *Kapitel 4.3*) sowie der **Stoffeigenschaften** (vgl. *Kapitel 4.1*) ist die Prüfung **der bodenabhängigen Expositionsbedingungen** am Standort durchzuführen.

**Boden-
abhängige
Expositi-
onsbedin-
gungen**

Dazu wird das standortspezifische Vorliegen des Schadstoffes bzw. seine Verfügbarkeit im Boden bestimmt oder abgeschätzt (vgl. *Kapitel 5.2, 6.2 und 7.2*), beispielsweise durch Bestimmung:

- der Oxidationsstufe oder Bindungsform eines Schadstoffes (vgl. *Kapitel 5.2.2 und 5.2.3*),
- der Resorptionsverfügbarkeit (bei oral wirksamen Stoffen, vgl. *Kapitel 5.2.4*),
- der Gehalte in der Feinkornfraktion < 63 µm (bei inhalativ wirksamen Stoffen, vgl. *Kapitel 5.2.5*),
- der Pflanzenverfügbarkeit (Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch, vgl. *Kapitel 7.2.2*)
- oder weiterer verfügbarkeitsbestimmender Faktoren (z. B. pH-Wert, vgl. *Kapitel 7.2.3*).

Die Untersuchung bodenabhängiger Expositionsbedingungen ist i. d. R. mit vergleichsweise geringem Aufwand durchzuführen und die Ergebnisse sind in nur geringem Maße kurzfristigen Änderungen unterworfen.

Prüfungen der **nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen** sind sinnvoll, sofern **Abweichungen der aktuellen standörtlichen Gegebenheiten von den Standardannahmen** zu erwarten sind (vgl. *Kapitel 5.3, 6.3 und 7.3* sowie *Anhang 3*). Das ist häufig der Fall bei wohnbaulich genutzten Flächen, wo ein breites Nutzungsspektrum der Fläche – von selten genutzten Abstandsgrünflächen bis hin zu intensiv und individuell genutzten Hausgärten – zu betrachten ist. Dabei ist zu beachten, dass sich die aktuelle Nutzung kurzfristig ändern kann.

**Nutzungs-
abhängige
Expositi-
onsbedin-
gungen**

Auf **öffentlich genutzten Flächen**, wie Kinderspielplätzen oder Park- und Freizeitanlagen, ist dagegen kaum mit vom Standardszenario abweichenden Nutzungsgewohnheiten zu rechnen, so dass Abweichungen von den Standardannahmen gut begründet werden müssen.

**Kinder-
spielplätze /
Park- und
Freizeitan-
lagen**

Für Flächen, die in ihrer Nutzung deutlich von den vorgegebenen Standardszenarien abweichen (Sportplätze, Freibäder etc.) sind die Prüfung und Anpassung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen in besonderem Maße notwendig. Ggf. ist die Definition neuer Szenarien sinnvoll (vgl. *Kapitel 9.2.1*).

**Neue
Szenarien
oder Nut-
zergruppen**

Vor der Durchführung von Expositionsabschätzungen ist ein **geeignetes Untersuchungskonzept** zu erstellen, mit Hilfe dessen die nachfolgenden Datenerhebungs- und Untersuchungsschritte zeitlich und inhaltlich strukturiert (Priorisierung, Stufenkonzept) werden.

**Planung
und Durch-
führung**

3.3.2. Gefahrenbeurteilung und abschließende Gefährdungsabschätzung

Die Gefahrenbeurteilung erfolgt anhand der gesundheitlichen Wirkungen des Schadstoffinventars (Wirkung eines Stoffes) und Quantifizierung der Expositionsbedingungen gegenüber dem Schadstoff (Dosis eines Stoffes).

**Wirkung
und Dosis**

Zur Gefahrenbeurteilung werden für toxische Stoffe Konzepte für Dosis-Wirkungs-Beziehungen (chronische Toxizität) und Wirkschwellen (akute Toxizität) herangezogen, für kanzerogene Stoffe Krebsrisikoabschätzungen. Gemäß den Methoden und Maßstäben für die Ableitung der Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV (UBA 1999ff) ist für den Einzelfall die **hinreichende Wahrscheinlichkeit eines Schadeneintritts** zu ermitteln. Bei der Prüfvalueableitung wird dies durch sogenannte Gefahrenfaktoren (F_{Gef}) sichergestellt (vgl. *Kapitel 4.1* und *Anhang 3*). Entsprechendes gilt für die einzelfall- oder gebietsbezogenen Beurteilungswerte (im Sinne von Maßnahmenwerten).

**Gefahren-
bezug**

In der Detailuntersuchung sind bei der Gefahrenbeurteilung grundsätzlich auch die bei der Ableitung einzelner Prüfwerte getroffenen **Plausibilitätsabwägungen** und Sonderfälle zu berücksichtigen (vgl. *Anhang 2*). So sind die jeweils errechneten Beurteilungswerte grundsätzlich nochmals mit den Ableitungsbedingungen der Prüfwerte abzugleichen.

**Ableitungs-
bedingun-
gen**

Zu beachten ist beispielsweise, dass der Prüfwert für Cadmium aufgrund von Plausibilitätsprüfungen gegenüber dem methodisch abgeleiteten Wert halbiert wurde. Bei Arsen wurde der Wert u. a. aufgrund von Überlegungen zur Aufnahme aus Nahrungsmitteln und der Überlegung, dass Prüfwerte ein Zusatzrisiko durch die Aufnahme von belastetem Bodenmaterial abbilden müssen, heraufgesetzt.

Für Blei basiert der heraufgesetzte Prüfwert letztlich auf einer Zusammenschau von Biomonitoring-Daten aus Duisburg zur Blutbleibelastung von Kindern und den ermittelten Bodengehalten (vgl. UBA 1999ff).

Die Gefahrenbeurteilung stellt eine **zusammenfassende gutachterliche Leistung** dar, bei der formal abgeleitete Beurteilungswerte lediglich als Werkzeug dienen.

Zur Beurteilung **der sensibelsten planungsrechtlich zulässigen Nutzung** werden je nach Wirkungs- und Aufnahmepfad die bodenabhängigen Expositionsbedingungen herangezogen, die den für den Menschen relevanten Anteil des Schadstoffes im Boden charakterisieren (vgl. *Kapitel 5.2, 6.2 und 7.2*). Daraus kann ein **Beurteilungswert für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung (BWs)** ermittelt werden.

**Beurteilungswert
BWs**

Wird die **aktuelle Nutzung** durch Berücksichtigung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen betrachtet (vgl. *Kapitel 5.3, 6.3 und 7.3*), kann darüber hinaus ein **Beurteilungswert für die aktuelle Nutzung (BWa)** ermittelt werden.

**Beurteilungswert
BWa**

Die **abschließende Gefährdungsabschätzung** basiert auf einer Zusammenschau der Ergebnisse der Gefahrenbeurteilung und aller standörtlichen Erkenntnisse. Hierbei prüft und bewertet die Behörde die vorliegenden Erkenntnisse hinsichtlich Plausibilität und Vollständigkeit und entscheidet, ob weitere Untersuchungen und/oder Maßnahmen zur Gefahrenabwehr notwendig sind.

**Abschließende
Gefährdungs-
abschätzung**

3.3.2.1 Akute Toxizität und sofortiger Handlungsbedarf

Parallel zu den bisher genannten Szenarien ist bei vielen Stoffen auch die **akute Toxizität** bei **einmaliger hoher Bodenaufnahmemenge** durch spielende (Klein-)Kinder zu beachten (vgl. *Kapitel 5.3.1*). Dies gilt nicht nur für Kinderspielflächen, sondern auch für Park- und Freizeitflächen, Sport- und Bolzplätze oder sonstige frei zugängliche Brach- oder Grünflächen (unter Umständen auch Gewerbeflächen), die von (Klein-)Kindern ungehindert erreicht werden können.

**Akute
Wirkungen**

**...durch
einmalige
Exposition**

Nur bei wenigen Stoffen sind **akute toxische Wirkungen** für die Höhe der Prüfwerte ausschlaggebend oder mitentscheidend (z. B. Cyanide; vgl. UBA 1999ff).

Liegen bei anderen Parametern **sehr hohe Schadstoffgehalte** vor, können akute Wirkungen dennoch nicht generell ausgeschlossen werden (z. B. Bleischrot auf Wurfscheibenschießanlagen oder bei Industriebrachen). Im Einzelfall kann es notwendig werden, mit Blick auf Sofortmaßnahmen zur Gefahrenabwehr Beurteilungswerte für diese Wirkungen festzulegen. Abgestimmte Akutwerte für weitere Stoffe (wie Arsen) finden sich in *Anhang 2*.

... durch
sehr hohe
Schadstoff-
gehalte

Werden Beurteilungswerte für Stoffe, für die akut toxische Wirkungen bestimmend sind (vgl. *Tabelle 3*), überschritten, sind i. d. R. Sofortmaßnahmen einzuleiten. Hierbei kann die **Zugänglichkeit** der Fläche oder ggf. (wie bei Arsen) auch die **Resorptionsverfügbarkeit** (vgl. *Kapitel 5.2.4*) die Dringlichkeit von Maßnahmen konkretisieren.

Sofortmaß-
nahmen

3.3.2.2 Schnittstellen zu anderen Sach- und Rechtsbereichen

Mittels Expositionsabschätzungen sollen gesundheitliche Auswirkungen, die von Bodenbelastungen ausgehen, beurteilt werden. Es gibt Überschneidungen zu anderen klassisch gesundheitsbezogenen Fragestellungen, wenn beispielsweise Stoffgemische mit (vermutlichen oder bekannten) gleichen oder ähnlichen Wirkungspunkten, nicht geregelte Stoffe oder neue Nutzungsszenarien zu beurteilen sind. Hier kann es erforderlich werden, entsprechende **Sachkunde aus dem Bereich der Umwelthygiene oder Umweltmedizin** hinzuzuziehen. Ggf. sind auch Schnittstellen zu anderen Rechtsbereichen bzw. Übertragungsmöglichkeiten von Bewertungsgrundlagen zu prüfen (vgl. *Kapitel 4.1.3, 10.2 und 10.3*).

Möglichkei-
ten und
Grenzen

3.4. Entbehrlichkeit von Expositionsabschätzungen

Eine aufwändige Prüfung der Expositionsbedingungen ist dann entbehrlich, wenn daraus kein Erkenntnisgewinn für die abschließende Gefährdungsabschätzung zu erwarten ist. Dies ist i. d. R. der Fall, wenn:

Verzicht auf
Expositi-
onsab-
schätzung?

- die gemessenen Gesamtgehalte die anzuwendenden Prüfwerte sehr deutlich überschreiten (beispielsweise sind ab einer 10-fachen Überschreitung der Prüfwerte Untersuchungen zur Resorptionsverfügbarkeit nicht mehr zielführend; vgl. *Kapitel 5.2.4*);

- einfache Maßnahmen zur Gefahrenabwehr umsetzbar sind (z. B. die Anhebung des pH-Wertes durch Kalkungsmaßnahmen zur Verringerung der Pflanzenverfügbarkeit);
- Maßnahmenwerte überschritten werden und die Annahmen der Regelvermutung nicht begründet in Zweifel zu ziehen sind (vgl. *Kapitel 2.1.2*);
- repräsentative Daten oder Informationen insbesondere für großflächige homogene Belastungen vorliegen, die auf einzelne (Teil-)Flächen (beispielsweise Kleingartenparzellen) übertragen werden können (vgl. *Kapitel 9.3*).

Kurz gesagt:

Expositionsabschätzungen werden im Rahmen von Detailuntersuchungen durchgeführt. Sie sollen eine Gefahrenbeurteilung und abschließende Gefährdungsabschätzung für die Wirkungspfade Boden-Mensch/Direktkontakt und/oder Boden-Nutzpflanze-Mensch sowie bei Erfordernis auch für die Wirkungspfade Boden-Bodenluft-Mensch und/oder Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch ermöglichen. Entscheidend für die Durchführung einer Expositionsabschätzung ist die Standortcharakterisierung, die das Stoffinventar konkretisiert und die Nutzung der Flächen im Blick hat. In jedem Fall ist zu differenzieren zwischen sensibelster planungsrechtlich zulässiger und aktueller Nutzung der Flächen.

Zur Prüfung der Expositionsbedingungen muss schadstoff- und nutzungsabhängig die Untersuchungsstrategie festgelegt werden. Im ersten Schritt dient die Prüfung bodenabhängiger Expositionsbedingungen der Klärung der Mobilität und Verfügbarkeit der Schadstoffe im Boden. Im zweiten Schritt kann mit Hilfe der Erhebung nutzungsabhängiger Expositionsbedingungen die aktuelle Nutzung der Fläche konkretisiert und beurteilt werden. Die Beurteilung der Ergebnisse orientiert sich an der Art der Schadstoffwirkungen, für die ein hinreichender Gefahrenverdacht anzunehmen ist. Im begründeten Einzelfall kann auch von einer Expositionsabschätzung abgesehen werden.

4. Standortcharakterisierung

Wie wird das Schadstoffinventar bewertet?
Welche Bewertungsgrundlagen gibt es?
Welche Wirkungs- und Aufnahmepfade sind zu betrachten?
Wie sind die Nutzungsszenarien definiert?
Welches Nutzungsszenario ist zu wählen?

Wesentliche Schritte der Standortcharakterisierung sollten bereits in der orientierenden Untersuchung (OU) durchgeführt worden sein, offene Punkte sind in der Detailuntersuchung abschließend zu klären (vgl. Checkliste in *Anhang 1*).

4.1. Charakterisierung des Schadstoffinventars

Die **Identifikation der relevanten Schadstoffe** an einem Standort erfolgt in der Regel bereits im Rahmen der **orientierenden Untersuchung**. Grundlage bieten beispielsweise Kenntnisse zur (Vor-)Nutzung des Standortes, Hinweise aus historischen Recherchen, Voruntersuchungen oder Monitoring-Programmen. Genutzt werden können hierzu auch Hintergrundinformationen zur branchentypischen Inventarisierung von Schadstoffen (z. B. LfUG 2003, LfUG 2012; vgl. *Anhang 6*).

**Schadstoff-
inventar**

In der **Detailuntersuchung** erfolgt die **abschließende Charakterisierung** und vertiefende Betrachtung des Schadstoffinventars. Hierbei muss wirkungspfadbezogen berücksichtigt werden, in welcher Tiefe der Schadstoff vorkommt. Dies ist entsprechend bei der Probennahme und Untersuchung zu berücksichtigen (vgl. *Kapitel 10.1*), auch mit Blick auf ggf. künftige Eingriffe in den Boden, bei denen z. B. stärker belastetes Bodenmaterial an die Oberfläche gelangen kann.

**Tiefen-
bezug**

Ob von einem Schadstoff eine Gefahr am Standort ausgeht, **hängt einerseits von der Höhe der Stoffgehalte ab** und andererseits davon, ob der jeweilige Stoff über die Wirkungs- und Aufnahmepfade **überhaupt in relevantem Ausmaß in den menschlichen Organismus gelangen kann**.

**Relevante
Aufnahme**

Zur Bewertung möglicher Schadstoffaufnahmen sind **Beurteilungsmaßstäbe für die humantoxische Wirkung** der Substanzen erforderlich. Dabei sind sowohl

Daten zur oralen, inhalativen wie auch zur dermalen Aufnahme zu berücksichtigen und miteinander zu vergleichen, um für die Expositionsabschätzung den sensibelsten Wirkungs- und Aufnahmepfad eines Schadstoffes identifizieren zu können.

Im Detail bestimmen die humantoxikologischen Eigenschaften der Schadstoffe (**akute Toxizität, chronische Toxizität, Kanzerogenität**) den zeitlich zu betrachtenden Horizont für die Expositionsbeurteilung. Während bei toxisch wirksamen Stoffen in der Regel Expositionsbeurteilungen für relevante Lebensabschnitte aggregiert werden, wird bei kanzerogenen Stoffen die Risikoabschätzung auf die Lebenszeit (70 Jahre) bezogen. Für akut toxische Stoffe wie beispielsweise Cyanide oder Arsen wird eine einmalige orale Aufnahme im Kindesalter zugrunde gelegt; bei inhalativ wirksamen Stoffen wird eine akute Exposition für die Dauer einer Stunde angenommen.

Für die Bewertung **chronisch toxisch wirkender Stoffe** bilden sogenannte Wirkungsschwellen oder tolerierbare resorbierte Dosen (TRD) pro kg Körpergewicht (kg KG) das Grundgerüst.

Durch die Berücksichtigung eines Gefahrenfaktors (i. d. R. 2 bis 10), der nach einem standardisierten Konzept (vgl. KONIETZKA & DIETER 1998) bestimmt ist, werden gefahrenbezogene Körperdosen (KD) abgeleitet, die die bodenschutzrechtliche Anforderung an die **hinreichende Wahrscheinlichkeit für eine Gefahr** erfüllen.

Bei den verschiedenen Wirkmechanismen sind folgende Besonderheiten zu berücksichtigen:

Für **chronisch toxisch wirkende Stoffe** findet bei der Prüfwertableitung auch die **Hintergrundexposition** Berücksichtigung. Hierzu sind ggf. standortspezifische Kenntnisse, Daten und Untersuchungen für den zu betrachtenden Stoff zu beachten. Konventionsgemäß werden 80 % der tolerierbaren resorbierten Dosis (TRD) bereits als Hintergrundexposition angenommen (vgl. *Kapitel 9.2.3* sowie *Anhang 3*).

**Art der
Wirkung...**

**...und
Zeitbezug**

**Wirk-
schwelle:
TRD-Werte**

Für **kanzerogen wirksame Stoffe** werden Abschätzungen des Risikos einer Krebserkrankung - verursacht durch schädliche Bodenveränderungen - durchgeführt. Als Konvention wird ein akzeptables, durch die schädliche Bodenveränderung bedingtes, zusätzliches Krebsrisiko mit 10^{-5} definiert, und daraus abgeleitet ein gefahrenbezogenes Risiko mit $5 * 10^{-5}$ (Gefahrenfaktor $F_{\text{Gef}} = 5$) festgelegt (vgl. *Anhang 3*).

Akzeptables zusätzl. Krebsrisiko
1:100.000

Gefahrenbezogenes Risiko
5:100.000

Für Stoffe, die bereits bei vergleichsweise geringen Gehalten **akut toxische Wirkungen** zeigen, wie beispielsweise Cyanide, werden **lebensbedrohliche Wirkungen** zur Betrachtung der Wirkschwelle für einmalige oder kurzzeitige Expositionen herangezogen und mit Hilfe eines **Sicherheitsfaktors von 10** eine gefahrenbezogene Körperdosis abgeleitet.

Akut toxische Wirkungen

Detaillierte Ausführungen zum methodischen Vorgehen hinsichtlich der Beurteilung von Schadstoffen finden sich im Methodenteil in *Anhang 3*.

4.1.1. Schadstoffe mit Bewertung nach BBodSchV

Ausführliche Stoffbeschreibungen sowie die Ableitung von TRD-Werten und Krebsrisikoabschätzungen sind in der Loseblattsammlung von EIKMANN et al. (1999ff) dokumentiert. Die **Methodengrundlagen** sowie eine Dokumentation der stoffspezifischen Prüfwertableitungen finden sich in der Loseblattsammlung, herausgegeben vom Umweltbundesamt (UBA 1999ff). Die Vorgehensweise zur Ableitung der Maßnahmenwerte für Dioxine/Furane wurde von SCHULZ (1992) veröffentlicht.

Bewertungsgrundlagen

Zur Ableitung der Prüfwerte werden Szenarien, bei denen Wirkungen auf Kinder als sensibelstes Schutzgut (‚Kinderspielflächen‘, ‚Wohngebiete‘, ‚Park- und Freizeitanlagen‘) im Vordergrund stehen, vom Szenario ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ unterschieden, für das Erwachsene während ihrer Arbeitszeit betrachtet werden. Je nach Szenario können verschiedene Wirkungs- und Aufnahmepfade beurteilungsrelevant werden (vgl. hierzu *Tabelle 1* und *Tabelle 2*).

Beurteilungsrelevante Wirkungs- und Aufnahmepfade

Auf Sport- und Bolzplätzen stellt die inhalative Aufnahme bodenbürtiger Schadstoffe von Kindern und Jugendlichen den beurteilungsrelevanten Aufnahmepfad dar, wobei für Blei, Nickel und Quecksilber die toxischen Wirkungen dominieren,

während für Arsen, Cadmium, Chrom und Benzo(a)pyren kanzerogene Wirkungen ausschlaggebend sind (vgl. DELSCHEN et al. 2006).

Gemäß BBodSchV wird die **Stoffgruppe der PAK** durch Benzo(a)pyren als Bezugssubstanz dieser Gruppe untersucht und bewertet. Benzo(a)pyren repräsentiert dabei die Wirkung typischer PAK-Gemische auf ehemaligen Kokereien, Gaswerksgeländen und Teermischwerken/-öllager. Weicht das PAK-Muster oder der Anteil von Benzo(a)pyren an der Summe der Toxizitätsäquivalente im zu bewertenden Einzelfall bei besonderer Nutzungshistorie deutlich von diesen typischen PAK-Gemischen ab, so muss dies bei der Anwendung der Prüfwerte berücksichtigt werden. Bei der Ableitung der Prüfwerte wurden siedlungsbedingte bundesweit typische Hintergrundgehalte von Benzo(a)pyren berücksichtigt. Liegen die regional typischen siedlungsbedingten Hintergrundwerte oberhalb der Prüfwerte für PAK/Benzo(a)pyren, ist dies gemäß Anlage 2 Tabelle 4 Fußnote 3 BBodSchV ebenfalls bei der Bewertung der Untersuchungsergebnisse zu berücksichtigen (vgl. auch *Kapitel 9.3*).

Zur Anwendung des Prüfwertes für PAK mit Benzo(a)pyren als Bezugssubstanz liegen zum Teil ergänzende länderspezifische Arbeitshilfen vor, in denen die Vorgehensweise zur Prüfung der typischen PAK-Profile und deren Bewertung beschrieben werden (vgl. *Anhang 2*).

**PAK-
Arbeits-
hilfen der
Länder**

Für weitere ausgewählte Stoffe finden sich in *Anhang 2* dieser Arbeitshilfe **(Stoff-)Datenblätter zur Expositionsabschätzung** mit Angaben der jeweiligen humantoxikologischen Charakteristika und Wirkweisen, zu relevanten Aufnahmepfaden sowie empfindlichsten Endpunkten und der Art der Wirkung (toxisch/kanzerogen), die schließlich zur Prüfwertableitung für die BBodSchV geführt haben. Darüber hinaus werden weitere Bewertungskriterien erörtert, die im Rahmen einer Plausibilitätsprüfung in die Prüfwertableitung eingeflossen sind und die in einer Gefahrenbeurteilung ebenfalls Berücksichtigung finden müssen.

**Anhang 2:
Stoffdaten-
blätter**

Der Kenntnisstand zur humantoxikologischen Stoffbewertung schreitet kontinuierlich fort, so dass die Bewertungsgrundlagen der Prüfwertableitung zum Teil nicht mehr dem aktuellen Wissensstand entsprechen. So wurden beispielsweise in Stellungnahmen der Kommission ‚Human-Biomonitoring‘ des Umweltbundesamtes humantoxikologische Neubewertungen für Blei (UBA 2009) und Cadmium

**Aktualität
von Stoff-
bewertun-
gen**

(UBA 2011) publiziert. Im Einzelfall können diese Erkenntnisse zur Gefahrenbeurteilung hinzugezogen werden. Dabei sind möglichst landes- oder bundesweit konsentrierte Werte heranzuziehen.

4.1.2. Weitere Schadstoffe mit konsentrierten Prüfwertvorschlägen

Für einige Stoffe liegen in Ergänzung zu den Prüfwerten der BBodSchV Vorschläge für Prüfwerte vor, die den Vorgaben zur Ableitung der Prüfwerte (vgl. UBA 1999ff) entsprechen. Eine Dokumentation der zugrundeliegenden Stoffbetrachtungen und Bewertungen findet sich in der Loseblattsammlung des Umweltbundesamtes (vgl. UBA 1999ff).

Der ständige Ausschuss Altlasten der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO 2008) hat außerdem weitere Werte veröffentlicht: Für Beryllium (und Verbindungen) liegen „**Prüfwertvorschläge**“ vor, die nach den genannten Kriterien berechnet wurden und deren humantoxikologische Bewertungsmaßstäbe bereits als konsentriert gelten. Für weitere Stoffe ist zudem die Information enthalten, dass abgeleitete Prüfwerte in einem „unpraktikabel hohen Bereich“ liegen würden.

**LABO 2008:
Bewertungs-
grundlagen
für Schad-
stoffe in
Altlasten**

Darüber hinaus wurden weitere Listen mit Beurteilungswerten unterschiedlicher Datenqualität veröffentlicht, so die „**orientierenden Hinweise für flüchtige Stoffe bei Untersuchungen des Bodenfeststoffes**“. Die geringere Belastbarkeit der abgeleiteten orientierenden Hinweise beruht nach der LABO auf der Betrachtung eines zusätzlich aufgestellten Expositionsszenarios für flüchtige Stoffe, dessen Verallgemeinerungsfähigkeit aufgrund der hohen Bedeutung standortspezifischer Faktoren als gering eingeschätzt werden muss.

Zusätzlich liegen „**behelfsmäßige Bodenorientierungswerte für die Einzelfallprüfung bei Rüstungsallasten (Kampfstoffe, Sprengstoffe und deren Abbauprodukte)**“ vor, deren Belastbarkeit aufgrund eingeschränkter Datenlage als vergleichsweise noch geringer eingeschätzt wird.

Als zusätzliche Kategorie hat die LABO zu den oben genannten orientierenden Hinweisen im Bodenfeststoff korrespondierende „**orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe in der Bodenluft**“ veröffentlicht, die sich aus der Betrachtung

des Transferverhaltens von flüchtigen Stoffen aus der Bodenluft in die Innenraumluft ergeben. Bei der Bewertung eines möglichen Übergangs von Schadstoffen aus der Bodenluft in die Innenraumluft ist zu beachten, dass die gemessenen Werte und die verwendeten Faktoren nur Größenordnungen darstellen können.

4.1.3. Schadstoffe ohne Prüfwertvorschläge

Liegen für einen relevanten oder gemessenen Stoff keine Prüfwerte bzw. Prüfwertvorschläge nach BBodSchV vor, ist zunächst zu prüfen, inwieweit der Stoff gesundheitliche Relevanz besitzt. Beispielsweise liegen die Beurteilungswerte für die Metalle Kupfer und Zink in einem relativ hohen Wertebereich.

*Kupfer
und Zink*

Gegebenenfalls sind eigene Bewertungsmaßstäbe zu entwickeln, die den Vorgaben zur Ableitung von Prüfwerten bzw. den Ergänzungen nach UBA (1999ff) möglichst weitgehend entsprechen sollten.

Aktuell liegen für insgesamt 141 weitere Stoffe in Deutschland unterschiedlich detailliert abgestimmte **humantoxikologische Bewertungsmaßstäbe** vor, die in EIKMANN et al. (1999ff) dokumentiert oder aber beim Umweltbundesamt nachzufragen sind.

Verwendung abgestimmter TRD-Werte für 141 Stoffe...

Für die Stoffbewertung, insbesondere aber auch dann, wenn keine Prüfwerte für Stoffe vorliegen, ist die besondere Fachkompetenz des **Sachverständigen nach § 18 BBodSchG** für den Wirkungspfad Boden-Mensch bzw. Boden-Nutzpflanze nachzuweisen. Es muss die notwendige Qualifikation im Bereich der Umwelthygiene / Toxikologie vorliegen. Im Einzelfall, beispielsweise bei Vorliegen von Stoffgemischen (vgl. *Kapitel 4.1.5*) oder Mischexpositionen (vgl. *Kapitel 9.2.2*), kann es auch erforderlich werden, auf den **toxikologischen und umweltmedizinisch-hygienischen Sachverstand** der Länder zurückzugreifen.

...erfordert Fachkompetenz und Qualifikation

4.1.4. Stoffgruppen

Für Stoffgruppen, die sich aus Einzelsubstanzen zusammensetzen und die erwiesenermaßen denselben Wirkendpunkt anzielen (Kombinationswirkung), ggf. auch mit unterschiedlichem Wirkpotenzial, gibt es nach den Vorgaben zur Ableitung der Prüfwerte verschiedene Beurteilungskonzepte.

Kombinationswirkungen

Zum einen können Stoffgruppen mit Hilfe einer Leit- oder Bezugssubstanz (beispielsweise **Benzo(a)pyren** für die Gruppe der PAK) beurteilt werden. Voraussetzung ist, dass die Wirkung der Bezugssubstanz ausreichend dokumentiert und anzunehmen ist, dass die Bezugssubstanz die Wirkung der Stoffgruppe repräsentiert.

**Bezugs-
substanz**

Ein anderes Konzept, das zur Bewertung beispielsweise der **Nitroaromaten** herangezogen wird, ist die gewichtete Addition nach dem Prinzip der TRGS 402. Hier wird die Summe der Quotienten der Einzelstoffe aus den gemessenen Stoffgehalten zu den Einzelstoffen gebildet, wobei als Grenzwert für Stoffgemische ein Bewertungsindex von 1 gilt (UBA 1999ff).

**Additions-
regel**

Zur Beurteilung der Stoffgruppe der **polychlorierten Dioxine, Furane und dl-PCB** werden sogenannte Toxizitätsäquivalente (TEQ) berechnet, die in Relation zur Toxizität des hochgiftigen 2,3,7,8-TCDD gesetzt werden. Die TEQ geben an, welcher Menge an 2,3,7,8-TCDD das in Frage stehende Gemisch aus PCDD/F in seiner toxischen Wirkung entspricht. Der Toxizitätsäquivalenzfaktor (TEF) für 2,3,7,8-TCDD ist mit 1 festgelegt. Durch Multiplikation der gemessenen Konzentration des jeweiligen Kongeners mit dem entsprechenden TEF und anschließender Addition der so gewichteten Konzentrationswerte ergibt sich diejenige Konzentration, von der die gleiche toxische Wirkung ausgehen würde wie von 2,3,7,8-TCDD (vgl. *Anhang 2*).

**Toxizitäts-
äquivalente**

Als **(Mineralöl-)Kohlenwasserstoffe (MKW)** wird ein Stoffgemisch bezeichnet, das mehrere hundert einzelne Verbindungen enthalten kann. Für die Bewertung problematisch ist, dass diese Mischung Kohlenwasserstoffe mit aromatischen und aliphatischen Komponenten enthält, die teils sehr unterschiedliche Eigenschaften und Toxizitäten aufweisen.

Von der LABO (vgl. LABO 2017) wird zur Bewertung der MKW daher eine Unterteilung in aliphatische und aromatische (einkernige Aromaten, Naphthalin und alkylsubstituierte Naphthaline) Kohlenwasserstoffe vorgenommen. Die aliphatischen und aromatischen Teilmengen werden weiter in Fraktionen unterteilt, von denen angenommen werden kann, dass die Einzelverbindungen dieser Fraktionen eine ähnliche toxische Wirkung aufweisen. Für jede Fraktion wird die Ge-

**Aromati-
sche und
aliphati-
sche MKW**

samtwirkung auf die Wirkung einer typischen und ausreichend untersuchten Einzelsubstanz oder Stoffgruppe bezogen, so dass für sieben inhalativ wirksame MKW-Fraktionen nutzungsabhängige Prüfwertvorschläge für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Innenraumluft-Mensch abgeleitet wurden (LABO 2017; vgl. *Anhang 2*). Für die anderen hier betrachteten Wirkungspfade sind keine Beurteilungsmaßstäbe ableitbar.

4.1.5. Stoffgemische

Für Stoffgemische, die Stoffe mit unterschiedlichen Wirkendpunkten enthalten und für die additive oder synergistische bzw. antagonistische Wirkungen anzunehmen sind, kann bislang auf keine methodischen Grundsätze zur Bewertung zurückgegriffen werden (vgl. *Kapitel 9.2.2*). Hier kann im Einzelfall lediglich mit entsprechendem Sachverstand argumentiert und bei Erfordernis ggf. pragmatisch vorgegangen werden (vgl. MKW).

4.2. Nutzungsszenarien

Zur Beschreibung möglicher Nutzungen eines Standortes im Rahmen dieser Arbeitshilfe sieht die BBodSchV fünf Nutzungsszenarien vor (,Kinderspielflächen‘, ,Wohngebiete‘, ,Park- und Freizeitanlagen‘, ,Nutzgärten‘, ,Industrie- und Gewerbegrundstücke‘).

**Nutzung
und
Nutzungs-
szenarien**

In dieser Arbeitshilfe werden auch die Szenarien ,Haus- und Kleingärten‘ (vgl. *Kapitel 4.2.2.3*) sowie ,Sport- und Bolzplätze‘ (vgl. *Kapitel 4.2.4*) betrachtet.

4.2.1. Kinderspielflächen

Als ,**Kinderspielflächen**‘ gelten alle „Aufenthaltsbereiche für Kinder, die ortsüblich (bzw. regelmäßig) zum Spielen genutzt werden, ohne den Spielsand von Sandkästen“ (§ 2 Nr. 18 BBodSchV). Dies können ausgewiesene Spielplätze sein, aber auch entsprechende Standorte innerhalb von anderen Nutzungen, in denen insbesondere Kleinkinder vergleichbar intensiv und regelmäßig



spielen. Hinweise auf die aktuelle Nutzung können sich z. B. aus der Ausstattung der Fläche mit Spielgeräten und -einrichtungen ergeben. ‚Kinderspielflächen‘ stellen die sensibelste Flächennutzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt dar.



Kinderspielflächen können im Einzelfall unterschiedlich intensiv genutzte Teilbereiche (Wegbereiche, dicht bewachsene Randbereiche etc.) aufweisen, die bei der Betrachtung der aktuellen Nutzung getrennt berücksichtigt und ggf. unterschiedlichen Nutzungsszenarien zugeordnet werden können (vgl. *Anhang 4: Fallbeispiel A*).



4.2.2. Wohngebiete

Als ‚**Wohngebiete**‘ gelten „dem Wohnen dienende Gebiete einschließlich Hausgärten oder sonstige Gärten gleichartiger Nutzung, auch soweit sie nicht im Sinne der Baunutzungsverordnung planungsrechtlich dargestellt oder festgesetzt sind.“ Ausgenommen sind Park- und Freizeitanlagen, Kinderspielflächen und befestigte Verkehrsflächen (§ 2 Nr. 19 BBodSchV).



Diese Arbeitshilfe unterscheidet zwischen **Wohngebieten mit weniger sensibler Nutzung** und **Haus- und Kleingärten** mit sensiblerer Nutzung.

4.2.2.1 Wohngebiete mit weniger sensibler Nutzung

„Wohngebiete“ (mit weniger sensibler Nutzung) im hier dargestellten engeren Sinn liegen beispielsweise als Abstandsräume oder unbefestigte Verkehrsflächen im Umfeld von Wohnbebauung vor und dienen dem Aufenthalt von Menschen. Die Nutzung zum Zwecke des intensiven Kinderspiels und des Anbaus von



Nahrungspflanzen - im Gegensatz zu Hausgärten, die eigenständig betrachtet werden - ist hier von geringerer Bedeutung. Zur Quantifizierung möglicher Expositionen wird für dieses Nutzungsszenario daher lediglich der Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt bzw. bei Vorkommen flüchtiger Stoffe auch der Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch betrachtet.

4.2.2.2 Nutzgärten (Obst- und Gemüsegarten)

Als „Nutzgärten“ definiert diese Arbeitshilfe in Ergänzung zu § 2 Nr. 23 BBodSchV Flächen, die **ausschließlich** dem Anbau pflanzlicher Nahrungsmittel zum Eigenverzehr und – im Gegensatz zu „Haus- oder Kleingärten“ – **nicht als Aufenthaltsbereich für Kinder dienen**.



Nur wenn der Aufenthalt von Kindern verneint werden kann, hat der Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch alleinige Relevanz (siehe auch *Kasten: Begriffserläuterung zu „Hausgärten“*).

4.2.2.3 Haus- und Kleingärten

Unter dem Nutzungsszenario ‚Haus- und Kleingärten‘ werden Flächen verstanden, die sowohl als Aufenthaltsbereiche für Kinder wie ‚Kinderspielflächen‘ (mit regelmäßig und intensivem Kinderspiel) als auch für den Anbau von Nahrungspflanzen wie ‚Nutzgärten‘ genutzt werden können. Besonders relevant ist dieses Szenario für die integrative Bewertung von Cadmium (Anlage 2, Tabelle 4, Fußnote 1 BBodSchV).



Der Begriff ‚Hausgärten‘

Die Verwendung des Begriffes ‚Hausgärten‘ in der BBodSchV ist mehrdeutig. Für die Bewertung des Wirkungspfadef Boden-Mensch/Direktkontakt wird im § 2 Nr. 19 in der Bestimmung des Begriffes ‚Wohngebiete‘ u. a. auch auf Hausgärten verwiesen, soweit – wie einschränkend ausgeführt – diese nicht als Kinderspielflächen anzusprechen sind. Auch bezüglich des Wirkungspfadef Boden-Nutzpflanze wird in § 2 Nr. 23 auf Hausgartenflächen verwiesen.

Die mit der Fußnote 1 der Prüfwertetabelle 4 in der Anlage 2 verbundene Sonderregelung zur integrativen Beurteilung von Cadmium in Haus- und Kleingärten ist mit der Möglichkeit begründet, dass manche Gärten sowohl für den Nahrungspflanzenanbau genutzt werden als auch als Kinderspielfläche dienen. In diesen Fällen sieht die BBodSchV eine additive Bewertung beider Wirkungspfade vor. Für die Expositionsabschätzung wird dann zur Berücksichtigung des Teilpfades „orale Bodenaufnahme spielender Kinder“ i. d. R. eine Bodenaufnahmerate anzusetzen sein, die der Nutzung als ‚Kinderspielflächen‘ entspricht.

Die Schadstoffbewertung in Hausgärten ist somit **nicht** zwingend mit der Anwendung von Wohngebietsprüfwerten verbunden, je nach Gebietscharakteristik (Einfamilienhaus-, Doppelhaus- oder Reihenhaushgärten, Abstandsgrün oder Vorgärten) kann es vielmehr notwendig sein, in Hausgärten das Kinderspielszenario und ggf. zusätzlich (und in Kombination) das Nutzgärtenszenario anzunehmen.

Flächen in Wohngebieten und Kleingärten, die aktuell ausschließlich dem Nutzpflanzenanbau dienen und bei denen der Aufenthalt von Kindern ausgeschlossen werden kann, werden vom Begriff des Hausgartens abgegrenzt und als Nutzgärten beschrieben.

„**Hausgärten**“ zeichnen sich in der Regel dadurch aus, dass sie erkennbar einer individuellen Nutzung durch eine Familie oder Bewohner/innen einer Wohneinheit unterliegen und häufig durch einen Zaun, eine Bepflanzung o.ä. abgegrenzt sind. Die aktuelle intensive Nutzung durch Kinder ist durch das Vorhandensein von Spielflächen oder Spielgeräten erkennbar oder aus Auskünften der Bewohner/innen bekannt. Nutzpflanzenanbau findet im „Hausgarten“ in der Regel in Nutzbeeten statt und wird von den Bewohnern und Bewohnerinnen der zugehörigen Wohneinheit betrieben.

So liegen „Hausgärten“ im direkten Umfeld von Wohnhäusern, während „Kleingärten“ meist in weiterer Entfernung davon liegen.

„**Kleingärten**“ (Schrebergärten) im Sinne des Bundeskleingartengesetzes (BKleingG 1983) werden nach § 1 Abs. 1 BKleingG wie folgt definiert:

- Gärten, die dem Nutzenden (von Kleingärten) „zur nicht erwerbsmäßigen gärtnerischen Nutzung, insbesondere zur Gewinnung von Gartenbauerzeugnissen für den Eigenbedarf, und zur Erholung“ dienen (kleingärtnerische Nutzung).
- Gärten, die „in einer Anlage“ liegen, „in der mehrere Einzelgärten mit gemeinschaftlichen Einrichtungen, zum Beispiel Wegen, Spielflächen und Vereinshäusern zusammengefasst sind (Kleingartenanlage)“.



„Kleingärten“ sind erkennbar abgegrenzte Flächen, die von Kleingarten-Pächtern (Familien, Paare, Alleinstehende) betrieben und genutzt werden. Der Anbau von Nutzpflanzen ist ursprünglicher Zweck der Ausweisung von Kleingartenanlagen gewesen und immer noch mehr oder minder großer Bestandteil der Kleingarten-nutzung. Die intensive Nutzung spielender Kinder kann sehr unterschiedlich sein, was bei der Feststellung der Notwendigkeit zur Durchführung von Expositionsabschätzungen berücksichtigt werden kann (vgl. *Kapitel 5.3*).

Für die beiden Nutzungsszenarien ‚**Haus- und Kleingärten**‘ sind sowohl der Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (ggf. als ‚Kinderspielfläche‘) als auch der Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch zu beachten und ggf. auch integrativ zu bewerten (vgl. *Kapitel 9.1*).

4.2.3. Park- und Freizeitanlagen

Unter das Nutzungsszenario ‚**Park- und Freizeitanlagen**‘ fallen „Anlagen für soziale, gesundheitliche und sportliche Zwecke, insbesondere öffentliche und private Grünanlagen [...]“ sowie „unbefestigte Flächen, die regelmäßig zugänglich sind und vergleichbar [...] genutzt werden“ (§ 2 Nr. 20 BBodSchV).



Bei der Gefahrenbeurteilung des Nutzungsszenarios ‚Park- und Freizeitanlagen‘ steht die Exposition spielender Kleinkinder über den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt im Vordergrund, wobei angenommen wird, dass die **Intensität der Nutzung** durch Kleinkinder bei den Szenarien ‚Kinderspielflächen‘, ‚Wohngebiete‘ sowie ‚Park- und Freizeitanlagen‘ in genannter Reihenfolge deutlich abnimmt.

Neuen Tendenzen, auf Grünflächen bzw. in Park- und Freizeitanlagen öffentlich zugängliche Bereiche für „**Urban Gardening**“ zu nutzen, kann insofern begegnet werden, als dass dieses Szenario ggf. gesondert betrachtet wird (vgl. *Kapitel 9.2.1*).

Zur Expositionsabschätzung solch speziell genutzter Teilflächen wären dann Überlegungen zur Nutzerstruktur (z. B. Alter der Nutzenden, Vorlieben) sowie zu Anbauflächen und -mengen und daraus resultierenden regelmäßig zugeführten Verzehrsmengen notwendig, um – falls erforderlich – ggf. ein neues Nutzungsszenario (vgl. *Kapitel 9.2.1*) dafür zu entwickeln, das sich vom Szenario ‚Nutzgärten‘ oder ‚Kleingärten‘ abgrenzt.

4.2.4. Sport- und Bolzplätze



„Sport- und Bolzplätze“ werden nach BBodSchV den „Park- und Freizeitanlagen“ zugeordnet. Die Prüfwerte wurden somit für die meisten Stoffe anhand der Annahmen zur oralen Bodenaufnahme abgeleitet. In den meisten Fällen steht aber auf solchen Flächen die Exposition Sport treibender Kinder und Jugendlicher durch inhalative Aufnahme bodenbürtiger Stäube im Vordergrund. Wie auch bei Kleingartenanlagen ist es fachlich vertretbar, hier spezifische, in DELSCHEN et al. (2006) veröffentlichte Annahmen in die Entscheidung zur Durchführung von Expositionsabschätzungen einfließen zu lassen (vgl. Kapitel 5.2.6). Im Falle akut wirkender Stoffe (z. B. Arsen) muss allerdings auch hier der orale Aufnahmepfad die Beurteilung bestimmen (vgl. Anhang 4: Fallbeispiel A).

4.2.5. Industrie- und Gewerbegrundstücke

Gemäß BBodSchV handelt es sich beim Szenario „Industrie- und Gewerbegrundstücke“ um „unbefestigte Flächen von Arbeits- und Produktionsstätten, die nur während der Arbeitszeit genutzt werden“ (§ 2 Nr. 21 BBodSchV). Bei diesem Nutzungsszenario wird die Gefährdung der dort tätigen Beschäftigten über den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt beurteilt, wobei der inhalative Aufnahmepfad Erwachsener im Vordergrund steht.



4.3. Auswahl des zutreffenden Nutzungsszenarios

Bei wohnbaulich genutzten Flächen können Unterschiede in der Art und Intensität der Nutzung, insbesondere im Hinblick auf zukünftige Änderungen auftreten.

Auf wohnbaulich genutzten Flächen **ist im Einzelfall die Entscheidung zu treffen**, ob intensives Kinderspiel (Nutzungsszenario „Kinderspielflächen“) anzunehmen

**Einstufung
wohnbau-
lich
genutzter
Flächen**

men ist, oder Kinderspiel eher eine untergeordnete Bedeutung hat (Nutzungsszenario ‚Wohngebiete‘).

Fallbeispiel ‚Hausgärten‘ / ‚Wohngebiete‘

Es ist beispielsweise denkbar, dass zum Zeitpunkt der Bestandsaufnahme im Garten einer Doppelhaushälfte Kleinkinder spielen und die junge Familie zum Eigenverzehr Pflanzen anbaut (aktuelle Nutzung: ‚Hausgarten‘), während das Rentnerehepaar der anderen Doppelhaushälfte den Garten als Ziergarten mit Rasen und Blumenbeeten nutzt (aktuelle Nutzung: ‚Wohngebiet‘).

Fünfzehn Jahre später kann es sich ganz anders darstellen: auf der einen Seite sind die kleinen Kinder groß geworden und der Anbau von Pflanzen wurde eingestellt (aktuelle Nutzung: ‚Wohngebiet‘), auf der anderen Seite haben die älteren Herrschaften ihr Haus den Enkelkindern übergeben, die Nachwuchs haben. Nutzgarten wird nicht betrieben (aktuelle Nutzung: ‚Kinderspielfläche‘). Daher sind beide Gartenhälften im Hinblick auf die **sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung** als ‚Hausgärten‘ mit den Nutzungen Kinderspielfläche und Nutzpflanzenanbau einzustufen, wenngleich dies aktuell nur für eine Hälfte zutrifft. Bei der Ergebnisbeurteilung ist primär die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung beurteilungsrelevant; ggf. kann in einem zweiten Schritt die aktuelle Nutzung einbezogen werden (vgl. auch *Anhang 4: Fallbeispiel B*).

Freiflächen im Umfeld von Blockbebauung, Zeilenbebauung und Hochhäusern sind eher als **allgemein genutztes Abstandsgrün** anzusprechen. Intensives Kinderspiel bzw. Nutzpflanzenanbau sind hier von untergeordneter Bedeutung.

**Beispiel:
Wohngebiete**

Im Einzelfall können in Wohngebieten mit einer Blockbebauung und überwiegend Abstandsgrün auch **sensible Nutzungen** anzutreffen sein, wie die abgebildete Fläche zeigt. Hier ist die Zuordnung zum Szenario ‚Kinderspielfläche‘ eher zutreffend, falls auch Nahrungspflanzen angebaut werden, dann sollte die Einstufung ‚Hausgarten‘ erfolgen.



...Kinderspielfläche

Auch auf Industrie- und Gewerbegrundstücken können sensiblere Teilnutzungen auftreten (z. B. Hausmeisterwohnung, Firmen-KiTa), die im Rahmen der Expositionsabschätzung zu beachten sind.

Für **individuell genutzte Gärten** von Einzel-, Doppel- und Reihenhäusern ist in der Regel eine Nutzung als Kinderspielfläche bzw. zum Anbau von Nahrungspflanzen anzunehmen und somit das Szenario ‚Haus- und Kleingärten‘ anzuwenden, um die Bewertung der sensibelsten planungsrechtlich zulässigen Nutzung

**Beispiel:
Hausgarten**

sicherzustellen (siehe *Kasten: Fallbeispiel ‚Hausgärten‘ / ‚Wohngebiete‘*). Ausnahmen können hier z. B. Vorgärten sein, sofern diese eine entsprechend intensive Kinderspielnutzung nicht vermuten lassen.

Fehlen planungsrechtliche Festsetzungen, bestimmt nach § 4 Abs. 4 BBodSchG die **Prägung des Gebiets** unter Berücksichtigung der absehbaren Entwicklung das Schutzbedürfnis. Ist bei großflächigen Belastungen von einer gleichartigen, ortstypischen Nutzung auszugehen, kann ebenfalls mit Hilfe erhobener und belastbarer Daten und Informationen (vgl. *Kapitel 5.3*) die Prägung des Gebietes beschrieben und beispielsweise als „standortspezifisches sensibelstes planungsrechtlich zulässiges Nutzungsszenario“ definiert werden. Die Prägung eines Gebietes kann beispielsweise durch Erhebung nutzungsabhängiger Annahmen innerhalb einer Stichprobe der betreffenden Flächen/Gärten festgestellt werden, im Sinne ortsüblicher (sensibelster) Nutzung. Hier muss allerdings sichergestellt werden, dass die Definition der Prägung des Gebietes die wahrscheinlichen sensibelsten Nutzungen auch mit abgebildet.

**Orts-
typische
Nutzung**

Alle Nutzungsszenarien werden durch einen oder mehrere Wirkungspfade charakterisiert, die einzeln oder in Kombination die Aufnahme der Schadstoffe durch den Menschen abbilden. In dieser Arbeitshilfe werden die **Wirkungspfade Boden-Mensch/Direktkontakt, Boden-Bodenluft-Mensch, Boden-Nutzpflanze-Mensch** und **Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch** betrachtet.

**Welche
Wirkungs-
pfade sind
relevant?**

Die Relevanz der Wirkungspfade für die verschiedenen Nutzungsszenarien zeigt *Tabelle 1*.

Tabelle 1: Nutzungsszenarien mit relevanten Wirkungspfaden

		Wirkungspfade			
		Boden-Mensch/ Direktkontakt	Boden-Bodenluft-Mensch ¹	Boden-Nutzpflanze-Mensch	Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch ²
Nutzungsszenarien	Kinderspielflächen ³	X	(X)		
	Wohngebiete ³	X	X		
	Haus- und Kleingärten	X	X	X	X
	Nutzgärten ³		(X)	X	X
	Park- und Freizeitanlagen ³	X	(X)		

		Wirkungspfade			
		Boden-Mensch/ Direktkontakt	Boden-Bodenluft-Mensch ¹	Boden-Nutzpflanze-Mensch	Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch ²
	Industrie- und Gewerbegrundstücke ³	X	X		
	Sport- und Bolzplätze	X	(X)		
	Weitere Szenarien	Prüfung der relevanten Wirkungspfade			
¹ Relevanz dieses Wirkungspfades abhängig von Stoffeigenschaften (Flüchtigkeit) ² Relevanz dieses Wirkungspfades nur in besonderen Fällen (Kleintier- / private Nutztierhaltung) ³ Szenarien der BBodSchV (X) nur bei auf der Fläche befindlicher oder angrenzender Bebauung, sowie bei ggf. künftiger Bebauung					

Neben der Nutzung des Standortes hängt die Relevanz der Wirkungspfade maßgeblich davon ab, auf welchem Weg Schadstoffe aufgrund ihrer Eigenschaften (beispielsweise Flüchtigkeit) in den menschlichen Organismus gelangen können. Einen Überblick, welche Aufnahmepfade in der Regel für die einzelnen Wirkungspfade von Bedeutung sind, gibt *Tabelle 2*.

Welche Aufnahmepfade sind relevant?

Tabelle 2: Wirkungspfade mit Zuordnung der beurteilungsbestimmenden Aufnahmepfade

		Aufnahmepfade				Transfermedium	Aufnahmedium	Schutzgut
		oral	inhalativ Staub	inhalativ Gas	dermal			
Wirkungspfade	Boden-Mensch/ Direktkontakt	X	X		X		Boden	Mensch
	Boden-Bodenluft-Mensch			X		Bodenluft	Atemluft	
	Boden-Nutzpflanze-Mensch	X				Boden	Obst und Gemüse	
	Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch	X				Futterpflanze	tierische Produkte	

Für ausgewählte Schadstoffe bzw. Schadstoffgruppen enthält *Anhang 2* Stoffdatenblätter zur Expositionsabschätzung, die die für verschiedene Wirkungs- und Aufnahmepfade sowie Nutzungsszenarien relevanten Stoffeigenschaften aufzeigen.

Kurz gesagt:

Zur Standortcharakterisierung gehören zwei wesentliche Schritte:

Zum einen muss das Schadstoffinventar benannt und bezüglich seiner Wirkung charakterisiert werden, d. h. die relevanten Wirkungspfade und Aufnahmepfade müssen festgelegt und die Beurteilungsmaßstäbe konkretisiert sein.

Zum anderen muss die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung der Flächen am Standort festgelegt werden; ggf. kann in einem zweiten Schritt die aktuelle Nutzung erhoben werden. Nutzungsszenarien, die von den in der BBodSchV genannten abweichen und die ortsübliche Prägung sind im Rahmen der bekannten Methoden und Maßstäbe zu berücksichtigen.

Für Schadstoffe, für die in der BBodSchV keine Maßstäbe genannt sind, können ggf. schon ausreichend bewertungsrelevante Grundlagen vorliegen; andernfalls ist mit entsprechendem Sachverstand und gemäß den Methoden und Maßstäben für die Ableitung der Prüf- und Maßnahmenwerte (UBA 1999ff) vorzugehen.

5. Durchführung von Expositionsabschätzungen für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt

Wie sind die relevanten Aufnahmepfade zu ermitteln?

Welche Untersuchungsmethoden sind für welche Wirkungs- und Aufnahmepfade geeignet?

Wie sind die Untersuchungen durchzuführen?

Wie werden die Ergebnisse für die einzelnen Untersuchungsschritte ausgewertet?

Wie werden die Ergebnisse für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt beurteilt?

5.1. Ermittlung relevanter Aufnahmepfade

Der Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt beschreibt die unmittelbare Schadstoffaufnahme des Menschen aus dem Boden in Abhängigkeit von der Nutzung der Fläche. Grundsätzlich können nichtflüchtige bzw. schwerflüchtige Schadstoffe durch:

- das direkte Verschlucken von Boden (orale Aufnahme),
- das Einatmen von feinen Bodenpartikeln (inhalative Aufnahme von bodenbürtigen Stäuben) oder
- den Kontakt der Haut mit dem Boden (dermale Aufnahme)

aufgenommen werden. Welcher Aufnahmepfad für die menschliche Gesundheit beurteilungsbestimmend ist, hängt von den Stoffeigenschaften, deren Art der Wirkung und der Flächennutzung ab.

Auf frei für Kleinkinder zugänglichen Flächen ist vorab zu prüfen, ob aufgrund des Vorkommens akut wirksamer Stoffe oder besonders hoher Stoffgehalte **Sofortmaßnahmen** zum Schutz der menschlichen Gesundheit erforderlich sind (vgl. *Abbildung 1* und *Kapitel 3.3.2.1*).

**Akute
Wirkung?**

Eine Übersicht der Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt und der beurteilungsbestimmenden Aufnahmepfade und Wirkungen ist für die einzelnen Nutzungsszenarien in *Tabelle 3* dargestellt (nach UBA 1999ff). Dabei wird das Nutzungsszenario ‚Sport- und Bolzplätze‘, für das orientierende Bodenbeurteilungswerte vorliegen (vgl. DELSCHEN et al. 2006), ergänzend aufgeführt (vgl. *Kapitel 4.2.4*).

Tabelle 3: Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (in mg/kg TM) mit beurteilungsbestimmenden Aufnahmepfaden (Farben) und Besonderheiten bei der Bewertung (Buchstaben)

Parameter	Kinderspiel- flächen		Wohngebiete		Park- und Freizeitanlagen		Industrie- und Gewerbe- grundstücke		Sport- und Bolz- plätze ⁵⁾		
Antimon	50	K, P	100	K, P	250	K, P	250	K, P			
Arsen	25	K, P	50	K, P	125/100 ¹⁾	K, P	140	K	100/100 ¹⁾	K	
Blei	200	P	400	P	1.000	P	2.000	P	5.000		
Cadmium	10	P	20	P	50	P	60	K	40	K	
Chrom _{gesamt}	200	K, Ox	400	K, Ox	400	K, P, Ox	200	K, P, Ox	100	K, Ox	
Chrom (VI)	130	K	250	K	250	K, P	130	K, P	40	K	
Kobalt	300	K	600	K	600	K, P	300	K, P			
Nickel	70	(K), P	140	(K), P	350	(K), P	900		250		
Quecksilber	10	Bi	20	Bi	50	Bi	100	Bi, P	250	Bi	
Thallium	5	P	10	P	25	P					
Cyanide	50		50		50		100	P			
PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren	0,5	K, P	1	K, P	1	K	5	K	4	K	
PCB ₆	0,4		0,8		2		40	K, P			
PCDD/F ^{2) 3)}	100		1.000		1.000		10.000				
Aldrin	2	K, P	4	K, P	10	K, P					
DDT	40	K	80	K	200	K	400	K, P			
Hexachlorbenzol	4		8		20		200	P			
Hexachlorcyclo- hexan ⁴⁾	5		10		25		400	P			
Pentachlorphenol	50	K, P	100	K, P	250	K, P	500	K, P			
2,4-Dinitrotoluol	3	K, P	6	K, P	15	K, P	50	K, P			
2,6-Dinitrotoluol	0,2	K, P	0,4	K, P	1	K, P	5	K, P			
Hexyl	150	K, P	300	K, P	750	K, P	1.500	K, P			
Hexogen	100	K	200	K	500	K	1.000	K, P			
Nitropenta	500	P	1.000	P	2.500	P	5.000	P			
TNT	20	K, P	40	K, P	100	K, P	200	K, P			
		orale Aufnahme beurteilungsbestimmend inhalative Aufnahme bodenbürtiger Stäube beurteilungsbestimmend orale und dermale Aufnahme zu berücksichtigen orale und inhalative Aufnahme mit demselben Wirkendpunkt zu berücksichtigen akute toxische Wirkungen (ggf.) beurteilungsbestimmend Wertfestlegung nach Plausibilitätsprüfung sekundärer Verunreinigungen z. B. durch Verwehungen etc. (vgl. Kapitel 5.1.2)									

K: Kanzerogenitätsbetrachtung	Ox: Oxidationsstufe relevant
Bi: Bindungsform im Boden beurteilungsrelevant	P: Wert durch Plausibilitätsprüfung begründet
¹⁾ Der Wert gilt zur Prüfung akuter Wirkungen von Arsen (resorptionsverfügbar) nach kurzfristiger Aufnahme ²⁾ inklusive dl-PCB; angegeben als Toxizitätsäquivalentsumme nach BBodSchV (in ng WHO-TEQ ₍₂₀₀₅₎ /kg TM) ³⁾ für PCDD/F sind keine Prüfwerte sondern Maßnahmenwerte formuliert ⁴⁾ HCH-Gemisch oder β-HCH ⁵⁾ orientierende Bodenbeurteilungswerte für Sport- und Bolzplätze (vgl. DELSCHEN et al. 2006)	

Nach der Charakterisierung des Schadstoffinventars (vgl. *Kapitel 4.1*) und der Festlegung des Nutzungsszenarios (vgl. *Kapitel 4.2* und *4.3*) sind die weiteren Untersuchungsschritte der Expositionsabschätzung festzulegen.

**Festlegung
der Unter-
suchungs-
schritte**

Die Schritte zur Prüfung der Expositionsbedingungen leiten sich aus den beurteilungsbestimmenden Aufnahmepfaden (oral, inhalativ, dermal) ab. Dabei gibt die empfindlichste Art der Wirkung (chronisch toxisch, kanzerogen oder akut toxisch) Hinweise auf die erforderlichen Annahmen und Modelle zur Abschätzung der Schadstoffzufuhr (vgl. *Kapitel 3.3.2.1* und *Kapitel 4.1* sowie *Anhang 3*).

5.1.1. Orale Aufnahme von Schadstoffen aus dem Boden

In den Nutzungsszenarien ‚Kinderspielflächen‘, ‚Haus- und Kleingärten‘, ‚Wohngebiete‘ und ‚Park- und Freizeitanlagen‘ dominiert für die meisten der in der BBodSchV betrachteten Schadstoffe der orale Aufnahmepfad die Bewertung (vgl. *Tabelle 3*). Für die Betrachtung dieses Aufnahmepfades werden Kinder im Alter bis 8 Jahren, die beim Spielen Boden verschlucken, als die sensibelste Nutzergruppe angesehen.

**Verschlu-
cken von
Boden**

Zur Überprüfung der **bodenabhängigen Expositionsbedingungen** bieten sich Untersuchungen der **Resorptionsverfügbarkeit** an (vgl. *Kapitel 5.2.4*).

**Resorp-
tionsver-
fügbarkeit**

Im Falle von **nutzungsabhängigen Expositions-betrachtungen** können Daten zur Ermittlung der **Bodenaufnahmemenge** sowie zur **Aufenthaltshäufigkeit** erhoben werden (vgl. *Kapitel 5.3.1* und *5.3.2*).

**Bodenauf-
nahme**

5.1.2. Inhalative Aufnahme partikulär gebundener Schadstoffe

Für die Bewertung gesundheitlicher Wirkungen auf spielende Kinder kann auch die inhalative Aufnahme partikulär gebundener Schadstoffe durch Einatmen bo-

denbürtiger Stäube bei bestimmten Schadstoffen (z. B. **Chrom**) Bedeutung erlangen. Für einzelne Schadstoffe sind sowohl die inhalative als auch die orale Aufnahme ähnlich bedeutsam (z. B. **Nickel**), so dass nach Prüfwertüberschreitungen auch beiden Aufnahmepfaden nachgegangen werden muss.

Im Szenario ‚**Sport- und Bolzplätze**‘ wird die inhalative Aufnahme bodenbürtiger Stäube durch Kinder und Jugendliche bis 14 Jahre für die Bewertung herangezogen (vgl. DELSCHEN et al. 2006).

**Inhalation
boden-
bürtiger
Stäube...**

Bei der Bewertung von ‚**Industrie- und Gewerbegrundstücken**‘ dominiert vom Grundsatz her die inhalative Aufnahme schadstoffhaltiger Stäube durch Erwachsene. Ein Großteil der für das Szenario ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ abgeleiteten Prüfwerte (z. B. Antimon, Blei, Cyanide, Quecksilber, 2,4-Dinitrotoluol, 2,6-Dinitrotoluol, DDT, Hexachlorbenzol, HCH, Hexyl, Hexogen, Nitropenta, PCB, Pentachlorphenol, TNT) ist allerdings letztlich durch Plausibilitätsprüfungen begründet, da die Betrachtung der inhalativen Aufnahme im Einzelfall zu unpraktisch hohen Werten führt (vgl. *Tabelle 4*). Vielmehr kommen in diesen Fällen Überlegungen zum Tragen, die sicherstellen sollen, dass es bei Einhalten der Prüfwerte für ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ nicht zu **sekundären Verunreinigungen** der diese ggf. umgebenden, empfindlicheren Flächennutzungen kommen kann, wenn Bodenmaterial ungezielt und diffus verlagert (abgeschwemmt, verweht, durch Rutschungen verbracht) wird.

Tabelle 4: Ableitung der Prüfwerte für das Nutzungsszenario ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ gemäß BBodSchV und UBA (1999ff) (Gesamtgehalte in mg/kg TM)

Parameter	Berechneter Wert	Prüfwert	Begründung
Antimon	6.000 / 25	250	In Angleichung an Park- und Freizeitanlagen
Cyanide	1.000	100	Akute Wirkungen (doppelter Wert gegenüber dem für Park- und Freizeitanlagen)
2,4-Dinitrotoluol	289.300	50	Berücksichtigung von möglichen Abschwemmungen oder Verwehungen etc. in die Umgebung, pragmatisch festgelegt
2,6-Dinitrotoluol	165.300	5	Fünffacher Wert gegenüber dem für Park- und Freizeitanlagen; Berücksichtigung von möglichen Abschwemmungen oder Verwehungen etc. in die Umgebung, pragmatisch festgelegt
Polychlorierte Biphenyle	330 (PCB _{gesamt})	40 (PCB ₆)	Berücksichtigung von möglichen Abschwemmungen oder Verwehungen etc. in die Umgebung (ca. Halbierung des berechneten Wertes)
Hexachlorbenzol	870	200	Pragmatisch festgelegt

Parameter	Berechneter Wert	Prüf-wert	Begründung
Hexachlorcyclohexan	700 / 800	400	Pragmatisch festgelegt (Halbierung des berechneten Wertes)
Blei	97.000	2.000	Berücksichtigung von möglichen Abschwemmungen oder Verwehungen etc. in die Umgebung (doppelter Wert gegenüber dem für Park- und Freizeitanlagen)
Quecksilber	- (org.) / 7.430 (anorg.)	100 (ges.)	
DDT	4.168	400	
Hexyl	-	1.500	
Hexogen	868.000	1.000	
Nitropenta	868.000	5.000	
Pentachlorphenol	-	500	
TNT	82.700	200	

Diese Überlegungen sind stoffspezifisch im Einzelfall bei der **Untersuchungsstrategie** zu beachten.

Generell sind zur Überprüfung der **bodenabhängigen Expositionsbedingungen** bei Dominanz des inhalativen Aufnahmepfades Untersuchungen zur **Anreicherung in der Feinkornfraktion < 63 µm** möglich (vgl. Kapitel 5.2.5). Ggf. ist eine gesonderte Probennahme aus dem Tiefenbereich 0–2 cm notwendig (vgl. Kapitel 10.1).

Anreicherung in der Feinkornfraktion

Daten für die **nutzungsabhängigen Expositionsbetrachtungen** (vgl. Kapitel 5.3) umfassen auch hier vornehmlich Informationen zur **Aufenthaltshäufigkeit und -dauer** oder der Bodenbedeckung.

Aufenthaltshäufigkeit und -dauer

5.1.3. Dermale Aufnahme von Schadstoffen aus dem Boden (perkutan)

Eine dermale (perkutane) Schadstoffaufnahme aus dem Boden ist bei entsprechendem Bodenkontakt möglich, wird jedoch insbesondere für anorganische Stoffe als vernachlässigbar angesehen (UBA 1999ff). Für organische Stoffe ist in Abhängigkeit ihres lipophilen Charakters eine relevante Resorption durch die Haut möglich.

Hautkontakt mit Boden...

Bei den meisten Schadstoffen erlangt der dermale Aufnahmepfad gegenüber der inhalativen und insbesondere der oralen Aufnahme keine oder nur eine sehr geringfügige Bedeutung, so dass sich weitere Sachverhaltsermittlungen in Bezug auf diesen Aufnahmepfad bei diesen Stoffen erübrigen.

...im Regelfall mit geringer Relevanz

Zu berücksichtigen ist die dermale Aufnahme allerdings bei besonders gut hautgängigen Substanzen, für die im Rahmen der Prüfwertableitung gesonderte Betrachtungen durchgeführt wurden. So wird beispielsweise für einige **sprengstofftypische Verbindungen** (2,4-DNT, 2-6-DNT, Hexyl, Nitropenta, TNT) in der Begründung der Prüfwertableitung auf deren gute dermale Aufnahme hingewiesen, die qualitativ oder quantitativ in den abgeleiteten Prüfwerten berücksichtigt wurde. Für PCP wurden bei der Ableitung der Prüfwerte die Bodenaufnahmeraten für die orale und die dermale Aufnahme addiert.

**Ausnahme:
einzelne
Organika**

Auch für **PAK/Benzo(a)pyren** wird dieser Aufnahmepfad aufgrund seiner lokalen Wirkungen nicht ausgeschlossen und qualitativ berücksichtigt (vgl. UBA 1999ff; vgl. *Anhang 2*).

Für weitere Stoffe und Stoffgruppen (DDT, PCB, Aldrin, HCH, HCB) wurde der dermale Aufnahmepfad als praktisch unbedeutend für eine Prüfwertableitung eingestuft.

Für einige **Kampfstoffe** (S-Lost, Chloracetophenon, Clark I, Pfiffikus) wurden im Rahmen der Prüfwertableitungen auch akute dermale Expositionen (vgl. UBA 1999ff) abgeprüft, die sich jedoch im Vergleich als nachrangig erwiesen.

**Keine akute
dermale
Exposition**

Expositionsabschätzungen für den dermalen Aufnahmepfad haben bislang in der Bewertungspraxis kaum Bedeutung erlangt. Orientierende Hinweise zur Quantifizierung des dermalen Aufnahmepfades finden sich in LfUG 2003.

5.2. Ermittlung bodenabhängiger Expositionsbedingungen als Beurteilungsgrundlage für die planungsrechtlich zulässige Nutzung

Ausgangspunkt für die Bewertung von Schadstoffen im Boden ist i. d. R. das Ergebnis der Gesamtgehaltsbestimmung. Standortspezifische Bodeneigenschaften können jedoch Einfluss beispielweise auf die Resorptionsverfügbarkeit eines Schadstoffes oder den Schadstoffgehalt in der lungengängigen Feinkornfraktion und damit auf die gesundheitliche Bedeutung der Stoffe haben. Im Gegensatz zur Bewertung von Bodenbelastungen unter aktueller Nutzung unterliegen diese Fak-

**Wirksamkeit und
Verfügbarkeit der
Schadstoffe**

toren keinen kurzfristigen Änderungen und eignen sich deshalb für eine generelle, langfristige Beurteilung von Schadstoffbelastungen im Hinblick auf die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung.

5.2.1. Gesamtgehalte

Die Auswertung der Gesamtgehalte, die i. d. R. aus der orientierenden Untersuchung in der für den Wirkungspfad Boden-Mensch maßgeblichen Fraktion < 2 mm vorliegen, ist Grundlage der Detailuntersuchung und legt den Bedarf und die Durchführung der Untersuchungsschritte zur Expositionsabschätzung fest (vgl. *Abbildung 1*). Sind die Ergebnisse nicht ausreichend, um die Ausbreitung der Schadstoffe oder das Schadstoffinventar zu erfassen, sind ggf. **Nachuntersuchungen** erforderlich, die gemäß § 19 Abs. 1 BBodSchV durch Sachverständige im Sinne § 18 BBodSchG oder Personen mit vergleichbarer Sachkunde zu entwickeln und zu begründen sowie zu begleiten und zu dokumentieren sind (vgl. *Kapitel 10*).

**Daten-
grundlage
ausrei-
chend?**

5.2.2. Oxidationsstufen

Untersuchungen zur Oxidationsstufe sind dann sinnvoll, wenn ein Stoff in unterschiedlichen Oxidationsstufen im Boden vorkommt und diese unterschiedliche gesundheitsrelevante Eigenschaften zeigen. In der Altlastenbearbeitung ist der Einfluss unterschiedlicher Oxidationsstufen in der Regel nur bei Chrom von praktischer Relevanz.

**Oxidations-
stufe und
Toxizität**

Sechswertiges Chrom (Chrom (VI), Chromat) gilt im Vergleich zum dreiwertigen Chrom (Chrom (III)) als deutlich toxischer, so dass eine Bewertung von Chrom_{gesamt} differenziert nach Oxidationsstufen aus humantoxikologischer Sicht zu empfehlen ist (vgl. hierzu EIKMANN et al. 1999ff, ZEDDEL 2001).

**Beispiel:
Chrom**

Die Prüfwerte der BBodSchV wurden auf Basis der humantoxikologischen Beurteilung von Chrom (VI) abgeleitet. Kanzerogene Wirkungen nach inhalativer Aufnahme haben sich hierfür als maßgeblich herausgestellt. Unter der Annahme üblicher Anteile von Chrom (VI) am Chrom_{gesamt}-Gehalt im Boden wurden dann die Prüfwerte für Chrom_{gesamt} pragmatisch festgelegt. Werden die Prüfwerte für Chrom_{gesamt} überschritten, sind die Annahmen in Bezug auf Chrom (VI) im Rahmen der Detailuntersuchung zu überprüfen.

**Ableitung
Prüfwerte
Chrom**

Verfahren zur Bestimmung von Chrom (VI) finden sich in der Methodensammlung des Fachbeirats Bodenuntersuchung (FBU 2021, vgl. auch FBU 2023).

Tabelle 5: Prüfwerte für Chrom (Oxidationsstufe) für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt gemäß BBodSchV (Gesamtgehalte in mg/kg TM), ergänzt um beurteilungsbestimmende Aufnahmepfade

Parameter	Kinderspielflächen		Wohngebiete		Park- und Freizeitanlagen		Industrie- und Gewerbegrundstücke		Sport- und Bolzplätze ¹	
	200	I	400	I	400	I	200	I	100	I
Chrom _{gesamt}	200	I	400	I	400	I	200	I	100	I
Chrom _{VI}	130	I	250	I	250	I	130	I	40	I

I: inhalative Aufnahme bodenbürtiger Stäube beurteilungsbestimmend
¹ orientierende Bodenbeurteilungswerte (vgl. Delschen et al. 2006)

Bei großflächigen schädlichen Bodenveränderungen können die Anteile von Chrom (VI) am Chrom_{gesamt} flächenrepräsentativ erhoben und ggf. Beurteilungswerte für Chrom_{gesamt} ermittelt werden.

Anteile an Chrom (VI)

Grundsätzlich stellt auch die Bestimmung von Chrom in der Feinkornfraktion < 63 µm bei ausschließlicher Bedeutung des inhalativen Aufnahmepfades einen sinnvollen Untersuchungsschritt dar (vgl. Kapitel 5.2.5).

5.2.3. Bindungsform

Die Bindungsform kann bei einzelnen Stoffen ebenfalls entscheidenden Einfluss auf die Toxizität nehmen.

Bindungsform und Toxizität

So zeigen beispielsweise **organische Zinnverbindungen** in Abhängigkeit von der Anzahl organischer Reste (Mono-, Di- oder Tributylzinn) oder beispielsweise der Länge des organischen Restes (Tributylzinn, Triethylzinn oder Trimethylzinn) unterschiedliche und zum Teil hochtoxische Wirkungen. In Umweltmedien haben insbesondere Tri-Organozinn-Verbindungen eine hohe Relevanz, sowohl aufgrund ihrer toxischen Wirkungen als auch aufgrund ihres Vorkommens. Umwandlungsprozesse durch Mikroorganismen beispielsweise im Boden sind möglich.

Beispiel: Organozinnverbindungen

Quecksilber, das in seiner elementaren Form vergleichsweise flüchtig ist, kommt in der Umwelt häufig anorganisch, aber auch in organischen Verbindungen (z. B. Methylquecksilber) vor. Dabei sind im Boden Umwandlungsprozesse zwischen anorganischen und organischen Formen zu berücksichtigen. Durch Mikroorganis-

Beispiel: Quecksilber

men, vor allem sulfatreduzierende Bakterien, oder abiotisch, durch andere Metallverbindungen, kann anorganisches Quecksilber insbesondere zu Methylquecksilber methyliert werden (vgl. HEMPEL 1993, SCHUSTER 1991).

Das Verhältnis von Methylquecksilber zum Gesamt-Quecksilber liegt für Böden meist deutlich unter 1 %. Spezielle Kontaminationen können z. B. auf Flächen vorliegen, auf denen quecksilberhaltige Pestizide eingesetzt wurden oder auf Standorten mit Verarbeitung von Quecksilber (z. B. Produktion von Zündhütchen).

Da sich sowohl die Endpunkte sensibelster Wirkungen als auch die Wirkstärken für anorganische und organische Quecksilberverbindungen unterscheiden, ist es zweckmäßig, bei Überschreitung der auf Gesamtgehalte an Quecksilber bezogenen Prüfwerte der BBodSchV den tatsächlichen Anteil an dem wesentlich toxischeren organischen Quecksilber zu bestimmen, soweit relevante Anteile nicht durch anderweitige Erkenntnisse ausgeschlossen werden können. Dies kann beispielsweise bei größeren Untersuchungskampagnen auch an einer Stichprobe erfolgen.

**Anteil an
organischem
Quecksilber**

Standardisierte Verfahren zur Bestimmung von organischem Quecksilber im Boden existieren bislang noch nicht, jedoch eine Verfahrensrichtlinie des Umweltbundesamtes für Lebensmittel, die hilfswise anwendbar ist (vgl. RÜDEL et al. 2011). Für Lebensmittel liegen darüber hinaus weitere Europäische Normen vor (DIN EN 17266, DIN EN 16801).

Zu beachten ist, dass für die Untersuchung organischer Quecksilberverbindungen die Bodenproben gegenüber mikrobiellen Methylierungs- sowie Demethylierungsprozessen geschützt werden sollten, was eine umfassende und zeitnahe Kühlung sowie eine anschließende Gefriertrocknung zur Probenvorbereitung erfordert (KODAMATANI et al. 2017, DEWILD et al. 2004).

Zur Prüfwertableitung wurden beide Bindungsformen zunächst getrennt betrachtet, aber nur für Quecksilber_{gesamt} ein Prüfwert festgelegt. Dabei wird unterstellt, dass dieses Element sowohl in anorganischer, als auch in organischer Bindungsform im Boden vorliegt.

**Ableitung
Prüfwerte
Quecksilber**

Sofern keine organischen Bindungsformen bzw. diese nur in einem irrelevanten Ausmaß vorkommen, können die für anorganische Quecksilberverbindungen errechneten „spezifizierten Prüfwerte“ als Beurteilungsmaßstab herangezogen werden. Umgekehrt haben für organisches Quecksilber die entsprechend für organische Verbindungen berechneten „spezifizierten Prüfwerte“ Relevanz (vgl. UBA 1999ff; vgl. *Tabelle 6*).

Spezifizierte Prüfwerte für Quecksilber

Tabelle 6: Spezifizierte Prüfwerte ‚Bindungsform‘ für Quecksilber für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt gemäß BBodSchV / UBA 1999ff (Gesamtgehalte in mg/kg TM), ergänzt um beurteilungsbestimmende Aufnahmepfade

Parameter	Kinderspielflächen		Wohngebiete		Park- und Freizeitanlagen		Industrie- und Gewerbegrundstücke		Sport- und Bolzplätze ¹	
	10	O	20	O	50	O	100	I/O	250	I
Quecksilber _{gesamt}	10	O	20	O	50	O	100	I/O	250	I
Quecksilber _{anorg}	25	O	50	O	120	O	-	-	-	-
Quecksilber _{org}	5	O	10	O	25	O	-	-	-	-

O: orale Aufnahme von Boden beurteilungsrelevant
 I: inhalative Aufnahme bodenbürtiger Stäube beurteilungsbestimmend
¹ orientierende Bodenbeurteilungswerte (vgl. Delschen et al. 2006)

Für beide Bindungsformen gilt der orale Aufnahmepfad (außer auf ‚Sport- und Bolzplätzen‘) als maßgeblich. Bei Überschreitung der Prüfwerte können im Rahmen der weiteren Expositionsabschätzung für anorganische Quecksilberverbindungen Resorptionsverfügbarkeitsuntersuchungen (vgl. *Kapitel 5.2.4*) die bodenabhängigen Expositionsbedingungen konkretisieren.

Untersuchung der Resorptionsverfügbarkeit

Ist dagegen mit dem Vorkommen elementaren Quecksilbers zu rechnen, muss dessen Flüchtigkeit beachtet werden (vgl. *Kapitel 6.1*).

Für organische Quecksilberverbindungen, insbesondere Methylquecksilber gibt es Hinweise, dass diese auch von Pflanzen aufgenommen werden können, zumeist unter reduzierenden Bedingungen im Wurzelraum. Bei Prüfwertüberschreitungen mit relevantem Vorkommen von Methylquecksilber sollte auf eher verästeten Standorten bei gärtnerischer Nutzung der Transfer in Pflanzen mit berücksichtigt werden (vgl. *Kapitel 7.2.4*).

Transfer in Nutzpflanzen?

Für ‚**Industrie- und Gewerbegrundstücke**‘ wurde aufgrund der anzunehmenden inhalativen Exposition ein Prüfwert (für anorganische Quecksilberverbindungen) von 7.430 mg/kg berechnet. Im Rahmen der Plausibilitätsprüfung wurde dieser Wert jedoch in Relation zu den Prüfwerten anderer Nutzungen abgesenkt. Damit soll sichergestellt werden, dass es bei Einhaltung des Prüfwertes nicht zu Sekundärverunreinigungen der diese ggf. umgebenden, empfindlicher genutzten Flächen kommen kann. Überlegungen zur Einbeziehung der Umgebung sind daher bei der Planung von Expositionsabschätzungen ggf. zu berücksichtigen.

**Keine
Sekundärverun-
reinigungen im
Umfeld**

5.2.4. Resorptionsverfügbarkeit (orale Aufnahme)

Zur Prüfung der mobilen oder mobilisierbaren Schadstoffanteile aus verschlucktem Boden (orale Aufnahme) ist ein laboranalytisches Verfahren zur Ermittlung der Resorptionsverfügbarkeit entwickelt, normiert und 2017 aktualisiert worden (DIN 19738). Nach § 13 Abs. 3 Satz 2 BBodSchV ist die Resorptionsverfügbarkeit nach dieser DIN zu bestimmen.

**Simulation
der Verdauungs-
prozesse im
Labor
(DIN 19738)**

Grundlage des Verfahrens ist die Erkenntnis, dass von dem an den Bodenpartikeln anhaftenden oder in die Bodenmatrix eingebundenen Schadstoffinventar im Verdauungstrakt nur ein gewisser Anteil durch Lösungs- oder Desorptionsprozesse freigesetzt wird (resorptionsverfügbarer Anteil). Demzufolge steht auch nur dieser (gelöste) Anteil für eine anschließende Resorption – also die Aufnahme durch die Darmwand – zur Verfügung. Nach der Resorption kann der Transport weiter in Organe, Gewebe, Blut oder andere Körperflüssigkeiten erfolgen und die Schadstoffe können – nun bioverfügbar genannt – ihre schädliche Wirkung entfalten. Den Unterschied zwischen ‚Resorptionsverfügbarkeit‘ und ‚Resorption‘ illustriert *Abbildung 3* beispielhaft für das Schwermetall Cadmium.

**Schadstoff-
bindung an
Boden-
partikel**

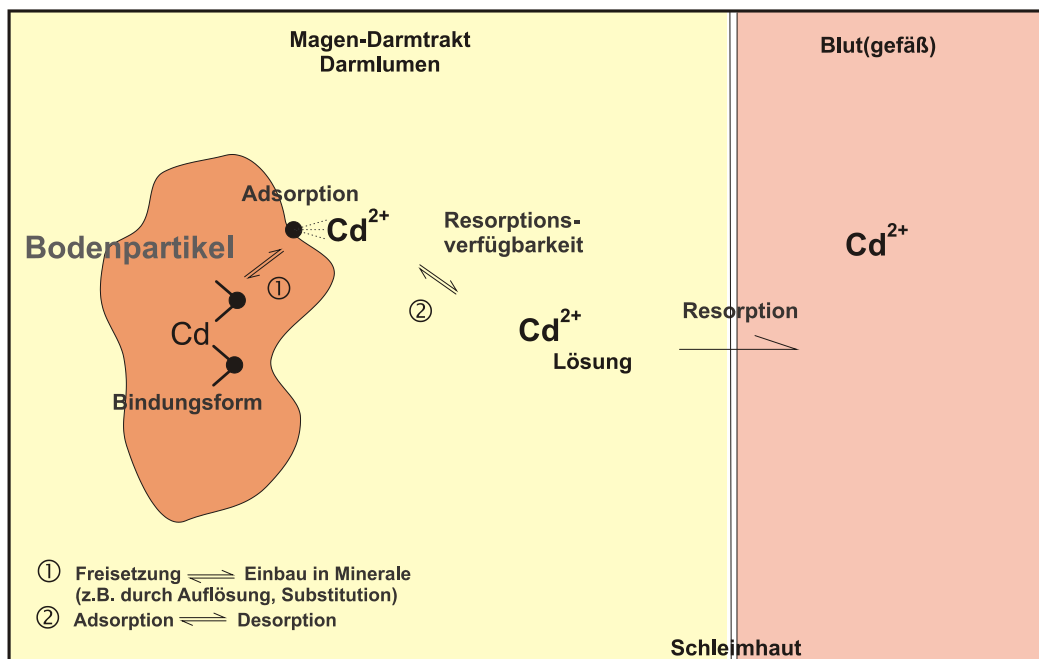


Abbildung 3: Prozesse im Vorfeld zur Resorption am Beispiel cadmiumverunreinigter Bodenpartikel (LANUV 2014)

Bei der Ableitung der Prüfwerte wurden die Kenntnisse zur – stoffspezifischen – **Resorption** gelöster Stoffe in der Regel berücksichtigt. Die **Resorptionsverfügbarkeit** ist dagegen auch abhängig von den Bodeneigenschaften, daher wurde für alle Schadstoffe eine **100%ige Resorptionsverfügbarkeit (RV-Anteil)**, also die vollständige Verfügbarkeit der mit dem Boden aufgenommenen Stoffe im Darmlumen, als Grundannahme unterstellt. Dies gilt es im Einzelfall durch laboranalytische Bestimmung des resorptionsverfügbaren Stoffgehaltes zu überprüfen (vgl. hierzu *Anhang 3*).

Laut DIN 19738 kann das Verfahren für eine Vielzahl anorganischer (z. B. **Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Quecksilber, Thallium oder auch Radionuklide**) und organischer Stoffe (z. B. **PAK, PCB, HCB, PCDD/F, HCH, DDT**) Anwendung finden. Praktische Erfahrungen liegen für Organika bislang lediglich mit Untersuchungen der Resorptionsverfügbarkeit von Benzo(a)pyren bzw. der acht höhermolekularen PAK vor. Für weitere Organika, wie TNT und PCB, hat ein Ringversuch zur Validierung des DIN-Verfahrens die methodischen Grenzen des Verfahrens aufgezeigt, so dass in der Praxis für diese Stoffe oft nach wie vor von einer 100%igen Resorptionsverfügbarkeit ausgegangen wird. Im Einzelfall sollte

**DIN 19738
geeignet
für...**

jedoch die Anwendbarkeit des DIN-Verfahrens in diesen Fällen nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden.

In der Regel werden die Untersuchungen zur Resorptionsverfügbarkeit in Rückstellproben durchgeführt. Die Analytik nach DIN 19738 ist in der Fraktion < 2 mm durchzuführen. Um methodische Fehler oder die Inhomogenität der Probe besser erkennen zu können, sollten auch die Gesamtgehalte der Rückstellproben neu bestimmt werden (vgl. *Kapitel 10.1*).

Proben und Analytik

Zur Beurteilung der **resorptionsverfügbaren Gehalte (RV-Gehalte)** sind die entsprechenden Beurteilungswerte (BW) zu ermitteln. Diese beziehen sich immer auf die betrachtete Nutzung, daher ist die Festlegung des jeweiligen Nutzungsszenarios erforderlich. Zunächst ist die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung anzusetzen, auf deren Grundlage Beurteilungswerte für die **sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung (BWs)** ermittelt werden (vgl. *Kapitel 2.3* und *Abbildung 1*).

Ermittlung von BW_{sRV}

Zur Beurteilung können dabei die ermittelten RV-Gehalte unmittelbar mit den jeweiligen Prüfwerten verglichen werden (die Prüfwerte der BBodSchV dienen dann als Beurteilungswerte (BW_{sRV}) mit Maßnahmenwertcharakter, vgl. *Kapitel 2.2.1*). Zur Berechnung von Beurteilungswerten für die **aktuelle Nutzung (BWa)** wird auf die *Kapitel 5.3* und *5.4* verwiesen.

Gleichung 1: Beurteilungswert (BW_{sRV}) für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt, orale Aufnahme

BW_{sRV} = Prüfwert BBodSchV

(abweichendes Vorgehen: siehe unten stehender *Kasten: Ausnahmen*)

mit:

BW_{sRV} (in mg/kg) = Beurteilungswert bezogen auf gemessene resorptionsverfügbare Gehalte (< 2 mm)

Bei den Stoffen **Arsen, Blei, Quecksilber und Nickel**, bei denen die Prüfwerte abweichend vom standardisierten Verfahren (vgl. hierzu UBA 1999ff) abgeleitet wurden oder andere Besonderheiten zu berücksichtigen sind, bedarf dieses Vorgehen spezifischer Anpassungen (siehe *Kasten: Ausnahmen*).

Ausnahmen berücksichtigen!

Ausnahmen

Blei:

Aufgrund von Plausibilitätsüberlegungen sowie Daten aus epidemiologischen Studien, die zur Prüfvertableitung geführt haben, ist für Blei die Resorptionsverfügbarkeit in den Prüfwerten implizit berücksichtigt. Daher sind zur Beurteilung von gemessenem resorptionsverfügbarem Blei (innere Exposition) die folgenden ursprünglich berechneten Beurteilungswerte heranzuziehen:

- 70 mg Pb/kg Boden (Kinderspielflächen),
- 145 mg Pb/kg Boden (Wohngebiete) bzw.
- 360 mg Pb/kg Boden (Park- und Freizeitanlagen).

Arsen:

Für Arsen ist der Akutwert (resorptionsverfügbar) von 100 mg/kg zu beachten (vgl. *Anhang 2*).

Quecksilber:

Für anorganisches Quecksilber können die in *Tabelle 6* genannten spezifizierten Prüfwerte als Beurteilungswerte herangezogen werden.

Nickel:

Für Nickel ist neben dem oralen zusätzlich auch der inhalative Aufnahmepfad zu berücksichtigen.

Beispiel: Arsen auf einer Kinderspielfläche

In einem Einzelfall ist auf einer Kinderspielfläche ein Gesamtgehalt an Arsen von 45 mg As/kg Boden sowie ein resorptionsverfügbare Gehalt (RV-Gehalt) von 20 mg As/kg Boden gemessen worden.

Nach *Gleichung 1* ist der einzelfallbezogene Beurteilungswert in diesem Fall gleich dem Prüfwert der BBodSchV:

$$BW_{SRV} = \text{Prüfwert BBodSchV} = 25 \text{ mg As/kg Boden}$$

Ein Abgleich des gemessenen RV-Gehalts mit dem BW_{SRV} zeigt: Der gemessene RV-Gehalt von 20 mg As/kg Boden unterschreitet in diesem Fall den BW_{SRV} in Höhe von 25 mg As/kg Boden (sowie den Akutwert von 100 mg/kg, vgl. *Tabelle 3*).

Alternativ kann durch Division des RV-Gehaltes durch den Gesamtgehalt ein Quotient (EQ_{RV}) berechnet werden.

**Ermittlung
von EQ_{RV}**

Gleichung 2: Expositionsquotient Resorptionsverfügbarkeit (EQ_{RV}) für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt, orale Aufnahme

$$EQ_{RV} = \frac{\text{RV-Gehalt (in mg/kg)}}{\text{Gesamtgehalt (in mg/kg)}}$$

mit:

EQ_{RV} = Expositionsquotient Resorptionsverfügbarkeit (orale Aufnahme)

RV-Gehalt = resorptionsverfügbare Gehalt

Der Quotient entspricht im Grundsatz dem resorptionsverfügbaren Anteil (RV-Anteil).

**Ermittlung
RV-Anteil**

Gleichung 3: Resorptionsverfügbare Anteil für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt, orale Aufnahme

$$\text{RV-Anteil} = \frac{\text{resorptionsverfügbare Gehalt (in mg/kg)}}{\text{Gesamtgehalt (in mg/kg)}} * 100$$

mit:

$$\text{RV-Anteil (in \%)} = \text{resorptionsverfügbare Anteil (orale Aufnahme)}$$

Aus dem jeweiligen Prüfwert und dem ermittelten Quotienten kann wiederum ein Beurteilungswert für den Gesamtgehalt ($BW_{s_{\text{gesamt}}}$) errechnet werden, der ebenfalls Maßnahmenwertcharakter aufweist (vgl. *Kapitel 2.2.1*).

**Ermittlung
 $BW_{s_{\text{gesamt}}}$ /
 $gBW_{s_{\text{gesamt}}}$**

Gleichung 4: Beurteilungswert Gesamtgehalt ($BW_{s_{\text{gesamt}}}$) für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt, orale Aufnahme

$$BW_{s_{\text{gesamt}}} = \frac{\text{Prüfwert BBodSchV}}{EQ_{RV}}$$

(abweichendes Vorgehen: siehe oben stehender *Kasten: Ausnahmen*)

mit:

$$BW_{s_{\text{gesamt}}} \text{ (in mg/kg)} = \text{Beurteilungswert, bezogen auf gemessene Gesamtgehalte (< 2 mm)}$$

Dieses Vorgehen bietet sich bei der Bewertung großflächiger Belastungen unter Einbeziehung gebietsbezogener Auswertungen zur Resorptionsverfügbarkeit an (Ermittlung eines $gBW_{s_{\text{gesamt}}}$, vgl. *Kapitel 9.3*).

Beispiel: Arsen auf einer großflächig belasteten Fläche („Hausgärten“)

Auf einer großflächig mit Arsen belasteten Fläche wurde eine Einfamilienhaussiedlung untersucht. Als Nutzungsszenario wurden „Hausgärten“ angesetzt, wobei der Fokus der Bewertung auf der Nutzung „Kinderspiel“ lag. In den Oberbodenproben der einzelnen Gärten wurden jeweils Arsen-Gesamtgehalte ermittelt, die zwischen 41 und 112 mg/kg lagen. Für einen repräsentativen Anteil ausgewählter Proben wurde außerdem die Resorptionsverfügbarkeit von Arsen bestimmt. Für diese Wertepaare (Gesamtgehalt / RV-Gehalt) wurde jeweils nach *Gleichung 2* der EQ_{RV} berechnet. Nach Klärung statistischer Anforderungen an die Auswertung der Daten und Festlegung eines Perzentils (vgl. *Kapitel 9.3.3*) ergab sich über alle Wertepaare ein 95. Perzentil für den (standortspezifischen) EQ_{RV} von 0,35 (dies entspricht einem RV-Anteil von 35 %).

Damit ergibt sich nach *Gleichung 4* ein standortspezifischer $gBW_{s_{\text{gesamt}}}$ wie folgt:

$$gBW_{s_{\text{gesamt}}} = \frac{\text{Prüfwert BBodSchV}}{EQ_{RV}} = \frac{25 \text{ mg As/kg Boden}}{0,35} = 71,4 \text{ mg As/kg Boden}$$

Die in den einzelnen Hausgärten ermittelten Gesamtgehalte können nun dem gBW_{gesamt} gegenübergestellt werden. Für Hausgärten mit Gesamtgehalten $< 71,4 \text{ mg As/kg Boden}$ gilt der Beurteilungswert gBW_{gesamt} für Arsen als unterschritten, Messwerte $> 71,4 \text{ mg As/kg Boden}$ überschreiten den standortspezifischen (gebietsbezogenen) Beurteilungswert.

Im Einzelfall kann auf die Untersuchung der Resorptionsverfügbarkeit verzichtet werden, wenn beispielsweise hohe Prüfwertüberschreitungen vorliegen (vgl. *Kapitel 3.4*).

Ausnahmen!

5.2.5. Schadstoffanreicherung in der Feinkornfraktion $< 63 \mu\text{m}$ (inhalative Aufnahme)

Für Schadstoffe, für die aufgrund ihrer gesundheitlichen Wirkungen der inhalative Aufnahmepfad im Vordergrund steht (z. B. Chrom; vgl. *Tabelle 3*) bzw. als gleichrangig gegenüber dem oralen Aufnahmepfad einzustufen ist (z. B. Nickel; vgl. *Tabelle 3*), ist eine **Überprüfung der Schadstoffgehalte in der lungengängigen Fraktion des Bodens** sinnvoll.

Lungengängige Fraktion im Boden

Definition: Lungengängige Fraktion

Als humantoxikologisch bedeutsame, lungengängige Fraktion sind Partikel mit einem Durchmesser von $< 10 \mu\text{m}$ (PM10) anzusehen (vgl. EIKMANN et al. 1993; HEMPFLING & DOETSCH 1997; AGLMB 1995). Der Anteil der Staubpartikel $< 10 \mu\text{m}$ am Luftstaub wird für Stadtgebiete im Allgemeinen mit 85 % angenommen (vgl. EIKMANN et al. 1993).

Aufgrund physikalischer Gegebenheiten ist anzunehmen, dass die Feinkornfraktion des Bodens höhere Schadstoffgehalte als das Grobkorn aufweist. Für die Ableitung der Prüfwerte der BBodSchV wurden deshalb **pauschale Anreicherungsfaktoren** eingeführt, die höhere Schadstoffkonzentrationen in der lungengängigen Fraktion gegenüber der analysierten Fraktion $< 2 \text{ mm}$ berücksichtigen. Es wurde für **anorganische Stoffe ein Anreicherungsfaktor von 5** und für **organische Schadstoffe ein Anreicherungsfaktor von 10** angenommen. Dies gilt es im Einzelfall zu prüfen.

Schadstoffanreicherung im Feinkorn: 5- oder 10-fach

Diese Prüfung ist grundsätzlich auch bei der Bewertung solcher Nutzungsszenarien durchzuführen, in denen der inhalative Aufnahmepfad dominiert – wie auf ‚Industrie- und Gewerbegrundstücken‘ oder ‚Sport- und Bolzplätzen‘ (vgl. *Kapitel 5.1.2*).

Eine Trennung und anschließende Analyse der Schadstoffgehalte in der lungengängigen Fraktion < 10 µm ist labortechnisch allerdings kaum möglich. Hilfsweise besteht die Möglichkeit, die Korngrößenfraktionen bis zu einem Durchmesser < 63 µm abzusieben (DIN EN ISO 17892-4 bzw. ISO 11277) und zu analysieren (vgl. auch im *Anhang 3: Kapitel 2.1.1.2*).

**Siebbare
Feinkorn-
fraktion
< 63 µm**

In dieser Fraktion werden die Gesamtgehalte bzw. besonders relevante Spezies/Bindungsformen wie z. B. Chrom (VI) bestimmt, um die Annahmen zum Anreicherungsverhalten von Substanzen im Staub näherungsweise zu überprüfen. Nach den Vorgaben der BBodSchV werden diese Untersuchungen in Proben aus dem **Tiefenbereich 0–2 cm** durchgeführt. In Ausnahmefällen können auch Proben / Rückstellproben aus dem Beprobungshorizont 0–10 cm herangezogen werden (vgl. *Kapitel 10.1*).

**Tiefen-
bereich
0–2 cm**

Bei der Ermittlung des Beurteilungswertes (BW) ist grundsätzlich auch die **Nutzung** zu betrachten. Je nach Auswahl und Festlegung des Szenarios und damit der Prüfwerte werden auf diese Weise Beurteilungswerte für die **sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung (BWs)** (vgl. *Kapitel 2.3* und *Abbildung 1*) bzw. in einem zweiten Schritt ggf. auch für die **aktuelle Nutzung (BWa)** ermittelt (vgl. *Kapitel 5.3* und *5.4*).

**BWs
oder BWa?**

Zur Beurteilung der inhalativen Aufnahme können die **in der Feinkornfraktion < 63 µm ermittelten Messwerte** mit den auf die Feinkornfraktion übertragenen Prüfwerten verglichen werden. Zur Beurteilung der sensibelsten planungsrechtlich zulässigen Nutzung sind die Prüfwerte der BBodSchV dazu mit dem jeweils gültigen Anreicherungsfaktor von 5 (Metalle) bzw. 10 (Organika) zu multiplizieren, die dann als Beurteilungswerte ($BW_{\text{Feinkornfraktion}}$) mit Maßnahmenwertcharakter dienen (vgl. *Kapitel 2.2.1*).

**Ermittlung
von
BWs<sub>Feinkorn-
fraktion</sub>**

Gleichung 5: Beurteilungswert ($BW_{\text{Feinkornfraktion}}$) für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt, inhalative Aufnahme

$$BW_{\text{Feinkornfraktion}} = \text{Prüfwert BBodSchV} * 5 \text{ (anorg.) bzw. } 10 \text{ (org.)}$$

mit:

$$BW_{\text{Feinkornfraktion}} \text{ (in mg/kg)} = \text{Beurteilungswert bezogen auf gemessene Gehalte in der Feinkornfraktion < 63 } \mu\text{m}$$

Beispiel: Chrom auf einer Kinderspielfläche

Auf einer Kinderspielfläche wurde in der Fraktion < 2 mm ein Chromgehalt von 300 mg Cr/kg Boden gemessen. Detailuntersuchungen erbrachten in der Feinkornfraktion < 63 µm einen Chromgehalt von 800 mg Cr/kg Boden.

Nach Gleichung 5 ergibt sich:

$$BWS_{\text{Feinkornfraktion}} = \text{Prüfwert BBodSchV} * 5 = 200 \text{ mg Cr/kg Boden} * 5 = 1.000 \text{ mg Cr/kg Boden}$$

$$BWS_{\text{Feinkornfraktion}} = 1.000 \text{ mg Cr/kg Boden} > \text{Messwert}_{\text{Feinkornfraktion}} = 800 \text{ mg Cr/kg Boden}$$

Der gemessene Gehalt in der Feinkornfraktion < 63 µm unterschreitet den $BWS_{\text{Feinkornfraktion}}$.

Auch in diesem Untersuchungsschritt ist es alternativ möglich, aus dem jeweiligen Prüfwert und dem ermittelten Quotienten ($EQ_{\text{Feinkornfraktion}}$) einen Beurteilungswert für den Gesamtgehalt (BWS_{gesamt}) zu errechnen, der ebenfalls Maßnahmenwertcharakter aufweist (vgl. Kapitel 2.2.1).

**Ermittlung
von $EQ_{\text{Feinkornfraktion}}$**

Gleichung 6: Beurteilungswert (BWS_{gesamt}) für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt, inhalative Aufnahme

**Ermittlung
 BWS_{gesamt} /
 $gBWS_{\text{gesamt}}$**

$$EQ_{\text{Feinkornfraktion}} = \frac{\text{Gehalt in der Feinkornfraktion} < 63 \mu\text{m (in mg/kg)}}{\text{Gehalt in der Fraktion} < 2 \text{ mm (in mg/kg)} * 5 \text{ (anorg.) bzw. } 10 \text{ (org.)}}$$

$$BWS_{\text{gesamt}} = \frac{\text{Prüfwert BBodSchV}}{EQ_{\text{Feinkornfraktion}}}$$

mit:

BWS_{gesamt} (in mg/kg) = Beurteilungswert bezogen auf gemessene Gesamtgehalte (< 2 mm)

$EQ_{\text{Feinkornfraktion}}$ = Expositionsquotient für die Anreicherung in der Feinkornfraktion < 63 µm (inhalative Aufnahme)

Der Quotient $EQ_{\text{Feinkornfraktion}}$ nimmt den Wert 1 an, wenn die Annahmen der BBodSchV hinsichtlich der Anreicherung von 10 für organische Schadstoffe bzw. 5 für anorganische Schadstoffe zutreffen. Ist $EQ_{\text{Feinkornfraktion}}$ dagegen kleiner als 1, findet am Standort eine geringere Anreicherung statt als für den Prüfwert nach BBodSchV angenommen.

Beispiel: Chrom (VI)-Anreicherung auf einer großflächig belasteten Fläche (Kinderspiel)

Auf einer großflächig belasteten Fläche wurde ein Anteil repräsentativ ausgewählter Proben auf Chrom (VI) sowohl in der Fraktion < 2 mm als auch in der Feinkornfraktion < 63 µm untersucht. Nach Klärung statistischer Anforderungen an die Auswertung der Daten und Festlegung eines Perzentils (vgl. Kapitel 9.3.3) ergab sich als 95. Perzentil für Chrom (VI) in der Feinkornfraktion 800 mg/kg Boden, in der Fraktion < 2 mm 300 mg/kg Boden. Damit wurde der standortspezifische $EQ_{\text{Feinkornfraktion}}$ nach Gleichung 6 bestimmt:

$$EQ_{\text{Feinkornfraktion}} = \frac{\text{Gehalt in der Feinkornfraktion} < 63 \mu\text{m (in mg/kg)}}{\text{Gehalt in der Fraktion} < 2 \text{ mm (in mg/kg)} * 5 \text{ (anorg.) bzw. } 10 \text{ (org.)}}$$

$$EQ_{\text{Feinkornfraktion}} = \frac{800 \text{ mg Cr}_{\text{VI}}/\text{kg Boden}}{300 \text{ mg Cr}_{\text{VI}}/\text{kg Boden} * 5} = 0,533$$

Aus *Gleichung 6* ergibt sich als Quotient $EQ_{\text{Feinkornfraktion}} = 0,533$ und mit Hilfe dessen kann dann der Beurteilungswert gBW_{Sgesamt} in Höhe von 375 mg Cr_{VI}/kg Boden ermittelt werden.

Auf einer Kinderspielfläche wurden in der Fraktion < 2 mm Chromgehalte von 340 mg Cr/kg Boden gemessen. Die Gehalte in der Feinkornfraktion < 63 µm wurden nicht ermittelt. Mithilfe des gBW_{Sgesamt} lässt sich jedoch eine Beurteilung dieser Einzelfläche vornehmen:

$$gBW_{\text{Sgesamt}} = \frac{\text{Prüfwert BBodSchV}}{EQ_{\text{Feinkornfraktion}}} = \frac{130 \text{ mg Cr}_{\text{VI}}/\text{kg Boden}}{0,533} = 244 \text{ mg Cr}_{\text{VI}}/\text{kg Boden}$$

$gBW_{\text{Sgesamt}} = 244 \text{ mg Cr}_{\text{VI}}/\text{kg Boden} < \text{Messwert} = 340 \text{ mg Cr}_{\text{VI}}/\text{kg Boden}$

Der Messwert von 340 mg Cr_{VI}/kg Boden überschreitet den Beurteilungswert gBW_{Sgesamt} .

5.2.6. Staubkonzentration in der Luft (inhalative Aufnahme)

In der Ableitung der Prüfwerte der BBodSchV wird zur Quantifizierung des inhalativen Aufnahmepfades von einer Staubkonzentration von 1 mg/m³ Luft ausgegangen, die als wirkungsrelevant anzusehen ist. Dieser Wert basiert auf einem Simulationsversuch bei Gartenarbeit unter trockenen Witterungsbedingungen (UBA 1999ff). Für ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ wird eine über den Tag gemittelte Staubkonzentration von 0,325 mg/m³ angenommen. Für die Beurteilung von Sport- und Bolzplätzen wurden von DELSCHEN et al. (2006) in Anlehnung an Untersuchungen und Aussagen der AGLMB (1995) 10 mg/m³ angenommen. Für die Betrachtung akuter Expositionen von Kindern gegenüber bodenbürtigen Schadstoffen wird standardmäßig von einer Staubeentwicklung von 6 mg/m³ über eine Stunde ausgegangen (UBA 1999ff).

Gibt es Hinweise auf standortspezifische Bedingungen, die von den Standardannahmen abweichen, wären Untersuchungen zur Quantifizierung der Entwicklung bodenbürtiger Stäube selbst denkbar. Da diese jedoch von einer Vielzahl an Variablen (Bodenart, Bodendichte, Feuchtigkeit der Bodenoberfläche und Bodenbedeckung sowie meteorologische Faktoren wie Wind, Niederschläge, Temperatur sowie nicht zuletzt vom Verhalten der Nutzenden selbst) abhängig ist, scheint dieser Ansatz in der Praxis wenig geeignet. Denkbar sind jedoch Auswertungen im Hinblick auf die Zugänglichkeit des Bodens (vgl. *Kapitel 5.3.1*).

Es ist zu berücksichtigen, dass auch andere Emissionen aus dem Umfeld (z. B. Industrieanlagen, Abwehungen von Deponien und Halden) die Staubbelastung an

**Annahmen
zur Staub-
ent-
wicklung...**

**...je nach
Nutzung**

**Untersu-
chung
Staubkon-
zentration?**

**Störein-
flüsse /
Emitten-
ten?**

einem Standort beeinflussen können. Im Verdachtsfall sollten Immissionsmessungen recherchiert oder durchgeführt werden.

5.2.7. Dermale Verfügbarkeit

Für einige organische Stoffe, die nach dermale Kontakt in den menschlichen Organismus aufgenommen werden und gesundheitliche Beeinträchtigungen entfalten können (beispielsweise sprengstofftypische Verbindungen), sowie Stoffe, die lokal an der Kontaktfläche Effekte auslösen können (beispielsweise Benzo(a)pyren), stellt sich die Frage nach der Untersuchung standörtlicher Bodeneigenschaften und -bedingungen zur Überprüfung der dermalen Exposition (vgl. *Kapitel 5.1.3*).

Zur Abschätzung der Relevanz der dermalen Aufnahme von bodenbürtigen Schadstoffen wurde seitens der TU Berlin eine In-vitro-Methode entwickelt (KAISER 2012). Diese wurde bislang nur für leichtflüchtige Stoffe getestet, die ohnehin aufgrund ihres niedrigen Siedepunktes kaum in relevantem Umfang über die Haut aufnehmbar sein sollten. Die experimentell ermittelten mobilisierbaren Gehalte werden analog zu den nach DIN 19738 ermittelten Gehalten für die orale Aufnahme als „potenziell resorptionsverfügbar“ – hier über die Haut – bezeichnet. Es bleibt allerdings abzuwarten, ob sich dieses Verfahren speziell zur Bewertung des dermalen Transferpfades von mittel- bis schwerflüchtigen organischen Stoffen (z. B. PAK oder auch PCB) in der Zukunft als geeignet erweisen wird.

Methodische Ansätze in der Entwicklung

5.2.8. Beurteilung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen auf Grundlage der planungsrechtlich zulässigen Nutzung

Mit Blick auf die Beurteilung der **sensibelsten planungsrechtlich zulässigen Nutzung** sind die im Rahmen der Expositionsabschätzung abgeleiteten Beurteilungswerte (**BWs**) den Ergebnissen aus den Untersuchungen der **bodenabhängigen Expositionsbedingungen** gegenüberzustellen und gutachterlich zu würdigen (vgl. *Kapitel 2.3* und *Abbildung 1* sowie *Kapitel 5.2.4* und *Kapitel 5.2.5*).

Vergleich mit BWs

Ergibt diese Prüfung eine Unterschreitung der BWs, gilt der **Gefahrenverdacht** für die zugrunde gelegte, sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung insoweit als **ausgeräumt**. Wird dagegen ein standortspezifisch abgeleiteter Beurtei-

lungswert (BW_s) überschritten, gilt die Gefahr für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung als **festgestellt**. In diesem Fall müssen weitere Schritte erfolgen. Dies kann die **Prüfung der aktuellen Nutzung** umfassen (vgl. *Kapitel 5.3*) oder es sind Maßnahmen zu prüfen (vgl. *Kapitel 5.4*).

5.3. Zusätzliche Ermittlung nutzungsabhängiger Expositionsbedingungen als Beurteilungsgrundlage der aktuellen Nutzung

Zu den standortspezifischen Bedingungen, die die Wirksamkeit von Schadstoffen in Böden auf die menschliche Gesundheit beeinflussen, zählen auch Aspekte der Nutzung. Hier ist die Flächengestaltung ebenso einzubeziehen wie die Intensität der Nutzung, wodurch das Ausmaß des Bodenkontaktes im Einzelfall beeinflusst werden kann. Die folgenden Unterkapitel befassen sich mit Verfahren zur Quantifizierung **aktueller nutzungsabhängiger Expositionsbedingungen**. Dabei ist zu beachten, dass sich die hierbei aktuell festgestellten Verhältnisse kurzfristig ändern können, so dass deren Gültigkeit langfristig zu beobachten oder anderweitig sicherzustellen ist.

Eine Dokumentation der allgemeinen Standards zur Quantifizierung der Exposition für die verschiedenen Nutzungsszenarien und Aufnahmepfade findet sich in *Anhang 3*.

Insbesondere die Nutzung als ‚Hausgarten‘ und ‚Kleingarten‘ sowie ‚Wohngebiet‘ ist durch sehr unterschiedliche Nutzungsformen und -intensitäten gekennzeichnet, so dass hier die aktuelle Nutzung zum Teil erheblich von den Standardannahmen abweichen kann. Für die Expositionsabschätzung ist eine Aussage darüber zu treffen, wieviel Boden (mit den darin enthaltenen Schadstoffen) von den Nutzenden der Fläche aufgenommen wird und mit welcher Frequenz und Dauer solche Ereignisse stattfinden.

Die Berücksichtigung nutzungsabhängiger Expositionsbedingungen verbietet sich allerdings, wenn es Hinweise auf Stoffe mit **akut toxischen Wirkungen** gibt (z. B. Cyanide). Hier ist die Prüfung von Sofortmaßnahmen erforderlich (vgl. *Kapitel 3.3.2.1*).

Berücksichtigung aktueller Expositionsbedingungen

...gut geeignet für Haus- und Kleingarten

Akute Wirkung?

Für die Szenarien ‚Kinderspielfläche‘ und ‚Park- und Freizeitanlage‘ sollte die Prüfung nutzungsabhängiger Expositionsbedingungen nur in Ausnahmefällen durchgeführt werden, da hier Flächen zu bewerten sind, die von unterschiedlichsten Nutzenden (jedoch in sehr einheitlicher Art und Weise) frequentiert werden. Auf diesen Flächen sollten individuelle nutzungsabhängige Annahmen und Angaben nicht oder nur sehr pauschalisiert und nachweislich begründet in die Gefahrenbeurteilung einfließen.

Ausnahmen!

5.3.1. Bodenaufnahmemenge/-rate – Zugänglichkeit des Bodens

Die Schadstoffaufnahme aus dem Boden wird neben der Form der Nutzung insbesondere auch durch die **aktuelle Gestaltung** der Fläche bestimmt. So können der **Grad der Versiegelung (z. B. Betonfläche, Steinplatten)** oder **die Vegetationsbedeckung der Bodenoberfläche (Pflanzenwuchs, Rasen)** zu einer Verringerung der aktuell anzunehmenden oralen Bodenaufnahme gegenüber den zugrundeliegenden Annahmen und Konventionen für das sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzungsszenario beitragen. Im Hinblick auf die inhalative Aufnahme ist in dem Fall mit einer Verringerung der angenommenen Staubentwicklung zu rechnen. Zugangsbeschränkungen durch **Zäune** etc. können die mögliche Nutzergruppe einschränken, wie beispielsweise auf Schießplätzen.

Möglicher Bodenkontakt

Üblicherweise wird die Nutzung einer Fläche bereits in der orientierenden Untersuchung im Zuge der Probennahme dokumentiert. Im Hinblick auf die Prüfung der Expositionsbedingungen kann ergänzend die konkrete Flächengestaltung erhoben und dokumentiert werden, beispielsweise in Form einer Nutzungskartierung, Fotodokumentation oder Befragung der Nutzenden, aus der der Grad der Versiegelung oder Bodenbedeckung bzw. die Vegetationsdichte der Fläche hervorgeht und die Zugänglichkeit abgeleitet werden kann.

Datenerhebung zur Nutzung und Zugänglichkeit

Bei großflächigen Betrachtungen können ggf. typische Nutzungsstrukturen bereits zur Beschreibung der **ortsüblichen Prägung** erhoben und zur Konkretisierung des Nutzungsszenarios für die sensibelste planungsrechtliche Nutzung herangezogen werden (vgl. *Kapitel 4.3*).

Nach den Standardannahmen für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt wird modellhaft davon ausgegangen, dass Kinder **beim intensiven Spielen**

Intensives Kinderspiel

(Szenario ‚Kinderspielflächen‘) langfristig (d. h. über die ersten 8 Lebensjahre) 0,5 g Boden pro Spieltag (an 240 Tagen pro Jahr; vgl. *Kapitel 5.3.2*) aufnehmen. Hochgerechnet ergeben sich daraus **120 g Boden pro Jahr**.

Für das Szenario ‚Wohngebiete‘ wird modellhaft von einer **geringeren Intensität des Kinderspiels bzw. Zugänglichkeit des Bodens** ausgegangen, so dass hier die Bodenaufnahme mit **60 g Boden pro Jahr** (d. h. entweder 0,5 g Boden an 120 Spieltagen pro Jahr oder 0,25 g Boden an 240 Spieltagen pro Jahr; vgl. *Kapitel 5.3.2*) angenommen wird.

Zur Betrachtung von Stoffen mit akuter Wirkung wird eine einmalige Bodenaufnahme von 10 g unterstellt (vgl. *Anhang 3*).

Wurde eine Fläche als ‚**Haus- oder Kleingarten**‘ bzw. ‚**Wohngebiet**‘ eingestuft, ist daher zur Bewertung der aktuellen Situation als erstes zu prüfen, ob auf der Fläche Kinderspiel überhaupt in **intensivem Ausmaß** stattfindet (vgl. *Kapitel 4.3*). Anhaltspunkte hierfür können das Vorhandensein von Spielgeräten oder Spielflächen sein bzw. sich aus Befragungen der Nutzenden ergeben.

**Findet
Kinderspiel
statt?**

Gibt es Anhaltspunkte für intensives Kinderspiel, ist die **aktuelle Nutzung der Fläche (oder einer abgrenzbaren Teilfläche) als ‚Kinderspielfläche‘** einzustufen und die Modellannahme dafür heranzuziehen (120 g Boden/a).

Wurde nur eine klar abgrenzbare Teilfläche als ‚Kinderspielfläche‘ identifiziert, können in der Detailuntersuchung repräsentative Untersuchungsergebnisse dieser Teilfläche ermittelt oder herangezogen werden. Hierbei ist zu beachten, dass sich ggf. rasch Nutzungsänderungen (siehe *Kasten*) ergeben können, auf die im Rahmen der abschließenden Gefährdungsabschätzung explizit hinzuweisen ist und vor deren Hintergrund die Ergebnisse entsprechend zu würdigen sind.

In Haus- und Kleingärten kann die aktuelle Nutzung unter Umständen sehr schnell wechseln:

- Spielgeräte (und damit Kinderspielflächen) werden aus diversen Gründen in die andere Ecke des Gartens versetzt,
- Kleinkinder finden andere (unversiegelte) Gartenbereiche viel spannender als den Bereich um die Sandkiste herum,
- der Hauptaufenthaltsbereich befindet sich im Vorgarten, weil dort im Sommer mehr Schatten ist,
- Beete werden zu Rasenflächen und Rasenflächen zu Beeten,

- im Laufe eines heißen Sommers wird der (zunächst dichte) Rasenbewuchs immer lückiger,
- die Bewuchsdichte nach dem Vertikutieren ist verändert,
- etc.

Gibt es keine Hinweise auf intensive Kinderspielaktivitäten, kann eine Abschätzung und näherungsweise Quantifizierung der aktuellen Bodenaufnahmemengen unter Berücksichtigung von Subnutzungen durchgeführt werden.

Welche Subnutzungen sind bekannt?

Wenn davon auszugehen ist, dass Kinder sich nur selten auf den zu beurteilenden Flächen aufhalten, können folgende Werte für verschiedene Subnutzungen als Anhaltspunkte für die zu berücksichtigenden Bodenaufnahmemengen dienen (vgl. *Tabelle 7*).

Tabelle 7: Subnutzungen und Bodenaufnahmemengen in Gärten ohne intensives Kinderspiel (Quelle: LANUV 2014)

Subnutzung	Bodenaufnahmemenge		Bemerkung	Intensität der Exposition
Nutzbeete	0,25 g/d	60 g/a (0,25 g/d * 240 d/a) (0,5 g/d * 120 d/a)	offener Boden, direkter Kontakt eingeschränkt möglich	mittel
Zierbeete (auch lockere Gehölzbestände)	0,25 g/d	60 g/a (0,25 g/d * 240 d/a) (0,5 g/d * 120 d/a)	offener Boden, direkter Kontakt eingeschränkt möglich	mittel
Rasen	0,1 g/d	24 g/a (0,1 g/d * 240 d/a) (0,5 g/d * 48 d/a)	geschlossene Rasendecke, direkter Kontakt kaum möglich	gering

In diesen Fallgestaltungen wird angenommen, dass bei weniger intensivem Aufenthalt von Kindern ein eher gleichmäßiger Aufenthalt ohne eine spezifische Bevorzugung auf den Teilflächen stattfindet.

Für die Abschätzung der Bodenaufnahme ist der Bedeckungsgrad der Flächen zu berücksichtigen. Auf dicht bewachsenen Flächen kann die Bodenaufnahme als deutlich reduziert gewertet werden.

Flächen ohne offenen Boden

Teilflächen, bei denen der Boden unzugänglich ist (wie beispielsweise versiegelte oder überbaute Flächen) werden **nicht anteilig** bei der Ermittlung der Gesamtfläche miteinbezogen (siehe unten). Für sehr dicht bewachsene Flächen (z. B. mit Hecken- oder Bodendecker-



Bewuchs) ist eine entsprechende gutachterliche Beurteilung notwendig. Nur wenn hier tatsächlich kein direkter Bodenkontakt möglich bzw. anzunehmen ist, sollten auch diese Flächen bei der Ermittlung der Gesamtfläche ausgenommen werden.

Im Rahmen einer Kartierung sind die in *Tabelle 7* genannten Subnutzungen zu erfassen und deren **Anteile an der zugänglichen Gesamtfläche** zu berechnen. Mit diesen Angaben kann im nächsten Schritt ein gewichteter Wert für die Bodenaufnahmemenge bestimmt werden. Die folgende *Tabelle 8* enthält dazu ein Beispiel:

Tabelle 8: Berechnung der täglichen Bodenaufnahmemenge in Gärten ohne intensives Kinderspiel (Beispiel)

Subnutzung	Aufnahmemenge in g/d	Anteil an der zugänglichen Fläche*	Bodenaufnahmemenge pro Nutzungsanteil in g/d
Nutzbeete	0,25	5 %	0,0125
Zierbeete	0,25	15 %	0,0375
Rasen	0,1	80 %	0,08
Summe		100 %	0,130

* Versiegelte und unzugängliche Flächen werden bei der Berechnung der Gesamtfläche **nicht berücksichtigt!**

Die so abgeschätzte Bodenaufnahme kann die **Untergrenze von 0,1 g/d** (wie Rasen) für die zugänglichen Bereiche nicht unterschreiten (vgl. hierzu *Anhang 3*).

Es ist zu beachten, dass sich die Annahmen zur Aufenthaltshäufigkeit (vgl. *Kapitel 5.3.2*) und zur Modellierung der Schadstoffaufnahme in realistisch sinnhaften Grenzen bewegen müssen. Deshalb gilt eine Kappungsgrenze, die sicherstellt, dass nach Abschätzungen zur aktuellen Bodenaufnahmemenge und zur Aufenthaltshäufigkeit eine Aufnahmemenge von **12 g Boden pro Jahr** als Annahme nicht unterschritten wird.

**Kappungs-
grenze
beachten!**

Für die **aktuelle Nutzung** kann ein spezifischer **Expositionsquotient EQ_{BA}** zur Berücksichtigung der nutzungsabhängigen Bodenaufnahmemenge für weitere Expositionsabschätzungen zur oralen Aufnahme wie folgt berechnet werden:

**Ermittlung
von EQ_{BA}**

Gleichung 7: Expositionsquotient EQ_{BA} für die Bodenaufnahmemenge, oraler Aufnahmepfad

$$EQ_{BA} = \frac{\text{Bodenaufnahmemenge}_{\text{aktuell}} \text{ (in g/d)}}{\text{Bodenaufnahmemenge}_{\text{Standard Kinderspielfläche}} \text{ (in g/d)}}$$

mit:

$$EQ_{BA} = \text{Expositionsquotient Bodenaufnahmemenge (orale Aufnahme)}$$

Beispiel: Expositionsquotient Bodenaufnahmemenge

Der Expositionsquotient für die Untersuchungsfläche des Beispiels in *Tabelle 8* ergibt sich mit:

$$EQ_{BA} = \frac{\text{Bodenaufnahmemenge}_{\text{aktuell}} \text{ (in g/d)}}{\text{Bodenaufnahmemenge}_{\text{Standard Kinderspielfläche}} \text{ (in g/d)}} = \frac{0,130 \text{ g/d}}{0,5 \text{ g/d}} = 0,26$$

Besteht aufgrund des Schadstoffspektrums für eine zugängliche Fläche Grund zur Annahme, dass bereits nach einmaliger Aufnahme hoher Mengen akut toxische Wirkungen zu befürchten sind (vgl. *Kapitel 3.3.2.1*), sind keine weiteren Prüfschritte zur Betrachtung nutzungsabhängiger Expositionsbedingungen möglich. In dem Fall ist zur Abschätzung der Exposition von einer **einmaligen Bodenaufnahmemenge von 10 g** auszugehen (vgl. auch *Anhang 3*).

**Akute
Wirkung?**

5.3.2. Aufenthaltshäufigkeit sensibler Nutzergruppen bei oraler und inhalativer Aufnahme

Die langfristige Schadstoffaufnahme aus dem Boden wird neben der Zugänglichkeit der Bodenoberfläche durch die Aufenthaltshäufigkeit der Nutzenden bestimmt. In einem intensiv genutzten Hausgarten ist erwartungsgemäß von einer stärkeren Nutzungsintensität auszugehen als in einem kleinen Vorgarten.

Bei der Prüfwertableitung wurde zur Abschätzung der Bodenaufnahme durch Kinder beim Spielen generell von einer Nutzungsfrequenz von 240 Tagen pro Jahr ausgegangen. Für die Szenarien ‚Wohngebiete‘ sowie ‚Park- und Freizeitanlagen‘ werden entsprechend um den Faktor 2 (120 Tage pro Jahr) bzw. 5 (48 Tage pro Jahr) geringere Bodenaufnahmeraten angenommen.

**Standard-
annahmen**

Für ‚Kleingärten‘ können aufgrund ihrer Lage und spezifischen Nutzung ggf. abweichende Annahmen zur Aufenthaltshäufigkeit spielender Kinder getroffen werden. In einer Studie zu Anbau- und Nutzungsgewohnheiten in Kleingärten in Nordrhein-Westfalen (vgl. LUA NRW 2001) wurde u. a. das Nutzungsverhalten von Kindern im Alter von 0–8 Jahren betrachtet. Eine weitere Differenzierung in verschiedene Altersgruppen war auf Grund der geringen Fallzahl nicht möglich, so dass diese Auswertungen nur begrenzt belastbare Aussagen für Kleinkinder (bis 2 Jahre) zulassen. Danach halten sich Kinder im Alter von 0–8 Jahren im Mittel rund 125 Tage pro Jahr in Kleingärten auf. Das entsprechende **95. Perzentil** liegt bei **213 Tagen pro Jahr**. Der nach BBodSchV vorgegebene **Standard von 240 Tagen pro Jahr** erscheint eher konservativ, was eine Anhebung der Prüfschwelle im Einzelfall gegenüber den Werten der BBodSchV rechtfertigen kann.

**Prüfung
Standard-
annahmen
in Klein-
gärten**

Zur Abschätzung aktueller nutzungsabhängiger Expositionsbedingungen in ‚Haus- und Kleingärten‘ (vgl. *Kapitel 4.3*) können beispielsweise Befragungen oder Erhebungen durchgeführt und ausgewertet werden. Die Belastbarkeit solcher Aussagen ist gutachterlich zu prüfen und einer Plausibilitätsprüfung zu unterziehen. In Befragungen muss bedacht werden, dass die Aussagen von Betroffenen oft durch „Wunschvorstellungen“ überlagert sind (beispielsweise zum Spielverhalten der Kinder im Hausgarten).

**Erhebung
von Daten**

Unter Plausibilitätsaspekten ist bei der Ermittlung und Anpassung der aktuellen Aufenthaltshäufigkeit darauf zu achten, dass dadurch die Annahmen zur Bodenaufnahme bei Nutzung als ‚Park- und Freizeitanlage‘ nicht deutlich (um mehr als die Hälfte) unterschritten werden. Konkret bedeutet dies, dass durch die Kombination der Bodenaufnahme (0,1 bis 0,5 g pro Tag) und der Aufenthaltshäufigkeit (48 bis 240 Tagen pro Jahr) die Annahmen zur **Bodenaufnahmemenge von 12 g pro Jahr** i. d. R. nicht unterschritten werden sollen (vgl. *Kapitel 5.3.1*). Ausnahmen sind nur bei Vorliegen vertiefender Informationen für den Standort begründbar.

**Kappungs-
grenze
beachten!**

Wenn beispielsweise durch Erhebungen zum Spielverhalten von Kindern in bestimmten Siedlungsstrukturen oder bei besonderen gebietsbezogenen Witterungsbedingungen nachvollziehbar und belastbar begründet werden kann, dass

**Ermittlung
von EQ_{AH}**

die Aufenthaltshäufigkeit auf der Fläche von den Standardannahmen für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung abweicht, kann gemäß der *Gleichung 8* ein **Expositionsquotient EQ_{AH}** berechnet werden:

Gleichung 8: Expositionsquotient EQ_{AH} für die Aufenthaltshäufigkeit, oraler und inhalativer Aufnahme-pfad

$$EQ_{AH} = \frac{\text{Aufenthaltshäufigkeit}_{\text{aktuell}} \text{ (in d/a)}}{\text{Aufenthaltshäufigkeit}_{\text{Standard Kinderspielfläche}} \text{ (in d/a)}}$$

mit:

EQ_{AH} = Expositionsquotient Aufenthaltshäufigkeit (orale und inhalative Aufnahme)

Beispiel: Expositionsquotient Aufenthaltshäufigkeit

Der Expositionsquotient EQ_{AH} für eine Untersuchungsfläche ergibt zum Beispiel:

$$EQ_{AH} = \frac{\text{Aufenthaltshäufigkeit}_{\text{aktuell}} \text{ (in d/a)}}{\text{Aufenthaltshäufigkeit}_{\text{Standard Kinderspielfläche}} \text{ (in d/a)}} = \frac{125 \text{ d/a}}{240 \text{ d/a}} = 0,52$$

5.3.3. Aufenthaltsdauer sensibler Nutzergruppen bei inhalativer und der-maler Aufnahme

Für die Betrachtung des inhalativen und dermalen Aufnahme-pfades wird standardmäßig eine **Aufenthaltsdauer** der Kinder von 2 Stunden pro Tag angenommen. Hinsichtlich dieser Annahme sind Anpassungen durch Berechnung eines **Expositionsquotient EQ_{AD}** nach *Gleichung 9* begründet möglich.

Ermittlung von EQ_{AD}

Gleichung 9: Expositionsquotient EQ_{AD} für die Aufenthaltsdauer, inhalativer Aufnahme-pfad

$$EQ_{AD} = \frac{\text{Aufenthaltsdauer}_{\text{aktuell}} \text{ (in h/d)}}{\text{Aufenthaltsdauer}_{\text{Standard Kinderspielfläche}} \text{ (in h/d)}} = \frac{\text{Aufenthaltsdauer}_{\text{aktuell}} \text{ (in h/d)}}{2 \text{ h/d}}$$

mit:

EQ_{AD} = Expositionsquotient Aufenthaltsdauer (inhalative Aufnahme)

Auf der Haut können sich schadstoffbelastete Bodenpartikel noch länger befinden. Für die dermale Aufnahme wurde deshalb abweichend von einer Expositionszeit von 5 Stunden ausgegangen. Der EQ_{AD} wäre für eine Beurteilung des dermalen Aufnahme-pfades entsprechend anzupassen.

5.3.4. Weitere Expositionsstandards

Grundsätzlich können im Einzelfall auch noch weitere Standards zur Expositionsabschätzung vor dem Hintergrund der **aktuellen Nutzung** eines Standortes überprüft werden (vgl. *Anhang 3*). Hierfür sind **nachvollziehbare und belastbare Begründungen** gutachterlich darzulegen.

Beispiel: Atemrate

Als Beispiel sei die Atemrate genannt, die der Quantifizierung der inhalativen Boden-/Staubaufnahme dient und die alters- sowie aktivitätsabhängig ist. So wird für die Atemrate unterschieden zwischen ruhenden, leichten, mittelschweren und intensiven körperlichen Betätigungen (vgl. HEMPFLING & DOETSCH 1997, AGLMB 1995). Die der Prüfvertableitung für ‚Kinderspielflächen‘ zugrundeliegende Standardannahme von 15 m³/Tag entspricht dabei den Empfehlungen der AGLMB (1995) für die Atemrate von 4- bis 6-Jährigen bei leichter Aktivität im „ungünstigen Fall“ bei zeitlich begrenzter Exposition. Als „wahrscheinlicher Fall“ wird die Atemrate mit 12 m³/Tag angegeben.

Für Sport- und Bolzplätze wird von einer mäßigen Aktivität ausgegangen, so dass dafür als Standard bei zeitlich begrenzter Exposition im „ungünstigen“ Fall für 7- bis 8-jährige Kinder eine Atemrate von 46 m³/Tag angenommen wurde (vgl. DELSCHEN et al. 2006).

Da im Rahmen von Einzelfallprüfungen Studien zur Festlegung der Atemrate mit Sicherheit nicht durchführbar sind, wäre abzuwägen, inwieweit Verschiebungen der Annahmen zur Atemrate vom „ungünstigen“ zum „wahrscheinlichen“ Fall zulässig sind bzw. inwieweit aufgrund des Nutzungsangebotes vor Ort oder der Altersstruktur der Nutzenden (z. B. jüngere Kinder) weniger intensive Aktivitäten (und damit geringere Atemraten) zulässigerweise anzunehmen sind.

5.3.5. Beurteilung der Expositionsbedingungen auf Grundlage der aktuellen Nutzung

Unter Berücksichtigung der ermittelten aktuellen **nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen** und Expositionsquotienten (EQ) können im Einzelfall **Beurteilungswerte BWa** für die **aktuelle Nutzung** abgeleitet werden (vgl. *Kapitel 5.3.1* und *5.3.2*).

**Ermittlung
von BWarV
und
BWa<sub>Feinkorn-
fraktion</sub>**

Grundsätzlich sind der orale und inhalative Aufnahmepfad getrennt zu betrachten.

Gleichung 10: Beurteilungswert für die aktuelle Nutzung (BWa) für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt, orale Aufnahme

**Orale
Aufnahme**

$$B_{Wa_{RV}} = \frac{\text{Prüfwert BBodSchV}}{EQ_{BA} * EQ_{AH}} = \frac{B_{Ws_{RV}}}{EQ_{BA} * EQ_{AH}}$$

$$B_{Wa_{gesamt}} = \frac{\text{Prüfwert BBodSchV}}{EQ_{RV} * (EQ_{BA} * EQ_{AH})} = \frac{B_{Ws_{gesamt}}}{EQ_{BA} * EQ_{AH}}$$

(abweichendes Vorgehen: siehe *Kasten: Ausnahmen* in *Kapitel 5.2.4*)

mit:	
BW_{aRV} (in mg/kg)	= Beurteilungswert für die aktuelle Nutzung, bezogen auf gemessene resorptionsverfügbare Gehalte
BW_{sRV} (in mg/kg)	= Beurteilungswert für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung, bezogen auf gemessene resorptionsverfügbare Gehalte (vgl. <i>Gleichung 1</i>)
$BW_{agesamt}$ (in mg/kg)	= Beurteilungswert für die aktuelle Nutzung, bezogen auf gemessene Gesamtgehalte
$BW_{sgesamt}$ (in mg/kg)	= Beurteilungswert für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung, bezogen auf gemessene Gesamtgehalte (vgl. <i>Gleichung 4</i>)
EQ_{RV}	= Expositionsquotient Resorptionsverfügbarkeit
EQ_{BA}	= Expositionsquotient Bodenaufnahmemenge (vgl. <i>Gleichung 7</i>)
EQ_{AH}	= Expositionsquotient Aufenthaltshäufigkeit (vgl. <i>Gleichung 8</i>)

Gleichung 11: Beurteilungswert für die aktuelle Nutzung (BWA) für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt, inhalative Aufnahme

Inhalative Aufnahme

$BW_{aFeinkornfraktion} = \frac{\text{Prüfwert BBodSchV} * 5 \text{ (anorg.) bzw. } 10 \text{ (org.)}}{EQ_{AH} * EQ_{AD}} = \frac{BW_{sFeinkornfraktion}}{EQ_{AH} * EQ_{AD}}$	
$BW_{agesamt} = \frac{\text{Prüfwert BBodSchV}}{EQ_{Feinkornfraktion} * (EQ_{AH} * EQ_{AD})} = \frac{BW_{sgesamt}}{EQ_{AH} * EQ_{AD}}$	
mit:	
$BW_{aFeinkornfraktion}$ (in mg/kg)	= Beurteilungswert für die aktuelle Nutzung, bezogen auf gemessene Gehalte in der Feinkornfraktion < 63 µm
$BW_{sFeinkornfraktion}$ (in mg/kg)	= Beurteilungswert für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung, bezogen auf gemessene Gehalte in der Feinkornfraktion < 63 µm (vgl. <i>Gleichung 5</i>)
$BW_{agesamt}$ (in mg/kg)	= Beurteilungswert für die aktuelle Nutzung, bezogen auf gemessene Gesamtgehalte
$BW_{sgesamt}$ (in mg/kg)	= Beurteilungswert für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung, bezogen auf gemessene Gesamtgehalte (vgl. <i>Gleichung 6</i>)
$EQ_{Feinkornfraktion}$	= Expositionsquotient Anreicherung in der Feinkornfraktion < 63 µm
EQ_{AH}	= Expositionsquotient Aufenthaltshäufigkeit (vgl. <i>Gleichung 8</i>)
EQ_{AD}	= Expositionsquotient Aufenthaltsdauer (vgl. <i>Gleichung 9</i>)

Die für die aktuelle Nutzung ermittelten **Beurteilungswerte BWa** entsprechen den **Maßnahmenwerten im konkreten Einzelfall**. Bei deren Anwendung sind Aspekte der Plausibilität genauso zu prüfen wie Überlegungen zu sinnvollen Ober- oder Kappungsgrenzen (siehe oben).

Plausibilitätsprüfung

5.4. Abschließende Gefährdungsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt

In der abschließenden Gefährdungsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt sind schließlich alle vorliegenden standortspezifischen Informationen sowie die Auswertungen für **alle relevanten Schadstoffe** für die untersuchte Fläche zusammenzuführen und aus bodenschutzrechtlicher Sicht festzustellen, ob der Gefahrenverdacht für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt insoweit ausgeräumt oder die Gefahr festgestellt wurde (vgl. *Abbildung 1*). Hierbei sind die relevanten Schadstoffe jeweils zu nennen. Analog sind die Ergebnisse auch für die aktuelle Nutzung zu formulieren, sofern diese erhoben wurde (vgl. *Kapitel 2.2.1*). Wurde der Gefahrenverdacht lediglich für die aktuelle Nutzung ausgeräumt, sind Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen zur Festschreibung des Status quo der aktuellen Nutzung zu empfehlen. Wird die Gefahr sowohl für die sensibelste planungsrechtlich zulässige als auch für die aktuelle Nutzung festgestellt, sind diesbezüglich weitergehende Maßnahmen erforderlich.

Zusammenführung aller Erkenntnisse

Handelt es sich um eine Nutzung der Fläche als ‚Haus- oder Kleingarten‘, sind parallel auch Auswertungen zum Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch erforderlich (vgl. *Kapitel 7*), die ggf. je nach Schadstoffinventar einer integrativen Betrachtung zu unterziehen sind (vgl. *Kapitel 9.1*).

Beachtung weiterer Wirkungspfade

Kurz gesagt:

Zur Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt bestimmen die relevanten Aufnahmepfade die Methoden zur Prüfung der Expositionsbedingungen. Steht der orale Aufnahmepfad im Vordergrund der Bewertung, kann die Untersuchung der Resorptionsverfügbarkeit die bodenabhängigen Expositionsbedingungen konkretisieren, für inhalativ wirksame Schadstoffe bilden dagegen Untersuchungen der Feinkornfraktion < 63 µm den humantoxikologisch relevanten Schadstoffgehalt im Boden ab. Mit Hilfe dieser Ergebnisse ist dann die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung am untersuchten Standort abschließend zu beurteilen. Ist der Gefahrenverdacht nicht auszuräumen, können ggf. die aktuelle Nutzung betrachtet und nutzungsabhängige Expositionsbedingungen, wie Informationen zur Zugänglichkeit des Bodens, zur Bestimmung der Bodenaufnahme oder Angaben zur Expositionshäufigkeit und -dauer erhoben und bewertet werden. Grundsätzlich sind die Ergebnisse Plausibilitätsprüfungen zu unterziehen und abschließend gutachterlich zu betrachten. Dabei sind Kappungsgrenzen zu beachten, die nutzungsbedingt die Beurteilungswerte in doppelter Höhe der ‚Park- und Freizeitanlagen‘ nicht überschreiten sollten.

Im Falle von Schadstoffen mit akuter Wirkung sind i. d. R. vor einer Expositionsabschätzung Sofortmaßnahmen zu prüfen. Im Falle von Nutzungsszenarien mit wechselnden Nutzenden oder Nutzungsstrukturen (‚Kinderspielflächen‘, ‚Park- und Freizeitanlagen‘) sollte von einer Prüfung der aktuellen Nutzung abgesehen werden. Im Fall der Nutzung einer Fläche als ‚Haus- oder Kleingarten‘ sind parallele Prüfungen zum Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch erforderlich, die ggf. in Abhängigkeit vom Schadstoff integrativ zu betrachten sind.

6. Durchführung von Expositionsabschätzungen für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch

Für welche Stoffe ist dieser Wirkungspfad relevant?

Wie sind die Aufnahmewege?

Welche Untersuchungsstrategien sind geeignet?

Wie sind die Untersuchungen durchzuführen?

Wie werden die Ergebnisse für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch beurteilt?

6.1. Grundlagen

Der Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch beschreibt die Möglichkeiten der Aufnahme von Schadstoffen, die sich im Boden über die Bodenluft ausbreiten. Als Bodenluft werden alle gasförmigen Stoffe im Untergrund bezeichnet, die sich in den Hohlräumen zwischen den festen Bestandteilen des Bodens befinden. Neben den Bestandteilen der Atmosphärenluft kann die Bodenluft auch leichtflüchtige Schadstoffe enthalten.

Flüchtigkeit

Wichtige Leichtflüchter

Zur Gruppe der leichtflüchtigen organischen Verbindungen zählen typischerweise BTEX, LCKW, kurzkettige MKW sowie Naphthalin als flüchtige Einzelsubstanz aus der Gruppe der PAK.

Unter den anorganischen Schadstoffen sei an dieser Stelle auf das Quecksilber in elementarer oder organischer Form (als Dimethylquecksilber) verwiesen, welches aufgrund seiner Flüchtigkeit in die Gasphase übertritt. Weitere ggf. relevante leichtflüchtige Verbindungen sind Schwefelwasserstoff, Phosphorwasserstoff, Arsenwasserstoff und Ammoniak.

Eine spezielle Form der Bodenluft stellt das sogenannte Deponiegas dar, d. h. die in einer Deponie bzw. Altablagerung durch mikrobiellen Abbau entstehenden Gase mit den Hauptkomponenten Methan und Kohlendioxid. Deponiegase sind nicht Gegenstand dieser Arbeitshilfe.

In der Bodenluft können sich flüchtige Stoffe ausgehend von der Schadstoffquelle in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Bodens ausbreiten. Wenn ein Austreten der Stoffe an der Bodenoberfläche und somit eine stetige Verdünnung erschwert ist, z. B. durch eine Bodenversiegelung, kann sich die Konzentration in der Bodenluft erhöhen. Durch Fugen, Risse oder Leitungszuführungen kann Bodenluft auch in Gebäude eindringen.

Ausbreitung und Anreicherung

Grundsätzlich können für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch zwei Aufnahmepfade für den Menschen differenziert werden:

Inhalation gasförmiger Stoffe

- Einatmen von gasförmigen Schadstoffen aus der Außenluft (inhalative Aufnahme)
- Einatmen von gasförmigen Schadstoffen aus der Innenraumluft (inhalative Aufnahme)

6.1.1. Aufnahme über die Außenluft

Grundsätzlich ist eine Aufnahme von Schadstoffen im freien Gelände über die bodennahe Außenluft zwar denkbar. Allerdings werden die aus dem Boden durch Diffusion austretenden flüchtigen Schadstoffe **sofort stark verdünnt** (Verdünnung von 1:10.000 und mehr). Aufgrund dieser starken Verdünnung der Bodenluft in die Außenluft sind relevante Aufnahmemengen gasförmiger Schadstoffe im Freien erst bei sehr hohen Konzentrationen zu erwarten, so dass die Aufnahme über die Außenluft auch bei bodennah spielenden Kindern in der Regel nicht bewertungsrelevant ist (vgl. auch LABO 2008).

Geringere Verdünnungen sind bei offenen Baugruben oder Arbeiten, bei denen Erde durch kleinere Baumaßnahmen (Errichtung von Zäunen, Schuppen etc.) bewegt wird, anzunehmen. Hier können Personen unmittelbar während oder im Anschluss an die Erdbewegungen in Kontakt mit der Erde kommen, so dass bei flüchtigen Stoffen ggf. **hohe Belastungen innerhalb eines kurzen Zeitraumes** (etwa eine Stunde) nach den Erdbewegungen zu erwarten sind. Aufgrund der kurzen Expositionsdauer ist dieses Szenario für chronisch toxische Endpunkte nicht bewertungsrelevant.

Als Standard zur Abschätzung akuter Expositionsmöglichkeiten gegenüber **flüchtigen Stoffen mit akuter Wirkung** (beispielsweise Kampfstoffe wie S-Lost) wurde ein Verhältnis Bodenluft-Außenluft von 100:1 angenommen (UBA 1999ff). In der Praxis führen diese Annahmen jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit in einer Vielzahl von Situationen zu einer deutlichen Überschätzung, so dass bei konkreten Eingriffen in den Boden eine messtechnische Überwachung empfohlen wird (UBA 1999ff, LfU BY 2023b).

Verdünnung der Bodenluft in die Außenluft...

...im Regelfall keine Relevanz für Bewertung

Geringere Verdünnungsfaktoren in Baugruben!

Akute Wirkung?

6.1.2. Aufnahme über die Innenraumluft

Sind Wohn- oder Industriegebäude im Umfeld einer Schadstoffquelle vorhanden, können flüchtige Schadstoffe über Prozesse der Diffusion und Konvektion (Advektion) aus der Bodenluft über Risse und andere Wegsamkeiten in Gebäude eindringen und sich in der Innenraumluft anreichern. Diese Anreicherung ist von der Luftwechselzahl der jeweiligen Räume abhängig und bei festen ggf. unterkellerten Gebäuden wesentlich höher als bei Bauwerken oder Errichtungen mit hoher Luftwechselzahl, wie Hallen, Gewächshäusern, Gartenlauben oder Zelten.

Gebäudebestand

Über die Innenraumluft können die Schadstoffe beim Aufenthalt in den Gebäuden eingeatmet und aufgenommen werden; Näheres siehe *Anhang 3: Kapitel 2.2.2.1*. Je nach Lage der Räume (Keller, Parterre oder Obergeschoss), Zustand der Bausubstanz und Lüftungsverhalten kommt es dabei zu einer **Verdünnung** gegenüber der Bodenluftkonzentration um Größenordnungen, die durch Konventionsannahmen beschrieben werden können.

Lage und Zustand

Im Rahmen der Prüfung **bodenabhängiger Expositionsbedingungen** ist das Transmissionspotenzial zu untersuchen, das den Schadstofftransport im Boden abschätzen lässt und das wesentlich von der **Gasdurchlässigkeit** des Bodens sowie der Lage der **Kontaminationsquelle** abhängt. Hierzu werden i. d. R. Untersuchungen direkt in der Bodenluft durchgeführt (vgl. *Kapitel 6.2.2*).

Untersuchung der Bodenluft...

Zur Prüfung der **nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen** (vgl. *Kapitel 6.3*) sind die Wegsamkeit für die Bodenluft ins Gebäude (beispielsweise Durchlässigkeit des Bodens oder Entfernung zur Schadstoffquelle) sowie die Nutzung und der Zustand der Gebäude selbst zu betrachten.

Abschätzung des Schadstoffübergangs

Liegen **Hinweise auf Kontaminationen** der Innenraumluft vor, sollten diese gemäß § 10 Abs. 6 BBodSchV durch Innenraumluftmessungen überprüft werden (vgl. *Kapitel 6.4*).

Innenraumluftmessungen

Wenn (im Ausnahmefall) Innenraumluftmessungen bereits vorliegen, kann umgekehrt die Bodenluftuntersuchung ein Baustein bei der Ursachenermittlung der Innenraumluftbelastung sein.

6.2. Ermittlung bodenabhängiger Expositionsbedingungen als Beurteilungsgrundlage für die planungsrechtlich zulässige Nutzung

Umfasst das Schadstoffspektrum auf der zu betrachtenden Fläche flüchtige Schadstoffe und steht **aktuell ein Gebäude** oder Bauwerk **auf oder neben der Fläche**, das durch Menschen genutzt wird, sind im Rahmen der Detailuntersuchung ggf. Untersuchungen zur möglichen Ausbreitung der Schadstoffe im Boden erforderlich, sofern diese nicht bereits innerhalb der orientierenden Untersuchung durchgeführt wurden. Gleiches gilt, wenn eine Bebauung der Fläche oder eine Bebauung in **direkter Nachbarschaft** planungsrechtlich zulässig ist. Zu beachten ist, dass aufgrund der Ausbreitung der Schadstoffe in der Bodenluft eine Untersuchung und Bewertung **über die Grundstücksgrenze** der altlastverdächtigen Fläche hinaus notwendig sein kann.

Ausbreitung flüchtiger Schadstoffe in Gebäude oder Bauwerke

Die Verteilung der Stoffe im Drei-Phasen-System Boden/Bodenluft/Bodenwasser wird erheblich von bodenphysikalischen Kenngrößen wie Wassergehalt, Porenform und -größe bzw. Porenvolumen sowie von meteorologischen Bedingungen beeinflusst. Auch eine mögliche Ausgasung von Leichtflüchtern aus dem Grundwasser kann relevant werden. Daher kommt sowohl den im Bodenfeststoff (vgl. *Kapitel 6.2.1*) als auch den in der Bodenluft (vgl. *Kapitel 6.2.2*) gemessenen Schadstoffgehalten bzw. -konzentrationen nur ein orientierender Charakter zu.

6.2.1. Gehalte im Bodenfeststoff

Gehalte im Bodenfeststoff werden i. d. R. im Rahmen der orientierenden Untersuchung bestimmt und ausgewertet. Für leicht flüchtige Schadstoffe dienen sie im Rahmen der Detailuntersuchung der räumlichen Eingrenzung des Kontaminationsherdes.

Ausgangspunkt Feststoffgehalte

Sind die Ergebnisse nicht ausreichend, sind ggf. weitere Proben zu entnehmen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das entnommene Probenmaterial möglichst repräsentativ für den zu bewertenden Bodenbereich sein muss (vgl. LABO 2008). Für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch bedeutet dies, dass das Bodenmaterial aus dem relevanten Kontaminationsbereich entnommen werden sollte, aus dem der Übertritt über die Bodenluft in die Innenraumluft wahrscheinlich ist.

Probennahmetiefe beachten!

Bodenmaterial aus der üblichen Beprobungstiefe im obersten Bodenmeter ist für eine Bewertung in der Regel ungeeignet.

Daraus folgt, dass die Probennahmetiefe notwendigerweise von den in Anlage 3, Tabelle 3 der BBodSchV aufgeführten Tiefen abweicht (vgl. auch *Kapitel 10.1*). Aus dem Expositionsszenario ergibt sich als Ort der Probennahme der Nahbereich zum betrachteten Gebäude, der i. d. R. einer Tiefe von 2–2,5 m unter GOK (Kellersohle) entspricht (LABO 2017). Zur Abschätzung des Gesamtpotenzials – auch im Hinblick auf die planungsrechtlich zulässige Nutzung – ist der Kontaminationsschwerpunkt ggf. gesondert zu beproben.

Zur Interpretation der Ergebnisse kann auf die **orientierenden Hinweise für flüchtige Stoffe (Bodenfeststoffwerte) der LABO (2008)** sowie die **Prüfwertvorschläge zur Bewertung von Mineralölkohlenwasserstoffen (LABO 2017)** zurückgegriffen werden (vgl. *Kapitel 4.1.2*) bzw. sind entsprechende Werte gemäß der Ableitungsmethoden und -maßstäbe (UBA 1999 ff) (vgl. *Kapitel 4.1.3*) abzuleiten.

Orientierende Hinweise und Prüfwertvorschläge Bodenfeststoff

Eine Prüfung **standortspezifischer Rahmenbedingungen** für Leichtflüchter, (wie z. B. die Ermittlung von sogenannten **K_{as}-Werten**, d. h. Boden-Bodenluft-Verteilungskoeffizienten) ist nicht sinnvoll, da die weiteren Ableitungsbedingungen zu stark pauschalierten Werten führen. Bei auffälligen Feststoffgehalten sind Bodenluft- und/oder Innenraumluftmessungen durchzuführen.

6.2.2. Konzentrationen in der Bodenluft

Bodenluftmessungen liegen bei Kenntnis des Schadstoffinventars i. d. R. für flüchtige Stoffe bereits aus der orientierenden Untersuchung vor und können zur Auswertung herangezogen werden.

Bodenluftmessungen aus der orientierenden Untersuchung

Die Durchführung von (weiteren) Bodenluftmessungen kann jedoch erforderlich werden, wenn bisher keine entsprechenden Messungen durchgeführt wurden, jedoch Hinweise auf Leichtflüchter aus anderen Messungen vorliegen oder Wiederholungsmessungen angezeigt sind.

Einzelergebnisse aus Bodenluftmessungen sind nur für einen begrenzten zeitlichen und räumlichen Bereich repräsentativ, so dass bei der Bewertung zeitliche,

Wiederholungsmessungen

räumliche und durch das Entnahmeverfahren bedingte Schwankungen der Schadstoffkonzentration in der Bodenluft zu berücksichtigen sind. Grundsätzlich wird daher empfohlen, die Bewertung von Bodenluft nicht an ein einzelnes Messdatum zu knüpfen, sondern aufgrund möglicher witterungsbedingter Einflüsse zumindest zwei, besser drei Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchzuführen.

Stationäre Bodenluftmessstellen sind daher temporären Bohrlochmessungen in jedem Fall vorzuziehen. Variieren die Bodenverhältnisse im bewertungsrelevanten Bereich stark, sind ggf. an mehreren Stellen Messungen erforderlich. Sinnvoll ist dies insbesondere in lockerem Gestein, während bei tonig schluffigen Böden keine wesentliche Ausbreitung zu erwarten ist.

Verbesserung der Aussagefähigkeit

Wichtig ist eine Probennahme von Bodenluft aus dem bewertungsrelevanten Bereich. Die Probennahme sollte darüber hinaus mindestens 1,5 m unter GOK und oberhalb des Kapillarsaums des Grundwassers erfolgen, um einen Einfluss atmosphärischer Luft bzw. des Grundwassers auszuschließen. Aus dem Expositionsszenario ergibt sich als Ort der Probennahme wie beim Bodenfeststoff der Nahbereich des Bodens zum betrachteten Gebäude, der für den Übertritt von Bodenluft in die Innenraumlufte relevant ist und i. d. R. einer Tiefe von 2–2,5 m unter GOK (Kellersohle) entspricht (LABO 2017). Zur Abschätzung des Gesamtpotenzials an Schadstoffen ist – auch im Hinblick auf die planungsrechtlich zulässige Nutzung – der Kontaminationsschwerpunkt ebenfalls ggf. gesondert zu beproben.

Probenahmetiefe beachten!

Bodenluftproben aus dem oberen Bodenmeter sind generell nicht zielführend, da flüchtige Verbindungen in dieser Bodentiefe abgereichert sind (LABO 2017). Weitere Hinweise zur Probennahme sind auch dem *Anhang 3* zu entnehmen.

Zur Beurteilung der vorgefundenen Konzentrationen sind die **orientierenden Hinweise für flüchtige Stoffe in der Bodenluft** der LABO (2008) heranzuziehen (vgl. *Kapitel 4.1.2*).

Orientierende Hinweise Bodenluft

Die dort festgelegten Orientierungswerte sind insbesondere zur Bewertung festgestellter Belastungen und Auslösung der in § 10 Abs. 6 BBodSchV aufgeführten Maßnahmen (Innenraumlufte-messungen) geeignet. Das Risiko falsch negativer

Befunde ist im Einzelfall abzuschätzen und entlastende Aussagen sind entsprechend (gut) zu begründen. In der Regel sind dazu auch Untersuchungen anderer Medien notwendig.

Gerüche

Flüchtige Stoffe können geruchliche Wahrnehmungen hervorrufen, die zwar keinen anerkannten toxischen Wirkungsendpunkt darstellen, die jedoch Befinden, Verhalten und Leistungen beeinträchtigen können (IRK-UBA 2014).

Bei der Ableitung der orientierenden Hinweise für flüchtige Stoffe in der Bodenluft wurden Geruchsschwellen berücksichtigt, die nach DIN 13725 ermittelt wurden. Bei Überschreitung der oberen Konzentrationsschwellen für Stoffe, die als geruchlich problematisch eingestuft sind, wird empfohlen, die Bewertung solcher potenziellen Belästigungen bezüglich ihrer Erheblichkeit mit den zuständigen Gesundheitsbehörden abzustimmen (LABO 2008).

Von der Innenraumlufthygiene-Kommission des UBA wurde ein Konzept zur gesundheitlich-hygienischen Bewertung von Geruchsstoffen in der Innenraumluft vorgelegt, das die Ableitung sogenannter Geruchsleitwerte beinhaltet, mit dem Ziel, geringe von unzumutbaren, erheblichen geruchlichen Belästigungen zu unterscheiden (IRK-UBA 2014).

6.3. Zusätzliche Ermittlung nutzungsabhängiger Expositionsbedingungen als Beurteilungsgrundlage der aktuellen Nutzung

Wurden im Umfeld von Gebäuden auffällige Schadstoffkonzentrationen in der Bodenluft gemessen (vgl. *Kapitel 6.2.2*), ist es möglich, auf Basis von Verdünnungsfaktoren abzuschätzen, in welcher Größenordnung Konzentrationen in der Innenraumluft angrenzender Gebäude zu erwarten sind. Standardmäßig wird für die Ableitung der Prüfwerte der Transfer von der Bodenluft in die Innenraumluft mit einer Verdünnung von 1:1.000 abgeschätzt (vgl. UBA 1999ff).

**Verdünnung
Bodenluft-
Innenraum-
luft 1:1.000**

Art und Zustand eines Gebäudes, die tatsächliche Nutzung der betroffenen Räumlichkeiten sowie weitere Faktoren können im Rahmen einer Einzelfallbetrachtung erhoben und berücksichtigt werden. Dabei ist zu beachten, dass sich ein Teil dieser Faktoren im Laufe der Zeit ändern kann (vgl. *Kapitel 6.5*).

6.3.1. Art und Zustand des Gebäudes

Der Transfer von Schadstoffen aus der Bodenluft in Gebäude hinein wird im Wesentlichen durch den Zustand des Gebäudes sowie Gebäudecharakteristika bestimmt. Diese Aspekte sind im Rahmen von Begehungen zu überprüfen sowie kartografisch bzw. fotografisch zu dokumentieren. Hier ist insbesondere auf Weg-

**Überprüfung der
Wegsamkeiten**

samkeiten für die Bodenluft zu achten, wie beispielsweise Rohranschlüsse, Fugen, Risse an der Gebäudeaußenwand, in Kellerräumen oder Souterrainwohnungen.

Sind Gebäude betroffen, die in einem schlechten Zustand angetroffen werden, oder liegt die Schadstoffquelle bzw. -messstelle in deutlicher Entfernung zum betroffenen Gebäude, kann ggf. von den Standardannahmen zum Transferverhalten in Richtung geringerer oder höherer Verdünnung abgewichen werden (vgl. *Anhang 3*). Darüber hinaus können aber auch standortspezifische Eigenschaften des Bodens, weitere Standortfaktoren oder Witterungsbedingungen Einfluss nehmen, so dass die Anwendung der Transferfaktoren immer auch gutachterlich zu begründen und zu diskutieren ist.

**Anpassung
der Ver-
dünnungs-
faktoren**

6.3.2. Gebäudenutzung

Zur Ableitung der Prüfwerte für das Szenario ‚**Wohngebiete**‘ bzw. **Wohngebäude** im Hinblick auf leichtflüchtige Schadstoffe, die aus der Bodenluft in die Innenraumluft gelangen, wird angenommen, dass die sensibelste Nutzergruppe der **Kleinkinder** im Alter von 1–3 Jahren und einem Körpergewicht von 10 kg im ungünstigen Fall ganztägig, d. h. **24 Stunden pro Tag** der Innenraumluft ausgesetzt ist und dabei ein Atemvolumen von 7 m³ pro Tag anzunehmen ist. Bei kanzerogenen Stoffen wird eine lebenslange Exposition von 70 Jahren und eine Atemrate von 0,39 m³ pro kg KG*d unterstellt (UBA 1999ff; vgl. *Anhang 3*).

**Standard-
annahmen**

Für ‚**Industrie- und Gewerbegrundstücke**‘ wird davon ausgegangen, dass nur Erwachsene als Nutzergruppe in Betracht zu ziehen sind, mit einer Atemrate von 20 m³ pro Tag. Allerdings wird die Aufenthaltsdauer mit Hilfe eines Gewichtungsfaktors den üblichen Arbeitszeiten angepasst. So wird von einer 40-Stunden-Woche an 45 Wochen pro Jahr ausgegangen. Für kanzerogene Stoffe wird unterschieden in eine Arbeitszeit von 20 und 40 Jahren. Daraus ergeben sich Gewichtungsfaktoren Z von 4,85 für toxisch wirkende Stoffe bzw. 17 und 8,5 (20 / 40 Jahre) für kanzerogene Stoffe (UBA 1999ff; vgl. *Anhang 3*).

**Gewich-
tungs-
faktor Z**

Zur Abschätzung der Expositionsbedingungen hinsichtlich einer inhalativen Aufnahme flüchtiger Schadstoffe sind die betroffenen Räume zu beschreiben und

**Aktuelle
Raum-
nutzung**

bezüglich ihrer Nutzung zu charakterisieren. Dies erfolgt üblicherweise im Rahmen der Ortsbesichtigung, die mit Hilfe von Fotos und Begehungsprotokollen dokumentiert wird. Zur Quantifizierung möglicher Expositionen von Bewohnenden der betroffenen Gebäude können Annahmen hinsichtlich der Raumnutzung getroffen werden.

Gibt es beispielsweise Hinweise darauf, dass im Hinblick auf die **aktuelle Raumnutzung** begründet von den Standardannahmen abgewichen werden kann (z. B. im Falle von Lagerräumen, die aktuell nur gelegentlich von Erwachsenen kurz betreten werden), können Aufenthaltszeiten für die aktuelle Raumnutzung berücksichtigt und Beurteilungswerte für die Bodenluft für die aktuelle Nutzung begründet werden (vgl. *Anhang 3*).

6.4. Innenraumluftmessungen

Nach § 10 Abs. 6 BBodSchV soll im Rahmen der Detailuntersuchung eine Untersuchung der Innenraumluft erfolgen, wenn „aufgrund der örtlichen Umstände oder nach den Ergebnissen von Bodenluftuntersuchungen [...] **Anhaltspunkte** für die Ausbreitung von flüchtigen Schadstoffen aus einer Verdachtsfläche oder alllastverdächtigen Fläche in Gebäude bestehen“.

Anhaltspunkte für eine Ausbreitung?

Die örtlichen Gegebenheiten, die entsprechende Anhaltspunkte bieten bzw. die im Einzelfall erhebliche Abweichungen von Standardannahmen begründen können, lassen sich gemäß *Kapitel 6.3* und *Anhang 3* erkennen und darstellen. Die Auslösung von Innenraumluftmessungen muss aber nicht von der ‚exakten‘ zahlenmäßigen Überschreitung von Beurteilungswerten abhängig gemacht werden – der Hinweischarakter der Werte bleibt zu beachten.

Nach Baurecht, in Form der jeweiligen Landesbauordnung, darf von einer baulichen Anlage keine Gefährdung der menschlichen Gesundheit ausgehen. Soweit es sich um Arbeitsplätze in Innenräumen handelt, die nicht gefahrstoffrechtlichen Regelungen unterliegen, muss gemäß *Arbeitsstätten-Verordnung* ausreichend gesundheitlich zuträgliche Atemluft vorhanden sein (HEBISCH et al. 2019).

Hieraus leitet sich sowohl für öffentlich als auch für privat genutzte Räume das Erfordernis ab, bei Hinweisen auf **Schadstoffbelastungen im Boden**, für die ein

Schadstoffquellen

Transfer aus dem Boden in die Innenraumluft wahrscheinlich ist (vgl. *Kapitel 6.3.1*), Innenraumluftuntersuchungen durchzuführen. Hierbei gilt es allerdings zu berücksichtigen, dass als Schadstoffquelle neben der Bodenluft auch Ausdünstungen aus Farben, Lacken, Kunststoffen, Möbeln, Teppichböden, Klimaanlage etc. in Frage kommen können.

Zuständigkeiten und Befugnisse bezüglich der Durchführung von Innenraumluftmessungen sind in den Bundesländern teils unterschiedlich geregelt.

Zuständigkeiten

Zur Erhebung und Beurteilung von Innenraumluftkonzentrationen hat die Ad-hoc Arbeitsgruppe der Innenraumhygiene-Kommission (IRK) des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden (heute: Ausschuss für Innenraumrichtwerte AIR) eine Handreichung veröffentlicht (IRK-UBA 2007), in der Anforderungen an Innenraumluftmessungen und Messstrategien formuliert sowie das Vorgehen zur Beurteilung von Schadstoffen in der Innenraumluft beschrieben sind (vgl. hierzu *Anhang 3*).

Anforderungen an Innenraumluftmessungen

Für eine Reihe von Schadstoffen wurden bereits sogenannte **Richtwerte** abgeleitet. Eine Übersicht findet sich auf der Internetseite des Umweltbundesamtes. Die genannten Richtwerte (Richtwert I und Richtwert II, siehe *Glossar*) sind in der Regel gemäß eines **Basisschemas** abgeleitet und begründet (vgl. IRK-UBA 1996, sowie Fortschreibung IRK-UBA 2012 und AIR 2015). Die Überschreitung des Richtwertes II zeigt eine Gefährdung an.

Richtwerte des AIR

6.5. Abschließende Gefährdungsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch

Bei flüchtigen Stoffen ist für die Betrachtung dieses Wirkungspfades sowohl die aktuelle als auch die **sensibelste planungsrechtlich zulässige wohnbauliche** Nutzung relevant.

Mit Erreichen bzw. Überschreitung des Richtwertes II gilt die Gefahr durch einen Schadstoffeintrag aus der Bodenluft in Innenräume als festgestellt und es werden Maßnahmen zur Gefahrenabwehr notwendig. Die jeweiligen Zuständigkeiten sind zu beachten.

Im Einzelfall kann die **aktuelle Nutzung** von der planungsrechtlich zulässigen Nutzung insofern **abweichen**, dass eine weniger sensible Nutzung (beispielsweise Lagerräume etc.) vorliegt, so dass ggf. die Gefahr für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung zwar festgestellt wurde, der Gefahrenverdacht für die aktuelle Nutzung jedoch aufgrund der weniger sensiblen Gebäudenutzung insoweit ausgeräumt wurde. Allerdings ist zu beachten, dass sich ein solches (weniger sensibles) Nutzungsverhalten ändern kann. Auch muss berücksichtigt werden, dass sich mit zunehmendem Alter von Gebäuden deren Zustand verschlechtern und damit die Wegigkeit für Schadstoffe aus der Bodenluft in die Innenraumluft zunehmen kann.

Unter dem Gesichtspunkt der Verhältnismäßigkeit sind nach IRK-UBA (2012) im Konzentrationsbereich zwischen **RW I und RW II in der Innenraumluft** zunächst keine baulichen oder sonstigen quellenbezogenen Veränderungen vorzunehmen, sondern es ist vor allem verstärkt zu lüften.

Wenn jedoch trotz nachweisbar verstärkten Lüftens Kontrollmessungen keine erkennbare Verbesserung der Luftqualität anzeigen und der Richtwert I nach wie vor überschritten wird, sind in einem zweiten Schritt auch für Konzentrationen im Bereich zwischen RW I und RW II weitergehende, gegebenenfalls auch bauliche Maßnahmen zu empfehlen, da eine über einen längeren Zeitraum (> 12 Monate) erhöhte Belastung aus Gründen der Vorsorge nicht akzeptabel ist. Ein Sanierungserfordernis nach Bodenschutzrecht lässt sich daraus jedoch nicht direkt ableiten.

Grundsätzlich müssen jedoch die Ursachen für nachgewiesene Innenraumluftbelastungen geklärt und ggf. die Schadstoffquelle im Boden identifiziert und beseitigt werden.

Darüber hinaus empfiehlt es sich, den Gebäudezustand durch Bausachverständige überprüfen zu lassen. Ziel ist es dabei, offensichtliche bauliche und technische Mängel festzustellen, die für den Schadstoffeintrag aus der Bodenluft in Innenräume verantwortlich sein können.

Klärung der Ursachen und Schadstoffquellen

Kurz gesagt:

Eine Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch ist dann erforderlich, wenn das Stoffinventar auch flüchtige Schadstoffe enthält, für die anzunehmen ist, dass diese sich über die Bodenluft in nahestehende Gebäude oder Räume ausbreiten können. Bodenluftmessungen können erste Anhaltspunkte dafür liefern, wobei die Aussagekraft von Bodenluftmessungen von verschiedenen Aspekten wie Witterungsbedingungen, Position der Probennahmestelle etc. abhängt und stets auf Mehrfachmessungen beruhen sollte.

Liegen Hinweise für erhöhte Schadstoffkonzentrationen in der Bodenluft vor, können zur Prüfung der aktuellen, nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen Informationen zum Gebäudezustand oder zur Gebäudenutzung erhoben und ausgewertet werden. Letztlich sind jedoch – unter Beachtung der Zuständigkeiten – Innenraumluftmessungen zu planen, durchzuführen und auszuwerten, mit dem Ziel, Innenraumluftbelastungen auszuschließen oder Ursachen dafür zu klären und ggf. die Schadstoffquelle im Boden zu identifizieren und zu beseitigen.

7. Durchführung von Expositionsabschätzungen für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch

Welche Nutzung wird betrachtet?

Wie gelangen Schadstoffe in Nutzpflanzen?

Welche Nutzpflanzen reichern Schadstoffe an?

Welche Untersuchungsmethoden sind zur Expositionsabschätzung geeignet?

Welchen Einfluss haben Anbau- und Verzehrsgewohnheiten?

Wie werden die Ergebnisse für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch beurteilt?

7.1. Grundlagen

Der Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch beschreibt die mögliche Schadstoffaufnahme des Menschen durch den **Verzehr von Gemüse und Obst**, das auf schadstoffbelasteten Flächen (z. B. ‚Nutzgärten‘) angebaut wird (vgl. *Kapitel 4.2*). Hiervon zu unterscheiden – und in dieser Arbeitshilfe nicht behandelt – sind Flächen, bei denen die Beurteilung der Schadstoffbelastung des Bodens auf die Sicherstellung der Vermarktungsfähigkeit landwirtschaftlicher Produkte (Ackerbau, Erwerbsgartenbau) oder die Verwertbarkeit der produzierten Futterpflanzen in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung (Grünland) abzielt. Hierzu wird auf die Empfehlungen des Landes Brandenburg, Baden-Württemberg und Sachsen verwiesen (LUA BB 2003, LUA BB 2010, LRA RNK 2022, BfUL 2015).

Für **reine ‚Nutzgärten‘** wird angenommen, dass diese eine entsprechende Anbaufläche aufweisen und ausschließlich dem privaten Anbau von Nutzpflanzen dienen. Obst und Gemüse sollten grundsätzlich ohne Einschränkung (der Arten, Sorten und Flächenanteile) angebaut werden können. Sehr unterschiedliche Detailnutzungen (insbesondere hinsichtlich bevorzugter Gemüsearten) sind deshalb zu bedenken. Eine Unterscheidung in aktuelle und potenzielle Nutzung ist bei der Bewertung einer tatsächlich als ‚Nutzgarten‘ genutzten Fläche nur nachrangig von Belang. Deshalb sind Standardannahmen gegenüber Betrachtungen des Einzelfalls in seiner momentanen Ausprägung zu bevorzugen.

***Privater
Obst- und
Gemüse-
anbau***

***NICHT:
Erwerbs-
gartenbau /
Ackerbau***

***Reine
Nutzgärten***

In ‚**Haus- und Kleingärten**‘ stellt der Anbau von Nahrungspflanzen zum Eigenverzehr lediglich eine Teilnutzung dar. Da solche Gärten zugleich als Aufenthaltsbereich für spielende Kinder dienen können, sollte **zusätzlich eine integrative Betrachtung** des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze-Mensch in Verbindung mit dem Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (orale Aufnahme) durchgeführt werden (vgl. *Kapitel 9.1*).

Nutzpflanzenanbau als Teilnutzung

Integrative Betrachtung oraler Aufnahmepfade

Die Betrachtung des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze-Mensch ist sinnvollerweise in zwei Schritte zu unterteilen:

- Übergang des Schadstoffes aus dem Boden der Anbaufläche in oder auf die Nutzpflanze (Schadstoffübergang Boden-Nutzpflanze; vgl. *Kapitel 7.1.1*) und
- Schadstoffaufnahme des Menschen durch den Verzehr der dort angebauten Nutzpflanzen (Gemüse und Obst) (Schadstoffaufnahme Nutzpflanze-Mensch; vgl. *Kapitel 7.1.2*).

Schadstoffübergang Boden-Nutzpflanze

Schadstoffaufnahme durch Verzehr

Generell ist vorab zu prüfen, ob von der Fläche ausgehende Gefahren eventuell mit einfachen Mitteln (vgl. *Kapitel 7.5*) abgewehrt werden können (z. B. Einschränkung des Nutzpflanzenanbaus auf bestimmte Arten oder auf eine bestimmte Anbaufläche) und eine Detailuntersuchung für diesen Wirkungspfad dann entbehrlich ist (§ 10 Abs. 5 BBodSchV).

Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze

Die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze haben im Kontext dieser Arbeitshilfe insbesondere den Schutz der menschlichen Gesundheit beim Verzehr von Obst und Gemüse aus dem Eigenanbau in Privatgärten zu gewährleisten. Die Vermarktungsfähigkeit von pflanzlichen Nahrungs- und Futtermitteln aus der landwirtschaftlichen Produktion und Ertragsrückgänge aufgrund phytotoxischer Wirkungen bestimmter Schadstoffe sind nicht Gegenstand der Arbeitshilfe.

Soweit Datengrundlagen vorhanden sind, wurde bei der Prüfwertableitung anhand von Modellannahmen zum Verzehr von Obst und Gemüse aus Privatgärten überprüft, dass bei Unterschreiten der Prüfwerte eine gefahrlose Nutzung eines privaten Gartens zur Eigenversorgung mit Obst und Gemüse betrieben werden kann.

Bei Überschreitung von Prüfwerten kann die Gefährdung im Einzelfall anhand der Modelle zur Größe der Anbaufläche (vgl. *Kapitel 7.3.2*) sowie zum Pflanzentransfer und zu Verzehrsgewohnheiten überprüft werden (vgl. *Anhang 3*).

7.1.1. Schadstoffübergang vom Boden in und auf Nutzpflanzen

Schadstoffe können prinzipiell über drei verschiedene Teilpfade vom Boden in oder auf Pflanzen übergehen (vgl. *Abbildung 4*):

- Aufnahme von gelösten Stoffen aus dem Bodenwasser über die Wurzeln und Verteilung der Substanzen in der Pflanze („systemischer Pfad“, vorrangig z. B. bei Cadmium).
- Aufnahme von Substanzen aus der bodennahen Atmosphäre über Spaltöffnungen (Stomata) bzw. die Wachsschicht (Kutikula) und Verteilung innerhalb des pflanzlichen Gewebes („Gaspfad“, z. B. bei PCB).
- Ablagerung von schadstoffhaltigem Boden bzw. Staub auf der Pflanzenoberfläche und zum Teil Anlagerung bzw. Aufnahme über die Kutikula („Verschmutzungspfad“ oder/und Deposition; relevant z. B. bei Benzo(a)pyren).

Teilpfade

Systemischer Pfad

Gaspfad

Verschmutzungspfad

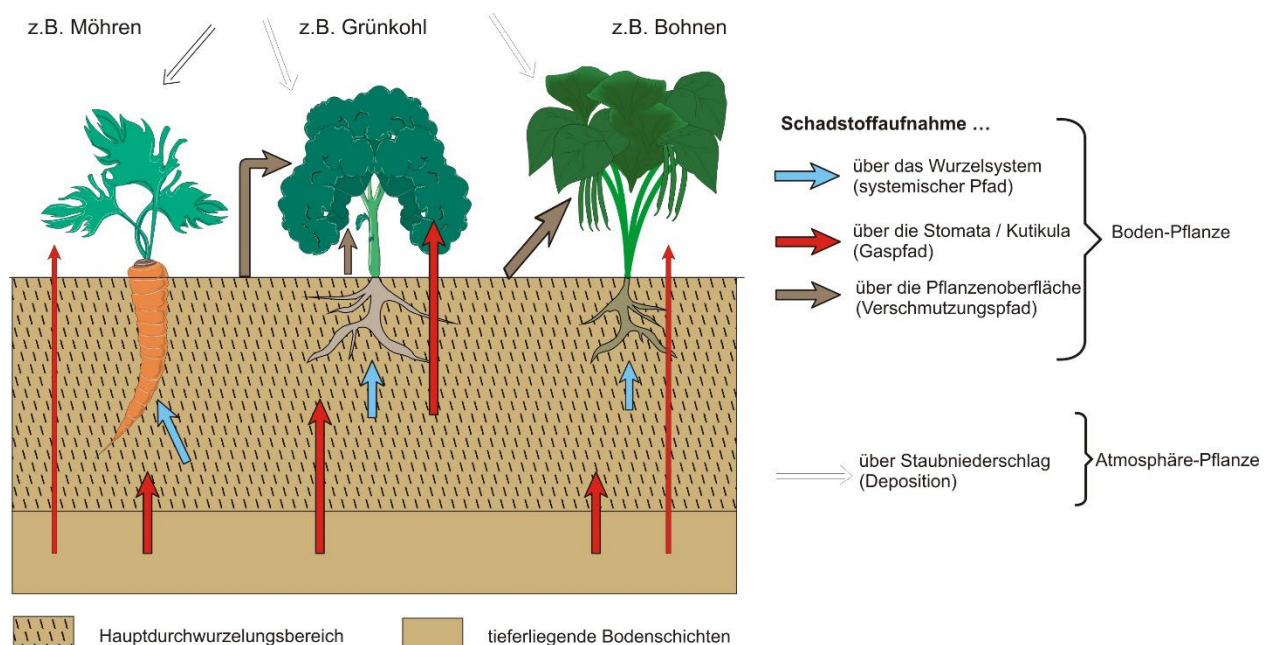


Abbildung 4: Schematische Darstellung der relevanten Teilpfade beim Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze (LANUV 2014)

Je nach primär zu betrachtendem Aufnahmepfad und Schadstoff nehmen verschiedene Gemüsearten Schadstoffe in unterschiedlichem Maße auf. In der nachfolgenden *Tabelle 9* findet sich eine Zusammenfassung der potenziellen Aufnahmepfade für verschiedene Schadstoffe in Nutzpflanzen.

Tabelle 9: Regelannahmen zur Relevanz der verschiedenen Aufnahmepfade für ausgewählte Schadstoffe (nach LANUV 2014)

	Boden-Pflanze			Atmosphäre-Pflanze
	Systemischer Pfad	Verschmutzungspfad	Gaspfad	Deposition
	Boden- und pflanzenbedingte Einflussfaktoren können im Einzelfall zu Abweichungen führen	Relevanz vor allem für Pflanzen mit großer und / oder schlecht zu reinigender Oberfläche bis ca. 40 cm über Geländeoberkante	Relevanz für Pflanzen mit großer Blattoberfläche bis 5 cm über Geländeoberkante	Zusätzliche Relevanz im Umfeld von Emissionsquellen vor allem für Pflanzen mit großer und / oder schlecht zu reinigender Oberfläche
zumeist in geringem Umfang relevant:	Blei ¹⁾ Chrom Arsen Quecksilber PAK ⁵⁾ PCB	-	-	-
zumeist mäßig relevant:	Nickel Thallium	-	Quecksilber ³⁾ PAK ⁶⁾ PCB ⁷⁾	-
relevant:	Cadmium Blei ²⁾	Arsen Blei Cadmium Chrom Nickel Quecksilber ⁴⁾ Thallium PAK PCB	-	Arsen Blei Cadmium Chrom Nickel Quecksilber ⁴⁾ Thallium PAK ⁵⁾ PCB
1) bei pH-Werten > 5		5) Benzo(a)pyren und höher kondensierte PAK		
2) bei pH-Werten < 5		6) 2–3 Ring-PAK		
3) elementar und organisch gebunden		7) vor allem gering chlorierte PCB		
4) anorganisch				

Der Gaspfad und die Deposition stellen in der Regel Sonderfälle dar, die nur unter bestimmten Konstellationen vertieft zu betrachten sind. Allerdings sollte die zusätzliche Aufnahme **immissionsbedingter Schadstoffe** aus der Atmosphäre (Deposition oder Schwebstaub) einer gesonderten Betrachtung unterzogen werden, wenn Hinweise auf möglicherweise relevante Einträge z. B. aus Immissionsmessungen, Luftreinhalteplänen etc. vorliegen. Sofern Informationen über immissionsbedingte Hintergrundbelastungen von Pflanzen vorliegen, ist dies bei der Bewertung des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze zu berücksichtigen (vgl. *Kapitel 9.2.3*). Dieses ist insbesondere von Bedeutung, wenn in der Detailuntersuchung Untersuchungen der Ernteprodukte in Erwägung gezogen werden oder bodenbezogene Maßnahmen geplant sind, die bei einer Immissionsbelastung ggf. keine Wirkung entfalten würden.

Wie stark sich Schadstoffe in Ernteprodukten anreichern, ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig (vgl. *Anhang 3: Kapitel 2.3.1*).

- Die Menge der systemisch aufgenommenen Schadstoffe variiert sehr spezifisch zwischen den Pflanzenarten und -sorten.
- Es kann zu erheblichen Unterschieden im Hinblick auf die Verlagerung innerhalb der Pflanze in unterschiedliche **Pflanzenorgane** kommen.
- Im Hinblick auf den Verschmutzungspfad spielt die **Morphologie** einer Pflanzenart oder -sorte eine große Rolle (Wuchsform, Blattoberfläche). In der Regel werden Nutzpflanzen für den privaten Verzehr zwar küchenfertig aufbereitet (gewaschen und ggf. geschält), wobei zumindest ein Teil der Verschmutzungen entfernt wird. Ein Teil der Anhaftungen kann jedoch auch bei gründlicher Reinigung der Ernteprodukte nicht vollständig entfernt werden, insbesondere bei Pflanzen, die durch ihre morphologischen Eigenschaften wie z. B. eine krause oder empfindliche Oberfläche schwer zu reinigen sind (Petersilie, Grünkohl, Erdbeeren etc.).
- Einen Einfluss auf die Schadstoffgehalte in Nutzpflanzen hat in der Regel auch die **Witterung**. Die systemische Aufnahme schwankt je nach Feuchtegehalt des Bodens, Regenereignisse können darüber hinaus zu einem Aufspritzen von Bodenmaterial und damit zu einer stärkeren Verschmutzung führen.
- Hinzu kommen Einflüsse der Anbau-, Bearbeitungs- oder Düngemethoden.

Eine Reihe von Pflanzenarten lassen sich schadstoffspezifisch einzelnen Anreicherungsklassen zuordnen. Im *Anhang 3* finden sich dazu Übersichtstabellen, in denen die einzelnen Gemüse-Arten maßgeblich auf Grundlage des Transferfaktors den **Anreicherungsklassen** „hoch“, „mittel“ oder „niedrig“ zugeordnet wurden (vgl. *Kapitel 7.2.4* und *Anhang 3*).

Zur Ermittlung der **bodenabhängigen Expositionsbedingungen** können – neben den Gesamtgehalten (vgl. *Kapitel 7.2.1*) – Untersuchungen zu den **pflanzenverfügbaren Schadstoffgehalten** im Boden (vgl. *Kapitel 7.2.2*) sowie zu **pflanzenverfügbarkeitsbestimmenden Bodenfaktoren** (vgl. *Kapitel 7.2.3*) herangezogen werden.

**Anreicherungs-
klassen für
verschiedene Ge-
müsearten**

**Pflanzen-
verfügbar-
keit**

Im Hinblick auf längerfristig gültige Aussagen sind einzelne Untersuchungsergebnisse zur **gegenwärtig gemessenen Belastung von Pflanzen** (Pflanzenuntersuchungen) aufgrund der extrem großen Variabilität der anzutreffenden Pflanzengehalte nur wenig belastbar. Sollen solche Untersuchungen dennoch durchgeführt werden, sind für gesicherte Aussagen i. d. R. Pflanzen zu untersuchen, die die jeweiligen Schadstoffe bevorzugt anreichern bzw. die besonders häufig verzehrt werden – und das über mehrere Jahre. Da Entscheidungen meist zeitnah getroffen werden müssen, ist das jedoch i. d. R. kaum mit verhältnismäßigem Aufwand möglich (vgl. hierzu auch *Kapitel 7.4*).

**Pflanzen-
unter-
suchungen**

7.1.2. Schadstoffaufnahme Nutzpflanze-Mensch

Wenn Nutzpflanzen auf schadstoffbelasteten Flächen angebaut werden und die Schadstoffe vom Boden in die Nutzpflanzen (Gemüse und Obst) gelangen, hängt die Schadstoffaufnahme des Menschen auch von den **nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen** ab, die charakterisiert werden durch die **Anbau- und Verzehrsgewohnheiten** der Nutzenden. Nähere Ausführungen finden sich in *Kapitel 7.3* und *Anhang 3*.

**Anbau- und
Verzehrsmengen**

Für die Ableitung der Prüf- und Maßnahmenwerte nach BBodSchV wurde eine Standardgröße der Anbaufläche angenommen, auf der eine durchschnittliche Gemüseauswahl angebaut und übliche Ernteerträge erzielt werden. Bei Einhaltung der Prüfwerte nach BBodSchV ist sichergestellt, dass gesundheitliche Beeinträchtigungen beim Nutzenden des Gartens **bei üblicher Bandbreite** der angebauten Obst- und Gemüsearten sowie **gängigen Verzehrsmengen** auszuschließen sind.

Da unterschiedliche Pflanzenarten Schadstoffe unterschiedlich stark akkumulieren, kommt der Frage des zu berücksichtigenden Anbauspektrums (vgl. *Kapitel 7.3.1*) und der Größe der Anbaufläche (vgl. *Kapitel 7.3.2*) besondere Bedeutung zu.

**Nutz-
pflanzen-
spektrum
und Anbau-
fläche**

Sind besondere Anbaugewohnheiten zu berücksichtigen oder ist eine integrative Beurteilung der oralen Schadstoffaufnahme über mehrere Wirkungspfade erforderlich (z. B. Cadmium und Thallium), sollte die Schadstoffaufnahme des Menschen durch den Verzehr von Nutzpflanzen für den Einzelfall quantifiziert werden

**Sonderfälle
und
Vorlieben**

(vgl. *Anhang 3* und *Kapitel 9.1*). Dies setzt voraus, dass die **Schadstoffgehalte der zu verzehrenden Nutzpflanzen**, die auf der zu untersuchenden Fläche angebaut werden, bekannt sind oder abgeschätzt werden können.

Da Untersuchungen der angebauten Nutzpflanzen vergleichsweise störanfällig sind (vgl. *Kapitel 7.4*), sollten hierzu i. d. R. vorrangig fachlich begründete Transferabschätzungen (vgl. *Kapitel 7.2.4*) ausgehend von den Schadstoffgehalten des Bodens durchgeführt werden.

Transferabschätzungen...

Als Vorteil dieser Vorgehensweise ist anzusehen, dass die mögliche, langfristig im Mittel zu erwartende Schadstoffaufnahme für das Gesamtsystem Boden-Nutzpflanze-Mensch statistisch gut erfasst und beschrieben werden kann und die mit der Modellierung verbundene Bewertung grundsätzlich nachvollziehbar ist. Hierzu ist es jedoch erforderlich, bestimmte Annahmen zu treffen, die in die Anwendung von Transferabschätzungen und -modellen einfließen (vgl. *Kapitel 7.2.4*).

...Boden-Nutzpflanze

7.2. Ermittlung bodenabhängiger Expositionsbedingungen

Ausgangspunkt zur Bestimmung von Schadstoffen im Boden ist i. d. R. die Untersuchung der Gesamtgehalte. Standortspezifische Bodeneigenschaften oder -bestandteile können dabei die Pflanzenverfügbarkeit eines Schadstoffes im Boden und damit die Schadstoffanreicherung in Nutzpflanzen beeinflussen.

Verfügbarkeit für die Pflanze

7.2.1. Gesamtgehalte

Die Gesamtgehalte der Schadstoffe im Boden beschreiben grundsätzlich das maximale Potenzial, das zur Schadstoffbelastung von Nutzpflanzen führen kann. Für bestimmte Schadstoffe, wie beispielsweise **Arsen, Quecksilber oder Benzo(a)pyren** sind die Gesamtgehalte maßgeblich für die Bewertung des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze-Mensch (vgl. *Tabelle 10*), da entweder der Verschmutzungspfad im Vordergrund der Bewertung steht (vgl. *Kapitel 7.1.1*) oder kaum Zusammenhänge mit pflanzenverfügbaren Gehalten festgestellt werden konnten.

Ausgangspunkt Feststoffgehalte

In der Regel liegen für die zu untersuchende Fläche bzw. Teilfläche bereits aus der orientierenden Untersuchung die Gesamtgehalte aus der relevanten Fraktion (< 2 mm) vor. Die Auswertung der Ergebnisse in der orientierenden Untersuchung ist Grundlage für die Detailuntersuchung und legt den Bedarf der Untersuchungsschritte fest. Erlauben die Ergebnisse keine ausreichend sicheren Aussagen zur flächen- und tiefenbezogenen Verteilung der Schadstoffe oder zum Schadstoffinventar, sind ggf. Nachuntersuchungen zur Bestimmung der Gesamtgehalte erforderlich (vgl. *Kapitel 10.1*).

Zur Beurteilung der Gesamtgehalte für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze enthält die BBodSchV Prüfwerte, denen die Untersuchungsergebnisse gegenübergestellt werden können. Die Prüfwerte gelten für die Beurteilung der Schadstoffgehalte in Nutzgärten in der oberen **Bodentiefe** (0 bis 30 cm bei Anwendung der Bodentiefen nach Anlage 3 Tabelle 3 BBodSchV). **Für größere (d. h. die jeweils unteren) Bodentiefen** gelten nach § 15 Abs. 1 Satz 3 BBodSchV die **1,5-fachen Werte**.

Auswertung der Ergebnisse

Tabelle 10: Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze, Szenario ‚Nutzgärten‘, zur Beurteilung von Gesamtgehalten (in mg/kg TM)

Parameter	Methode ¹⁾	Prüfwert
Arsen	Gesamtgehalt (KW)	200 ²⁾
Quecksilber	Gesamtgehalt (KW)	5
Benzo(a)pyren	Gesamtgehalt	1
DDT	Gesamtgehalt	1
¹⁾ Extraktionsverfahren KW = Königswasser ²⁾ bei Böden mit teilweise reduzierenden Verhältnissen gilt ein Prüfwert von 50 mg/kg		

Für **Quecksilber** sowie für **Arsen** basiert die Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze lediglich auf Ergebnissen der Königswasser-Extraktion. Bei bundesweiten Auswertungen der TRANSFER-Datenbank konnten nur geringe Zusammenhänge zwischen Boden- und Pflanzengehalten (vgl. LABO 1998) ermittelt werden, so dass die Prüfwerte im Wesentlichen auf Abschätzungen von üblichen Hintergrundbelastungen basieren.

Quecksilber und Arsen

Für **Arsen** liegt eine Arbeitshilfe vor, die weiterführende Hilfestellungen für die Gefahrenbeurteilung im Hinblick auf einen Übergang von Arsen vom Boden in oder auf Nahrungs- und auch Futterpflanzen gibt (LABO 2013).

Für **Chrom** existiert kein Beurteilungswert für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze. Die Relevanz für die Beurteilung entsprechender humantoxischer Wirkungen über den Pflanzenpfad ist eher nachrangig.

Chrom

Für **Benzo(a)pyren** wurde im Rahmen der Prüfwertableitung ein Wert von 1 mg/kg Boden festgelegt. Relevant ist hier insbesondere eine mögliche Anhaftung belasteter Bodenpartikel. Erst ab sehr hohen Gehalten an Benzo(a)pyren im Boden (> 15 mg/kg Boden) kann zusätzlich auch der systemische Pfad Relevanz erlangen, so dass in dem Fall Empfehlungen zum verschmutzungsarmen Anbau ggf. keinen ausreichenden Schutz bieten können.

**Benzo(a)-
pyren**

Für **PAK** liegen umfangreiche Versuche vor, die belegen, dass insbesondere die atmosphärische Deposition sowie die Verschmutzung mit kontaminierten Bodenpartikeln bei Pflanzenarten eine Rolle spielen, deren oberirdisch wachsende Organe als pflanzliche Nahrung dienen. Dabei sind Blattgemüsearten wegen ihrer großen Oberfläche und ihrer wachsartigen Kutikula besonders anfällig für Verschmutzungen.

Aus Böden gelangen PAK z. B. durch Windverfrachtung oder durch Auf- bzw. Anspritzen bei Starkregenereignissen auf pflanzliche Oberflächen. Sie werden dort zum Teil absorbiert („Direktübergang“) und lassen sich auch durch Waschen kaum entfernen. Eine ausgeprägte systemische Aufnahme von PAK aus dem Boden ist erst bei sehr hohen Gehalten anzunehmen, so dass Untersuchungen zur systemischen Pflanzenverfügbarkeit in der Regel nicht zielführend sind.

Wie die Ergebnisse von Freilandversuchen weiterhin zeigten, wurden die humantoxikologisch abgeleiteten tolerablen mittleren Pflanzengehalte von 14,4 µg Benzo(a)pyren/kg TM (basierend auf der Annahme, dass ca. 300 g Frischgemüse pro Person und Tag verzehrt werden) bereits bei Bodengehalten von 2 mg/kg in einigen Pflanzenarten (z. B. Spinat, Blattsalat) zum Teil erheblich überschritten (DELSCHEN et al. 1999).

7.2.2. Pflanzenverfügbare Gehalte

Mithilfe der **Ammoniumnitratextraktion** nach DIN ISO 19730 lässt sich abschätzen, inwieweit bestimmte anorganische Schadstoffe aus dem Boden für die Aufnahme in Nutzpflanzen verfügbar sind.

**Extraktion
mit
Ammoniumnitrat**

In der Regel werden die Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit von Schadstoffen im Rahmen der orientierenden Untersuchung durchgeführt. Soweit der Wirkungspfad erst in der Detailuntersuchung vertieft untersucht wird, sind zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze-Mensch die Untersuchungen auf Pflanzenverfügbarkeit zu ergänzen. Es können dafür beispielsweise Rückstellproben genutzt werden (vgl. *Kapitel 10.1*).

Falls keine oder nur unzureichende Untersuchungen des Bodens zu pflanzenverfügbaren Gehalten im Ammoniumnitratextrakt vorliegen oder deren Ermittlung zu aufwändig erscheint, können sie hilfsweise über gebietspezifische oder allgemeine statistische Regressionsmodelle abgeschätzt werden (LUA NRW 2005; vgl. *Anhang 3: Kapitel 2.3.1*). Bei Nutzung solcher Modelle sind jedoch **immer gründliche Prüfungen** zur Übertragbarkeit und Anwendbarkeit auf die zu beurteilenden Standorte anzuraten. Dazu gehören die Überprüfung von Ursache und Quelle der Schadstoffbelastungen, der Abgleich äußerer Rahmenbedingungen sowie eine **stichprobenhafte messtechnische Überprüfung der Pflanzenverfügbarkeit**.

**Abschätzung
mittels Re-
gressions-
modellen**

Zur Beurteilung der pflanzenverfügbaren Gehalte für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze enthält die BBodSchV Prüfwerte für Blei und Thallium. Für Cadmium sind hierfür Maßnahmenwerte festgelegt, die nach Art der angebauten Nutzpflanzen differenziert sind (vgl. *Tabelle 11*). Die Prüf- und Maßnahmenwerte gelten für die Beurteilung der Schadstoffgehalte in Nutzgärten in der oberen Bodentiefe (0 bis 30 cm bei Anwendung der Bodentiefen nach Anlage 3 Tabelle 3 BBodSchV). **Für größere (d. h. die jeweils unteren) Bodentiefen** gelten nach § 15 Abs. 1 Satz 3 BBodSchV die **1,5-fachen Werte**. Als Extraktionsverfahren ist nach Anlage 2 Tabelle 6 BBodSchV eine Ammoniumnitratextraktion vorgegeben.

**Prüf- und
Maßnah-
menwerte
der
BBodSchV**

Tabelle 11: Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze¹⁾, Szenario ‚Nutzgärten‘, zur Beurteilung von pflanzenverfügbaren Gehalten (in mg/kg TM)

Parameter	Prüfwert	Maßnahmenwert
Cadmium		0,04 / 0,1 ²⁾
Blei	0,1	
Thallium	0,1	
¹⁾ Extraktionsverfahren AN = Ammoniumnitratextraktion nach DIN ISO 19730 ²⁾ Auf Flächen mit Brotweizenanbau oder Gemüseanbau gilt ein Maßnahmenwert von 0,04 mg/kg; ansonsten gilt ein Maßnahmenwert von 0,1 mg/kg		

Da **Cadmium** vergleichsweise gut von Pflanzen aus dem Boden aufgenommen werden kann, kommt der Aufnahme von Cadmium über den Verzehr von Nutzpflanzen eine bedeutende Rolle zu. Infolgedessen wurde für Cadmium im Rahmen der BBodSchV neben den Maßnahmenwerten für Nutzgärten (auf Basis der pflanzenverfügbaren Gehalte) ergänzend auch ein **Prüfwert für ‚Haus- und Kleingärten‘** von 2,0 mg/kg auf Basis der Gesamtgehalte (Königswasserextrakt) abgeleitet, der die gleichzeitige Aufnahme von Cadmium über den Wirkungspfad

**Cadmium
integrativ**

Boden-Mensch/Direktkontakt und den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch integrativ bewertet (vgl. *Kapitel 9.1*).

Für **Cadmium** gelten enge statistische Zusammenhänge für die Transferbeziehungen zwischen Ammoniumnitrat-extrahierbaren Gehalten im Boden und Pflanzengehalten. Eine Abschätzung für Haus- und Kleingärten (vgl. DELSCHEN & LEISNER-SAABER 1998, LABO 1998) zeigt, dass bei Bodengehalten unterhalb von 0,04 mg/kg mit hoher Wahrscheinlichkeit keine toxikologisch relevante Zusatzbelastung des Menschen durch den Verzehr von selbsterzeugtem Gemüse zu erwarten ist.

Da Nutzpflanzen **Blei** kaum systemisch aufnehmen, trägt der Verzehr von Nahrungspflanzen nur in sehr geringem Maße zur gesamten Bleiaufnahme des Menschen bei. Da dem Direktpfad (orale Bodenaufnahme) meist überragende Bedeutung zukommt, erübrigt sich eine integrative Betrachtung beider Wirkungspfade für diesen Stoff in der Regel.

Blei

Auch für **Blei** wurde ein statistischer Zusammenhang zwischen Ammoniumnitrat-extrahierbaren Bodengehalten und Pflanzengehalten ermittelt, so dass ein Prüfwert von 0,1 mg/kg Boden (Ammoniumnitratextrakt) abgeleitet wurde, bei dessen Überschreitung mit 20%iger Wahrscheinlichkeit der (zum Zeitpunkt der Ableitung gültige) doppelte Lebensmittelrichtwert (ZEBS 1997) in mäßig anreichernden Gemüsepflanzen überschritten wird.

Für **Nickel** liegt bislang kein Prüfwert für Nutzgärten vor; es wurde lediglich im Hinblick auf Wachstumsbeeinträchtigungen ein Prüfwert für Ackerbauflächen (Ammoniumnitrat-extrahierbarer Gehalt) abgeleitet. Entsprechende Prüfwerte sind in Anlage 2 Tabelle 8 BBodSchV auch für **Arsen**, **Kupfer** und **Zink** genannt. Die Betrachtung von Wachstumsbeeinträchtigungen von (Nutz-)Pflanzen ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeitshilfe.

Nickel

Für **Nickel** ist bekannt, dass es sich im Gegensatz zu anderen Schwermetallen tendenziell in den generativen Pflanzenteilen (z. B. Bohnen) anreichert. Transferfaktoren Boden/Pflanze werden in der Literatur (vgl. LÜBBEN & SAUERBECK 1991) in der Größenordnung von 0,01 bis 0,5 angegeben. Auswertungen der TRANSFER-Datenbank (vgl. LABO 1998) hinsichtlich phytotoxischer (pflanzentoxischer) Wirkungen haben an der empfindlichsten Nutzpflanze (Spinat) Zusammenhänge zwischen Ammoniumnitrat-extrahierbaren Gehalten und Pflanzengehalten ergeben, die jedoch keinen Prüfwert ableiten ließen.

Im Februar 2015 veröffentlichte die EFSA ein wissenschaftliches Gutachten zu den Risiken für die menschliche Gesundheit durch Nickel in Lebensmitteln, insbesondere Gemüse, sowie im Trinkwasser (EFSA 2015). Die EFSA ermittelte einen sicheren Höchstwert (Tolerable Daily Intake – TDI) von 2,8 µg/kg KG*d. Ausgehend von aktuellen Werten für die mittlere bzw. erhöhte Exposition kamen die EFSA-Sachverständigen zu dem Schluss, dass die derzeitige ernährungsbedingte Exposition gegenüber Nickel Bedenken aufwerfen kann.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit oder entsprechender modellhafter Annahmen (vgl. *Anhang 3*) können für standortspezifische Abschätzungen des Schadstofftransfers vom Boden in die Pflanze (vgl. *Kapitel 7.2.4*) hinzugezogen werden.

Abschätzung des Schadstofftransfers

Unter Berücksichtigung von Daten zum Verzehrverhalten der Nutzenden (vgl. *Kapitel 7.3*) können dann **Schadstoffzufuhrmengen** ermittelt werden, die im Rahmen integrativer Betrachtungen der oralen Schadstoffaufnahme über die Wirkungspfade Boden-Mensch/Direktkontakt und Boden-Nutzpflanze-Mensch abschließend zu bewerten sind (vgl. *Kapitel 9.1*).

Schadstoffzufuhrmengen

7.2.3. Pflanzenverfügbarkeitsbestimmende Bodenfaktoren

Ist im Rahmen der orientierenden Untersuchung der Nachweis hoher Schadstoffgesamtgehalte erbracht worden, können **einfach zu bestimmende Bodenparameter** Hinweise auf deren Verfügbarkeit geben. Diese Untersuchungen sind allerdings nur dann sinnvoll, wenn die systemische Schadstoffaufnahme in Pflanzen über das Wurzelsystem im Vordergrund steht (vgl. *Kapitel 7.1.1*).

Bodenparameter

Einflussfaktoren

Die Pflanzenverfügbarkeit von Stoffen im Boden wird von einer Reihe von Bodenparametern beeinflusst (vgl. im Detail z. B. SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 2018, BLUME et al. 2010). Insbesondere sind zu nennen:

- pH-Wert (z. B. relevant bei Schwermetallen),
- organische Substanz (z. B. relevant bei organischen Schadstoffen) und
- Korngrößenverteilung bzw. Tonanteil (relevant bei anorganischen und organischen Schadstoffen) sowie
- reduzierende Bedingungen infolge Vernässung (beispielsweise bei Arsen relevant).

Bei **pH-Werten** oberhalb von ca. pH 5 (z. B. Blei) bis pH 6 (z. B. Cadmium oder Nickel) nimmt die Verfügbarkeit von Schwermetallen in der Regel ab (BLE 2020). So kann beispielsweise auf kontaminierten Standorten, auf denen aufgrund der Historie mit gut gepufferten Substraten und konstant hohen pH-Werten zu rechnen ist (z. B. durch Schlackenrückstände) trotz hoher Metallgesamtgehalte der Transfer Boden-Nutzpflanze von geringer Bedeutung sein. Andererseits lässt sich bei hohen mobilen Schwermetallgehalten aus der Kenntnis des pH-Wertes in Verbindung mit dem Gesamtgehalt beurteilen, ob sich durch eine pH-Wert-Erhöhung

pH-Werte und Schwermetallverfügbarkeit

als einfache Maßnahme der Gefahrenabwehr der mobile Schwermetallgehalt bewertungsrelevant verringern lässt.

Hohe Anteile **organischer Substanz** (ermittelt beispielsweise als TOC) können insbesondere organische Schadstoffe sorbieren, so dass diese dann für Pflanzen sowohl über das Wurzelsystem als auch den Gaspfad kaum verfügbar sind.

TOC

Ebenso können in Böden mit hohem **Tonanteil** Schadstoffe gebunden und die Aufnahme über das pflanzliche Wurzelsystem vermindert werden. Die exakte Bestimmung der Tonanteile mittels Korngrößenanalysen ist i. d. R. jedoch sehr aufwändig. In vielen Fällen reicht aber eine akkurate Bestimmung der Bodenart gemäß der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 (AD-HOC-AG BODEN 2005) mittels Fingerprobe aus. Die Kenntnis von Bodenart und TOC-Gehalt ist zudem für die Zuordnung des Ziel-pH-Wertes, dem beispielsweise in der Landwirtschaft und im Gartenbau eine große Bedeutung zukommt, notwendig (DLG 2022). Dieser pflanzenbaulich orientierte Ziel-pH-Wert beschreibt einen pH-Wert-Bereich, der wiederum Bedeutung im Hinblick auf die Pflanzenverfügbarkeit von Schadstoffen hat (siehe oben).

**Bindung
je nach
Tonanteil**

Als Fazit ist festzuhalten, dass die Bestimmung der die Verfügbarkeit beeinflussenden Bodenparameter (pH-Wert; organische Substanz (TOC), Korngrößenverteilung bzw. Tonanteil) **methodisch einfach und kostengünstig** ist und zusätzliche Anhaltspunkte für die Bewertung des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze-Mensch liefert. Zumindest der pH-Wert sollte daher in keiner Bodenuntersuchung fehlen.

**pH-Wert als
Standard-
messung**

Bei der Bewertung ist zu berücksichtigen, dass der pH-Wert keine langfristig stabile Größe darstellt, sondern durch unterschiedliche Einflüsse (Säureeinträge, Kalkung, Redoxreaktionen etc.) veränderbar ist und einer zeitlich begrenzten Gültigkeit unterliegt.

**pH-Wert
temporär**

Der Aufnahmepfad über die Anlagerung und Auflagerung von Schadstoffen auf (auch oberirdische) Pflanzenteile (Verschmutzungspfad) lässt sich mit Hilfe verfügbarkeitsbestimmender Bodenparameter nicht näher abschätzen.

**Verschmut-
zung**

7.2.4. Transferabschätzung Boden-Nutzpflanze

Zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze-Mensch interessiert letztendlich der Schadstoffgehalt im Ernteprodukt. Liegen keine belastbaren und reproduzierbaren Daten aus Pflanzenuntersuchungen vor (vgl. *Kapitel 7.4*), sind Transferabschätzungen erforderlich, mit Hilfe derer **Schadstoffgehalte in angebauten Nutzpflanzen (C_{Pfl})** auf Basis von Untersuchungsergebnissen des Bodens (vgl. *Kapitel 7.2.1 bis 7.2.3*) überschlägig berechnet werden können.

Als Grundlage für Transferabschätzungen können Auswertungen dienen, die im Rahmen der Prüfwertableitung vorgenommen wurden. Dabei wurden mit Hilfe von Regressionsfunktionen **Transferbeziehungen** für die Schadstoffanreicherung unterschiedlicher Pflanzenarten aufgestellt. Auf dieser Grundlage wurden Klassen für Nahrungspflanzen unterschiedlichen Anreicherungsverhaltens gebildet, für die jeweils Transferfaktoren bestimmt und Prüf- bzw. Maßnahmenwerte abgeleitet wurden (vgl. *Anhang 3: Kapitel 2.3.1*).

**Modell-
betrach-
tung**

**Zusammen-
hangs-
analysen**

Regressionsmodelle

Die Datenbank TRANSFER des Umweltbundesamtes (UBA) enthält zurzeit ca. 320.000 Datenpaare Boden/Pflanze, die sich aus Kombinationen von ca. 120 Pflanzenarten bzw. -teilen und verschiedenen Bodenextraktionsmitteln ergeben. Zum Teil existieren auch zu einem Pflanzenergebnis mehrere zugehörige Bodenuntersuchungsergebnisse (Anwendung verschiedener Extraktionsmittel an der gleichen Bodenprobe). Eine Auswertung der Datenbank wurde mit fachlicher Begleitung durch die LABO im Auftrag des UBA durchgeführt (vgl. KNOCHÉ et al. 1999, LABO 1998, UBA 2015).

Für Blei und Cadmium sind in der TRANSFER-Datenbank Daten aus umfassenden Erhebungsuntersuchungen im Freiland hinterlegt, die Grundlage für statistische Regressionsmodelle bilden und mit deren Hilfe Gruppen von Pflanzenarten mit unterschiedlichem Anreicherungsvermögen unterschieden werden konnten.

Diese Regressionsmodelle integrieren und mitteln i. d. R. zahlreiche Einflussfaktoren (wie Region, Witterung, Pflanzensorten etc.), die die erkannten Zusammenhänge beeinflussen. Dennoch sollte die Unsicherheit einer Abschätzung über Regressionsmodelle bei der Beurteilung berücksichtigt werden. Hierfür können z. B. statistische Gütemaße (z. B. Konfidenzbänder) herangezogen werden. Ggf. ist auch zu prüfen, ob eine Regionalisierung der Transferbeziehungen die Aussageunsicherheit verbessern kann.

Für einige Stoffe reichte die Anzahl der belastbaren Datensätze für eine Berechnung von Regressionsfunktionen bisher nicht aus. Trotzdem sind Aussagen zum Anreicherungsverhalten möglich. Details und schadstoffspezifische Übersichtstafeln zum Anreicherungsverhalten zahlreicher Nutzpflanzen sowie Berechnungsmodelle für Transferabschätzungen mit Beispielen für Cadmium und Blei finden sich in *Anhang 3*.

**Abschät-
zung
pflanzen-
verfügbarer
Gehalte**

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, die Grundlagendaten der Transferabschätzungen anhand von Pflanzenuntersuchungen vor Ort zu überprüfen und angepasste Modelle zu berechnen. Dieses Vorgehen erfordert jedoch einen erheblichen Aufwand sowohl bei der Planung als auch bei der Durchführung – nicht zuletzt, weil i. d. R. mehrere Anbaujahre zu berücksichtigen sind (vgl. *Kapitel 7.4*). Auch wenn für einen Schadstoff bisher keine entsprechenden Datengrundlagen vorliegen, müssten Transferbeziehungen – aufbauend auf neu zu erhebenden oder auszuwertenden Datenpaaren – im Einzelfall abgeleitet werden.

Grundsätzlich können Regressionsfunktionen bzw. Transferabschätzungen für vertiefte Sachverhaltsermittlungen verwendet werden, sofern gegenüber den Standardannahmen abweichende Bedingungen vorliegen oder Schadstoffe bisher noch nicht bewertet wurden. In der vorliegenden Arbeitshilfe bilden Transferabschätzungen die Grundlage für Expositionsabschätzungen zur Schadstoffzufuhr über den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch bzw. bei einer integrativen Pfadbetrachtung.

Gemessene oder abgeschätzte **Pflanzengehalte** können mit lebensmittelrechtlichen Vorgaben oder anderen Beurteilungsmaßstäben (Daten der Lebensmittelüberwachung etc.) abgeglichen werden. Hierbei ist auf die unterschiedlichen Zielsetzungen (Verbraucherschutz, Gefahrenabwehr) der jeweiligen rechtlichen Regelungen hinzuweisen, die mit unterschiedlichen Schutzniveaus (Vorsorge / Gefahrenabwehr) verknüpft sind.

Da Transferabschätzungen aufwändig sind, sollte alternativ immer geprüft werden, ob die Gefahr auch mit einfachen Mitteln (z. B. Anbaubeschränkungen, pH-Wert-Anhebung) abgewehrt werden kann (vgl. *Kapitel 7.5*).

7.3. Ermittlung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen

Die Prüfung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen und der entsprechende Prüfwertevergleich führt entweder zum Ausräumen des Gefahrenverdachts im Hinblick auf den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch oder es

werden weitere Untersuchungsschritte erforderlich. Eine Möglichkeit zur Quantifizierung der Schadstoffaufnahme durch den Verzehr von Nutzpflanzen ist die Prüfung der **Anbaubedingungen und ggf. Verzehrsmengen**.

Die Schadstoffmenge, die ein Mensch über selbst angebaute Nutzpflanzen aufnimmt, ist von mehreren Faktoren abhängig:

- Dem **Spektrum angebauter Nutzpflanzen**, insbesondere den jeweiligen Anteilen an hoch-, mittel- und niedriganreichernden Arten (vgl. *Kapitel 7.3.1*).
- Den **Ernteerträgen**; i. d. R. wird von einem durchschnittlichen Ernteertrag ausgegangen. Näheres findet sich in *Anhang 3*.
- Der **Größe der Anbaufläche** (vgl. *Kapitel 7.3.2*). Diese ist im Zuge der Detailuntersuchung ggf. zu spezifizieren.
- Den **Verzehrsmengen** pro Kopf bzw. Person. Zur Abschätzung eines durchschnittlichen Pro-Kopf-Gemüseverzehr aus dem Eigenanbau in Kleingärten liegen Daten zu Anbau, Ernte, Verderb und Verzehr vor (vgl. LUA NRW 2001), die im Rahmen von Expositionsabschätzungen für alle möglichen Nutzergruppen verwendet werden können (Angaben in g/kg Körpergewicht und Tag; vgl. *Anhang 3*).

Ist bekannt, welche Schadstoffgehalte in Nutzpflanzen zu erwarten sind (vgl. *Kapitel 7.2.4*) oder nachgewiesen wurden (vgl. *Kapitel 7.4*), hängt die Schadstoffaufnahme des Menschen maßgeblich von der Zusammensetzung der auf der belasteten Fläche angebauten Nutzpflanzen sowie der Größe der Anbaufläche und der Personenzahl ab, aus der sich letztlich eine Verzehrsmenge pro Kopf ableiten lässt.

7.3.1. Nutzpflanzenspektrum

Als Grundlage zur Ableitung von Prüf- und Maßnahmenwerten für Nutzgärten wurde hinsichtlich der angebauten Nutzpflanzen ein **typisches Spektrum verschiedener Gemüsearten mit unterschiedlichem Anreicherungsverhalten** angenommen. Wird eine Detailuntersuchung durchgeführt, sollte eine Abschätzung erfolgen, ob diese Annahme plausibel ist oder ob in dem vorliegenden Einzelfall spezielle Besonderheiten zu beachten sind.

Schadstoff-
zufuhr über
Nutz-
pflanzen

Prüfung der
Anbaue-
wohnheiten

Werden auf einer Fläche beispielsweise nur **Obstbäume und -sträucher** angepflanzt, sind hohe Schadstoffgehalte im Boden von untergeordneter Bedeutung (LUA BB 2000, MAWARI et al. 2022). Auch der Anbau von **Küchenkräutern** ist in der Regel von nachrangiger Relevanz, da deren Verzehrsmengen prinzipiell gering ausfallen und die damit verbundene Schadstoffzufuhr trotz ihrer hohen Verschmutzungsanfälligkeit vernachlässigt werden kann.

Falls dagegen die Nutzer einer Fläche **besondere Anbauvorlieben** (z. B. nur Grünkohl oder Spinat) haben und damit ungünstigere Konstellationen vorliegen, ist ggf. auf Grundlage des Nutzpflanzenspektrums und deren Anreicherungsverhalten die Abschätzung der Schadstoffaufnahme entsprechend anzupassen. Detaillierte Hilfestellungen zu einer solchen Abschätzung sind in *Anhang 3* zu finden.

7.3.2. Anbaufläche pro Person

Sind keine Auffälligkeiten bezüglich des Nutzpflanzenspektrums festzustellen, kann eine vereinfachte Expositionsabschätzung über die Ermittlung der Anbaufläche im Einzelfall und Abgleich mit den Standardannahmen durchgeführt werden. Dabei wird ein durchschnittliches Anbauspektrum verschiedener Gemüsearten vorausgesetzt.

Die Maßnahmen- bzw. Prüfwerte der BBodSchV wurden so festgelegt, dass sie bei einer hohen Selbstversorgungsrate mit Gemüse aus dem eigenen Garten und üblicherweise zu erzielenden Ernteerträgen einen ausreichenden Schutz darstellen (vgl. *Anhang 3*). Dazu wird eine Anbaufläche von etwa **40 m² pro Person** benötigt, die bei der Ableitung der Beurteilungswerte als **Standardannahme** zu Grunde gelegt wurde. Diese Annahme kann im Rahmen der Expositionsabschätzung überprüft oder bei der Festlegung von Maßnahmen genutzt werden (vgl. *Kapitel 7.5*).

Zur **Ermittlung der Anbaufläche** bestehen mehrere Möglichkeiten:

- Eine theoretische Abschätzung der Anbaufläche. Dies kann z. B. über die durchschnittliche Größe der Gartenflächen und die Ableitung des maximal anzunehmenden Anteils von Nutzpflanzenbeeten erfolgen. Empfohlen wird dabei die Annahme eines ‚**realistischen worst-case-Szenarios**‘. Dies könnte beispielsweise sein:

**Ermittlung
der Anbau-
fläche**

**Standard-
anbau-
fläche:
40 m² pro
Person**

**Pauschal-
annahmen
oder Einzel-
fallerhe-
bung**

- Für die Garten-Freiflächen in Hausgärten: 50 % Rasen, 30 % Zierbeete und 20 % Nutzbeete.
- In Kleingärten: Zugrundelegung üblicher Parzellengrößen und Annahme der ‚Drittelregelung‘ (mindestens ein Drittel Anbau von ‚Gartenbauerzeugnissen für den Eigenbedarf‘, d. h. von Obst und Gemüse).
- Auswertung aktueller Luftbilder:
 - Ermittlung der individuellen oder durchschnittlichen Größe von Freiflächen bzw. Nutzbeeteanteilen.
 - Beschreibung der ortstypischen Nutzung der Gärten (dominieren z. B. ländlich geprägte Gärten mit einem größeren Anteil an Selbstversorgung oder eher ‚Schottergärten‘ bzw. Ziergärten ohne relevante Nutzbeeteanteile?).
- Befragungen / Vor-Ort-Erhebungen / Kartierungen.

Bei einer Ermittlung der Anbaufläche durch die Auswertung aktueller Luftbilder bzw. durch Befragungen / Vor-Ort-Erhebungen / Kartierungen ist zu beachten, dass sich die hierbei festgestellten Verhältnisse kurzfristig ändern können, so dass deren **Gültigkeit ggf. langfristig zu beobachten oder anderweitig sicherzustellen** ist. Im Zweifel ist eine (‚realistische worst-case‘-) Abschätzung tatsächlichen Erhebungen vorzuziehen.

**Änderung
der Vor-Ort-
Verhältnisse**

Da sich die Gefahrenbeurteilung immer auf die Anbaufläche (bzw. Verzehrsmenge) pro Kopf bezieht, ist eine **Ermittlung der Personenanzahl** notwendig. Dies kann durch Abschätzungen, Befragungen oder andere Erhebungen erfolgen. Im Falle einer theoretischen Abschätzung könnte für ‚Haus- und Kleingärten‘ beispielsweise jeweils ein 2-Personen-Haushalt zugrunde gelegt werden.

**Personen
pro
Haushalt**

Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass Anbauflächen von 40 m² pro Person in der Regel das **Maximum der Vor-Ort-Verhältnisse** darstellen – nach überschlägigen Berechnungen können größere Erntemengen im Eigenverzehr nicht bewältigt werden. **Anbauflächen > 40 m²** pro Person sind als **Einzelfall** gesondert zu betrachten.

Findet Nutzpflanzenanbau nur auf einer sehr kleinen Anbaufläche statt, ist davon auszugehen, dass die Schadstoffaufnahme aus entsprechend geringen Verzehrsmengen i. d. R. als nicht relevant anzusehen ist. In Ausnahmefällen können jedoch spezielle Anbaugewohnheiten (z. B. Anbau von Gemüse zur ausschließlichen Versorgung von Kleinkindern) oder sehr hohe Bodenbelastungen auch auf kleinen Flächen zur Aufnahme erheblicher Schadstoffmengen führen, so dass die Angabe einer **Bagatellschwelle** für Anbauflächen **nicht pauschal möglich** ist, sondern anhand der Umstände des Einzelfalls festzulegen ist.

Kleine Anbauflächen

Durch den Vergleich der im Einzelfall ermittelten Anbaufläche mit der Standardanbaufläche von 40 m² pro Kopf kann ein **Expositionsquotient EQ_{AF}** berechnet werden, mit Hilfe dessen einzelfallbezogene Beurteilungswerte mit Maßnahmenwertcharakter abgeleitet werden können (vgl. Gleichung 12).

Ermittlung von EQ_{AF}

Gleichung 12: Expositionsquotient EQ_{AF} zur Berücksichtigung der im Einzelfall ermittelten Anbaufläche pro Person

$$EQ_{AF} = \frac{\text{Anbaufläche}_{\text{Einzelfall}} \text{ (in m}^2\text{/Person)}}{\text{Anbaufläche}_{\text{Standard}} \text{ (in m}^2\text{/Person)}} = \frac{\text{Anbaufläche}_{\text{Einzelfall}} \text{ (in m}^2\text{/Person)}}{40 \text{ m}^2\text{/Person}}$$

mit:

EQ_{AF} = Expositionsquotient für die einzelfallbezogene Anbaufläche

Dieser Expositionsquotient findet primär bei der Bewertung des Szenarios ‚Nutzgärten‘ Anwendung, für das alleine der Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze Relevanz hat, er kann jedoch auch in integrative Bewertungsansätze Eingang finden (vgl. Kapitel 9.1).

7.4. Pflanzenuntersuchungen

Der Gedanke, das Ausmaß der Pflanzenverfügbarkeit von Schadstoffen im Boden durch direkte **Bestimmung der Gehalte in der Pflanze** selbst zu ermitteln, ist zunächst naheliegend. Entsprechend genießt diese Vorgehensweise in der Regel eine hohe Akzeptanz. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass Schadstoffgehalte in Pflanzen eine **erhebliche Streuung** aufweisen können, die von einer Vielzahl kaum kontrollierbarer Einflussfaktoren abhängt. Schwankungen der Schadstoffgehalte einer Pflanzenart können allein aufgrund von Wachstums- und Witterungsbedingungen den Faktor 10 erreichen; hinzu kommen Sortenunterschiede,

Hohe Akzeptanz...

...geringe Belastbarkeit

Unterschiede aufgrund von Düngung, Wassergabe, Pflanzenschutz und vieles mehr. Insofern sollte für eine längerfristig gültige Beurteilung aus fachlicher Sicht Transferabschätzungen (vgl. *Kapitel 7.2.4* und *Anhang 3*) Vorzug gegenüber konkreten Pflanzenuntersuchungen gegeben werden, da diese auf einer langjährigen, breiten Datenbasis ermittelt wurden.

Erscheint es dennoch notwendig oder auch aus fachlichen Erwägungen heraus sinnvoll, konkrete Pflanzenuntersuchungen durchzuführen, ist im Vorfeld neben dem finanziellen Aufwand auch der zeitliche Rahmen für die in der Regel mehrjährigen Untersuchungen zu klären. In die Entscheidung sollten mögliche Schwierigkeiten in der Interpretation insbesondere bei einmaligen Untersuchungen einfließen (vgl. hierzu auch DELSCHEN & KÖNIG 1998, LUA NRW 2001).

In *Anhang 3* sind einige wichtige Rahmenbedingungen zur Pflanzenauswahl, den Anbaubedingungen sowie zur Probennahme und Analytik zusammengestellt, sofern Pflanzenuntersuchungen angestrebt werden.

**Rahmenbedingungen
für Pflanzenuntersuchungen**

7.5. Abschließende Gefährdungsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch

Auf Basis der ermittelten Anbauflächen kann eine vereinfachte Expositionsabschätzung durchgeführt werden. Dabei wird mit Hilfe des Expositionsquotienten EQ_{AF} ein **einzelfallbezogener Beurteilungswert (BW_{Pfl})** berechnet (vgl. *Gleichung 13*), mit dem geprüft wird, ob der Nutzpflanzenanbau aufgrund der Größe der Anbaufläche überhaupt Relevanz erlangen kann.

**Ermittlung
von BW_{Pfl}**

Gleichung 13: Einzelfallbezogener Beurteilungswert (BW_{Pfl}) für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch

$$BW_{Pfl} = \frac{\text{Prüfwert / Maßnahmenwert BBodSchV}}{EQ_{AF}}$$

mit:

BW_{Pfl} (in mg/kg)	= Beurteilungswert für den Einzelfall, bezogen auf gemessene Gehalte im Boden (Bodenfraktion < 2 mm)
EQ_{AF}	= Expositionsquotient für die einzelfallbezogene Anbaufläche (vgl. <i>Gleichung 12</i>)

Unterschreiten die gemessenen Bodengehalte den so ermittelten einzelfallbezogenen Beurteilungswert (BW_{Pfl}), ist der Gefahrenverdacht insoweit ausgeräumt.

Wird der Beurteilungswert überschritten und die **Gefahr für den Einzelfall** somit festgestellt, werden ggf. weitere Detailprüfungen zu den Anbaubedingungen und Verzehrsmengen (vgl. *Anhang 3*) oder Maßnahmen notwendig. Dabei empfiehlt es sich zunächst zu prüfen, inwieweit die Gefahr durch **einfache Maßnahmen** (§ 10 Abs. 5 BBodSchV) abgewehrt bzw. beseitigt werden kann. So können die Erhöhung des pH-Wertes, Änderungen des Nutzpflanzenspektrums (z. B. Verzicht auf hoch anreichernde Pflanzenarten) oder die Bedeckung offener Bodenbereiche z. B. durch Mulchmaterial (Verminderung der Verschmutzung) geeignete Maßnahmen darstellen.

Eine weitere einfache Maßnahme stellt die **Einschränkung der Größe der Anbaufläche** dar (vgl. *Gleichung 14*).

Gleichung 14: Berechnung der maximal tolerablen Anbaufläche (AF_{max}) für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch

$$AF_{max} = \frac{\text{Prüfwert} / \text{Maßnahmenwert BBodSchV (in mg/kg)}}{\text{Gehalt im Boden (in mg/kg)}} * \text{Anbaufläche}_{\text{Standard}} \text{ (in m}^2\text{/Person)}$$

$$AF_{max} = \frac{\text{Prüfwert} / \text{Maßnahmenwert BBodSchV (in mg/kg)}}{\text{Gehalt im Boden (in mg/kg)}} * 40 \text{ m}^2\text{/Person}$$

mit:

AF_{max} (in m ² /Person)	=	maximal tolerable Anbaufläche für den Einzelfall
Gehalt im Boden	=	bezogen auf gemessene Gehalte (Bodenfraktion < 2 mm)

Zu bedenken ist, dass ein Großteil dieser Maßnahmen regelmäßige Kontrollen und ggf. Wiederholungen von Untersuchungen erfordert. Unter Umständen sind geeignete Maßnahmen zur Festschreibung eines gefahrlosen Zustandes bzw. des Status quo der aktuellen Nutzung zu treffen (z. B. Anordnungen, Allgemeinverfügungen, Bodenschutzgebiete, Kleingartensatzungen etc.).

Der Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch weist im Kontext dieser Arbeitshilfe nur im Szenario ‚**Nutzgärten**‘ **alleinige Relevanz** auf (vgl. *Kapitel 4.2*).

**Einfache
Maßnahmen?**

**Maximal
tolerable
Anbaufläche**

**Überwachung oder
Festschreibung**

**Relevanz
des Nutzpflanzen-
anbaus?**

Flächen, auf denen der Anbau von Nahrungspflanzen zum Eigenverzehr lediglich eine **Teilnutzung** darstellt, sind dem Nutzungsszenario ‚Haus- und Kleingärten‘ zuzuordnen. Dabei wird die Bewertung der gärtnerischen Nutzung in der Regel zusätzlich zum Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt betrachtet (integrative Betrachtung, vgl. *Kapitel 9.1*).

Kurz gesagt:

Ist der Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch beispielsweise in ‚Hausgärten‘ oder ‚Kleingärten‘ relevant, sind Expositionsabschätzungen durchzuführen, um die Schadstoffzufuhr über den Verzehr von angebautem Gemüse zu quantifizieren. Durch Messung pflanzenverfügbarer Gehalte kann der Transfer von Schadstoffen (wie Blei, Cadmium und Thallium) vom Boden in die Nutzpflanze prognostiziert werden. Einflussfaktoren wie pH-Wert, TOC und Bodenart können ergänzende Informationen zur aktuellen Mobilität der Schadstoffe liefern.

Bei üblicher, gemischter Anbauweise verschiedener Nutzpflanzen lassen sich vergleichende Abschätzungen zur Schadstoffaufnahme anhand der Anbaufläche durchführen, da für die Ableitung der Prüfwerte hierzu Regelannahmen getroffen wurden.

Da Nutzpflanzen Schadstoffe in unterschiedlichem Maß anreichern, ist die Kenntnis des Spektrums der angebauten Nutzpflanzen sinnvoll. Wenn bestimmte Gemüsearten (z. B. Grünkohl, Erdbeerefeld etc.) außergewöhnlich häufig angebaut werden, kann das spezielle Anreicherungsverhalten ausschlaggebend für die Bewertung sein. In diesem Fall sind ggf. vertiefte Erhebungen der Anbaubedingungen und Verzehrsmengen angezeigt.

Die Expositionsabschätzung im Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch bemisst die Schadstoffaufnahme des Menschen über den Verzehr von selbstangebautem Obst und Gemüse. Für das Nutzungsszenario ‚Haus- und Kleingärten‘ ist sie integrativ mit der Schadstoffzufuhr über den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt auszuwerten.

8. Durchführung von Expositionsabschätzungen für den Wirkungspfad Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch

Welche Fallkonstellation wird hier beschrieben?
Welche Untersuchungsmethoden sind geeignet?
Wie sind die Untersuchungen durchzuführen?
Wie werden die Untersuchungsergebnisse beurteilt?

Als Sonderfall wird im Rahmen der Arbeitshilfe auch der Wirkungspfad Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch kurz gestreift. Die landwirtschaftliche Nutzung mit kommerzieller Tierhaltung wird dahingegen ausgeklammert, da hierfür konkrete rechtliche Rahmenbedingungen des Futtermittel- und Lebensmittelrechts bestehen. Betrachtet werden Fallkonstellationen, in denen in Gärten („Haus- und Kleingärten“) oder auf Grünflächen einzelne Nutztiere gehalten werden (z. B. Hühner, Ziegen, Schafe, Kaninchen) und letztlich auch ein Eigenverzehr der anfallenden tierischen Produkte erfolgt (Eier, Milch, Fleisch).

Nutztierhaltung in privaten Gärten

Hier ist zu beachten, dass die Schadstoffaufnahme sowohl über den Schadstoffübergang aus dem Boden in bzw. auf die Futterpflanze und dann ins Nutztier erfolgen kann, als auch direkt vom Boden ins Nutztier (durch direkte Aufnahme von Bodenpartikeln, wie z. B. bei Freilandhaltung von Hühnern). **Die Bewertung der direkten Bodenaufnahme durch Tiere ist derzeit nicht geregelt, da Bilanzfaktoren Boden-Tier fehlen.**

Schadstofftransfer Boden-Nutztier?

8.1. Bodenuntersuchungen

Eine durch Bodenbelastungen verursachte Schadstoffaufnahme bei Nutztieren erfolgt überwiegend über äußerliche Anhaftungen von Bodenmaterial an Futterpflanzen. Dabei wurde im Rahmen der Ableitung der Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV von einem Verschmutzungsanteil von standardmäßig 3 % ausgegangen; in der Praxis liegen die Werte je nach Tierart, Bodenverhältnissen, Vegetationsbedeckung, Haltungs- und Weidebedingungen etc. zwischen 1 % und 10 % (LUA BB 2010).

Bodenaufnahme durch Anhaftungen an Futterpflanzen

Der Verschmutzungsanteil wird beeinflusst durch die **Art der Haltung** (Freilandhaltung > Stallhaltung), **Fütterungsverfahren** (Weide > Schnitt- und Erntennutzung) und die **Futterzusammensetzung** (bodennahe Pflanzen > bodenferne Pflanzen).

Verschmutzungsanteil?

Der Wirkungspfad Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch wird in der BBodSchV **nicht direkt betrachtet**. Allerdings zielen die Maßnahmenwerte der BBodSchV für Grünlandflächen (vgl. *Tabelle 12*) darauf ab, eine **Gefährdung der Tiere** bzw. der **Konsumenten tierischer Produkte zu verhindern**.

Hilfsweise heranzuziehende Maßstäbe

Tabelle 12: Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze auf Grünlandflächen im Hinblick auf die Pflanzenqualität (in mg/kg TM)

Stoff	Extraktionsverfahren*	Prüfwert	Maßnahmenwert
Arsen	KW	50	-
Blei	KW	-	1.200
Cadmium	KW	-	20 ¹⁾
Kupfer	KW	-	1.300 ²⁾
Nickel	KW	-	1.900
Quecksilber	KW	-	2
Thallium	KW	-	15
Hexachlorbenzol	Anl. 3 Tab. 5 BBodSchV	0,5	-
Hexachlorcyclohexan, gesamt	Anl. 3 Tab. 5 BBodSchV	0,05	-
PCB ₆	Anl. 3 Tab. 5 BBodSchV	-	0,2
PCDD/F ³⁾	Anl. 3 Tab. 5 BBodSchV	15	-

¹⁾ Bei Flächen mit pH-Werten unter pH 5 gilt ein Maßnahmenwert von 15 mg/kg.
²⁾ Bei Grünlandnutzung durch Schafe gilt ein Maßnahmenwert von 200 mg/kg.
³⁾ Summe der Dioxine und Furane (PCDD/F): polychlorierte Dibenzo-para-dioxine (PCDD) und polychlorierte Dibenzofurane (PCDF), angegeben als Toxizitätsäquivalentsumme nach BBodSchV (in ng WHO-TEQ₍₂₀₀₅₎/kg TM)
 * KW: Königswasserextraktion

Bei Überschreitung der Prüf- bzw. Maßnahmenwerte der BBodSchV in Bezug auf den Wirkungspfad Boden-Futterpflanze besteht die Möglichkeit, im Rahmen der Detailuntersuchung zu prüfen, ob der tatsächliche Verschmutzungsanteil deutlich über oder unter dem angenommenen Standard von 3 % anzunehmen ist. Daran sind entsprechende Maßnahmen auszurichten, die auf eine verschmutzungsarme Bewirtschaftung zielen (LUA BB 2010).

Verschmutzung < 3 %?

8.2. Untersuchung von Futterpflanzen

Wenn im Einzelfall Schadstoffgehalte im Futter untersucht werden sollen, ist darauf zu achten, dass das Pflanzenmaterial im Gegensatz zur Untersuchung von Lebensmitteln vor der Analyse nicht gewaschen werden darf, da in die Bewertung ein praxisüblicher Verschmutzungsanteil eingehen soll (LUA BB 2003, LUA BB 2010). Zur Untersuchung des Pflanzenmaterials selbst sei auf *Kapitel 7.4* verwiesen. Die ermittelten Werte können mit den einschlägigen futtermittelrechtlichen Beurteilungswerten (u. a. RICHTLINIE 2002/32/EG) in Futterpflanzen abgeglichen werden. Empfehlungen hierzu finden sich in LUA BB (2003).

**Schadstoff-
gehalte in
Futter-
pflanzen**

8.3. Untersuchung tierischer Produkte

Die Untersuchung tierischer Produkte wie Eier, Milch oder Fleisch ist nur in wenigen Fällen anzuraten. Auch dafür gelten die bereits im Hinblick auf Pflanzenuntersuchungen in *Kapitel 7.4* dargestellten Einschränkungen (hohe Variabilität der Ergebnisse, Vielzahl möglicher Einflussfaktoren etc.). Die Untersuchungsergebnisse tierischer Produkte sind mit ggf. vorhandenen lebensmittelrechtlichen Vorgaben abzugleichen. Die Ergebnisse können aber auch in Expositionsabschätzungen einfließen, die Verzehrsmengen und -gewohnheiten integrieren. Hierfür sind ggf. Standardannahmen zu recherchieren, beispielsweise aus Warenkorb-betrachtungen oder Verbrauchsstatistiken zum Lebensmittelverzehr.

**Schadstoff-
gehalte in
tierischen
Produkten**

Kurz gesagt:

Der Wirkungspfad Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch stellt einen Sonderfall dar, der nur in Einzelfällen Bedeutung erlangen kann. Werden Nutztiere privat auf Böden mit Bodenbelastungen gehalten, können Schadstoffe über die Futterpflanzen oder über anhaftende Verschmutzungen direkt in die Nutztiere gelangen. Orientierende Hinweise hierfür können Überschreitungen der Prüf- und Maßnahmenwerte zur Beurteilung von Grünlandnutzung geben. Im Rahmen der Expositionsabschätzung können Transferabschätzungen Boden-Futterpflanze mit Hilfe von Pflanzenverfügbarkeitsuntersuchungen, Abschätzungen zum Verschmutzungsanteil oder ggf. auch Untersuchungen des Futters direkt durchgeführt und ggf. für Modellabschätzungen zur Schadstoffaufnahme verwendet werden.

Zu beachten ist, dass neben der Aufnahme von Schadstoffen über Futterpflanzen auch eine direkte Schadstoffaufnahme über den Boden (z. B. bei Freilandhaltung von Hühnern) erfolgen kann. Die Bewertung der direkten Bodenaufnahme durch Tiere ist derzeit nicht geregelt, da Bilanzfaktoren Boden-Tier fehlen.

9. Sonderfälle der Expositionsbeurteilung

**Was ist zu tun, wenn mehrere Wirkungspfade gleichzeitig zu betrachten sind?
Wie können neue Szenarien entwickelt werden?
Wie kann einbezogen werden, dass eine Belastung von mehreren Schadstoffen ausgeht?
Wie wird die Hintergrundexposition berücksichtigt?
Wie ist bei großflächigen Belastungen vorzugehen?
Wann sind Untersuchungen am Menschen angezeigt?**

Die in der Arbeitshilfe beschriebene Vorgehensweise zielt im Wesentlichen auf Fallgestaltungen ab, die durch die standardisierten Annahmen und Konventionen der BBodSchV abgebildet und im Einzelfall konkretisiert werden können. Darüber hinaus können sich in der Praxis jedoch besondere Fragestellungen ergeben, von denen nachfolgend einige aufgegriffen und erörtert werden.

9.1. Integrative Betrachtung der Wirkungspfade Boden-Mensch/Direktkontakt und Boden-Nutzpflanze-Mensch

Für das Szenario ‚Haus- und Kleingärten‘ sind grundsätzlich sowohl der Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt als auch der Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch von Bedeutung.

Verschiedene Wirkungspfade gleichzeitig

Im Detail ergibt sich jedoch für eine **Vielzahl von Stoffen**, dass die Schadstoffzufuhr über den Verzehr selbst angebauter Pflanzen aufgrund eines geringen Schadstoffübergangs vom Boden in oder auf die Pflanze im Vergleich zum Direktpfad **eher vernachlässigbar** erscheint.

Für einzelne Schadstoffe, wie z. B. **Cadmium** oder **Thallium** hat allerdings auch der Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch so große Bedeutung, dass eine **integrative Betrachtung beider Wirkungspfade** erforderlich wird. Sowohl über den Direktpfad als auch über den Pflanzenpfad können relevante Schadstoffmengen oral in den menschlichen Organismus gelangen und dort wirksam werden.

Beispiel Cadmium und Thallium

Für die integrative Beurteilung ist es daher erforderlich, die Schadstoffzufuhrmengen für die orale Aufnahme aus beiden Wirkungspfaden zu ermitteln, um deren

Aggregierte Schadstoffzufuhrmengen

Summe den humantoxikologischen Bewertungsmaßstäben gegenüberstellen zu können.

Zunächst erfolgt die Ermittlung der **Schadstoffzufuhr** über den **Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt** über *Gleichung 15* (vgl. *Kapitel 5*).

**Orale
Schadstoff-
zufuhr
Direktpfad**

Gleichung 15: Berechnung der Schadstoffzufuhr über den Direktpfad

$$\begin{aligned} \text{Schadstoffzufuhr}_{\text{Direktpfad}} \text{ (in } \mu\text{g/kg KG}^*\text{d)} \\ &= \text{RV-Gehalt (in mg/kg Boden)} * \text{Bodenaufnahme (in g Boden/kg KG}^*\text{d)} \\ \text{mit:} \\ \text{RV-Gehalt} &= \text{resorptionsverfügbarer Gehalt} \\ \text{Bodenaufnahme}_{\text{Standard Kinderspielfläche}} \text{ (in g Boden/kg KG}^*\text{d)} \\ &= \frac{0,5 \text{ g Boden/d} * 240 \text{ d/a}}{365 \text{ d/a} * 10 \text{ kg KG}} = 0,033 \text{ g Boden/kg KG}^*\text{d} \end{aligned}$$

Die Berechnung der **Schadstoffzufuhr für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch** erfolgt anschließend über *Gleichung 16* (vgl. *Kapitel 7* und *Anhang 3*).

**Orale
Schadstoff-
zufuhr
Verzehr
Nutzpflanzen**

Gleichung 16: Berechnung der Schadstoffzufuhr über den Verzehr von Nutzpflanzen

$$\begin{aligned} \text{Schadstoffzufuhr}_{\text{Pfl}} \text{ (in } \mu\text{g/kg KG}^*\text{d)} \\ &= (\text{VM}_{\text{hoch}} * \text{F}_{\text{TM}} * \text{EQ}_{\text{AF}} * \text{C}_{\text{Pfl, hoch}}) + (\text{VM}_{\text{mittel}} * \text{F}_{\text{TM}} * \text{EQ}_{\text{AF}} * \text{C}_{\text{Pfl, mittel}}) \\ &\quad + (\text{VM}_{\text{niedrig}} * \text{F}_{\text{TM}} * \text{EQ}_{\text{AF}} * \text{C}_{\text{Pfl, niedrig}}) \\ \text{mit:} \\ \text{VM}_{\text{hoch / mittel / niedrig}} \text{ (in g FM/kg KG}^*\text{d)} &= \text{Verzehrmenge hoch- / mittel- / niedrigerer Pflanzen (schadstoffabhängig; vgl. Anhang 3: Tabelle A13 für Standardannahmen bzw. Tabelle A14, wenn besondere Anbaubedingungen vorherrschen)} \\ \text{F}_{\text{TM}} &= 0,1 \text{ (Faktor zur Umrechnung von Frisch- auf Trockenmasse; vgl. Anhang 3)} \\ \text{EQ}_{\text{AF}} &= \text{Expositionsquotient Anbaufläche für den Einzelfall (vgl. Gleichung 12); wurde kein EQ}_{\text{AF}} \text{ berechnet, ist dieser} = 1 \\ \text{C}_{\text{Pfl, hoch / mittel / niedrig}} \text{ (in } \mu\text{g/g TM)} &= \text{Schadstoffgehalt in der Pflanze (hoch- / mittel- / niedrigerer)} \\ \text{Erläuterung:} \\ \text{C}_{\text{Pfl}} &\text{ kann durch Untersuchungen ermittelt oder auch abgeschätzt werden, z. B. mit Hilfe von Transferfunktionen (vgl. Anhang 3: Gleichung A8).} \\ \text{Für Cadmium ergibt sich danach beispielsweise:} \\ \text{C}_{\text{Pfl, hoch}} \text{ (in } \mu\text{g/g TM)} &= 10^{1,791 + 0,842 * \log \text{C}_{\text{B-AN}}} \text{ (in mg/kg TM)} \end{aligned}$$

mit:
 C_{B-AN} (in mg/kg TM) = gemessener Bodengehalt im Ammoniumnitratextrakt

Details zu Annahmen über Verzehrsmengen finden sich in *Anhang 3*.

Die Berechnung der **integrativen Schadstoffzufuhr** erfolgt dann durch Addition der beiden berechneten Werte (vgl. *Gleichung 17*).

**Integrative
Schadstoff-
zufuhr**

Gleichung 17: Summe der Schadstoffzufuhr

$$\text{Schadstoffzufuhr}_{\text{integrativ}} = \text{Schadstoffzufuhr}_{\text{Direktpfad}} + \text{Schadstoffzufuhr}_{\text{Pfl}}$$

Zur Beurteilung des integrativen Pfades wird final die ermittelte integrative Schadstoffzufuhr den **humantoxikologisch abgeleiteten Beurteilungswerten** gegenübergestellt. Die berechneten Schadstoffzufuhrmengen sind gemäß dem folgenden Prinzip zu bewerten (vgl. *Gleichung 18* sowie *Anhang 2* und *3*):

**Gegenüber-
stellung mit
humantoxi-
kologi-
schen Be-
urteilungs-
werten**

Gleichung 18: Beurteilung der Schadstoffzufuhr

$$\text{Schadstoffzufuhr (in } \mu\text{g/kg KG}^*\text{d)} \leq \frac{\text{TRD} * (\text{F}_{\text{Gef}} - \text{Standardwert Hintergrund}) \text{ (in } \mu\text{g/kg KG}^*\text{d)}}{\text{Resorptionsquote}}$$

$$\text{Schadstoffzufuhr (in } \mu\text{g/kg KG}^*\text{d)} \leq \text{Zugeführte Dosis} * (\text{F}_{\text{Gef}} - \text{Standardwert Hintergrund})$$

mit:

$$\text{Zugeführte Dosis (in } \mu\text{g/kg KG}^*\text{d)} = \frac{\text{TRD (in } \mu\text{g/kg KG}^*\text{d)}}{\text{Resorptionsquote}}$$

und:

TRD (in $\mu\text{g/kg KG}^*\text{d}$)	=	tolerierbare resorbierte Dosis
F_{Gef}	=	Gefahrenfaktor (i. d. R. 2–10)
Standardwert Hintergrund	=	Berücksichtigung der Hintergrundexposition über Nahrungsmittel und Umgebungsluft; Regelannahme: 80 % des TRD-Wertes = 0,8
Resorptionsquote	=	stoff- und aufnahmepfadspezifische Resorption; Regelannahme, sofern nicht abweichend angegeben: 100 % = 1

Dieses Prinzip findet Anwendung, wenn die Schadstoffzufuhr über die Wirkungspfade Boden-Mensch/Direktkontakt und Boden-Nutzpflanze-Mensch im Rahmen von **Expositionsabschätzungen für chronisch toxisch wirkende Schadstoffe** betrachtet wird (Beispiel Cadmium; vgl. *Anhang 3* sowie *Anhang 4: Fallbeispiel B*).

**Chronisch-
toxische
Schad-
stoffe**

Zur integrativen Bewertung kanzerogener Stoffe sollte **im Einzelfall toxikologischer Sachverstand** hinzugezogen werden.

Kanzerogene Stoffe

9.2. Weiterführende Expositionsbetrachtungen

In besonderen Einzelfällen kann die Methodik der Expositionsabschätzung auch auf **weitergehende Fragestellungen** angewendet werden. So kann es notwendig werden, spezifische Nutzungsszenarien zu definieren oder Nutzergruppen zu charakterisieren. Aber auch die Berücksichtigung zusätzlicher Schadstoffe oder Schadstoffgruppen, Mehrfachbelastungen durch mehrere Schadstoffe bzw. eine mögliche Schadstoffaufnahme über mehrere Wirkungs- und Aufnahmepfade gleichzeitig kann weiterführende Expositionsbetrachtungen notwendig machen.

Spezialfälle

9.2.1. Neue Nutzungsszenarien

Je nach Fallgestaltung kann es erforderlich werden, ein von den vorhandenen Nutzungsszenarien abweichendes Nutzungsszenario zu definieren, um die Schadstoffaufnahme aus dem Boden (über mögliche Transfer- und Aufnahmepfade) zu modellieren.

Beispiel: Urban Gardening

Flächen im öffentlichen Bereich, die zum Anbau von Nutzpflanzen („Urban Gardening“) genutzt werden, sind ggf. vom Nutzungsszenario „Nutzgärten“ abzugrenzen. Hier können sowohl Überlegungen zur **Nutzergruppe** wie auch zur **typischen Nutzung** (Anbaugewohnheiten, Flächengrößen, Zeitdauer der Nutzung, individuelle/öffentliche Nutzung etc.) zu einer Differenzierung führen.

Beispiel: Bewässerung von Gärten

Ein weiteres Beispiel stellt die Bewässerung von Gärten durch Hausbrunnen o. ä. dar. Hier sind spezifische Überlegungen zum Schadstoffübergang vom ggf. belasteten Grundwasser in oder auf Nutzpflanzen sowie ggf. eine stetige Erhöhung der Bodenbelastung modellhaft zu quantifizieren.

Grundlagen für Annahmen für Expositionsabschätzungen liefern beispielsweise die Ausführungen der AGLMB (1995). Im Forschungsvorhaben des UBA (vgl. MEKEL et al. 2007a-d) wurden darüber hinaus zahlreiche Studien gesichtet, im Einzelnen beschrieben, ausgewertet und im Hinblick auf die Ableitung von Modellannahmen gewürdigt (Referenzwerte in RefXP 2011). Darüber hinaus finden

**Annahmen
und
Konventionen**

sich im Exposure Factors Handbook der U.S. EPA ebenfalls zahlreiche Angaben zu Annahmen und Standards zur Expositionsabschätzung (vgl. U.S. EPA 2023).

Grundsätzlich ist bei der Entwicklung neuer Szenarien oder der Betrachtung zusätzlicher Schadstoffe immer ein **Ableich aller relevanten Aufnahmepfade** gemäß der Bekanntmachung über Methoden und Maßstäbe für die Ableitung der Prüf- und Maßnahmenwerte nach der BBodSchV (vgl. UBA 1999ff) durchzuführen, um die Exposition mit den sensibelsten Wirkungen betrachten und in der Bewertung berücksichtigen zu können.

Beispiel: Organische Zinnverbindungen in Strandsand

Untersuchungen von Strandsand und Sedimenten von Küstenabschnitten in der Nähe von Häfen, die Rückstände mit organischen Zinnverbindungen aufwiesen, ließen Belastungen von Bade-/Freizeitstränden durch Aufspülungen von Sedimenten befürchten. In Ermangelung verbindlicher Regelungen für Bodenbelastungen mit zinnorganischen Verbindungen wurden gesundheitliche Beurteilungswerte für das Expositionsszenario der Strandnutzung durch Kleinkinder und Badegäste analog zu den Verfahren der BBodSchV für ‚Kinderspielflächen‘ abgeleitet. Dazu wurden im Rahmen einer Expositionsabschätzung pfadvergleichende Auswertungen für die orale und dermale Aufnahme durchgeführt (LGA S-H 2005).

9.2.2. Mischexpositionen und Kombinationswirkungen

Unter Mischexpositionen ist die gleichzeitige Exposition des Menschen gegenüber verschiedenen Schadstoffen, Schadstoffgemischen oder gesundheitsrelevanten Einflussfaktoren (wie beispielsweise Feinstaub) zu verstehen.

Gleichzeitige Exposition

So sind häufig verschiedene Schadstoffe gleichzeitig im Boden vorhanden und führen zu Mischexpositionen. Dennoch wird bei der Ableitung der Prüfwerte standardmäßig davon ausgegangen, dass die einzelnen Schadstoffe unterschiedlich und damit unabhängig voneinander wirken, so dass Kombinationswirkungen bis auf wenige Ausnahmen nicht berücksichtigt sind (vgl. UBA 1999ff).

bisher Einzelstoffbewertung

Wünschenswert wäre es, folgende Kombinationen von Expositionen zunehmender Komplexität zu berücksichtigen:

- Ein Schadstoff / mehrere Wirkungspfade
- Mehrere Schadstoffe / ein Wirkungspfad (Kombinationswirkungen)
- Mehrere Schadstoffe / mehrere Wirkungspfade

Ein Schadstoff kann **gleichzeitig über verschiedene Quellen** (Boden, Luft, Wasser) oder verschiedene Aufnahmepfade (oral, inhalativ) zum Menschen gelangen. Dem wird im Rahmen der Ableitung der Prüfwerte Rechnung getragen, indem jeweils Pfad-zu-Pfad-Vergleiche durchgeführt werden. Die Exposition über verschiedene Quellen (Boden und andere Umweltmedien) wird dabei durch Berücksichtigung der **Hintergrundexposition** (vgl. *Kapitel 9.2.3*) integriert. Diese Integration ist fachlich komplex, da bei verschiedenen Aufnahmepfaden mitunter auch der relevante Wirkendpunkt im menschlichen Körper variiert und so nicht ohne Weiteres eine Addition der Aufnahme bzw. der damit verbundenen Gefahr einer Erkrankung möglich ist.

Die Exposition gegenüber einem Stoff, der über verschiedene Wirkungspfade (z. B. Boden-Mensch/Direktkontakt und Boden-Nutzpflanze-Mensch, ggf. auch Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch) über denselben Aufnahmepfad (orale Aufnahme) in den Mensch gelangt, wird **durch integrative Betrachtung** wie in dieser Arbeitshilfe beschrieben (vgl. *Kapitel 9.1*) abgebildet.

Kombinationswirkungen sind anzunehmen, wenn verschiedene Schadstoffe am selben Wirkendpunkt ansetzen (beispielsweise Sauerstofftransport im Blut) und sich in ihrer Wirkung entweder ergänzen, potenzieren oder möglicherweise auch abschwächen. Die Bewertung solcher Kombinationswirkungen und Mischexpositionen verschiedener Schadstoffe über unterschiedliche Wirkungspfade stellen Wissenschaft, Regulation und Politik bislang jedoch noch vor besondere Herausforderungen. Erste Ansätze dazu werden diskutiert (vgl. CONRAD et al. 2014, KÜHLING 2014, KORTENKAMP et al. 2009).

**Kombina-
tions-
wirkungen**

Wissenschaftliche Ausschüsse der EU-Kommission (EU 2012) haben sich mit Kombinationswirkungen von Chemikalien befasst und Kriterien zur Bestimmung der prioritär näher zu bewertenden **chemischen Kombinationen/Mischungen** aufgestellt. Darüber hinaus empfehlen sie, in Fällen, in denen beispielsweise Informationen darüber vorliegen, dass die Wirkungsweise von Stoffen ähnlich ist, den Ansatz einer Dosis-/Konzentrationsaddition zu wählen.

**Additions-
prinzip bei
ähnlichen
Wirkungs-
weisen**

Dieses Prinzip wird im Rahmen der Prüfwertableitung bei der Bewertung von Stoffgruppen angewandt, die Einzelsubstanzen mit gleichem Wirkendpunkt aufweisen (z. B. **Nitroaromaten oder PCDD/F**; vgl. *Kapitel 4.1.4*).

Sollte der Verdacht von Mischexpositionen mit besonderen Kombinationswirkungen bestehen, die bislang **nicht in den Prüf- oder Maßnahmenwertableitungen berücksichtigt** sind, so übersteigt dies i. d. R. die Möglichkeiten einer gutachterlichen Bearbeitung – hierzu sind Experten/innen aus dem medizinisch / umwelt-hygienischen Bereich heranzuziehen. Es empfiehlt sich, die zuständigen oberen Bodenschutzbehörden zu informieren und ggf. bundesweite Einschätzungen und Erfahrungen zu Vergleichsfällen abzufragen.

**Medizini-
sche
Expertise
erforderlich**

9.2.3. Hintergrundexposition

Nach den Vorgaben zur Ableitung der Prüfwerte (UBA 1999ff) soll die gefahrenbezogene Körperdosis durch die Gesamtbelastung des Menschen über alle Pfade nicht überschritten werden. Als Gesamtbelastung des Menschen wird die Bodenbelastung plus die Hintergrundexposition, bestehend aus Nahrungsmitteln und Umgebungsluft, definiert.

**Gesamtbe-
lastung =
Bodenbe-
lastung +
Hinter-
grund-
exposition**

Auswertungen für Arsen, Blei und Cadmium haben ergeben, dass die Hintergrundexposition üblicherweise rund 80 % des TRD-Wertes (tolerierbare resorbierte Dosis) ausmacht. Daher wird davon ausgegangen, dass auch für die übrigen Stoffe die Hintergrundexposition bei 80 % des TRD-Wertes liegt (Regelannahme der Prüfwertableitung gemäß UBA 1999ff).

**... 80 % des
TRD-
Wertes**

Liegen für einzelne Stoffe oder standortbezogen detailliertere Kenntnisse und Daten vor (beispielsweise Nutzung von Hausbrunnen, Tierhaltung etc.), können auch nach oben oder unten abweichende Annahmen für die Hintergrundexposition getroffen werden.

Im Falle von kanzerogenen Stoffen entfällt die rechnerische Berücksichtigung der Hintergrundexposition, da hier das durch die jeweilige Exposition verursachte, zusätzliche tolerable Lebenszeitkrebsrisiko betrachtet wird. Ebenso entfällt die Hintergrundexposition bei der Betrachtung von lokal (im Atemtrakt) wirkenden Stoffen (vgl. UBA 1999ff).

**Sonder-
fälle: Kan-
zerogene
und lokal
wirkende
Stoffe**

9.3. Bewertung großflächiger Belastungen

Großflächige Bodenbelastungen treten u. a. in Siedlungsbereichen mit langjähriger Siedlungsgeschichte, Überschwemmungsgebieten, Gebieten mit erhöhten Schadstoffgehalten im geogenen Ausgangsmaterial (so in Bergbaugebieten) oder Immissionsgebieten mit ausgeprägter Deposition von Schadstoffen in Erscheinung. Zur Identifikation von Gebieten mit flächenhaften Bodenbelastungen stehen mehrere Verfahren zur Verfügung, zum Beispiel das Instrument der digitalen Bodenbelastungskarte (BBK). Hinweise zur Erstellung und Interpretation einer BBK finden sich bei MUNLV 2004, LfU BW 2011, LANUV 2007 sowie LfUG 2007.

Identifizierung flächenhafter Belastungen

Hat eine orientierende Untersuchung nach BBodSchV eine Prüfwertüberschreitung ergeben, sind im Regelfall für die jeweils betroffene Fläche im Rahmen der Detailuntersuchung weitere Sachverhaltsermittlungen inklusive einer Expositionsabschätzung durchzuführen. Für Gebiete mit großflächigen Belastungen ist jedoch solch ein grundstücks-, flurstücks- oder parzellenbezogenes Vorgehen häufig nicht praktikabel. Die dafür notwendigerweise durchzuführenden Untersuchungen sind außerordentlich aufwändig und bieten insbesondere keine ausreichende Bewertungssicherheit bei wechselnden Nutzungsintensitäten der Flächen. Für großflächig und weitgehend einheitlich belastete Gebiete (Schadstoffparameter, Schadstoffquelle, weitgehend homogene Verteilung) kann es daher sinnvoll sein, auch die **Expositionsabschätzung gebietsbezogen** durchzuführen. Hinweise dazu finden sich in MUNLV 2004 oder LfUG 2006.

Praktikabilität

Betrachtet werden können **bodenabhängige**, aber auch **nutzungsabhängige Expositionsbedingungen**. So können Daten zu Aufenthaltsdauer bzw. -häufigkeit in bestimmten Siedlungsgebieten (Ferienhaussiedlung, Wochenendhäuser, Kleingartenanlagen etc.) oder zu Nutzungsstrukturen (Wohnblocks mit Vorgärten) **die Prägung des Gebietes** und damit die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung konkretisieren. Darüber hinaus kann es z. B. zweckdienlich sein, gebietsbezogene Aussagen zur Verfügbarkeit von Schadstoffen etwa im Hinblick auf die Resorptionsverfügbarkeit abzuleiten (vgl. *Kapitel 5.2.4*).

Untersuchungsmethoden

Die Reihenfolge der Untersuchungsschritte kann hier im Einzelfall vom Standardvorgehen (vgl. *Abbildung 1*) begründet abweichen, beispielsweise wenn mit Hilfe

der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen zunächst die Prägung des Gebietes definiert und erst im folgenden Schritt der Bedarf für die Prüfung bodenabhängiger Expositionsbedingungen festgelegt wird.

9.3.1. Statistischer Kennwert aus Datenkollektiv statt Messwert

Bei einer gebietsbezogenen Bewertung wird zur Abschätzung der Exposition also nicht ein konkreter Messwert bzw. nicht ein konkretes Ergebnis einer Erhebung herangezogen, sondern **statistische Kennwerte**. Diese Kennwerte werden aus einem das Untersuchungsgebiet repräsentierenden Datenkollektiv ausreichenden Umfangs abgeleitet.

**Repräsen-
tativität**

9.3.2. Festlegung der Aussagesicherheit

Gebietsbezogene Bewertungen haben immer **günstige, mittlere und ungünstige Expositionsbedingungen** zu berücksichtigen. Die Auswertung kann dabei zum Beispiel auf Basis von Perzentilen erfolgen, wobei in der Praxis dem 5., 50. und 95. Perzentil eine besondere Bedeutung zukommt. Häufig wird aber auch das 10. bzw. 90. Perzentil herangezogen.

**Statistische
Kennzahlen**

Im Falle der Resorptionsverfügbarkeit oder der Aufenthaltsfrequenz etwa werden ungünstige Expositionsbedingungen durch das 95. Perzentil (bzw. 90. Perzentil) des Datensatzes repräsentiert (d. h. hohe Verfügbarkeit bzw. große Häufigkeit), günstige Expositionsbedingungen durch das 5. Perzentil bzw. 10. Perzentil (d. h. geringe Verfügbarkeit bzw. geringe Häufigkeit) und schließlich mittlere Expositionsbedingungen durch das 50. Perzentil (Median) (vgl. BÖHME et al. 2023).

**Ungünstige
und günstige Fall-
gestaltungen**

Neben statistischen Verteilungsanalysen sind auch Regressionsanalysen unter Einbeziehung von Konfidenzintervallen (d. h. Vertrauensbereichen) geeignet, um mögliche statistische Zusammenhänge zwischen Variablen (z. B. Gesamtgehalt und resorptionsverfügbarem Gehalt) direkt aufzeigen zu können. So wurde aufgrund von Ergebnissen umfassender Untersuchungen zur Resorptionsverfügbarkeit von Arsen, Blei und Cadmium auf großflächigen Bodenbelastungen im Freistaat Sachsen (MÜLLER et al. 2020) für diese Gebietskulisse ein auf Verteilungs- und Regressionsanalysen basierendes Modell zur Abschätzung der resorptionsverfügbaren Gehalte veröffentlicht (LfULG 2019).

**Statistische
Zusammen-
hänge**

9.3.3. Ableitung gebietsbezogener Beurteilungswerte

Die statistisch abgeleiteten Kennwerte zur gebietsspezifischen Exposition können dazu verwendet werden, die allgemeinen stoff- und nutzungsspezifischen Beurteilungswerte (i. d. R. Prüfwerte) zu **gebietsbezogenen Beurteilungswerten** (mit Gefahrenbezug) **gBW** zu konkretisieren (MUNLV 2004, LfUG 2006) und zur weiteren Bewertung heranzuziehen.

**Gebiets-
bezogene
Beurtei-
lungswerte
gBW**

Damit wird es möglich, unterschiedliche Fallgestaltungen unter Beachtung vorgegebener **Aussagewahrscheinlichkeiten bzw. Aussagesicherheiten** spezifisch zu prüfen und abschließend zu beurteilen.

Dabei sind besonders die folgenden gebietsbezogenen Beurteilungswerte von Interesse:

- gBW_u : unterer gebietsbezogener Beurteilungswert; bei Einhaltung dieses Wertes kann selbst bei ungünstigen Expositionsbedingungen der Gefahrenverdacht mit einer hohen Wahrscheinlichkeit (95 % bzw. 90 %) ausgeräumt werden.
- gBW_m : mittlerer gebietsbezogener Beurteilungswert; bei diesem Wert ist die Wahrscheinlichkeit für die Ausräumung des Gefahrenverdachts bzw. die Feststellung der Gefahr jeweils 50 %.
- gBW_o : oberer gebietsbezogener Beurteilungswert; bei Erreichen dieses Wertes muss selbst bei günstigen Expositionsbedingungen die Gefahr mit einer hohen Wahrscheinlichkeit (95 % bzw. 90 %) als festgestellt gelten.

In Fällen, in denen beispielsweise die Bewertung eines Stoffes abschließend auf Basis resorptionsverfügbarer Gehalte möglich ist und statistisch beschreibbare Kenntnisse über die Resorptionsverfügbarkeit in einem abzugrenzenden Gebiet vorliegen, können dafür gebietsbezogene Beurteilungswerte gBW unter Verwendung statistischer Kennzahlen berechnet werden. Die Beurteilungswerte errechnen sich, wie nachfolgend beschrieben, aus resorptionsverfügbaren Anteilen und werden auf der Basis von Gesamtgehalten angegeben.

**Beispiel:
Messungen
zur
Resorpti-
onsverfü-
gbarkeit**

Gleichung 19: Gebietsbezogener Beurteilungswert (gBW) unter der beispielhaften Berücksichtigung der Resorptionsverfügbarkeit

$$gBW_u = \frac{\text{Prüfwert BBodSchV}}{95. \text{ Perzentil der RV (in \%)}}$$

$gBW_m = \frac{\text{Prüfwert BBodSchV}}{50. \text{ Perzentil der RV (in \%)}}$	
$gBW_o = \frac{\text{Prüfwert BBodSchV}}{5. \text{ Perzentil der RV (in \%)}}$	
mit:	
gBW _u (in mg/kg)	= unterer gebietsbezogener Beurteilungswert; Berücksichtigung ungünstiger Expositionsbedingungen; hier Ableitung auf Basis der resorptionsverfügbaren Anteile
gBW _m (in mg/kg)	= mittlerer gebietsbezogener Beurteilungswert; Berücksichtigung mittlerer Expositionsbedingungen; hier Ableitung auf Basis der resorptionsverfügbaren Anteile
gBW _o (in mg/kg)	= oberer gebietsbezogener Beurteilungswert; Berücksichtigung günstiger Expositionsbedingungen; hier Ableitung auf Basis der resorptionsverfügbaren Anteile
jeweils unter Angabe des zugrunde gelegten Perzentils des gebietsbezogenen Datenkollektivs in Bezug auf die resorptionsverfügbaren Anteile in %	

Sofern zur Bewertung von Stoffgehalten **nutzungsabhängige Expositionsbedingungen** herangezogen werden sollen, kann z. B. mit Hilfe der statistischen Kennzahlen zur Aufenthaltshäufigkeit bzw. -dauer ein Expositionsquotient berechnet werden (vgl. *Gleichung 8* und *Gleichung 9*), der wiederum auf die allgemeinen Beurteilungswerte (Prüfwerte) angewendet wird, um gebietsbezogene Beurteilungswerte zu berechnen.

9.3.4. Anwendung der gebietsbezogenen Beurteilungswerte

Der untere gebietsbezogene Beurteilungswert (gBW_u) kann zur Entscheidung herangezogen werden, ob auf Basis gemessener Gesamtgehalte überhaupt weitergehender Untersuchungsbedarf besteht, da bei Einhaltung dieses Wertes mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden kann, dass der Gefahrenverdacht ausgeräumt ist. Umgekehrt ist davon auszugehen, dass bei Überschreitung des oberen gebietsbezogenen Beurteilungswertes (gBW_o) mit hoher Wahrscheinlichkeit die Gefahr festzustellen ist, so dass entsprechende Maßnahmen erforderlich sind. Beispiele für die direkte Verknüpfung von gestaffelten Maßnahmen mit den Wahrscheinlichkeitsmaßen der gebietsbezogenen Beurteilungswerte finden sich in den Regelungen zum Bodenplanungsgebiet Raum Freiberg (LD SACHSEN 2011) und Raum Annaberg (LD SACHSEN 2022) oder in dem durch Rechtsverordnung festgelegten Bodenschutzgebiet mit siedlungsbedingt

flächenhaft erhöhten Gehalten an Arsen, Blei, Cadmium und Benzo(a)pyren in Duisburg (STADT DUISBURG 2022, 2023).

9.4. Human-Biomonitoring

Als schutzgutbezogenes Verfahren zur weiteren Sachverhaltsermittlung nach Prüfwertüberschreitung kommt das Verfahren des Human-Biomonitorings im Zusammenhang mit den Wirkungspfaden Boden-Mensch/Direktkontakt, Boden-Nutzpflanze-Mensch und Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch insbesondere bei großflächigen Bodenbelastungen in Frage.

Im Gegensatz zu Expositionsabschätzungen, bei denen mit Hilfe von Annahmen und Modellen sowie von Schadstoffmessungen in Kontakt- und Transfermedien Rückschlüsse auf eine äußere und schließlich innere Schadstoffzufuhr durch eine Kontaminationsquelle gezogen werden, haben Human-Biomonitoring-Untersuchungen zum Ziel, die innere Belastung des menschlichen Organismus direkt in menschlichen Körperflüssigkeiten und -geweben zu untersuchen, um individuelle Schadstoffbelastungen zu bestimmen und gegebenenfalls einige hierdurch ausgelöste biologische Wirkungen zu erkennen (UBA 2020).

Die gemessenen Konzentrationen spiegeln dabei die integrale **Belastung des Organismus aus verschiedenen Quellen** (Nahrung, Trinkwasser, Luft, Boden, Bedarfsgegenstände etc.) über alle Aufnahmepfade (oral, inhalativ, dermal) wider und charakterisieren gleichzeitig individuelle Unterschiede hinsichtlich Aufnahmemenge, Resorption, Stoffwechsel sowie Ausscheidung (SCHULZ & KOLOSSA-GEHRING 2010).

Inwieweit mit dessen Hilfe eine Gesundheitsgefahr für die betroffenen Menschen ermittelt werden kann, hängt im konkreten Einzelfall von standort- und schadstoff-abhängigen Kriterien sowie vom zeitlichen Betrachtungshorizont ab. Vertiefende Ausführungen hierzu finden sich in LANUV (2014).

Da es sich hierbei um unmittelbare Untersuchungen am Menschen handelt, sollte grundsätzlich darauf geachtet werden, die Kompetenz bzw. Zuständigkeit der entsprechenden Fachämter und -behörden (z. B. Gesundheitsämter) zu integrieren

Innere Belastung des menschlichen Organismus...

Ermittlung von Gesundheitsgefahren

Zuständigkeiten beachten!

bzw. zu beachten (siehe hierzu auch Veröffentlichungen der HBM-Kommission des Umweltbundesamtes (UBA HBM 2023)).

Kurz gesagt:

Sonderfälle der Expositionsabschätzung sind integrative Pfadbetrachtungen, die in Abhängigkeit vom Schadstoff die gleichzeitige Schadstoffzufuhr über verschiedene Wirkungspfade erfordern. Die Entwicklung neuer Nutzungsszenarien oder die besondere Berücksichtigung der Hintergrundexposition ist im Rahmen der Expositionsabschätzung ebenso möglich wie die Beurteilung großflächiger Bodenbelastungen oder die Berücksichtigung eines Human-Biomonitorings. Der Bewertung von Mischexpositionen und der Kombinationswirkung von Stoffgemischen sind allerdings aus wissenschaftlicher Sicht derzeit noch Grenzen gesetzt.

10. Methodische Anforderungen

Was ist bei Planung und Durchführung von Untersuchungen zu berücksichtigen?

Was sollte ein Gutachten zur Expositionsabschätzung beinhalten?

Wie sollte ein Gutachten zweckmäßigerweise gegliedert sein?

Was ist im Rahmen der Qualitätssicherung zu beachten?

Welchen Anforderungen sollte ein/e Gutachter/in genügen?

10.1. Vorgaben zu Probennahme und Analytik

Sofern im Rahmen der Detailuntersuchung Proben entnommen werden sollen, sind die Vorgaben der BBodSchV bezüglich der Größe der zu beprobenden Flächeneinheit (gesamte Fläche bzw. Teilfläche), der Anzahl an repräsentativen Teilproben, die zu einer Mischprobe zusammen zu führen sind, sowie der zu untersuchenden Bodenhorizonte und Tiefenstufen soweit möglich zu berücksichtigen.

Probennahme und Analytik gemäß BBodSchV

Liegen Hinweise auf Belastungen unterhalb der nach BBodSchV **relevanten Tiefen** vor, die langfristig im Falle einer Bodenumlagerung in oberflächennahe Bereiche bewertungsrelevant sein könnten, sind auch diese Tiefenbereiche bei der Probennahme zu berücksichtigen. Maßgeblich ist hier in der Regel der Tiefenbereich bis 1 m, in dem größere Bäume oder Büsche gepflanzt, Kinderspielgeräte verankert oder auch Leitungen verlegt werden und Umlagerungen aus dem tieferen Untergrund erfolgen können.

Relevanz größerer Tiefenbereiche bis 1 m

Einen **aktuellen Überblick über geeignete Verfahren** im Hinblick auf Probenplanung, Probennahme, Probenvorbereitung und Analytik geben die vom Fachbeirat Bodenuntersuchungen (FBU) herausgegebene Methodensammlung Boden-/Altlastenuntersuchung (FBU 2021), die Fachposition des FBU zu den Grundsätzen der Probennahme im bodenschutzrechtlich geregelten Bereich (FBU 2018) sowie sonstige Arbeitshilfen z. B. LfU BY (2023a). Merkblätter und Arbeitshilfen der Länder sind inzwischen auch über das Informationssystem zur Qualitätssicherung bei der Altlastenbearbeitung (ISQAB) verfügbar.

Hilfestellungen für Probennahme und Probenuntersuchung

Nach § 19 Abs. 1 BBodSchV soll die **Probennahme** von „Sachverständigen im Sinne des § 18 BBodSchG oder Personen mit vergleichbarer Sachkunde“ entwickelt, begründet, begleitet und dokumentiert werden. Mit der Durchführung ist eine entsprechend akkreditierte bzw. gemäß § 18 notifizierte Untersuchungsstelle

zu beauftragen. Es sollte dabei auf eine gute Dokumentation der Probennahme bzw. der Bodenverhältnisse geachtet werden, um Besonderheiten bei der späteren Bewertung berücksichtigen zu können.

Die **Analytik** der Gesamtgehalte hat dabei nach Anlage 3 BBodSchV oder gleichwertigen Verfahren (FBU 2021) zu erfolgen, wobei die Gesamtgehalte für die Schwermetalle und Arsen nach Aufschluss durch Königswasser zu ermitteln sind.

Generell ist bei der Auswahl des jeweiligen Analyseverfahrens und der Durchführung der Analytik im Labor zu beachten, dass im Hinblick auf die Nachweis- und Bestimmungsgrenze die Über- und Unterschreitung der entsprechenden Prüf- und Maßnahmenwerte nach Anlage 2 BBodSchV (und folgerichtig auch der mit Hilfe der vorliegenden Arbeitshilfe in der Detailuntersuchung ermittelten Beurteilungswerte) sicher beurteilt werden kann.

**Nachweis-
und Be-
stimmungsgrenze**

Diverse Untersuchungsschritte im Rahmen der **Detailuntersuchung** können an Rückstellproben durchgeführt werden, vorausgesetzt, entsprechende Aufbewahrungsfristen wurden vereinbart und die Probenlagerung wurde fachgerecht durchgeführt. Sofern in den relevanten Analysevorschriften keine Vorgaben zur Probenlagerung genannt sind, können die Angaben zur Lang- und Kurzzeitlagerung von Bodenproben in der DIN ISO 18512 herangezogen werden.

**Rückstell-
proben**

Dies gilt beispielsweise für die Analytik der Resorptionsverfügbarkeit (vgl. DIN 19738) bei Relevanz des **oralen Aufnahmepfades** zur Bewertung des Wirkungspfadens Boden-Mensch/Direktkontakt. Um methodische Fehler oder Inhomogenitäten der Probe besser erkennen zu können, sollten hierbei auch die Gesamtgehalte der Rückstellproben neu bestimmt werden. Im Hinblick auf die Qualitätssicherung dieser Labor-Methode ist darauf zu achten, dass die diesbezüglichen Vorgaben der DIN 19738, wie beispielsweise die Durchführung und Auswertung von Doppelbestimmungen oder ggf. Dreifachbestimmungen sowie die Ermittlung der Gesamtbilanz bereits bei der Vergabe der Analytik berücksichtigt werden. Es ist auch der nicht mobilisierbare Gehalt im Rückstand (Sediment) als Doppelbestimmung zu ermitteln (vgl. *Anhang 3*).

**Resorpti-
onsverfüg-
barkeit
nach DIN
19738**

Zur Überprüfung des Schadstoffgehaltes in der Feinkornfraktion < 63 µm wird in der Regel ebenfalls auf Rückstellproben zurückgegriffen. Hier gilt es jedoch zu

**Feinkorn-
fraktion
< 63 µm**

bedenken, dass gemäß den Vorgaben der BBodSchV zur Überprüfung des Wirkungspfad **Boden-Mensch/Direktkontakt** bei Relevanz des **inhalativen Aufnahme**pfades zusätzlich die Bodentiefe 0–2 cm zu beproben und zu untersuchen ist.

In den meisten Fällen – wenn keine Vorkenntnisse oder besonderen Hinweise auf inhalativ wirksame Stoffe oder immissionsbedingte Einflüsse vorliegen – erfolgt jedoch die Beprobung der Bodenhorizonte 0–10 cm und 10–30 cm, so dass in den meisten Fällen keine Rückstellproben für 0–2 cm vorhanden sind. So ist gutachterlich zu prüfen, ob eine Untersuchung der Feinkornfraktion < 63 µm aus Rückstellproben aus 0–10 cm durch die Homogenität oder ggf. Nutzung am Standort zu begründen ist oder ggf. eine erneute Beprobung der Tiefe 0–2 cm erforderlich wird.

Spezielle Hinweise zur Entnahme, Vorbereitung und Analytik von Bodenproben für den Wirkungspfad **Boden-Bodenluft-Mensch** sind den Arbeitshilfen der LABO (2008, 2017) zu entnehmen. Die Entnahme und Vorbereitung von Bodenmaterial speziell für flüchtige Stoffe ist in DIN EN ISO 22155 geregelt.

Wesentliche Regelungen zur Durchführung von Innenraumluftmessungen basieren auf einschlägigen Vorschriften (DIN EN ISO 16000-1, VDI 4300) und Ausführungen der IRK-UBA (2007), die zu beachten sind.

Insbesondere bei der Probennahme für den Wirkungspfad **Boden-Nutzpflanze-Mensch** ist es sinnvoll, die Horizontgrenzen zu beachten, wie es die BBodSchV für den Regelfall vorsieht (§ 20 Abs. 1 BBodSchV).

Die Analytik der Pflanzenverfügbarkeit (vgl. DIN ISO 19730) ist – ggf. in Rückstellproben – in der Fraktion < 2 mm zu durchzuführen (vgl. *Anhang 3*). Dabei ist auf eine ausreichend niedrige Bestimmungsgrenze (BG) zu achten (höchstens ½ Beurteilungswert). Falls Regressionsgleichungen für Transferabschätzungen (vgl. *Kapitel 7.2.4*) erstellt werden sollen, sind die Bestimmungsgrenzen ggf. noch niedriger zu wählen.

**Proben-
nahme
Boden-
Mensch/Di-
rektkontakt**

**Proben-
nahme und
Analytik
Boden-Bo-
denluft-
Mensch**

**Innenraum-
luft-
messungen**

**Proben-
nahme Bo-
den-Nutz-
pflanze**

**Pflanzen-
verfügbar-
keit nach
DIN ISO
19730**

10.2. Anforderungen an Gutachten und Auswertungen

Expositionsabschätzungen sind üblicherweise in die weiteren Sachverhaltsermittlungen im Rahmen der Detailuntersuchung eingebettet. Ein solches Gutachten zur Detailuntersuchung sollte bestimmten inhaltlichen und formalen Anforderungen genügen.

***Inhaltliche
und formale
Anforderungen***

Ausgehend von den Ergebnissen der orientierenden Untersuchung ist die Zielstellung der anschließenden Detailuntersuchung zu formulieren.

Zielstellung

Zunächst ist die Untersuchungsfläche zu charakterisieren und das zugrunde gelegte Nutzungsszenario explizit zu benennen und entsprechend zu begründen. Die verwendeten Datengrundlagen inklusive Angabe zu Quelle, Bearbeitungsstand und Maßstab sind zu benennen.

***Standort-
charakteri-
sierung***

Das Konzept und die Methodik der durchgeführten Geländeuntersuchungen inklusive Bodenansprache, Probennahmen, Befragungen und Kartierungen sind übersichtlich und nachvollziehbar zu dokumentieren, ebenso die Ergebnisse dieser Erhebungen. Weiterhin sind die Bewertungsansätze im Hinblick auf die durchgeführte Untersuchung inklusive Nennung etwaiger Beurteilungswerte darzustellen.

***Konzept
und
Methodik***

Die im Rahmen der Detailuntersuchung gewählte Vorgehensweise zur Beantwortung des festgestellten Klärungsbedarfs ist darzustellen und zu begründen. Hierbei ist sowohl die Auswertung im Hinblick auf die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung als ggf. auch die aktuelle Nutzung am Standort darzustellen.

Die zur Anwendung kommenden Verfahren zur Expositionsabschätzung (z. B. Untersuchung der Resorptionsverfügbarkeit, Ermittlung von Bodenaufnahmemengen, Auswertung der Anbaufläche von Nutzpflanzen etc.) sollten dabei explizit benannt werden. Gleiches gilt für die Wirkungs- und Aufnahmepfade, auf die sich diese beziehen.

***Verfahren
zur Exposi-
tionsab-
schätzung***

Abweichungen von Regelannahmen der Prüfwertableitung und insbesondere eine in Einzelfällen vorgenommene Änderung der in dieser Arbeitshilfe dargelegten Kappungsgrenzen (z. B. für die Bodenaufnahmerate) sind ausführlich und stichhaltig zu begründen.

***Einzelfall-
begründun-
gen***

Die Ergebnisse der Expositionsabschätzung inklusive der Modellannahmen sollten im Gutachten nachvollziehbar dokumentiert sein. Dies beinhaltet auch die Gegenüberstellung der aktuell angenommenen Expositionsbedingungen und der Standardbedingungen des zugrunde gelegten Nutzungsszenarios, ggf. mit Hilfe von Expositionsquotienten. Die Expositionsabschätzung mündet schließlich in der Feststellung, ob der Gefahrenverdacht in Bezug auf die betrachtete Nutzung letztlich ausgeräumt werden kann oder ob die Gefahr festzustellen ist und Maßnahmenbedarf besteht.

Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit

In *Anhang 5* zu dieser Arbeitshilfe befindet sich eine Mustergliederung für Gutachten zur Expositionsabschätzung im Rahmen der Detailuntersuchung.

Mustergliederung

Weiterhin sollten die Arbeiten nach dem neusten Stand der Vorschriften und mit der notwendigen Sorgfalt durchgeführt werden, nach Möglichkeit unter der Leitung eines anerkannten Sachverständigen (vgl. *Kapitel 10.3*). Standardarbeitsanweisungen helfen, Arbeitsabläufe zu optimieren und nachvollziehbar zu machen.

Qualitätssicherung

Ein wichtiger Teil der Qualitätssicherung ist die Plausibilitätsprüfung von Messwerten oder Daten, die im Rahmen von Erhebungen oder Kartierungen gewonnen werden. Diese sind mit Erfahrungswerten und ggf. vorhandenen Hintergrundwerten (vgl. *Kapitel 9.2.3*) oder Daten aus Vorgängerkampagnen abzugleichen. Die Prüfung der Relation von Schadstoffen untereinander stellt einen weiteren Ansatzpunkt zur Qualitätskontrolle dar (Anwendungsbeispiel sind die PAK).

Plausibilitätsprüfungen

Beim Vergleich mit Beurteilungswerten sollte auch der Mess- und Ergebnisunsicherheit von Bodenuntersuchungen Rechnung getragen werden. Nach § 24 Abs. 1 BBodSchV ist „die physikalisch-chemische und chemische Analyse [...] durch eine nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditierte Untersuchungsstelle durchzuführen.“ Damit ist verbunden, dass die in dieser Norm enthaltenen Vorgaben zur Messunsicherheit eingehalten werden müssen. Sofern es „für die Interpretation der Prüfergebnisse erforderlich ist“, ist die Messunsicherheit im Prüfbericht zusammen mit dem jeweiligen Messergebnis anzugeben. Eine solche Angabe empfiehlt sich generell, um die Güte einer Messung einschätzen zu können (vgl. FBU 2008, FBU 2015). Bei Mehrfachmessungen sind die Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert zu betrachten (vgl. z. B. DIN 19738). Der Fachbeirat

Mess- und Ergebnisunsicherheit

Bodenuntersuchungen hat 2008 ausgehend von den Ergebnissen aus Ringvergleichen zudem Maßzahlen zur laborübergreifenden Messunsicherheit von Analyseverfahren der BBodSchV veröffentlicht (FBU 2008); diese werden momentan aktualisiert. Zum Umgang mit der Mess- und Ergebnisunsicherheit im Vollzug der BBodSchV werden aktuell im Auftrag der LABO Eckpunkte erarbeitet.

Eine weitere Möglichkeit der Qualitätskontrolle stellen Bilanzierungen dar. So muss beispielsweise gemäß DIN 19738 die Summe aus resorptionsverfügbarem Gehalt im Extrakt und nicht resorptionsverfügbarem Gehalt im Rückstand näherungsweise den Gesamtgehalt ergeben (tolerable Abweichung bis 20 %).

Sollen Aussagen aus Datenkollektiven abgeleitet werden, ist zunächst ein Mindestumfang der Stichprobe zu beachten, weiterhin die Verteilung der Daten (z. B. in Form von Box-Whisker-Plots). Außerdem sind Ausreißertests sinnvoll, um auffällige Einzelwerte, die zu einer Verzerrung des Gesamtdatenbestands führen, zunächst zu identifizieren und ggf. von den weiteren Betrachtungen auszuklamern.

**Statistische
Sicherheit**

10.3. Anforderungen an Sachverständige

Gemäß § 18 BBodSchG müssen Sachverständige sowie Untersuchungsstellen in Bezug auf Probennahme und Analytik, die Aufgaben nach dem BBodSchG wahrnehmen, die dazu erforderliche Sachkunde und Zuverlässigkeit besitzen. Zu diesen Aufgaben zählt auch die Durchführung der Detailuntersuchung inklusive der darin integrierten Expositionsabschätzung. Zudem müssen Sachverständige und Untersuchungsstellen über die zur Bearbeitung der Aufgaben notwendige geräte-technische Ausstattung verfügen. Darüber hinaus „hat der Sachverständige auch diejenigen Voraussetzungen zu erfüllen, die dem Wesen der Sachverständigentätigkeit innewohnen“ (LABO 2002).

**Sachver-
ständige
und
Untersu-
chungsstel-
len**

In Einzelfällen mit speziellen Fragestellungen im Hinblick auf „exotische“ Schadstoffe (vgl. *Kapitel 4.1.3*) oder ungewöhnliche Nutzungsszenarien mit Nutzergruppen, die nicht dem Standard entsprechen, kann es jedoch notwendig sein, zusätzlich auf die Kompetenz der für den Gesundheits- bzw. Bodenschutz zuständigen Fachämter und -behörden (z. B. Gesundheitsämter) zurückzugreifen.

Die Anerkennung der Sachverständigen und Untersuchungsstellen gemäß § 18 BBodSchG erfolgt auf Länderebene. Diese führen aktuelle Listen mit nach § 18 BBodSchG anerkannten Sachverständigen und Untersuchungsstellen.

**Anerken-
nung**

Unter <https://www.resymesa.de/ReSyMeSa/Allgemein> (**Re**cherche **S**ystem **M**essstellen und **S**achverständige) besteht die Möglichkeit der bundesweiten Recherche nach gemäß § 18 BBodSchG anerkannten Sachverständigen und Untersuchungsstellen.

Kurz gesagt:

Der Kern eines Gutachtens zur Expositionsabschätzung ist die Erfassung und die Auswertung der Expositionsbedingungen, deren Abgleich mit den Annahmen des zugrunde gelegten Nutzungsszenarios sowie die Beantwortung der Frage, ob der Gefahrenverdacht letztlich ausgeräumt werden kann oder eine Gefahr festzustellen ist.

Die angewendeten Verfahren sollen anerkannt sein und die Regeln der Qualitätssicherung beachtet werden. Transparenz und Verständlichkeit sind wichtige Kriterien für die Güte der Darstellung.

Die Durchführung der Arbeiten sollte in der Hand von Sachverständigen und Untersuchungsstellen nach § 18 BBodSchG liegen, wobei in Einzelfällen mit speziellen Fragestellungen auch anderweitiger Sachverstand insbesondere aus dem Gesundheits- und Bodenschutz heranzuziehen ist.

Literaturverzeichnis

- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.), 5. Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart, Hannover, 438 S.
- AGLMB (Arbeitsgemeinschaft der leitenden Medizinalbeamtinnen und -beamten der Länder) (1995): Standards zur Expositionsabschätzung – Bericht des Ausschusses für Umwelthygiene. Behörde für Arbeit, Gesundheit und Soziales (Hrsg.), Hamburg.
- AIR (Ausschuss für Innenraumrichtwerte) (2015): Gesundheitliche Bewertung krebserzeugender Verunreinigungen der Innenraumluft – erste Ergänzung zum Basisschema. Mitteilung des Ausschusses für Innenraumrichtwerte. Bundesgesundheitsblatt, (58), S. 769–773.
- BfUL (Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft Sachsen) (2015): Hinweise und Empfehlungen zum Umgang mit arsen- und schwermetallbelasteten landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden. Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft Sachsen. Online: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/19072>
- BLE (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung) (2020): Mit Kalk gegen Schwermetalle. 3. Auflage, 2020. Online: <https://www.ble-medienervice.de/0389-3-mit-kalk-gegen-schwermetalle.html>
- BLUME, H.P.; HORN, R.; THIELE-BRUNS, S. (Hrsg.) (2010): Handbuch des Bodenschutzes – Bodenökologie und -belastung / Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 4. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim.
- BÖHME, H.; JAGGI, C.; KÜCHLER, E.; KÜCHLER, F. (2023): Bewertung der Schadstoffe auf der Grundlage der Resorptionsverfügbarkeit. In: Altlasten spektrum 3/2023, S. 97–101.
- CONRAD, A.; HOOPMANN, M.; TWARDILLA, D. (2014): Mischexpositionen und Kombinationswirkungen. In: UMID 2/2014, S. 55–57. Online: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/workshop_mischexpositionen_55-57.pdf
- DELSCHEN, T.; BERTGES, W.-D.; LEISNER-SAABER, J. (2006): Bewertung von Schadstoffbelastungen auf Sport- und Bolzplätzen nach Maßstäben des Bodenschutzrechtes. In: Bodenschutz 2/2006, S. 44–48.
- DELSCHEN, T.; HEMBROCK-HEGER, A.; LEISNER-SAABER, J.; SOPCZACK, D. (1999): Verhalten von PAK im System Boden/Pflanze: PAK-Belastung von Kulturpflanzen über den Luft-/Bodenpfad. In: UWSF-Z, Umweltchem. Ökotox., 11, 2; S. 79–87.

- DELSCHEN, T.; KÖNIG, W. (1998): Untersuchung und Beurteilung der Schadstoffbelastung von Kulturböden im Hinblick auf den Wirkungspfad Boden-Pflanze. In: König, W.; Utermann, J.; Kerth, M. (Hrsg.): Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Kapitel 3550, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- DELSCHEN, T.; LEISNER-SAABER, J. (1998): Selbstversorgung mit Gemüse aus Schwermetall-belasteten Gärten: Eine Gefährdungsabschätzung auf toxikologischer Basis. In: Bodenschutz 1/1998, S. 17–20.
- DEWILD, J.F.; OLUND, S.D.; OLSON, M.L.; TATE, M.T. (2004): Methods for the preparation and analysis of solids and suspended solids for methylmercury; Chapter 7 of Book 5 Laboratory Analysis, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- DIN 19738 (2017-06): Resorptionsverfügbarkeit von organischen und anorganischen Schadstoffen aus kontaminiertem Bodenmaterial. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN 13725 (2022-06): Emissionen aus stationären Quellen – Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration durch dynamische Olfaktometrie und die Geruchsstoffemissionsrate. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN 16801 (2016-07): Lebensmittel – Bestimmung von Elementen und ihren Verbindungen – Bestimmung von Methylquecksilber in Lebensmitteln marinen Ursprungs mit Isotopenverdünnung GC-ICP-MS. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN 17266 (2020-03): Lebensmittel – Bestimmung von Elementen und ihren Verbindungen – Bestimmung von Organoquecksilber in Fisch und Meeresfrüchten mittels Feststoffquecksilberbestimmung. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 16000-1 (2006-06): Innenraumluftverunreinigungen – Teil 1: Allgemeine Aspekte der Probennahmestrategie. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 17892-4 (2017-04): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 22155 (2016-07): Bodenbeschaffenheit – Gaschromatographische Bestimmung flüchtiger aromatischer Kohlenwasserstoffe, Halogenkohlenwasserstoffe und ausgewählter Ether – Statisches Dampfraum-Verfahren. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO/IEC 17025 (2018-03): Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN ISO 18512 (2009-03): Bodenbeschaffenheit – Anleitung für die Lang- und Kurzzeitlegerung von Bodenproben. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN ISO 19730 (2009-07): Bodenbeschaffenheit – Extraktion von Spurenelementen aus Böden mit Ammoniumnitratlösung. Beuth-Verlag, Berlin.

- DLG (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V.) (2022): Hinweise zur Kalkdüngung. Fachzentrum Landwirtschaft (Hrsg.), DLG-Merkblatt 456, 3. Auflage, Stand 05/2022. Online: https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/landwirtschaft/themen/publikationen/merkblaetter/dlg-merkblatt_456.pdf
- EFSA (European food and safety authority) (2015): Scientific Opinion on the risks to public health related to the presence of nickel in food and drinking water. EFSA Journal 2015; 13(2):4002.
- EIKMANN, T.; BRAMMERTZ, A.; EIKMANN, S. (1993): Kriterien zur Beurteilung der inhalativen Aufnahme von Schadstoffen aus dem Boden – Beispiel: Kontamination von Sport- und Bolzplätzen. In: König, W.; Utermann, J.; Kerth, M. (Hrsg.): Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Kapitel 3595, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- EIKMANN, T.; HEINRICH, U.; HEINZOW, B.; KONIETZKA, R. (Hrsg.) (1999ff): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen – Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- EU (Europäische Union) (2012): Kombinationswirkungen von Chemikalien – Chemische Mischungen. Mitteilung der Kommission an den Rat. Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52012DC0252&from=EN>
- FBU (Fachbeirat Bodenuntersuchungen) (2008): Angabe der Messunsicherheit bei chemischen Bodenuntersuchungen für den Vollzug der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. FBU Arbeitsgruppe „Qualitätssicherung und Ergebnisunsicherheit für Bodenuntersuchungsverfahren“. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3511.pdf>
- FBU (Fachbeirat Bodenuntersuchungen) (2015): Messunsicherheit für Verfahren zum Vollzug und zur Weiterentwicklung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung.
- FBU (Fachbeirat Bodenuntersuchungen) (2018): Position des FBU zu Grundsätzen der Bodenprobenahme im bodenschutzrechtlich geregelten Bereich. FBU Arbeitsgruppe „Probenahme“. Online: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/359/dokumente/2016_12_fbu-grundsaeetze_bodenprobenahme_0.pdf
- FBU (Fachbeirat Bodenuntersuchungen) (2021): Methodensammlung Feststoffuntersuchung. Ad-hoc-AG „Methodenharmonisierung“ (Fachbeirat Bodenuntersuchungen – LAGA-Forum Abfalluntersuchung), Version 2.0, Stand 15.06.2021. Online: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/359/dokumente/20210615_methodensammlungfeststoffuntersuchung_v2_final_0.pdf
- FBU (Fachbeirat Bodenuntersuchungen) (2023): Feststellung gemäß § 25 (1) der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung zur Gleichwertigkeit und praktischen Eignung von Methoden durch den Fachbeirat Bodenuntersuchungen; Stand 02.08.2023. Online: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/359/dokumente/gleichwertigkeitsfeststellung_bbodschv_stand_2023-08-02.pdf.

- HEBISCH, R.; KULBUSCH, T.; BUX, K.; BREUER, D.; LAHRZ, T. (2019): Gefahrstoffe am Arbeitsplatz – Arbeitsplatzgrenzwert, Immissionsgrenzwert oder Innenraumrichtwert? In: Fachzeitschrift Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft; DGUV (Hrsg.), VDI Fachmedien, Band 79, Nr. 7/8; S. 255–259.
- HEMPEL, M. (1993): Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Gefährdungsabschätzung quecksilberkontaminierter Standorte, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg.
- HEMPFLING, R.; DOETSCH, P. (1997): Wissenschaftliche Begleitung und Fortentwicklung eines Gefährdungsabschätzungsmodells für Altlasten – UMS-System zur Altlastenbeurteilung – Abschlußbericht – ARGE Fresenius-focon. F&E Vorhaben 109 01 215, im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- IRK-UBA (Umweltbundesamt) (1996): Richtwerte für die Innenraumluft: Basisschema. Bundesgesundheitsblatt, (39), S. 422–426.
- IRK-UBA (Umweltbundesamt) (2007): Beurteilung von Innenraumluftkonzentrationen mittels Referenz- und Richtwerten. Handreichung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumluftthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. Bundesgesundheitsblatt, (50), S. 990–1005. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/Handreichung.pdf>
- IRK-UBA (Umweltbundesamt) (2012): Richtwerte für die Innenraumluft: erste Fortschreibung des Basisschemas. Mitteilung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Kommission Innenraumluftthygiene und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. Bundesgesundheitsblatt, (55), S.279–290. Online: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/Basisschema_2012.pdf
- IRK-UBA (Umweltbundesamt) (2014): Gesundheitlich-hygienische Beurteilung von Geruchsstoffen in der Innenraumluft mithilfe von Geruchsleitwerten. Entwurf der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Kommission Innenraumluftthygiene und der Obersten Landesgesundheitsbehörden zur öffentlichen Diskussion bis Ende Dezember 2015. Bundesgesundheitsblatt, (57), S.148–153. Online: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/geruchsleitwerte_2014.pdf
- ISO 11277 (2020-04): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden – Verfahren mittels Siebung und Sedimentation. Beuth-Verlag, Berlin.
- KAISER, D. B. (2012): Evaluierung vorhandener Verfahren und Daten zur Beurteilung der Resorptionsverfügbarkeit ausgewählter Schadstoffe. Dissertation, Freie Universität Berlin, Online: <https://d-nb.info/1032899409/34>
- KNOCHE, H.; BRAND, P.; VIERECK-GÖTTE, L. (1999): Schwermetalltransfer Boden - Pflanze, Ergebnisse der Auswertungen hinsichtlich der Königswasser - Ammoniumnitrat-Extraktion anhand der Datenbank TRANSFER. UBA-Texte 11/99.

- KODAMATANI, H.; MAEDA, C.; BALOGH, S.; NOLLET, Y.H.; KANZAKI, R.; TOMIYASU, T. (2017): The influence of sample drying and storage conditions on methylmercury determination in soils and sediments; *Chemosphere* Vol 173, 380–386.
- KONIETZKA, R.; DIETER, H. (1998): Ermittlung gefahrenbezogener chronischer Schadstoffdosen zur Gefahrenabwehr beim Wirkungspfad Boden-Mensch. In: König, W.; Utermann, J.; Kerth, M. (Hrsg.): *Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser*, Kapitel 3530, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- KORTENKAMP, A.; BACKHAUS, T.; FAUST, M. (2009): State of the Art Report on Mixture Toxicity. Final Report, Executive Summary. Online. http://ec.europa.eu/environment/chemicals/effects/pdf/report_mixture_toxicity.pdf
- KÜHLING, W. (2014): Mehrfachbelastungen. In: UVP-Gesellschaft e.V. / AG Menschliche Gesundheit (Hrsg.): *Leitlinien Schutzgut Menschliche Gesundheit*, S. 162–168, Hamm 2014.
- LABO (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (1998): Eckpunkte zur Gefahrenbeurteilung des Wirkungspfad des Bodenverunreinigungen/Altlasten – Pflanze. Ad-hoc-AG „Schwermetalltransfer Boden/Pflanze“ des AK „Bodenbelastung“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz. In: König, W.; Utermann, J.; Kerth, M. (Hrsg.): *Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser*, Kapitel 9009, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- LABO (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (2002): Arbeitshilfe Qualitätssicherung. Online: https://www.labo-deutschland.de/documents/labo-arbeitshilfe-qualitaetssicherung-12-12-2002_d4c.pdf
- LABO (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (2003): Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei orientierenden Untersuchungen. Online: https://www.labo-deutschland.de/documents/Si-WaPrognose-120903_91f.pdf
- LABO (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (2006): Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei Detailuntersuchungen. Online: https://www.labo-deutschland.de/documents/Ah_Du_1208_732_8fa.pdf
- LABO (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (2008): Bewertungsgrundlagen für Schadstoffe in Altlasten – Informationsblatt für den Vollzug. Stand: 01.09.2008 (ergänzt Juni 2009). Online: https://www.labo-deutschland.de/documents/34_Infoblatt_Altlasten_01092008_e69_34f.pdf
- LABO (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (2013): Arbeitshilfe Arsentransfer aus Böden in Nahrungs- und Futterpflanzen – Gefahrenbeurteilung und Maßnahmen. Online: https://www.labo-deutschland.de/documents/2013-09-03_LABO-Arbeitshilfe_Arsen-transfer.pdf

- LABO (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (2017): Bewertung von Mineralölkohlenwasserstoffen (MKW) bezüglich des Wirkungspfades Boden-Mensch bei einer potentiellen Belastung über Boden, Bodenluft und Innenraumluft. Eine LABO-Hilfestellung für den Vollzug. Online: https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO_MKW-Bewertung_2017_12.pdf
- LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen) (2007): Leitfaden zur Erstellung digitaler Bodenbelastungskarten Teil II: Siedlungsbereiche; LANUV-Arbeitsblatt 1. Online: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/40001.pdf
- LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen) (2014): Weitere Sachverhaltsermittlungen bei Überschreitung von Prüfwerten nach BBodSchV für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Nutzpflanze; LANUV-Arbeitsblatt 22. Online: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/40022.pdf
- LD SACHSEN (2011): Verordnung der Landesdirektion Chemnitz zur Festlegung des Bodenplanungsgebietes „Raum Freiberg“ vom 10.05.2011; Sächsisches Gesetz- u. Verordnungsblatt Nr. 6/2011 inklusive Kartenwerk und Erläuterungstext. Online: https://www.lids.sachsen.de/umwelt/?ID=5067&art_param=452
- LD SACHSEN (2022): Verordnung der Landesdirektion Sachsen zur Festlegung des Bodenplanungsgebietes Raum Annaberg vom 25. Oktober 2022; Sächsisches Gesetz- und Verordnungsblatt Nr. 31/2022 vom 15.11.2022; Online inklusive Kartenwerk und Erläuterungstext unter: https://www.lids.sachsen.de/umwelt/?ID=19784&art_param=453
- LfU BW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg) (2011): Arbeitshilfe zum Umgang mit großflächig erhöhten Schadstoffgehalten im Boden, Karlsruhe. Online: <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/20142>
- LfU BY (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz) (2023a): Probenahme von Boden und Bodenluft bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen. Merkblatt 3.8/4. Online [https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000002?SID=1150045011&ACTIONxSESSx-SHOWPIC\(BILDxKEY:%27lfu_bod_00190%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27\)](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000002?SID=1150045011&ACTIONxSESSx-SHOWPIC(BILDxKEY:%27lfu_bod_00190%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27))
- LfU BY (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz) (2023b): Untersuchung und Bewertung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen, Wirkungspfad Boden-Mensch (direkter Kontakt) und Expositionsszenario Boden-Bodenluft-Innenraumluft; Merkblatt 3.8/8. Online: https://www.stmuv.bayern.de/themen/boden/vollzug/doc/merkblatt_3_8_8_stmuv.pdf
- LfUG (Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen) (2003): Detailuntersuchung; Handbuch zur Altlastenbehandlung Teil 7, z. T. aktualisiert 2006 und 2014. Online: https://www.boden.sachsen.de/download/Handbuch_ges_Internet_Januar2014.pdf
- LfUG (Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen) (2006): Handlungsempfehlungen für die Umsetzung des Bodenschutzrechtes in Gebieten mit großflächig erhöhten Schadstoffgehalten; Materialien Bodenschutz, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.

- LfUG (Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen) (2007): Erstellung digitaler Bodenbelastungskarten zur flächenhaften Darstellung und Beurteilung von Schadstoffen in sächsischen Böden; Materialien zum Bodenschutz; Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- LfUG (Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen) (2012): Branchenbezogene Merkblätter zur Altlastenbehandlung. Online: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13520>
- LfULG (Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen) (2019): Prognosemodell zur Abschätzung der Resorptionsverfügbarkeit; kostenfreie Bereitstellung im Excel-Format. Online: https://search.sachsen.de/genericsearch-api/viewHTML?reference=https://www.boden.sachsen.de/download/LfULG_RV_Modell_Sachsen_V1.03_neu.xlsx&searchTerm=prognosemodell&mandantId=1c70a553-c020-44dd-8aa8-3377e41c3a79
- LGA S-H Kiel (2005): Organische Zinnverbindungen in Strandsand. Ableitung von Richtwerten zur Gefährdungsabschätzung und gesundheitlichen Beurteilung von Bodenkontaminationen mit organischen Zinnverbindungen. Stellungnahme und Vorschlag der norddeutschen Arbeitsgruppe (HB, HH, MVP, NS, SH) unter Beteiligung des Umweltbundesamtes. Online: https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/G/gesundheitschutz_umweltbezogen/Boden/Downloads/bericht_OrganoZinnStrandsand_2005.pdf?__blob=publication-File&v=1
- LRA RNK (Landratsamt Rhein-Neckar-Kreis) (2022): Anbau von Nahrungs- und Futterpflanzen auf mit Arsen und Schwermetallen belasteten Böden im Rhein-Neckar-Kreis; Leitfaden; 4. Fortschreibung. Online: <https://rhein-neckar-kreis.landwirtschaft-bw.de/pb/,Lde/9408744/?LIST-PAGE=676418>
- LUA BB (Landesumweltamt Brandenburg) (2000): Die Bodenbelastung brandenburgischer Haus- und Kleingärten durch Schadstoffe. Fachbeiträge des Landesumweltamtes, Heft-Nr. 48. Online: https://lfu.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/lua_bd48.pdf
- LUA BB (Landesumweltamt Brandenburg) (2003): Untersuchung und Bewertung von altlastverdächtigen Flächen und Verdachtsflächen – Wirkungspfad Boden-Pflanze-Tier. Fachbeiträge des Landesumweltamtes, Heft-Nr. 81, Bodenschutz und Altlastenbearbeitung 2. Online: <https://lfu.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Fachbeitrag%2081.pdf>
- LUA BB (Landesumweltamt Brandenburg) (2010): Leitfaden zur Detailuntersuchung, Teil Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze.
- LUA NRW (Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen) (2001): Verzehrsstudie in Kleingärten im Rhein-Ruhrgebiet. Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, Band 14. Online: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/0_lua/malbo14_web.pdf
- LUA NRW (Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen) (2005): Abschätzung der Schwermetallmobilität in nordrhein-westfälischen Böden, Essen 28.01.2005. Online: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/boden/boschu-lua/Bericht_KW_AN_neu%202005-01-28.pdf

- LÜBBEN, S.; SAUERBECK, D. (1991): Transferfaktoren und Transferkoeffizienten für den Schwermetallübergang Boden - Pflanze In: Forschungszentrum Jülich GmbH (Hrsg.): Auswirkung von Siedlungsabfällen auf Böden, Bodenorganismen und Pflanzen, Berichte aus der ökologischen Forschung, 6, S. 180–223.
- MAWARI, G.; KUMAR, N.; SARKAR, S.; DAGA, M.K.; SINGH, M.M.; JOSHI, T.K.; KHAN, N.A. (2022): Heavy Metal Accumulation in Fruits and Vegetables and Human Health Risk Assessment: Findings From Maharashtra, India. Online: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9434655/>.
- MEKEL, O.; MOSBACH-SCHULZ, O.; SCHÜMANN, M.; et al. (2007a): Evaluation von Standards und Modellen zur probabilistischen Expositionsabschätzung Teil 1: Grundlagen der bevölkerungsbezogenen Expositionsmodellierung. WaBoLu-Hefte, Nr. 02/2007. UBA-FB: 001073/1, Förderkennzeichen: 202 61 218/02, Umweltbundesamt.
- MEKEL, O.; MOSBACH-SCHULZ, O.; SCHÜMANN, M.; et al. (2007b): Evaluation von Standards und Modellen zur probabilistischen Expositionsabschätzung Teil 2: Empfehlungen für Expositionsfaktoren. WaBoLu-Hefte, Nr. 03/2007. UBA-FB: 001073/2, Förderkennzeichen: 202 61 218/02, Umweltbundesamt.
- MEKEL, O.; MOSBACH-SCHULZ, O.; SCHÜMANN, M.; et al. (2007c): Evaluation von Standards und Modellen zur probabilistischen Expositionsabschätzung Teil 3: Szenarien. WaBoLu-Hefte, Nr. 04/2007. UBA-FB: 001073/3, Förderkennzeichen: 202 61 218/02, Umweltbundesamt.
- MEKEL, O.; MOSBACH-SCHULZ, O.; SCHÜMANN, M.; et al. (2007d): Evaluation von Standards und Modellen zur probabilistischen Expositionsabschätzung Anhang. WaBoLu-Hefte, Nr. 05/2007. UBA-FB: 001073/ANH, Förderkennzeichen: 202 61 218/02, Umweltbundesamt.
- MÜLLER, I.; KARDEL, K.; SCHÜRER, S. (2020): Modelle zur Abschätzung der Resorptionsverfügbarkeit – Beurteilung des Direktpfads Boden-Mensch bei großflächigen Bodenbelastungen in Sachsen. In: Bodenschutz 2/2020.
- MUNLV (Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen) (2004): Leitfaden zur Ausweisung von Bodenschutzgebieten. Online: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/boden/bodenschutz_nrw/pdf/Leitfaden_zur_Ausweisung_von_Bodenschutzgebieten.pdf
- RefXP (2011): Datenbank RefXP für Expositionsfaktoren, entwickelt im Rahmen des „Aktionsprogramm Umwelt und Gesundheit“ (APUG); Umweltbundesamt. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/www.uba.de/xprob>
- RÜDEL, H.; KÖSTERS, J.; SCHÖRMANN, J. (2011): Bestimmung von Methylquecksilberverbindungen in Umweltproben durch ICP-MS – Richtlinie zur chemischen Analyse. Verfahrensrichtlinien für Probenahme, Transport, Lagerung und chemische Charakterisierung von Umwelt- und Humanproben des Umweltbundesamtes. Online: https://www.umweltprobenbank.de/upb_static/fck/download/SOP_MeHg-ICP-MS_de.pdf

- SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL (2018): Lehrbuch der Bodenkunde, 17. Auflage; Springer Verlag.
- SCHULZ, C.; KOLOSSA-GEHRING, M. (2010): Orientierungswerte – Human-Biomonitoring. In: Handbuch der Umweltmedizin. Wichmann, H.; Fromme, H. (Hrsg.), Ecomed, Landsberg/Lech.
- SCHULZ, D. (1992): Dioxine im Boden. In: König, W.; Utermann, J.; Kerth, M. (Hrsg.): Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Kapitel 1700, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- SCHUSTER, E. (1991): Quecksilberkontaminierte Böden. Eine Literaturstudie zur Einschätzung des Verhaltens von Quecksilber und seinen Verbindungen, Studie im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen.
- STADT DUISBURG (2022): Rechtsverordnung für das Bodenschutzgebiet Duisburg mit flächenhaft siedlungsbedingt erhöhten Schadstoffgehalten (Bodenschutzgebietsverordnung). Amtsblatt für die Stadt Duisburg Nr. 39 vom 31.10.2022, S. 691.
- STADT DUISBURG (2023): Rechtsverordnung für das Bodenschutzgebiet Duisburg mit flächenhaft siedlungsbedingt erhöhten Schadstoffgehalten (Bodenschutzgebietsverordnung) 1. Änderung. Amtsblatt für die Stadt Duisburg Nr. 18 vom 30.06.2023, S. 246.
- TRGS 402 (2010/2016): Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition, Technische Regeln für Gefahrstoffe, GMBI 2010 S. 231–253 vom 25.2.2010, geändert und ergänzt: GMBI 2016 S. 843–846 vom 21.10.2016.
- UBA (Umweltbundesamt) (Hrsg.) (1999ff): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. Erich Schmidt Verlag, Loseblattsammlung 1999 mit Ergänzungen, Berlin.
- UBA (Umweltbundesamt) (2009): Kommission „Human-Biomonitoring“ – 2. Addendum zur Stoffmonographie Blei – Referenz- und „Human-Biomonitoring“-Werte der Kommission Human-Biomonitoring. Bundesgesundheitsblatt, Band 52, Heft 10, S. 983–986.
- UBA (Umweltbundesamt) (2011): Evaluierung vorhandener Bewertungsansätze und Entwicklung eines Konzeptes zur integrierten Wirkungsbewertung prioritärer Schadstoffe über alle Pfade auf der Grundlage der Bioverfügbarkeit. Forschungskennzahl 3708 72 200 UBA-FB 001495. UBA-Texte 59/2011. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4172.pdf>
- UBA (Umweltbundesamt) (2015): Evaluierung vorhandener Daten zu Gesamt- und verfügbaren Stoffgehalten in Böden und in Nahrungs- und Futtermittelpflanzen bezüglich der Prüfwerte der BBodSchV im Pfad Boden-Pflanze. Forschungskennzahl 3713 71 227, UBA-FB 002666.
- UBA (Umweltbundesamt) (2020): Human-Biomonitoring. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/belastung-des-menschen-ermitteln/human-biomonitoring>

- UBA (Umweltbundesamt) (2023): Kommission Human-Biomonitoring. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/kommissionen-arbeitsgruppen/kommission-human-biomonitoring>
- U.S. EPA (2023): Exposure Factors Handbook. Online: <https://www.epa.gov/expobox/about-exposure-factors-handbook>
- VDI 4300 Blatt 1 (1995-12): Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Allgemeine Aspekte der Messstrategie. VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf.
- ZEBS (Zentrale Erfassungs- und Bewertungsstelle für Umweltchemikalien) (1997): Richtwerte für Schadstoffe in Lebensmitteln. Bundesgesundheitsblatt, (5), S. 182–184; zurückgezogen.
- ZEDDEL, A. (2001): Hinweise zur Bewertung von Chrom (III) nach der Methodik der BBodSchV für den Direktpfad Boden-Mensch. In: Altlasten spektrum 5/2001, S. 238–243.

Rechtsnormenverzeichnis

BauGB (2004): Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634), zuletzt geändert durch Art. 2 G zur Änd. des EnergiewirtschaftsG zur Einführung von Füllstandsvorgaben für Gasspeicheranlagen sowie zur Änd. von § 246 des BauGB vom 26.4.2022 (BGBl. I S. 674).

BauNVO (2017): Baunutzungsverordnung, Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke; in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. November 2017 (BGBl. I S. 3786), zuletzt geändert durch Art. 2 BaulandmobilisierungsG vom 14.6.2021 (BGBl. I S. 1802).

BBodSchG (1998): Bundes-Bodenschutzgesetz; Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. BGBl. I, 502 vom 17.03.1998, zuletzt geändert durch Art. 7 G zur Änd. des UmweltschadensG, des UmweltinformationsG und weiterer umweltrechtlicher Vorschriften vom 25.2.2021 (BGBl. I S. 306).

BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).

BKleingG (1983): Bundeskleingartengesetz vom 28. Februar 1983 (BGBl. I S. 210), zuletzt geändert durch Art. 11 Erstes G über die Bereinigung von Bundesrecht im Zuständigkeitsbereich des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung vom 19.9.2006 (BGBl. I S. 2146).

RICHTLINIE 2002/32/EG vom 07. Mai 2002 über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung. Amtsblatt der Europäischen Union, L 140; zuletzt geändert durch Art. 1 VO (EU) 2019/1869 vom 7.11.2019 (ABl. L 289 S. 32). Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02002L0032-20191128&from=DE>

Glossar

aktuelle Nutzung: Zum Zeitpunkt der Untersuchung aktuelle Nutzung der zu untersuchenden Fläche. Diese kann im Einzelfall von der (sensibelsten) planungsrechtlich zulässigen Nutzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch abweichen.

akute Toxizität: Giftigkeit eines Stoffes bei einmaliger oder mehrfacher Aufnahme innerhalb kurzer Zeit.

Aufenthaltsdauer (AD): Aufenthaltsdauer auf der zu untersuchenden Fläche in Stunden pro Tag.

Aufenthaltshäufigkeit (AH): Anzahl an Tagen im Jahr, an denen sich die sensibelste betrachtete Bevölkerungsgruppe (i. d. R. Kinder) auf der Fläche aufhält.

Aufnahmepfad: Beschreibt die Aufnahmewege (oral, inhalativ, dermal), über die Stoffe in den menschlichen Organismus gelangen können.

Beurteilungswerte (BW): Werden im Rahmen von Expositionsabschätzungen unter Berücksichtigung boden- und/oder nutzungsabhängiger Expositionsbedingungen im Einzelfall abgeleitet und verstehen sich als Maßnahmenwerte. Für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt ist dazu je nach Schadstoff der für diesen Parameter sensiblere Aufnahmepfad (oral, inhalativ, dermal) zugrunde zu legen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass diese Beurteilungswerte je nach Aufnahmepfad und Schadstoff einen unterschiedlichen Bezug haben: Gesamtgehalte, resorptionsverfügbare Gehalte, pflanzenverfügbare Gehalte, Gehalte in der Feinkornfraktion < 63 µm oder Gehalte an bestimmten Spezies (z. B. Chrom (VI)) etc. Für großflächige Bodenbelastungen werden gebietsbezogene Beurteilungswerte (gBW) (siehe dort) unterschieden.

Beurteilungswerte für die aktuelle Nutzung (BWa): Abgeleitete gefahrenbezogene Kennwerte, bei deren Überschreiten durch Schadstoffe im Boden für die am Standort festgestellten aktuellen nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen von einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast auszugehen ist und Maßnahmen erforderlich sind.

Beurteilungswerte für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung (BWs): Abgeleitete gefahrenbezogene Kennwerte, bei deren Überschreiten durch Schadstoffe im Boden für das am Standort festgelegte sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzungsszenario in der Regel von einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast auszugehen ist und Maßnahmen erforderlich sind.

bodenabhängige Expositionsbedingungen: Einfluss des Bodens, der Schadstoffbindung an den Boden oder der Art des Vorkommens des Schadstoffes auf die Exposition. Diese Faktoren haben Auswirkungen z. B. auf die Resorptionsverfügbarkeit, Pflanzenverfügbarkeit und Anreicherung in der Feinkornfraktion < 63 µm.

Bodenaufnahmemenge (BA): Die Menge Boden, die im Rahmen von (Spiel-)aktivitäten an einem Tag verschluckt wird.

chronische Toxizität: Giftigkeit eines Stoffes bei wiederholter oder kontinuierlicher Aufnahme über einen längeren Zeitraum. In Abgrenzung zu kanzerogenen Stoffen liegt eine Dosis-Wirkungs-Beziehung vor.

Deposition: Als Deposition oder Staubbiederschlag wird die Ablagerung von Stoffen bezeichnet, die als trockener Staub, zusammen mit Regenwasser oder als gasförmige Bestandteile aus der Luft auf Oberflächen wie Boden, Pflanzen, Gebäude und Gewässer gelangen.

Expositionsabschätzung: Abschätzung der verfügbaren Menge eines Stoffes, denen ein Mensch unter den Bedingungen des betrachteten Einzelfalls ausgesetzt sein kann. Sie ist Grundlage der abschließenden Gefährdungsabschätzung.

Expositionsbedingungen: Durch örtliche Umstände und die Grundstücksnutzung im Einzelfall geprägte Art und Weise, in der Schutzgüter der Wirkung von Schadstoffen oder physikalischen Einwirkungen ausgesetzt sein können (§ 2 Nr. 12 BBodSchV).

Expositionsquotient (EQ): Relation von aktuellen Expositionsbedingungen am Standort zu den Standardexpositionsbedingungen des zugrundeliegenden Nutzungsszenarios der BBodSchV, z. B. im Hinblick auf die Bodenaufnahmemenge (BA), die Aufenthaltshäufigkeit (AH) und Aufenthaltsdauer (AD) oder die Anbaufläche (AF) für selbstangebaute Nahrungspflanzen.

Feinboden: Bei der Kennzeichnung der Gesamtbodenart wird zwischen den Kornfraktionen des Feinbodens (< 2 mm Durchmesser) und des Grobbodens (\geq 2 mm Durchmesser) unterschieden. Die Kornfraktionen des Feinbodens werden gemäß ihrem Durchmesser weiter unterteilt in Ton (< 0,002 mm); Schluff (0,002 - < 0,063 mm) und Sand (0,063 - < 2 mm).

Feinkornfraktion < 63 μ m: Die humantoxikologisch bedeutsame, lungengängige Fraktion sind Partikel mit einem Durchmesser von < 10 μ m (PM10). Aus labortechnischen Gründen wird auf die Analytik der Feinkornfraktion < 63 μ m des Bodens zurückgegriffen (DIN EN ISO 17892-4 bzw. ISO 11277).

gebietsbezogene Beurteilungswerte (gBW): Statistisch abgeleitete Kennwerte zur gebietsspezifischen Exposition, bei deren Überschreiten für ein bestimmtes Nutzungsszenario auf Basis der im Rahmen einer gebietsbezogenen Detailuntersuchung ermittelten Expositionsbedingungen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit von einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast auszugehen ist und ggf. Maßnahmen erforderlich sind (vgl. *Kapitel 9.3.3*).

Gefährdung: Zustand oder Situation, in der die Möglichkeit des Eintritts eines Schadens bzw. einer Störung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung besteht. Die Gefährdung entsteht durch ein mögliches räumliches und/oder zeitliches Zusammentreffen eines Schutzgutes und einer Gefahrquelle.

Gefährdungsabschätzung: Die Gefährdungsabschätzung ist der zusammenfassende Begriff für die Gesamtheit der Untersuchungen, Beurteilungen durch die Gutachter und Bewertungen durch die Behörden, die notwendig sind, um die Gefahrenlage bei einer einzelnen altlastverdächtigen Fläche oder

Verdachtsfläche zu klären. Die „abschließende Gefährdungsabschätzung“ findet i. d. R. auf der Stufe der Detailuntersuchung statt.

Gefahr: Im Verwaltungsrecht liegt eine Gefahr vor, „wenn eine Sachlage oder ein Verhalten bei ungehindertem Ablauf des objektiv zu erwartenden Geschehens in absehbarer Zeit mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ein polizeilich geschütztes Rechtsgut schädigen wird“. In der Altlastenbearbeitung wird darunter die Fähigkeit einer Substanz oder Situation verstanden, unter den konkreten Randbedingungen des Einzelfalls einen Schaden („nicht unerhebliche Rechtsgutverletzung“) zu verursachen. In der Arbeitshilfe bezieht sich der „Schaden“ auf die Gesundheit des Schutzguts (= Rechtsgut) „Mensch“.

Gefahrenbeurteilung: Die von Gutachtern unter anderem auf Grundlage von Beurteilungswerten abgeleitete Einschätzung der Gefahr. Davon abzugrenzen ist die Bewertung durch die Behörde, die als abschließende Gefährdungsabschätzung am Ende der Detailuntersuchung das weitere behördliche Handeln bestimmt.

Gefahrenbezug: Der Gefahrenbezug quantifiziert die hinreichende Wahrscheinlichkeit eines Schadenseintritts, die notwendig ist, wenn die Datenbasis zur Bewertung gesundheitlicher Wirkungen auf „praktisch sicheren Dosen“ (bei kanzerogenen auf dem „akzeptablen zusätzlichen Risiko“) für empfindliche Personengruppen der Allgemeinbevölkerung beruht.

Gefahrenverdacht: Beim Gefahrenverdacht liegen objektive Anhaltspunkte für eine Gefahr vor, die für eine endgültige Bewertung zu verifizieren sind.

Gesamtgehalt: Gehalt eines Analyten in einer Probe, der mit einem weitgehend erschöpfenden Extraktionsverfahren gemessen wurde, z. B. nach Königswasser-Aufschluss (Schwermetalle) oder Lösemittelextraktion (Organika).

Hausgärten: Hausgärten liegen im direkten Umfeld von Wohnhäusern und zeichnen sich dadurch aus, dass in ihnen sowohl intensives Kinderspiel als auch ein Anbau von Nutzpflanzen stattfinden kann.

Hintergrundexposition: Die orale Hintergrundexposition des Menschen bezeichnet die Schadstoffaufnahme aus dem Verzehr von gekauften Nahrungsmitteln, die in der Regel nicht lokal begrenzten Ursprungs sind, sondern eine weiträumige Durchschnittsbelastung repräsentieren. Sofern keine lokal spezifische Mehrbelastung des Trinkwassers vorliegt, kann auch der für die Getränke- und Nahrungszubereitung verwendete Wasseranteil mit einer durchschnittlichen Kontamination angenommen und unter der Hintergrundexposition subsummiert werden. Zusätzlich muss die Hintergrundexposition durch inhalativ aufgenommene Schadstoffe beachtet werden.

Hintergrundgehalt: Schadstoffgehalt eines Bodens, der sich aus dem geogenen (natürlichen) Grundgehalt eines Bodens und der ubiquitären Stoffverteilung als Folge diffuser Einträge in den Boden zusammensetzt.

kanzerogen: ... oder karzinogen ist eine Substanz, die Krebs erzeugen kann, ohne dass eine zusätzliche Einwirkung exogener Faktoren notwendig wäre. Ihre Wirkung ist irreversibel. Bei kanzerogen wirkenden Substanzen existiert im Gegensatz zu chronisch wirkenden Substanzen keine Dosis-Wirkungs-Beziehung.

Kleingärten (Schrebergärten): Kleingärten sind in der Regel in Kleingartenanlagen zusammengefasst und liegen - im Gegensatz zu Hausgärten - häufig in weiterer Entfernung vom Wohnort. Der Anbau von Nutzpflanzen ist ursprünglicher Zweck der Ausweisung von Kleingartenanlagen und in der Regel immer noch mehr oder minder großer Bestandteil der Kleingartennutzung. Die intensive Nutzung spielender Kinder sowie die Aufenthaltsdauer pro Jahr kann sehr unterschiedlich sein, was bei Expositionsabschätzungen zu berücksichtigen ist.

konsentiert: In Fachgremien abgestimmt.

lokale Wirkung: Insbesondere bei inhalativer Belastung können lokale Wirkungen im Atemtrakt auftreten, so dass sich die Ermittlung einer Körperdosis (vgl. TRD-Wert) nicht als sinnvoll erweist, sondern vielmehr Luftkonzentrationen als sogenannte Referenzkonzentrationen zur Beurteilung heranzuziehen sind.

Nutzgärten: Flächen in Wohngebieten und Kleingärten, die aktuell ausschließlich dem Nutzpflanzenanbau dienen und bei denen der Aufenthalt von Kindern ausgeschlossen werden kann.

nutzungsabhängige Expositionsbedingungen: Expositionsbedingungen, die durch die spezifische Flächennutzung gegeben sind, wie beispielsweise eine verminderte Bodenaufnahme durch Flächenversiegelung oder Aufenthaltshäufigkeiten bedingt durch die Nutzungsgewohnheiten der Nutzer.

Nutzungsszenario: Ein Nutzungsszenario beschreibt die Nutzung einer Fläche, bei der es bei einer definierten Nutzergruppe zum Kontakt mit den im Boden enthaltenen Schadstoffen und deren Aufnahme kommen kann.

Pflanzenverfügbarkeit: Maß der Verfügbarkeit von (Schad-) Stoffen aus dem Boden für die Pflanzen. Als standardisiertes Laborverfahren zur Bestimmung der Verfügbarkeit aller Elementverbindungen eines Bodens wird die Extraktion mit Ammoniumnitrat-Lösung nach DIN ISO 19730 angewandt.

planungsrechtlich zulässige Nutzung: Eine durch die Bauleitplanung erlaubte Nutzung einer Fläche.

Resorption: Prozess der Aufnahme von Stoffen aus dem Darm über die Darmschleimhaut in den Organismus (Blut, Lymphe) während der Verdauung.

Resorptionsverfügbarkeit (RV): Mengenanteil eines Stoffes, der nach Verschlucken eines Bodenpartikels im Magen-Darm-Trakt freigesetzt wird und für eine Aufnahme in den Organismus (Resorption) zur Verfügung steht. Dieser Vorgang wird durch ein festgelegtes In-vitro-Prüfsystem nach DIN-Norm 19738 simuliert und analysiert.

Richtwert I (RW I): Vom Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR) festgelegte Konzentration eines Stoffes in der Innenraumluft, bei der bei einer Einzelstoffbetrachtung nach gegenwärtigem Erkenntnisstand auch dann keine gesundheitliche Beeinträchtigung zu erwarten ist, wenn ein Mensch diesem Stoff lebenslang ausgesetzt ist. Aus Gründen der Vorsorge sollte auch im Konzentrationsbereich zwischen Richtwert I und II gehandelt werden, sei es durch technische und bauliche Maßnahmen am Gebäude (handeln muss in diesem Fall der Gebäudebetreiber) oder durch verändertes Nutzerverhalten. RW I kann als Zielwert bei der Sanierung dienen. Die Richtwerte beziehen sich auf Einzelstoffe und beinhalten keine Aussage über mögliche Kombinationswirkungen verschiedener Substanzen.

Richtwert II (RW II): Vom Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR) festgelegter wirkungsbezogener Wert, der sich auf die gegenwärtigen toxikologischen und epidemiologischen Kenntnisse zur Wirkungsschwelle eines Stoffes unter Einführung von Unsicherheitsfaktoren stützt. Er stellt die Konzentration eines Stoffes dar, bei deren Erreichen beziehungsweise Überschreiten unverzüglich zu handeln ist. Beim Überschreiten dieser Konzentration sind Schäden für die menschliche Gesundheit mit hinreichender Wahrscheinlichkeit anzunehmen. Je nach Wirkungsweise des Stoffes kann der Richtwert II als Kurzzeitwert (RW II K) oder Langzeitwert (RW II L) definiert sein.

Sofortmaßnahmen: Unverzügliches Handeln, um eine Gefahr aufgrund akuter Wirkungen oder hoher Schadstoffgehalte abzuwehren. In Frage kommen z. B. Absperrmaßnahmen oder Zutrittsbeschränkungen.

systemische Aufnahme (medizinisch): Aufnahme von Substanzen in das Blut- und/oder Lymphsystem des Körpers und Verteilung im gesamten Körper, so dass Wirkungen das gesamte Organsystem bzw. den gesamten Körper betreffen können.

systemische Aufnahme (Pflanze): Aufnahme von Substanzen aus dem Bodenwasser über die Wurzeln und Verteilung in der gesamten Pflanze.

Toxizität: Giftigkeit eines Stoffes. Maß für die Fähigkeit eines Stoffes, einen exponierten Organismus zu schädigen.

TRD-Wert: Bezeichnet tolerierbare täglich resorbierte Körperdosen eines Gefahrstoffes (pro Kilogramm Körpergewicht und Tag), bei denen mit hinreichender Wahrscheinlichkeit bei Einzelstoffbetrachtung nach dem gegenwärtigen Stand der Kenntnis keine nachteiligen Effekte auf die menschliche Gesundheit erwartet werden bzw. bei denen nur von einer geringen Wahrscheinlichkeit für Erkrankungen ausgegangen wird.

Wirkungspfad: Weg eines Schadstoffes von der Schadstoffquelle bis zu dem Ort einer möglichen Wirkung auf ein Schutzgut.

Zugänglichkeit: Möglichkeit des Bodenkontaktes unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten (Abdeckung, Versiegelung, Bedeckung, Bewuchsdichte, Einzäunung etc.).

**Arbeitshilfe zur Expositionsabschätzung
in der Detailuntersuchung
für den Wirkungspfad Boden-Mensch**

**Anhang 1
Checkliste zur Expositionsabschätzung**

Dezember 2023

A. Hintergrundinformation	
1.	<p>Sind die notwendigen Hintergrundinformationen zur Darlegung des Falles ausreichend dokumentiert? (vgl. <i>Kapitel 2</i>)</p> <p style="text-align: right;">ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p>Anmerkungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Lage des Untersuchungsgebietes <input type="checkbox"/> Informationen zu Eigentümer, Nutzung, Historie <input type="checkbox"/> Anhaltspunkte für schädliche Bodenveränderung <input type="checkbox"/> Ergebnisse aus der orientierenden Untersuchung
2.	<p>Ist die Fragestellung zur Durchführung der Expositionsabschätzung klar formuliert? (vgl. <i>Kapitel 3</i>)</p> <p style="text-align: right;">ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p>
3.	<p>Sind Zuständigkeiten zur Bearbeitung des Falles geklärt? (vgl. <i>Kapitel 2.2</i> und 3.3.2.2)</p> <p>Wer sind die Zuständigen? Bitte nennen:</p> <p>Wurden die Zuständigen beteiligt? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p>
B. Standortcharakterisierung	
1. Schadstoffinventar	
1.1	<p>Ist das Stoffinventar gut / nachvollziehbar charakterisiert? (vgl. <i>Kapitel 4.1</i>)</p> <p style="text-align: right;">ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p>Wenn ja, welche Schadstoffe sind relevant? Bitte nennen:</p>
1.2	<p>Gibt es Hinweise auf <u>weitere Stoffe</u>, die <u>zusätzlich</u> untersucht werden sollen?</p> <p style="text-align: right;">ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p>Bitte Schadstoffe nennen:</p>
1.3	<p>Sind die Stoffe mit den Vorgaben der BBodSchV oder fachlich gleichwertigen Beurteilungsmaßstäben bewertbar? (vgl. <i>Kapitel 4.1.1</i> und 4.1.2)</p> <p style="text-align: right;">ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p>Wenn nein, sind Neubewertungen notwendig? (vgl. <i>Kapitel 4.1.3</i>) ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p>Wenn ja, für welche Schadstoffe?</p>
1.4	<p>ACHTUNG! Sind aufgrund akuter Wirkungen Sofortmaßnahmen zu prüfen? (vgl. <i>Kapitel 3.3.2.1</i>)</p> <p style="text-align: right;">ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p>Begründung:</p>

B.	Standortcharakterisierung			
2	Charakterisierung der Nutzung			
2.1	Ist das relevante Nutzungsszenario bzw. sind die Nutzungsszenarien benannt und beschrieben? (vgl. <i>Kapitel 4.2</i>) ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>			
2.2	Bitte die relevanten Szenarien und Wirkungspfade ankreuzen. (vgl. <i>Kapitel 4.3</i> und <i>Tabelle 1</i>)			
		Wirkungspfade		
		Boden-Mensch/ Direktkontakt	Boden-Bodenluft-Mensch	Boden-Nutzpflanze-Mensch
		Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch		
	Kinderspielflächen			
	Wohngebiete			
	Haus- und Kleingärten			
	Nutzgärten			
	Park- und Freizeitanlagen			
	Industrie- und Gewerbegrundstücke			
	Sport- und Bolzplätze			
	<p>dunkelgrau: Wirkungspfad für das Nutzungsszenario nicht relevant hellgrau: nur bei auf der Fläche befindlicher oder angrenzender Bebauung sowie bei ggf. künftiger Bebauung relevant</p>			
2.3	Gibt es deutliche Abweichungen von den Standardnutzungsszenarien? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> Wenn ja, welche? (vgl. <i>Kapitel 4.2</i> und <i>4.3</i>)			
2.4	Müssen neue Szenarien definiert werden? (vgl. <i>Kapitel 9.2.1</i>) ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> Wenn ja, bitte beschreiben?			

C. Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt									
1.	<p>Ist der Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt relevant? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p>(vgl. <i>Kapitel 4.3</i> und <i>5</i>)</p> <p>Wenn nein, weiter mit dem nächsten Wirkungspfad.</p>								
2.	<p>Wenn ja, welches sind die beurteilungsbestimmenden Aufnahmepfade für die relevanten Schadstoffe? Bitte Schadstoffe nach relevanten Aufnahmepfaden eintragen. (vgl. <i>Kapitel 5.1</i>)</p>								
	Aufnahmepfade								
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 25%;">oral</th> <th style="width: 25%;">inhalativ (Staub)</th> <th style="width: 25%;">inhalativ (Gas)</th> <th style="width: 25%;">dermal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: #d9ead3;"></td> <td style="background-color: #d9ead3;"></td> <td style="background-color: #555555;"></td> <td style="background-color: #d9ead3;"></td> </tr> </tbody> </table>	oral	inhalativ (Staub)	inhalativ (Gas)	dermal				
	oral	inhalativ (Staub)	inhalativ (Gas)	dermal					
dunkelgrau: Aufnahmepfad für den Wirkungspfad nicht relevant									
3.	<p>Liegen alle relevanten Untersuchungsergebnisse aus der orientierenden Untersuchung (OU) vor? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Abgrenzung der Untersuchungsfläche <input type="checkbox"/> Standortcharakterisierung <input type="checkbox"/> ggf. Nutzungskartierung <input type="checkbox"/> Probennahmeprotokolle <input type="checkbox"/> Analytik (Boden) <input type="checkbox"/> weitere: _____ <p>Wenn nein, welche Untersuchungen waren bzw. sind noch zu ergänzen?</p>								
4.	<p>Sind die erforderlichen Nachuntersuchungen erfolgt und ausreichend (Qualitätssicherung)? (vgl. <i>Kapitel 10.1</i>) ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p>Anmerkungen:</p>								

C.	Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt
6.	Prüfung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen (vgl. <i>Kapitel 5.3</i>)
6.1	Welche Daten liegen zur Nutzung der Fläche vor? <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Kartografische Darstellungen im GIS-Format <input type="checkbox"/> Luftbilddauswertungen <input type="checkbox"/> Fotodokumentation <input type="checkbox"/> Tabellen mit Subnutzungen der Flächen (in m²) <input type="checkbox"/> Ergebnisse aus Befragungen (Dokumentation) <input type="checkbox"/> weitere: _____
6.2	Wurden Annahmen zur Abschätzung der aktuellen Nutzung angepasst? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> Wenn ja; welche? <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Bodenaufnahmemenge (g/d) (vgl. <i>Kapitel 5.3.1</i>) <input type="checkbox"/> Aufenthaltshäufigkeit (d/a) (vgl. <i>Kapitel 5.3.2</i>) <input type="checkbox"/> Aufenthaltsdauer (h/d) (vgl. <i>Kapitel 5.3.3</i>) <input type="checkbox"/> weitere: _____ Anmerkungen:
6.3	Wurden die Kappungsgrenzen (0,1 g Boden/Tag; 12 g Boden/Jahr) beachtet? (vgl. <i>Kapitel 5.3.1</i>) ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> Anmerkungen:
7.	Untersuchungen am Schutzgut (Mensch) (vgl. <i>Kapitel 9.4</i>)
7.1	Wurden Human-Biomonitoring-Untersuchungen durchgeführt? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> Wenn ja, welche Ergebnisse liegen vor und wie wurden diese ausgewertet?
8.	Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Mensch/Direktkontakt (vgl. <i>Kapitel 5.4</i>)
8.1	Welche Fallgestaltungen bzgl. der Nutzung wurden abschließend beurteilt: <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung <input type="checkbox"/> aktuelle Nutzung <input type="checkbox"/> weiteres Nutzungsszenario: _____ Ergebnis:

D.	Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch			
1.	Ist der Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch relevant? (vgl. <i>Kapitel 4.3</i> und <i>6</i>)		ja <input type="checkbox"/>	nein <input type="checkbox"/>
Wenn nein, weiter mit dem nächsten Wirkungspfad.				
2.	Wenn ja, welches sind die beurteilungsbestimmenden Aufnahmepfade für die relevanten Schadstoffe? Bitte Schadstoffe nach relevanten Aufnahmepfaden eintragen. (vgl. <i>Kapitel 6.1</i>)			
Aufnahmepfade				
oral		inhalativ (Staub)	inhalativ (Gas)	dermal
dunkelgrau: Aufnahmepfad für den Wirkungspfad nicht relevant				
3.	Liegen alle relevanten Untersuchungsergebnisse aus der orientierenden Untersuchung (OU) vor?		ja <input type="checkbox"/>	nein <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Abgrenzung der Untersuchungsfläche <input type="checkbox"/> Identifikation der Schadstoffquelle <input type="checkbox"/> Standortcharakterisierung <input type="checkbox"/> ggf. Nutzungskartierung / Begehungsprotokolle <input type="checkbox"/> Probennahmeprotokolle <input type="checkbox"/> Analytik (Boden, Bodenluft, Innenraumluft) <input type="checkbox"/> weitere: _____				
Wenn nein, welche Untersuchungen waren bzw. sind noch zu ergänzen?				
4.	Sind die erforderlichen Nachuntersuchungen erfolgt und ausreichend (Qualitätssicherung)? (vgl. <i>Kapitel 10.1</i>)		ja <input type="checkbox"/>	nein <input type="checkbox"/>
Anmerkungen:				

D.	Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch		
5.	Prüfung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen (vgl. Kapitel 6.2)		
5.1	Untersuchung der Bodenluft? Wenn ja, für welche Stoffe relevant, z. B.: <input type="checkbox"/> aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX) <input type="checkbox"/> leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW) <input type="checkbox"/> Nitroaromaten <input type="checkbox"/> weitere: _____		
6.	Prüfung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen (vgl. Kapitel 6.3)		
6.1	Angaben zu Art und Zustand von Gebäuden? (vgl. Kapitel 6.3.1)	ja <input type="checkbox"/>	nein <input type="checkbox"/>
	Wenn ja, wurden Annahmen zum Schadstofftransfer Boden-Innenraumlufte angepasst?	ja <input type="checkbox"/>	nein <input type="checkbox"/>
	Wenn ja, Begründung:		
6.2	Wurden Annahmen zur Abschätzung der aktuellen Gebäudenutzung angepasst? (vgl. Kapitel 6.3.2)	ja <input type="checkbox"/>	nein <input type="checkbox"/>
	Wenn ja; welche?		
	<input type="checkbox"/> Aufenthaltshäufigkeit und -dauer <input type="checkbox"/> Nutzungsart und -intensität <input type="checkbox"/> weitere: _____		
	Begründung:		
7.	Untersuchungen am Aufnahmemedium (Innenraumlufte) (vgl. Kapitel 6.4)		
7.1	Wurden Untersuchungen in der Innenraumlufte durchgeführt?	ja <input type="checkbox"/>	nein <input type="checkbox"/>
	Wenn ja, welche Ergebnisse liegen vor und wie wurden diese ausgewertet?		
8.	Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Bodenluft-Mensch (vgl. Kapitel 6.5)		
8.1	Welche Fallgestaltungen bzgl. der Nutzung wurden abschließend beurteilt? <input type="checkbox"/> sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung <input type="checkbox"/> aktuelle Nutzung <input type="checkbox"/> weiteres Nutzungsszenario: _____		
	Ergebnis:		

E. Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch													
1.	Ist der Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch relevant? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> (vgl. <i>Kapitel 4.3</i> und <i>7</i>) Wenn nein, weiter mit dem nächsten Wirkungspfad.												
2.	Wenn ja, welches sind die beurteilungsbestimmenden Aufnahmepfade für die relevanten Schadstoffe? Bitte Schadstoffe nach relevanten Aufnahmepfaden eintragen. (vgl. <i>Kapitel 7.1</i>) <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="4">Aufnahmepfade</th> </tr> <tr> <th style="width: 25%;">oral</th> <th style="width: 25%;">inhalativ (Staub)</th> <th style="width: 25%;">inhalativ (Gas)</th> <th style="width: 25%;">dermal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: #d9ead3;"></td> <td style="background-color: #d9ead3;"></td> <td style="background-color: #d9ead3;"></td> <td style="background-color: #d9ead3;"></td> </tr> </tbody> </table> <p style="background-color: #d9ead3; padding: 5px;">dunkelgrau: Aufnahmepfad für den Wirkungspfad nicht relevant</p>	Aufnahmepfade				oral	inhalativ (Staub)	inhalativ (Gas)	dermal				
Aufnahmepfade													
oral	inhalativ (Staub)	inhalativ (Gas)	dermal										
2.1	Welche Aufnahmepfade sind zu prüfen? (vgl. <i>Tabelle 9</i>) <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="border: none; padding-right: 20px;">Systemisch <input type="checkbox"/></td> <td style="border: none; padding-right: 20px;">Verschmutzung <input type="checkbox"/></td> <td style="border: none;">Gaspfad <input type="checkbox"/></td> </tr> </table>	Systemisch <input type="checkbox"/>	Verschmutzung <input type="checkbox"/>	Gaspfad <input type="checkbox"/>									
Systemisch <input type="checkbox"/>	Verschmutzung <input type="checkbox"/>	Gaspfad <input type="checkbox"/>											
3.	Liegen alle relevanten Untersuchungsergebnisse aus der orientierenden Untersuchung (OU) vor? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Abgrenzung der Untersuchungsfläche <input type="checkbox"/> Standortcharakterisierung <input type="checkbox"/> ggf. Nutzungskartierung <input type="checkbox"/> ggf. Befragung der Nutzenden <input type="checkbox"/> Probennahmeprotokolle <input type="checkbox"/> Analytik (Boden, ggf. Nutzpflanzen) <input type="checkbox"/> weitere: ----- Wenn nein, welche Untersuchungen waren bzw. sind noch zu ergänzen?												
4.	Sind die erforderlichen Nachuntersuchungen erfolgt und ausreichend (Qualitätssicherung)? (vgl. <i>Kapitel 10.1</i>) ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> Anmerkungen:												

E.	Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch	
5.	Prüfung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen (vgl. Kapitel 7.2)	
5.1	Prüfung der Gesamtgehalte (Fraktion < 2 mm)? (vgl. Kapitel 7.2.1) Wenn ja, für welche Stoffe relevant, z. B.: <input type="checkbox"/> Arsen <input type="checkbox"/> Quecksilber <input type="checkbox"/> BaP <input type="checkbox"/> weitere: _____	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
5.2	Prüfung der pflanzenverfügbaren Gehalte (Ammoniumnitratextrakt)? (vgl. Kapitel 7.2.2) Wenn ja, für welche Stoffe relevant, z. B.: <input type="checkbox"/> Blei <input type="checkbox"/> Cadmium <input type="checkbox"/> Thallium <input type="checkbox"/> weitere: _____	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
5.3	Prüfung verfügbarkeitsbestimmender Faktoren? (vgl. Kapitel 7.2.3) Wenn ja, welche sind relevant? <input type="checkbox"/> pH-Wert <input type="checkbox"/> TOC <input type="checkbox"/> Bodenart / Tongehalt <input type="checkbox"/> weitere: _____	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
	Transferabschätzungen Boden-Nutzpflanze? (vgl. Kapitel 7.2.4) Wenn ja, welche?	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
6.	Untersuchungen am Schutzgut (Pflanze) (vgl. Kapitel 7.4)	
6.1	Wurden Pflanzenuntersuchungen durchgeführt? Wenn ja, welche? Ergebnisse:	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
7.	Prüfung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen (vgl. Kapitel 7.3)	
7.1	Welche Daten liegen zur Nutzung der Fläche vor? <input type="checkbox"/> Kartografische Darstellungen im GIS-Format <input type="checkbox"/> Theoretische Abschätzungen zu Nutzungsanteilen <input type="checkbox"/> Fotodokumentation <input type="checkbox"/> Vor-Ort-Erhebungen / Ergebnisse aus Befragungen (Dokumentation) <input type="checkbox"/> weitere: _____	

E. Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch													
7.2	<p>Wurden Annahmen zur Ermittlung der Anbaubedingungen angepasst (abgeschätzt oder erhoben)? (vgl. <i>Kapitel 7.3.1</i> und <i>7.3.2</i> sowie <i>Anhang 3</i>) ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p>Wenn ja; welche?</p> <p><input type="checkbox"/> Nutzpflanzenspektrum</p> <p><input type="checkbox"/> Personenanzahl: _____</p> <p><input type="checkbox"/> Anbaufläche (m²/Person): _____</p> <p><input type="checkbox"/> weitere: _____</p> <p>Wie wurden die angepassten Annahmen ermittelt?</p> <p><input type="checkbox"/> Abschätzung (realistisches worst-case-Szenario)</p> <p><input type="checkbox"/> Befragungen</p> <p><input type="checkbox"/> Luftbildauswertungen</p> <p><input type="checkbox"/> Vor-Ort-Erhebungen</p> <p>Ergebnis:</p>												
8. Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze-Mensch (vgl. <i>Kapitel 7.5</i>)													
8.1	<p>Welche Fallgestaltungen bzgl. der Nutzung wurden abschließend beurteilt?</p> <p>Ergebnis:</p>												
F. Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch													
1.	<p>Ist der Wirkungspfad Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch relevant? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p>(vgl. <i>Kapitel 4.3</i> und <i>8</i>)</p> <p>Wenn nein, weiter mit der abschließenden Gefährdungsabschätzung.</p>												
2.	<p>Wenn ja, welches sind die beurteilungsbestimmenden Aufnahmepfade für die relevanten Schadstoffe? Bitte Schadstoffe nach relevanten Aufnahmepfaden eintragen. (vgl. <i>Kapitel 8.1</i>)</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="4">Aufnahmepfade</th> </tr> <tr> <th style="width: 25%;">oral</th> <th style="width: 25%;">inhalativ (Staub)</th> <th style="width: 25%;">inhalativ (Gas)</th> <th style="width: 25%;">dermal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: #d9ead3;"></td> <td style="background-color: #d9ead3;"></td> <td style="background-color: #d9ead3;"></td> <td style="background-color: #d9ead3;"></td> </tr> </tbody> </table> <p>dunkelgrau: Aufnahmepfad für den Wirkungspfad nicht relevant</p>	Aufnahmepfade				oral	inhalativ (Staub)	inhalativ (Gas)	dermal				
Aufnahmepfade													
oral	inhalativ (Staub)	inhalativ (Gas)	dermal										

F.	Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch	
3.	Liegen alle relevanten Untersuchungsergebnisse aus der orientierenden Untersuchung (OU) vor? <input type="checkbox"/> Abgrenzung der Untersuchungsfläche <input type="checkbox"/> Standortcharakterisierung <input type="checkbox"/> ggf. Nutzungskartierung <input type="checkbox"/> Probennahmeprotokolle <input type="checkbox"/> Analytik (Boden, ggf. Futterpflanzen) <input type="checkbox"/> weitere: _____ Wenn nein, welche Untersuchungen waren bzw. sind noch zu ergänzen?	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
4.	Sind die erforderlichen Nachuntersuchungen erfolgt und ausreichend (Qualitätssicherung)? (vgl. <i>Kapitel 10.1</i>) Anmerkungen:	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
5.	Prüfung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen (vgl. <i>Kapitel 8.1</i>)	
5.1	Prüfung des Wirkungspfades Boden-Pflanze hinsichtlich (Futter-) Pflanzenqualität? (vgl. <i>Kapitel 8.1</i>) Wenn ja, für welche Stoffe relevant? <input type="checkbox"/> Arsen <input type="checkbox"/> Blei <input type="checkbox"/> Cadmium <input type="checkbox"/> Kupfer <input type="checkbox"/> Nickel <input type="checkbox"/> Quecksilber <input type="checkbox"/> Thallium <input type="checkbox"/> Hexachlorbenzol <input type="checkbox"/> Hexachlorcyclohexan <input type="checkbox"/> PCB <input type="checkbox"/> PCDD/F <input type="checkbox"/> weitere: _____	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
6.	Prüfung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen	
6.1	Wurden die Bedingungen erhoben, die Einfluss auf den Verschmutzungsgrad haben? (vgl. <i>Kapitel 8.1</i>) Ergebnisse:	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
6.2	Liegen Transferabschätzungen Boden-Nutzpflanze vor? Wenn ja, welche?	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>

F.	Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch	
7.	Untersuchungen am Schutzgut (Futterpflanze / tierische Produkte)	
7.1	<p>Wurden Untersuchungen der Futterpflanzen durchgeführt? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p>(vgl. <i>Kapitel 8.2</i>)</p> <p>Wenn ja, welche und wie wurden diese ausgewertet?</p> <p>Ergebnisse:</p>	
7.2	<p>Wurden Untersuchungen tierischer Produkte durchgeführt? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p>(vgl. <i>Kapitel 8.3</i>)</p> <p>Wenn ja, welche und wie wurden diese ausgewertet?</p>	
8.	Beurteilung des Wirkungspfades Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch	
8.1	<p>Welche Fallgestaltungen bzgl. der Nutzung wurden abschließend beurteilt?</p> <p>Ergebnis:</p>	
G.	Integrative Betrachtung der Wirkungspfade Boden-Mensch/Direktkontakt und Boden-Nutzpflanze-Mensch	
1.1	<p>Wurde die Schadstoffzufuhr für den Wirkungspfad Boden-Mensch/ Direktkontakt ermittelt? (vgl. <i>Kapitel 9.1</i>)</p> <p>Ergebnis:</p>	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
1.2	<p>Wurde die Schadstoffzufuhr für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch ermittelt? (vgl. <i>Kapitel 9.1</i>)</p> <p>Wenn ja, wie wurde der Schadstoffgehalt in der Pflanze ermittelt:</p> <p><input type="checkbox"/> Transferabschätzungen</p> <p><input type="checkbox"/> Pflanzenuntersuchungen</p> <p><input type="checkbox"/> weitere: _____</p> <p>Ergebnis:</p>	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
1.3	<p>Wurde die Summe der Schadstoffzufuhr den humantoxikologisch abgeleiteten Beurteilungswerten gegenübergestellt? (vgl. <i>Kapitel 9.1</i>)</p> <p>Ergebnis:</p>	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>

H.	Abschließende Gefährdungsabschätzung		
1.	Wurden alle relevanten Sachverhalte abgebildet und bewertet? Anmerkungen:	ja <input type="checkbox"/>	nein <input type="checkbox"/>
2.	Wurden alle relevanten Schadstoffe berücksichtigt und die Gefahren- beurteilungen für alle relevanten Aufnahmepfade abgewogen oder integrativ betrachtet? Anmerkungen:	ja <input type="checkbox"/>	nein <input type="checkbox"/>
3.	Wurden alle Wirkungspfade berücksichtigt und in der abschließenden Gefährdungsabschätzung einzeln bzw. integrativ betrachtet? Anmerkungen:	ja <input type="checkbox"/>	nein <input type="checkbox"/>
4.	Kann der vorliegende Fall für alle relevanten Schadstoffe und Wirkungspfade abschließend bewertet werden? Anmerkungen:	ja <input type="checkbox"/>	nein <input type="checkbox"/>

**Arbeitshilfe zur Expositionsabschätzung
in der Detailuntersuchung
für den Wirkungspfad Boden-Mensch**

**Anhang 2
Datenblätter zur Expositionsabschätzung**

Dezember 2023

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Schadstoffdatenblätter – Vorwort	1
Metalle/Halbmethalle	2
Arsen	3
Blei	7
Cadmium	12
Chrom	17
Nickel	21
Quecksilber	25
Cyanide.....	32
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	35
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK ₁₆) vertreten durch Benzo(a)pyren.....	38
Naphthalin	43
Pflanzenschutzmittel.....	46
Hexachlorcyclohexan (HCH-Gemisch oder β-HCH).....	46
Polychlorierte Biphenyle (PCB ₆).....	50
Chlorphenole	57
Pentachlorphenol (PCP) (C ₆ Cl ₅ OH)	58
Chlorbenzole.....	62
Hexachlorbenzol (HCB) (C ₆ Cl ₆).....	63
Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)	67
Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW).....	70

Schadstoffdatenblätter – Vorwort

Für die Bewertung der Ergebnisse aus der Expositionsabschätzung sind Daten zu den humantoxikologisch relevanten Wirkeigenschaften der Schadstoffe erforderlich. Die Grundzüge der Stoffbewertung sind in der *Arbeitshilfe Kapitel 4.1* beschrieben.

Anhang 2 bietet Unterstützung bei der Gefährdungsabschätzung bezüglich der Relevanz der Schadstoffe hinsichtlich ihrer möglichen Aufnahme- und Expositionspfade. Dazu werden u. a. relevante Daten zur Quantifizierung gesundheitlicher Wirkungen aufgeführt, auf Besonderheiten in der Bewertung hingewiesen sowie Beurteilungswerte aus angrenzenden Rechtsbereichen zitiert.

Darüber hinaus sind, soweit vorhanden, für die verschiedenen Nutzungsszenarien die Prüf- und Maßnahmenwerte der BBodSchV bzw. die orientierenden Hinweis- oder Bodenbeurteilungswerte aufgeführt, verknüpft mit Informationen zum nutzungsspezifisch relevanten Aufnahmepfad und dem sensibelsten toxikologischen Wirkendpunkt (toxisch/kanzerogen) sowie daraus folgenden Hinweisen für mögliche Untersuchungen zur Expositionsabschätzung.

Es finden sich Angaben zu folgenden Stoffgruppen:

- Metalle/Halbmethalle
- Cyanide
- Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)
- Pflanzenschutzmittel (PSM)
- Polychlorierte Biphenyle (PCB₆)
- Chlorphenole
- Chlorbenzole
- Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)
- Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW)

Neben den Stoffen mit Prüf- und Maßnahmenwerten nach BBodSchV sind Stoffe mit orientierenden Hinweiswerten und Stoffe ohne Prüfwertvorschläge aufgeführt.

In den Datenblättern werden unter Quantifizierung der Wirkung für die Qualität der unit risk-Schätzung die Kategorien UR++ („unit risk gut geeignet“), UR+ („unit risk geeignet“) und UR- („unit risk nicht geeignet“) angegeben. Nähere Erläuterungen der Kategorien sind in der Bekanntmachung über Methoden und Maßstäbe für die Ableitung der Prüf- und Maßnahmenwerte nach der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 18. Juni 1999 (Bundesanzeiger, Band 51, Heft 161a, S. 1–39) aufgeführt. Die Bezeichnung ‚(V)‘ steht im Folgenden für ‚vorläufig‘.

Metalle/Halbmalle

Schwermetalle sowie Halbmetalle können im Gegensatz zu den meisten organischen Schadstoffen nicht nur anthropogen sondern auch natürlich vorkommen (geogene Hintergrundgehalte). Darüber hinaus können Schwermetalle und Halbmetalle in Umweltmedien in unterschiedlichen Oxidationsstufen und Bindungsformen auftreten, mit ggf. unterschiedlichen Wirkungen oder Wirkpotenzialen (wie beispielsweise für Chrom (III) bzw. Chrom (VI) bekannt). Mit Ausnahme von metallischem Quecksilber und metallorganischen Verbindungen sind Metalle im Allgemeinen nicht flüchtig.

Arsen

Bezeichnung	Arsen (CAS-Nr.: 7440-38-2)
Vorkommen	Arsen ist ein Halbmetall und kommt im Boden in 3-wertiger und 5-wertiger Form vor. Eine differenzierte Betrachtung der Bindungsformen erfolgt im Rahmen der Prüfwertableitungen nicht. Organische Arsenverbindungen, die auch im Stoffwechsel zahlreicher Organismen entstehen können, gelten als weniger toxisch. Arsen verhält sich im Boden vergleichsweise wenig mobil und wird nur in geringem Maße von Pflanzen aufgenommen.
Humantoxikologische Bewertung	Die kanzerogenen Wirkungen von Arsen sind ausschlaggebend für die humantoxikologische Bewertung (Haut, Leber, Lunge). Bei oraler Exposition führen die toxischen und die kanzerogenen Wirkungen zur Ableitung ähnlicher Bodenwerte. Für Arsen sind auch akut toxische Wirkungen bekannt.
Quantifizierung der Wirkung	Quelle: UBA (1999ff) orale Aufnahme - toxisch TRD: 300 ng/(kg KG*d) (dermale Effekte) Resorption: 100 % SF (a,b,c,d): 3 (1,1,1,3) orale Aufnahme - kanzerogen Krebsrisiko 10 ⁻⁵ : 5,6 ng/(kg KG*d) (UR-) Resorption: 100 % inhalative Aufnahme - kanzerogen Krebsrisiko 10 ⁻⁵ : 1,8 ng/m ³ (UR++) Resorption: 30 %
Nutzungsszenarien	Während in den Nutzungsszenarien ‚Kinderspielflächen‘, ‚Wohngebiete‘ und ‚Park- und Freizeitanlagen‘ die toxischen und die kanzerogenen Wirkungen nach oraler Exposition zur Ableitung ähnlicher Bodenwerte führen, dominiert in den Nutzungsszenarien ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ sowie ‚Sport- und Bolzplätze‘ die kanzerogene Wirkung nach Inhalation. Für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze (‚Nutzgärten‘) basiert der Prüfwert von 200 mg/kg aufgrund einer zu geringen Datenlage (Boden-Pflanze-Wertepaare) auf üblichen Hintergrundbelastungen (Faktor 10). Reduzierende Bodenbedingungen erhöhen die Mobilität von Arsen, so dass für diese Bodenverhältnisse ein Prüfwert von 50 mg/kg abgeleitet werden konnte.
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> • Beim oralen Aufnahmepfad sind toxische und kanzerogene Wirkungen gleichbedeutend. • Die Prüfwerte sind nach Plausibilitätsprüfung abgeleitet. • Ab Arsengehalten von 100 mg/kg müssen auch akut toxische Wirkungen geprüft werden.
Beurteilungswerte Bodenluft	Keine Relevanz
Beurteilungswerte Innenraumluft (Staub)	Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige Stoffe im Hausstaub (AGÖF 2004): 0,5 mg/kg (Hintergrundwert) 1 mg/kg (Normalwert) 3 mg/kg (Auffälligkeitswert)
Beurteilungswerte Lebensmittel	0,01–0,02 mg/kg in für Säuglinge und Kleinkinder bestimmten Lebensmitteln (Arsen _{anorganisch} ; EU-VO 2023/915) 0,03–0,3 mg/kg für Reis und Erzeugnisse auf Reisbasis (Arsen _{anorganisch} ; EU-VO 2023/915) 0,5 mg/kg in Salz (Gesamtarsen; EU-VO 2023/915) 0,1 mg/l Wein, weinhaltige Getränke (WeinV 2022) in anderen Ländern liegen z. T. weitere Grenzwerte vor (vgl. IGS NRW)

Bezeichnung	Arsen (CAS-Nr.: 7440-38-2)	
Trinkwasser	0,01 mg/l (Grenzwert TrinkwV 2023; gültig bis 11.01.2028 bzw. für vor dem 12.01.2028 in Betrieb genommene Wasserversorgungsanlagen bis 11.01.2036); 0,004 mg/l (Grenzwert TrinkwV 2023; gültig ab 12.01.2028 für ab dem 12.01.2028 neu in Betrieb genommene Wasserversorgungsanlagen bzw. ab 12.01.2036 für alle Wasserversorgungsanlagen.	
Harmonisierte Einstufung - Anhang VI der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP-Verordnung)	<u>Gefahrenklasse, -kategorie, -kodierung</u> Acute Tox. 3 * Aquatic Acute 1 Aquatic Chronic 1	<u>Kodierung der Gefahrenhinweise</u> H301: Giftig bei Verschlucken H331: Giftig bei Einatmen H400: Sehr giftig für Wasserorganismen H410: Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung
Weitere Verweise	Stellungnahmen zum Arsengehalt in Lebensmitteln des BfR (siehe auch BfR MEAL-Studie). Weitere Informationen finden sich bei EIKMANN et al. (1999ff), IGS NRW, LABO (2013) etc.	

Expositionsabschätzung für Arsen (CAS-Nr.: 7440-38-2)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahmepfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze ³	Wirkendpunkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Kinderspielflächen	25 mg/kg TM ¹	orale Aufnahme		toxisch / kanzerogen	Resorptionsverfügbarkeit
Wohngebiete	50 mg/kg TM ¹				Resorptionsverfügbarkeit
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
Park- und Freizeitanlagen	125 ¹ /100* mg/kg TM * Akutwert				Resorptionsverfügbarkeit
Industrie- und Gewerbegrundstücke	140 mg/kg TM ¹	inhalative Aufnahme		kanzerogen	Bestimmung in der Feinkornfraktion < 63 µm
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad

Expositionsabschätzung für Arsen (CAS-Nr.: 7440-38-2)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahmepfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze ³	Wirkendpunkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Nutzgärten	200/50* mg/kg TM ¹ *bei reduzierenden Verhältnissen		systemisch: gering Verschmutzung: relevant Gaspfad: - Deposition: relevant	toxisch / kanzerogen	nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Pflanzenpfad
Haus- und Kleingärten	25 mg/kg TM ¹ . * * Prüfwert für Kinderspielflächen	orale Aufnahme		toxisch / kanzerogen	Resorptionsverfügbarkeit
	200/50* mg/kg TM ¹ *bei reduzierenden Verhältnissen		systemisch: gering Verschmutzung: relevant Gaspfad: - Deposition: relevant		nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
Sport- und Bolzplätze	100 mg/kg TM ²	inhalative Aufnahme		kanzerogen	Bestimmung in der Feinkornfraktion < 63 µm
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad

¹ Prüfwert nach BBodSchV.
² Orientierender Bodenbeurteilungswert nach DELSCHEN et al. (2006)
³ Siehe hierzu *Arbeitshilfe Tabelle 9*

Quellen:

- AGÖF (Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V.) (2004): AGÖF-Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige organische Verbindungen und Schwermetalle im Hausstaub. Fassung Frühjahr 2004. Online: https://www.agoef.de/fileadmin/user_upload/dokumente/orientierungswerte/AGOEF-Hausstaub-Orientierungswerte-2004.pdf
- BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).
- BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung). Online: <http://www.bfr.bund.de/de/start.html>
- BfR MEAL-Studie: Was im Essen steckt. Bundesinstitut für Risikobewertung. Online: <https://www.bfr-meal-studie.de/>
- DELSCHEN, T.; BERTGES, W.-D.; LEISNER-SAABER, J. (2006): Bewertung von Schadstoffbelastungen auf Sport- und Bolzplätzen nach Maßstäben des Bodenschutzes. In: Bodenschutz 2/2006, S. 44–48.
- EIKMANN, T.; HEINRICH, U.; HEINZOW, B.; KONIETZKA, R. (Hrsg.) (1999ff): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen – Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung. Erich Schmidt Verlag, Berlin.

- IGS NRW: Informationssystem Gefährliche Stoffe. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Online: <https://igsvtu.lanuv.nrw.de/home/>
- LABO (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (2013): Arbeitshilfe Arsentransfer aus Böden in Nahrungs- und Futterpflanzen – Gefahrenbeurteilung und Maßnahmen. Online: https://www.labo-deutschland.de/documents/2013-09-03_LABO-Arbeitshilfe_Arsentranfer.pdf
- TrinkwV (2023): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV). Trinkwasserverordnung vom 20. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 159).
- UBA (Umweltbundesamt) (1999ff): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. Erich Schmidt Verlag, Loseblattsammlung 1999 mit Ergänzungen, Berlin.
- VERORDNUNG (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), OJ L 353, 31.12.2008, p. 1–1355.
- VERORDNUNG (EU) 2023/915 DER KOMMISSION vom 25. April 2023 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), Amtsblatt der Europäischen Union, L 119, 5.5.2023, p. 103–157. Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0915>
- WeinV (2022): Weinverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. April 2009 (BGBl. I S. 827), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 21. Oktober 2022 (BGBl. I S. 1873) geändert worden ist.

Blei

Bezeichnung	Blei (CAS-Nr.: 7439-92-1; elementar)
Vorkommen	<p>Blei ist ein Schwermetall, das in der Natur – mit Ausnahme kleiner Mengen elementaren Bleis, die mit Erzen vergesellschaftet sind – hauptsächlich in Form verschiedener anorganischer Verbindungen in der Oxidationsstufe +II vorkommt. Anorganische Verbindungen mit Blei in der Oxidationsstufe +IV (z. B. Bleidioxid und Blei(II,IV)-oxid [Mennige]) wirken oxidierend. Im Boden verhält sich Blei mäßig mobil.</p>
Humantoxikologische Bewertung	<p>Aussagen zur Toxizität von Blei gehen überwiegend auf Untersuchungen mit leicht löslichen Blei(II)-Verbindungen zurück, wobei für die Bewertung insbesondere der orale Aufnahmepfad über die Nahrung Relevanz erlangt. In den Organismus aufgenommenes Blei reichert sich langfristig im Knochengewebe an.</p> <p>Insgesamt wird in der Bevölkerung seit den 1980er Jahren eine abnehmende Tendenz insbesondere für die immissionsbedingte Bleiaufnahme sowie daraus resultierender Blutbleikonzentrationen beobachtet. Die neurotoxischen Effekte sowie die hohe Resorptionsrate von Blei bei Kindern sind ausschlaggebend für die humantoxikologische Bewertung (Entwicklung der Intelligenz). Aus epidemiologischen Daten an Kindern werden im Blut gemessene Bleikonzentrationen mit den beobachteten Effekten in Zusammenhang gebracht, wobei diese bereits bei Blutbleikonzentrationen (PbB) von weniger als 5 µg/dl auftreten und aufgrund des aktuellen Kenntnisstandes Wirkschwellen fachlich nicht zu begründen sind. Im Jahr 2010 wurde von der EFSA für die Entwicklungsneurotoxizität ein BMDL₀₁ von 0,5 µg/kg KG und Tag abgeleitet. Im Vergleich zum Kenntnisstand von 1999 (Prüfwertableitung) ist die Wirkung des Bleis anhand der aktuellen toxikologischen Datenlage als deutlich kritischer einzustufen.</p>
<p>Quantifizierung der Wirkung</p> <p>orale Aufnahme - toxisch</p> <p>orale Aufnahme - kanzerogen</p> <p>inhalative Aufnahme - kanzerogen</p>	<p>Quelle: UBA (1999ff)</p> <p>TRD: 1 µg/(kg KG*d) (entspricht 5 µg/dl PbB; neurologische Effekte)</p> <p>Resorption: 50 % (Kinder)</p> <p>SF (a,b,c,d): 2 (1,2,1,1)</p> <p>Krebsrisiko 10⁻⁵: -</p> <p>Resorption: -</p> <p>Krebsrisiko 10⁻⁵: -</p> <p>Resorption: -</p>
Nutzungsszenarien	<p>Während in den Nutzungsszenarien ‚Kinderspielflächen‘, ‚Wohngebiete‘ und ‚Park- und Freizeitanlagen‘ die toxischen Wirkungen nach oraler Exposition die Ableitung der Bodenwerte begründen, dominiert im Nutzungsszenario ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ im Prinzip die inhalative Aufnahme bodenbürtiger Stäube die Bewertung. Allerdings ergeben sich für ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ aufgrund der geringen inhalativen Wirksamkeit von Blei unpraktikabel hohe Werte, so dass im Zuge der Plausibilitätsprüfung für ‚Industrie und Gewerbegrundstücke‘ letztlich der zweifache Prüfwert für ‚Park- und Freizeitanlagen‘ angesetzt wird, um sicherzustellen, dass es bei Einhaltung dieses Prüfwertes nicht zu sekundären Verunreinigungen auf umliegenden, ggf. empfindlicher genutzten Flächen kommen kann (durch Abschwemmung, Verwehung etc.).</p> <p>In ‚Nutzgärten‘ ist die systemische Aufnahme von Blei aus dem Boden in die Nutzpflanze abhängig vom pH-Wert. In der Regel dominiert jedoch die direkte Bodenaufnahme den oralen Aufnahmepfad.</p>

Bezeichnung	Blei (CAS-Nr.: 7439-92-1; elementar)
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgrund der Datenlage zur Toxikologie von Blei (Stand 1999) wurden nach den Methoden zur Prüfwertableitung Prüfwerte von gerundet 70 mg Pb/kg für ‚Kinderspielflächen‘, 145 mg Pb/kg für ‚Wohngebiete‘ und 360 mg Pb/kg für ‚Park- und Freizeitanlagen‘ abgeleitet. • Im Rahmen der Plausibilitätsprüfung wurden darüber hinaus epidemiologische Daten herangezogen, die den Zusammenhang zwischen Blutbleikonzentration und den nachgewiesenen Bodenbelastungen sowie der Bleideposition ermitteln ließen.
	<ul style="list-style-type: none"> • Im Ergebnis wurde eine Erhöhung des Bleigehalts im Boden um 100 mg/kg mit einer Erhöhung der Blutbleikonzentration um 5 µg/l assoziiert, so dass unter Berücksichtigung der Hintergrundexposition ein Bodenprüfwert von 400 mg Pb/kg für ‚Wohngebiete‘ abgeleitet wurde. In der Konsequenz heißt das, dass die Prüfwerte für Blei für die unterstellten Bodenverhältnisse (durchschnittliche Resorptionsverfügbarkeit von ca. 35 %) gelten. • Werden resorptionsverfügbare Bleigehalte gemessen, sind diese daher mit den berechneten Prüfwerten (UBA 1999ff) für ‚Kinderspielflächen‘ (70 mg/kg), für ‚Wohngebiete‘ (145 mg/kg) und für ‚Park- und Freizeitanlagen‘ (350 mg/kg) abzugleichen. • Sollen für großflächigere Betrachtungen (Wohngebiete, Stadtteile etc.) gebietsbezogene Beurteilungswerte abgeleitet werden, stellt sich die Frage, inwiefern die den Prüfwerten zugrunde gelegten Daten übertragbar sind. Zur Klärung dieser Fragen wurden vertiefende Auswertungen aktueller Daten für den Duisburger Süden durchgeführt, deren Ergebnisse für Expositionsabschätzungen genutzt werden können (vgl. LUA 2006). <p>Prinzipiell gilt, dass sich die humantoxikologische Bewertung von Blei aktuell deutlich verschärft hat, während die Hintergrundbelastung der Bevölkerung durch Nahrung, Luftbelastung sowie berufliche Exposition insgesamt weiter gesunken scheint. Zu ergänzen ist, dass die HBM-Kommission 2009 eine Neubewertung für Blei vorgenommen und auf Grund der aktuellen Erkenntnisse die HBM-Werte ausgesetzt hat (UBA 2009).</p>
Beurteilungswerte Bodenluft	Keine Relevanz
Beurteilungswerte Innenraumluft (Staub)	<p>Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige Stoffe im Hausstaub (AGÖF 2004):</p> <ul style="list-style-type: none"> 5 mg/kg (Hintergrund) 20 mg/kg (Normalwert) 150 mg/kg (Auffälligkeitswert)
Beurteilungswerte Lebensmittel	<p>0,02–1,5 mg/kg für diverse Lebensmittel (Höchstgehalte an Kontaminanten (EU-VO 2023/915))</p> <p>0,01–0,02 mg/kg für Nahrungsmittel für Säuglinge und Kleinkinder (EU-VO 2023/915)</p> <p>1–2 mg/kg für Salze</p> <p>3 mg/kg für Nahrungsergänzungsmittel (EU-VO 2023/915)</p> <p>5 ppm Gelatine und Kollagen (EU-VO 853/2004)</p> <p>0,25 mg/l Wein, weinhaltige Getränke (WeinV 2022)</p> <p>in anderen Ländern liegen z. T. weitere Grenzwerte vor (vgl. IGS NRW)</p>
Trinkwasser	<p>0,01 mg/l (Grenzwert TrinkwV 2023; gültig bis 11.01.2028);</p> <p>0,005 mg/l (Grenzwert TrinkwV 2023; gültig ab 12.01.2028)</p>

Bezeichnung	Blei (CAS-Nr.: 7439-92-1; elementar)	
Harmonisierte Einstufung - Anhang VI der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP-Verordnung)	<u>Gefahrenklasse, -kategorie, -kodierung</u>	<u>Kodierung der Gefahrenhinweise</u>
	Lact.	H362: Kann Säuglinge über die Muttermilch schädigen
	Repr. 1A	H360FD: Kann die Fruchtbarkeit beeinträchtigen. Kann das Kind im Mutterleib schädigen
	Aquatic Acute 1 (Partikeldurchmesser < 1 mm)	H400: Sehr giftig für Wasserorganismen
	Aquatic Chronic 1 (Partikeldurchmesser < 1 mm)	H410: Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung
Weitere Verweise	Stellungnahmen und Empfehlungen zum Bleigehalt in Lebensmitteln des BfR. Weitere Informationen finden sich bei EIKMANN et al. (1999ff), IGS NRW etc.	

Expositionsabschätzung für Blei (CAS-Nr.: 7439-92-1; elementar)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahmepfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze ³	Wirkendpunkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Kinderspielflächen	200 mg/kg TM ¹	orale Aufnahme		toxisch	Resorptionsverfügbarkeit
Wohngebiete	400 mg/kg TM ¹				Resorptionsverfügbarkeit
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
Park- und Freizeitanlagen	1.000 mg/kg TM ¹	Resorptionsverfügbarkeit			
Industrie- und Gewerbegrundstücke	2.000 mg/kg TM ¹	inhalative Aufnahme (Plausibilität: orale Aufnahme)		toxisch	Zugänglichkeit der Fläche, Lage zum Umfeld, Nutzungen im Umfeld prüfen Möglichkeiten sekundärer Verunreinigungen prüfen und Prüfschritte auswählen (ggf. RV oder Feinkornfraktion < 63 µm)
Nutzgärten	0,1 mg/kg TM ¹ (AN)		systemisch: relevant bei pH < 5	toxisch	Pflanzenverfügbarkeit (AN, pH-Wert)

Expositionsabschätzung für Blei (CAS-Nr.: 7439-92-1; elementar)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahmepfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze ³	Wirkendpunkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
			Verschmutzung: relevant Gaspfad: - Deposition: relevant		nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Pflanzenpfad
Haus- und Kleingärten	200 mg/kg TM ¹ . * * Prüfwert für Kinderspielflächen	orale Aufnahme		toxisch	Resorptionsverfügbarkeit
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
	0,1 mg/kg TM ¹ (AN)		systemisch: relevant bei pH < 5 Verschmutzung: relevant Gaspfad: - Deposition: relevant		Pflanzenverfügbarkeit (AN, pH-Wert)
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Pflanzenpfad
					ggf. integrative Betrachtung orale Aufnahme!
Sport- und Bolzplätze	5.000 mg/kg TM ²	inhalative Aufnahme		toxisch	Bestimmung in der Feinkornfraktion < 63 µm
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
¹ Prüfwert nach BBodSchV. ² Orientierender Bodenbeurteilungswert nach DELSCHEN et al. (2006), wenn im betrachteten Expositionsszenario ausschließlich der inhalative Expositionspfad maßgebend ist. Es ist parallel zu prüfen, ob der orale Expositionspfad maßgebend ist, so dass der Prüfwert für ‚Park- und Freizeitanlagen‘ heranzuziehen ist. ³ Siehe hierzu <i>Arbeitshilfe Tabelle 9</i>					

Quellen:

AGÖF (Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V.) (2004): AGÖF-Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige organische Verbindungen und Schwermetalle im Hausstaub. Fassung Frühjahr 2004. Online: https://www.agoef.de/fileadmin/user_upload/dokumente/orientierungswerte/AGOEF-Hausstaub-Orientierungswerte-2004.pdf

BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).

BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung). Online: <http://www.bfr.bund.de/de/start.html>

DELSCHEN, T.; BERTGES, W.-D.; LEISNER-SAABER, J. (2006): Bewertung von Schadstoffbelastungen auf Sport- und Bolzplätzen nach Maßstäben des Bodenschutzes. In: Bodenschutz 2/2006, S. 44–48.

- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM) (2010): Scientific Opinion on Lead in Food. EFSA Journal 2010; 8(4): 1570 [151 pp.]. doi: 10.2903/j.efsa.2010.1570. Online: <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2010.1570>
- EIKMANN, T.; HEINRICH, U.; HEINZOW, B.; KONIETZKA, R. (Hrsg.) (1999ff): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen – Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- EU-VO 853/2004: Spezifische Hygienevorschriften für Lebensmittel tierischen Ursprungs, zuletzt geändert durch VO 2019/1243.
- IGS NRW: Informationssystem Gefährliche Stoffe. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Online: <https://igsvtu.lanuv.nrw.de/home/>
- LUA (LANDESUMWELTAMT NRW, Essen) (2006): Übergreifende Auswertung von Boden-, Immissions- und Humandaten zur Schwermetallbelastung im Duisburger Süden; Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz; MALBO 23.
- TrinkwV (2023): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV). Trinkwasserverordnung vom 20. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 159).
- UBA (Umweltbundesamt) (1999ff): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. Erich Schmidt Verlag, Loseblattsammlung 1999 mit Ergänzungen, Berlin.
- UBA (Umweltbundesamt) (2009): Kommission „Human-Biomonitoring – Neue und aktualisierte Referenzwerte für Antimon, Arsen und Metalle (Blei, Cadmium, Nickel, Quecksilber, Thallium und Uran) im Urin und im Blut von Kindern in Deutschland. Bundesgesundheitsblatt, Band 52, Heft 10, S. 977–982. Online: https://www.umwelt-online.de/regelwerk/gefstoff/gen_tech/biomonitoring/antimon.htm
- VERORDNUNG (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), OJ L 353, 31.12.2008, p. 1–1355.
- VERORDNUNG (EU) 2023/915 DER KOMMISSION vom 25. April 2023 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), Amtsblatt der Europäischen Union, L 119, 5.5.2023, p. 103–157. Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0915>
- WeinV (2022): Weinverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. April 2009 (BGBl. I S. 827), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 21. Oktober 2022 (BGBl. I S. 1873) geändert worden ist.

Cadmium

Bezeichnung	Cadmium (CAS-Nr.: 7440-43-9)																
Vorkommen	<p>Cadmium zählt zu den Schwermetallen und tritt in Form von Cadmiumblende und Cadmiumcarbonat als Begleiter von Zinkerzen auf. Außerdem findet es sich in Blei- und Kupfererzen sowie in Phosphatdüngern. In seinen Verbindungen tritt es in der Oxidationsstufe +II auf. Gut wasserlösliche Cadmiumverbindungen sind Cadmiumchlorid, -sulfat, -nitrat und -acetat, während Cadmiumsulfid, -oxid und -carbonat kaum wasserlöslich sind.</p> <p>Cadmium verhält sich im Boden in Abhängigkeit vom pH-Wert (niedriger pH) vergleichsweise mobil und wird in vergleichsweise hohem Maße von Nutzpflanzen (z. B. insbesondere von Weizen, Spinat, Sellerie, Salat) aufgenommen.</p>																
Humantoxikologische Bewertung	<p>Unabhängig vom Aufnahmepfad reichert sich Cadmium insbesondere in der Nierenrinde mit hohen biologischen Halbwertszeiten (10–30 Jahren) an und kann dort zu Störungen der Nierenfunktion führen. Aber auch Knoenschäden sowie immuntoxische Effekte, Schädigungen des Herz-Kreislaufsystems sowie Beeinträchtigungen der Fortpflanzung können bei hohen Cadmiumexpositionen beobachtet werden. Nach inhalativer Aufnahme dominieren kanzerogene Effekte im Atemtrakt. Auf neuen Daten basierend wurde durch die EFSA (2009) eine niedrigere tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge (TWI; <i>Tolerable Weekly Intake</i>) von 2,5 µg/kg Körpergewicht abgeleitet als die im Jahr 1988 von dem gemeinsamen FAO/WHO-Sachverständigenausschuss für Lebensmittelzusatzstoffe (JECFA; <i>Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives</i>) festgelegte vorläufig tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge (PTWI; <i>Provisional Tolerable Weekly Intake</i>) von 7 µg/kg Körpergewicht. Im Jahr 2010 wurde auch von dem JECFA die tolerierbare Aufnahmemenge herabgesetzt (vorläufig tolerierbare monatliche Aufnahmemenge; <i>provisional tolerable monthly intake</i> (PTMI) von 25 µg/kg Körpergewicht).</p>																
Quantifizierung der Wirkung	<p>Quelle: UBA (1999ff)</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 30%;">orale Aufnahme - toxisch</td> <td>TRD: 25 ng/(kg KG*d) (V) (Nierenschäden)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Resorption: 5 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>SF (a,b,c,d): 2 (1,2,1,1)</td> </tr> <tr> <td>inhalative Aufnahme - toxisch</td> <td>TRD: 35 ng/m³ (V) (lokale Wirkungen)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Resorption: -</td> </tr> <tr> <td></td> <td>SF (a,b,c,d): 3.000 (10,3,10,10)</td> </tr> <tr> <td>inhalative Aufnahme - kanzerogen</td> <td>Krebsrisiko 10⁻⁵: 0,8 ng/m³ (UR+)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Resorption: -</td> </tr> </table>	orale Aufnahme - toxisch	TRD: 25 ng/(kg KG*d) (V) (Nierenschäden)		Resorption: 5 %		SF (a,b,c,d): 2 (1,2,1,1)	inhalative Aufnahme - toxisch	TRD: 35 ng/m ³ (V) (lokale Wirkungen)		Resorption: -		SF (a,b,c,d): 3.000 (10,3,10,10)	inhalative Aufnahme - kanzerogen	Krebsrisiko 10 ⁻⁵ : 0,8 ng/m ³ (UR+)		Resorption: -
orale Aufnahme - toxisch	TRD: 25 ng/(kg KG*d) (V) (Nierenschäden)																
	Resorption: 5 %																
	SF (a,b,c,d): 2 (1,2,1,1)																
inhalative Aufnahme - toxisch	TRD: 35 ng/m ³ (V) (lokale Wirkungen)																
	Resorption: -																
	SF (a,b,c,d): 3.000 (10,3,10,10)																
inhalative Aufnahme - kanzerogen	Krebsrisiko 10 ⁻⁵ : 0,8 ng/m ³ (UR+)																
	Resorption: -																
Nutzungsszenarien	<p>Während in den Nutzungsszenarien ‚Kinderspielflächen‘, ‚Wohngebiete‘ und ‚Park- und Freizeitanlagen‘ die toxischen Wirkungen nach oraler Exposition die Ableitung der Bodenwerte bestimmen, dominiert in den Nutzungsszenarien ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ sowie ‚Sport- und Bolzplätze‘ die kanzerogene Wirkung nach Inhalation.</p> <p>In ‚Nutzgärten‘ ist von einer - vom pH-Wert abhängigen - hohen systemischen Aufnahme von Cadmium aus dem Boden in die Nutzpflanze auszugehen und gegenüber dem Direktpfad dominiert die orale Cadmiumaufnahme über Nutzpflanzen.</p>																

Bezeichnung	Cadmium (CAS-Nr.: 7440-43-9)	
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> • Beim oralen Aufnahmepfad sind toxische Wirkungen ausschlaggebend. • In der Plausibilitätsprüfung wurde im Hinblick auf den Schutz der natürlichen Bodenfunktionen der für ‚Kinderspielflächen‘ berechnete Prüfwert auf 10 mg Cd/kg Boden (KW) festgesetzt, so dass die in der BBodSchV angegebenen Prüfwerte für ‚Kinderspielflächen‘, ‚Wohngebiete‘ und ‚Park- und Freizeitanlagen‘ den berechneten halbierten Werten entsprechen. • Gegenüber dem Direktpfad dominiert der Verzehr von Nutzpflanzen die orale Cadmiumaufnahme. Daher sind die Wirkungspfade Boden-Mensch/Direktkontakt und Boden-Nutzpflanze-Mensch integrativ zu betrachten, d. h. die orale Cadmiumaufnahme ist für beide Wirkungspfade zu ermitteln und zu addieren! • Für die Ableitung der Prüfwerte für den Direktpfad wurde nach UBA (1999ff) ein Gefahrenfaktor F_{Gef} von 2 verwendet. Die Ableitung des integrativen Prüfwertes von 2 mg/kg TM erfolgte auf Grundlage eines Gefahrenfaktors F_{Gef} von 1,4 (vgl. DELSCHEN 1998). • Zur Bewertung der Schadstoffzufuhr wurde in der Prüfwertableitung von 1999 für Cadmium eine zugeführte Körperdosis von 500 ng/kg Körpergewicht und Tag angenommen, die nicht überschritten werden darf. • Von der EFSA wurde im Jahr 2009 eine tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge (Tolerable Weekly Intake – TWI) von 2,5 µg/kg abgeleitet, welche 2011 nochmals bestätigt wurde. • Steht die inhalative Aufnahme von Cadmium im Vordergrund, sind im Gegensatz zur oralen Aufnahme lokal kanzerogene Wirkungen beurteilungsrelevant! 	
Beurteilungswerte Bodenluft	Keine Relevanz	
Beurteilungswerte Innenraumluft (Staub)	Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige Stoffe im Hausstaub (AGÖF 2004): 0,5 mg/kg (Hintergrundwert) 1,5 mg/kg (Normalwert) 5 mg/kg (Auffälligkeitswert)	
Beurteilungswerte Lebensmittel	0,02–1,2 mg/kg für diverse Lebensmittel (Höchstgehalte an Kontaminanten (EU-VO 2023/915)) 0,01–0,04 mg/kg für Nahrungsmittel für Säuglinge und Kleinkinder (EU-VO 2023/915) 0,5 mg/kg für Salz 1–3 mg/kg für Nahrungsergänzungsmittel (EU-VO 2023/915) 0,5 ppm Gelatine und Kollagen (EU-VO 853/2004) 0,01 mg/l Wein, weinhaltige Getränke (WeinV 2022) in anderen Ländern liegen z. T. weitere Grenzwerte vor (vgl. IGS NRW)	
Trinkwasser	0,003 mg/l (Grenzwert TrinkwV 2023)	
Harmonisierte Einstufung - Anhang VI der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP-Verordnung)	<u>Gefahrenklasse, -kategorie, -kodierung</u> Acute Tox. 2 * Muta. 2	<u>Kodierung der Gefahrenhinweise</u> H330: Lebensgefahr bei Einatmen H341: Kann vermutlich genetische Defekte verursachen (<i>Expositionsweg angeben, sofern schlüssig belegt ist, dass diese Gefahr bei keinem anderen Expositionsweg besteht</i>)

Bezeichnung	Cadmium (CAS-Nr.: 7440-43-9)	
	<p>Carc. 1B</p> <p>STOT RE 1</p> <p>Aquatic Acute 1</p> <p>Aquatic Chronic 1</p> <p>Repr. 2</p>	<p>H350: Kann Krebs erzeugen (<i>Expositionsweg angeben, sofern schlüssig belegt ist, dass diese Gefahr bei keinem anderen Expositionsweg besteht</i>)</p> <p>H372 **: Schädigt die Organe (<i>alle betroffenen Organe nennen, sofern bekannt</i>) bei längerer oder wiederholter Exposition (<i>Expositionsweg angeben, sofern schlüssig belegt ist, dass diese Gefahr bei keinem anderen Expositionsweg besteht</i>)</p> <p>H400: Sehr giftig für Wasserorganismen</p> <p>H410: Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung</p> <p>H361fd: Kann vermutlich die Fruchtbarkeit beeinträchtigen. Kann vermutlich das Kind im Mutterleib schädigen.</p>
Weitere Verweise	<p>Stellungnahmen zum Cadmiumgehalt in Lebensmitteln des BfR.</p> <p>Weitere Informationen finden sich bei EIKMANN et al. (1999ff), IGS NRW etc.</p>	

Expositionsabschätzung für Cadmium (CAS-Nr.: 7440-43-9)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahmepfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze ⁵	Wirkendpunkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Kinderspielflächen	10 mg/kg TM ¹ / 2 mg/kg TM ^{1,3}	orale Aufnahme		toxisch	Resorptionsverfügbarkeit
Wohngebiete	20 mg/kg TM ¹ / 2 mg/kg TM ^{1,3}				Resorptionsverfügbarkeit
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
Park- und Freizeitanlagen	50 mg/kg TM ¹	Resorptionsverfügbarkeit			
Industrie- und	60 mg/kg TM ¹	inhalative Aufnahme		kanzerogen	Bestimmung in der Feinkornfraktion < 63 µm

Expositionsabschätzung für Cadmium (CAS-Nr.: 7440-43-9)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahmepfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze ⁵	Wirkendpunkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Gewerbegrundstücke					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
Nutzgärten	0,04/0,1 mg/kg TM ^{1,4} (AN) (Maßnahmenwert)		systemisch: relevant Verschmutzung: relevant Gaspfad: - Deposition: relevant	toxisch	Pflanzenverfügbarkeit (AN, pH-Wert) nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Pflanzenpfad
Haus- und Kleingärten	10 mg/kg TM ^{1,*} / 2 mg/kg TM ^{1,3} * Prüfwert für Kinderspielflächen	orale Aufnahme		toxisch	Resorptionsverfügbarkeit
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
	0,04/0,1 mg/kg TM ^{1,4} (AN) (Maßnahmenwert)		systemisch: relevant Verschmutzung: relevant Gaspfad: - Deposition: relevant		Pflanzenverfügbarkeit (AN, pH-Wert)
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Pflanzenpfad
			Integrative Betrachtung orale Aufnahme!		
Sport- und Bolzplätze	40 mg/kg TM ²	inhalative Aufnahme		kanzerogen	Bestimmung in der Feinkornfraktion < 63 µm nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad

¹ Prüfwert nach BBodSchV.
² Orientierender Bodenbeurteilungswert nach DELSCHEN et al. (2006)
³ Bei gleichzeitiger Nutzung der Haus- und Kleingärten als Aufenthaltsbereiche für Kinder und für Nahrungspflanzenanbau.
⁴ 0,04 mg/kg bei Brotweizenanbau oder Gemüseanbau; ansonsten 0,1 mg/kg.
⁵ Siehe hierzu *Arbeitshilfe Tabelle 9*

Quellen:

- AGÖF (Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V.) (2004): AGÖF-Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige organische Verbindungen und Schwermetalle im Hausstaub. Fassung Frühjahr 2004. Online: https://www.agoef.de/fileadmin/user_upload/dokumente/orientierungswerte/AGOEF-Hausstaub-Orientierungswerte-2004.pdf
- BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).
- BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung). Online: <http://www.bfr.bund.de/de/start.html>
- DELSCHEN, T. (1998): Pfadintegrierte Bewertung von Bodenbelastungen in Haus- und Kleingärten – Teil 2: Prüfwerte für das Nutzungsszenario „Wohngärten“. In: Altlasten spektrum 6/1998, S. 336–342.
- DELSCHEN, T.; BERTGES, W.-D.; LEISNER-SAABER, J. (2006): Bewertung von Schadstoffbelastungen auf Sport- und Bolzplätzen nach Maßstäben des Bodenschutzrechtes. In: Bodenschutz 2/2006, S. 44–48.
- EFSA (2009): Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain on a request from the European Commission on cadmium in food. The EFSA Journal (2009) 980, p. 1–139.
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM) (2011): Scientific Opinion on tolerable weekly intake for cadmium. EFSA Journal 2011; 9(2):1975. [19 pp.]
- EIKMANN, T.; HEINRICH, U.; HEINZOW, B.; KONIETZKA, R. (Hrsg.) (1999ff): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen – Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- EU-VO 853/2004: Spezifische Hygienevorschriften für Lebensmittel tierischen Ursprungs, zuletzt geändert durch VO 2019/12436.
- IGS NRW: Informationssystem Gefährliche Stoffe. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Online: <https://igsvtu.lanuv.nrw.de/home/>
- FAO/WHO (Food and Agriculture Organisation/World Health Organization) (2011): JECFA cadmium evaluation.
- TrinkwV (2023): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV). Trinkwasserverordnung vom 20. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 159).
- UBA (Umweltbundesamt) (1999ff): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. Erich Schmidt Verlag, Lo-seblattsammlung 1999 mit Ergänzungen, Berlin.
- VERORDNUNG (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), OJ L 353, 31.12.2008, p. 1–1355.
- VERORDNUNG (EU) 2023/915 DER KOMMISSION vom 25. April 2023 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), Amtsblatt der Europäischen Union, L 119, 5.5.2023, p. 103–157. Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0915>
- WeinV (2022): Weinverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. April 2009 (BGBl. I S. 827), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 21. Oktober 2022 (BGBl. I S. 1873) geändert worden ist.
- WHO (2011): Safety evaluation of certain food additives and contaminants. Prepared by the Seventy-third meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). Geneva, World Health Organization, WHO Food Additive Series No. 64. Online: <http://www.inchem.org/documents/jecfa/jecmono/v64je01.pdf>

Chrom

Bezeichnung	Chrom (CAS-Nr.: 7440-47-3)																
Vorkommen	<p>Chrom findet sich in der Natur fast ausschließlich in Form von Verbindungen der Oxidationsstufe +III. In biologischen Systemen – und damit auch in Lebensmitteln – liegt Chrom zumeist in dreiwertiger Form vor.</p> <p>In der Umwelt auftretende Chrom (VI)-Verbindungen (Chromate) sind weitestgehend anthropogenen Ursprungs. Chromate werden beispielsweise in der Oberflächenveredelung, zur Lederverarbeitung und als Farbpigmente verwendet.</p>																
Humantoxikologische Bewertung	<p>Während Chrom (III) in entsprechenden Dosen als lebensnotwendiges Spurenelement für den Menschen eingestuft wird (vgl. empfohlene Tagesdosis), gelten Chrom (VI)-Verbindungen im Vergleich dazu als deutlich toxischer, so dass eine differenzierte Betrachtung von Chromverbindungen in Abhängigkeit von der Oxidationsstufe erforderlich ist. Allerdings werden Chrom (VI)-Verbindungen im Organismus zum Teil zu Chrom (III) reduziert.</p> <p>Toxikologische Bewertungen von Chrom werden überwiegend für Chrom (VI)-Verbindungen durchgeführt, wobei als bewertungsrelevanter Aufnahmepfad die inhalative Exposition angenommen wird. Als sensibelster Wirkendpunkt werden die kanzerogenen Wirkungen von Chrom (VI)-Verbindungen in der Lunge eingestuft.</p>																
Quantifizierung der Wirkung	<p>Quelle: UBA (1999ff)</p> <table> <tr> <td>orale Aufnahme - toxisch</td> <td>TRD: 5.000 ng/(kg KG*d)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Resorption: -</td> </tr> <tr> <td></td> <td>SF (a,b,c,d): 500 (1,5,10,10)</td> </tr> <tr> <td>inhalative Aufnahme - toxisch</td> <td>TRD: 50 ng/m³</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Resorption: -</td> </tr> <tr> <td></td> <td>SF (a,b,c,d): 10 (1,1,1,10)</td> </tr> <tr> <td>inhalative Aufnahme - kanzerogen</td> <td>Krebsrisiko 10⁻⁵: 0,83 ng/m³ (UR+)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Resorption: -</td> </tr> </table>	orale Aufnahme - toxisch	TRD: 5.000 ng/(kg KG*d)		Resorption: -		SF (a,b,c,d): 500 (1,5,10,10)	inhalative Aufnahme - toxisch	TRD: 50 ng/m ³		Resorption: -		SF (a,b,c,d): 10 (1,1,1,10)	inhalative Aufnahme - kanzerogen	Krebsrisiko 10 ⁻⁵ : 0,83 ng/m ³ (UR+)		Resorption: -
orale Aufnahme - toxisch	TRD: 5.000 ng/(kg KG*d)																
	Resorption: -																
	SF (a,b,c,d): 500 (1,5,10,10)																
inhalative Aufnahme - toxisch	TRD: 50 ng/m ³																
	Resorption: -																
	SF (a,b,c,d): 10 (1,1,1,10)																
inhalative Aufnahme - kanzerogen	Krebsrisiko 10 ⁻⁵ : 0,83 ng/m ³ (UR+)																
	Resorption: -																
Nutzungsszenarien	<p>Für alle Nutzungsszenarien dominieren die kanzerogenen Wirkungen nach inhalativer Exposition die Ableitung der Prüfwerte, wobei Erkenntnisse zur Wirkung von Chrom (VI) die Grundlage für die Ableitung darstellen.</p> <p>Für ‚Nutzgärten‘ existiert kein Beurteilungswert für Chrom. Die Relevanz für die Beurteilung entsprechender humantoxischer Wirkungen über den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch wird als eher nachrangig eingeschätzt.</p>																
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> • Der inhalative Aufnahmepfad ist aufgrund der inhalativen Wirksamkeit von Chrom (Kanzerogenität) beurteilungsbestimmend. • Die humantoxikologische Bewertung basiert auf Daten zu Chrom (VI). Im Rahmen der Plausibilitätsprüfung wurde berücksichtigt, dass der Anteil von Chrom (VI) am Chrom_{gesamt} im Boden üblicherweise nicht mehr als 40 % beträgt. Unter Beachtung dessen wurden die für Chrom_{gesamt} angegebenen Prüfwerte abgeleitet. 																
Beurteilungswerte Bodenluft	Keine Relevanz																
Beurteilungswerte Innenraumluft (Staub)	<p>Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige Stoffe im Hausstaub (AGÖF 2004):</p> <ul style="list-style-type: none"> 20 mg/kg (Hintergrundwert) 75 mg/kg (Normalwert) 200 mg/kg (Auffälligkeitswert) <p>Chrom (VI) Kanzerogen, Allergen!</p>																

Bezeichnung	Chrom (CAS-Nr.: 7440-47-3)
Empfohlene Tagesdosis	40 µg/d für Erwachsene (Nährstoffbezugswerte (nutrient reference values – NRV) nach EU-VO1169/2011
Beurteilungswerte Lebensmittel	maximal 10 µg je 100 kcal in Diätlebensmitteln für Säuglinge (EU-VO-2016/128) maximal 15 µg je 100 kcal in Diätlebensmitteln für Nicht-Säuglinge (EU-VO-2016/128) 10 ppm Gelatine und Kollagen (EU-VO 853/2004) in anderen Ländern liegen z. T. weitere Grenzwerte vor (vgl. IGS NRW)
Trinkwasser	0,025 mg/l (Grenzwert TrinkwV 2023; gültig bis 11.01.2030) 0,005 (Grenzwert TrinkwV 2023; gültig ab 12.01.2030)
Weitere Verweise	Stellungnahmen des BfR (siehe auch das BfR MEAL-Studie). Weitere Informationen finden sich bei EIKMANN et al. (1999ff), IGS NRW etc.

Expositionsabschätzung zu Chrom (CAS-Nr.: 7440-47-3)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahmepfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze ³	Wirkendpunkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Kinderspielflächen	200 mg Cr _{gesamt} /kg TM ¹				Bestimmung von Chrom (VI)
	130 mg Cr(VI)/kg TM ¹				Bestimmung in der Feinkornfraktion < 63 µm
Wohngebiete	400 mg Cr _{gesamt} /kg TM ¹	inhalative Aufnahme		kanzerogen	Bestimmung von Chrom (VI)
	250 mg Cr(VI)/kg TM ¹				Bestimmung in der Feinkornfraktion < 63 µm
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
Park- und Freizeitanlagen	400 mg Cr _{gesamt} /kg TM ¹	inhalative Aufnahme Plausibilität		kanzerogen	Bestimmung von Chrom (VI)
	250 mg Cr(VI)/kg TM ¹				Bestimmung in der Feinkornfraktion < 63 µm
Industrie- und Gewerbegrundstücke	200 mg Cr _{gesamt} /kg TM ¹	inhalative Aufnahme Plausibilität		kanzerogen	Bestimmung von Chrom (VI)
					Bestimmung in der Feinkornfraktion < 63 µm
	130 mg Cr(VI)/kg TM ¹				nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad

Expositionsabschätzung zu Chrom (CAS-Nr.: 7440-47-3)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahme-pfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze ³	Wirkend-punkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Nutzgärten	-		systemisch: geringe Relevanz Verschmutzung: relevant Gaspfad: - Deposition: relevant	kanzerogen	
Haus- und Kleingärten	200 mg Cr _{gesamt} /kg TM ^{1, *} 130 mg Cr(VI)/kg TM ^{1, *} * Prüfwert für Kinderspielflächen	inhalative Aufnahme		kanzerogen	Bestimmung von Chrom (VI)
	-		systemisch: geringe Relevanz Verschmutzung: relevant Gaspfad: - Deposition: relevant		Bestimmung in der Feinkornfraktion < 63 µm nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
Sport- und Bolzplätze	100 mg Cr _{gesamt} /kg TM ² 40 mg Cr(VI)/kg TM ²	inhalative Aufnahme		kanzerogen	Bestimmung von Chrom (VI)
					Bestimmung in der Feinkornfraktion < 63 µm nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad

¹ Prüfwert nach BBodSchV.
² Orientierender Bodenbeurteilungswert nach DELSCHEN et al. (2006).
³ Siehe hierzu *Arbeitshilfe Tabelle 9*

Quellen:

AGÖF (Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V.) (2004): AGÖF-Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige organische Verbindungen und Schwermetalle im Hausstaub. Fassung Frühjahr 2004. Online: https://www.agoef.de/fileadmin/user_upload/dokumente/orientierungswerte/AGOEF-Hausstaub-Orientierungswerte-2004.pdf

BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).

BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung). Online: <http://www.bfr.bund.de/de/start.html>

BfR MEAL-Studie: Was im Essen steckt. Bundesinstitut für Risikobewertung. Online: <https://www.bfr-meal-studie.de/>

- Delegierte EU-VO 2016/128 DER KOMMISSION vom 25. September 2015 zur Ergänzung der Verordnung (EU) Nr. 609/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die besonderen Zusammensetzungs- und Informationsanforderungen für Lebensmittel für besondere medizinische Zwecke. OJ L 25, 2.2.2016, p. 30–43.
- DELSCHEN, T.; BERTGES, W.-D.; LEISNER-SABER, J. (2006): Bewertung von Schadstoffbelastungen auf Sport- und Bolzplätzen nach Maßstäben des Bodenschutzrechtes. In: Bodenschutz 2/2006, S. 44–48.
- EIKMANN, T.; HEINRICH, U.; HEINZOW, B.; KONIETZKA, R. (Hrsg.) (1999ff): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen – Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- EU-VO 853/2004: Spezifische Hygienevorschriften für Lebensmittel tierischen Ursprungs, zuletzt geändert durch VO 2019/1243.
- EU-VO 1169/2011 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 25. Oktober 2011 betreffend die Information der Verbraucher über Lebensmittel und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1924/2006 und (EG) Nr. 1925/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung der Richtlinie 87/250/EWG der Kommission, der Richtlinie 90/496/EWG des Rates, der Richtlinie 1999/10/EG der Kommission, der Richtlinie 2000/13/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 2002/67/EG und 2008/5/EG der Kommission und der Verordnung (EG) Nr. 608/2004 der Kommission. OJ L 304, 22.11.2011, p. 18–63.
- IGS NRW: Informationssystem Gefährliche Stoffe. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Online: <https://igsvtu.lanuv.nrw.de/home/>
- TrinkwV (2023): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV). Trinkwasserverordnung vom 20. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 159).
- UBA (Umweltbundesamt) (1999ff): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. Erich Schmidt Verlag, Losblattsammlung 1999 mit Ergänzungen, Berlin.

Nickel

Bezeichnung	Nickel (CAS-Nr.: 7440-02-0)
Vorkommen	<p>Nickel kommt als Spurenelement ubiquitär in der Umwelt in Form leicht löslicher Salze oder schwer löslicher Verbindungen vor. Trotz dieser Unterschiede weisen die Nickel-Verbindungen kaum toxikologische Unterschiede auf.</p> <p>Nickellegierungen haben günstige physikalische und chemische Eigenschaften und werden vielseitig verwendet.</p>
Humantoxikologische Bewertung	<p>Neben reproduktionstoxischen Wirkungen nach inhalativer oder oraler Aufnahme kann Nickel insbesondere nach dermale Kontakt allergische Reaktionen hervorrufen. Für Nickel steht dessen kanzerogenes Potenzial bei inhalativer Aufnahme im Vordergrund. Eine gesicherte Bewertung der kanzerogenen Wirkung wurde allerdings im Rahmen der Prüfwertableitung nicht für möglich erachtet. Schließlich haben vergleichende Expositionsrechnungen ergeben, dass bei Betrachtung nichtkanzerogener Effekte die inhalative und orale Aufnahme mit ca. 370 mg/kg ähnliche Bodenwerte liefert.</p> <p>Basierend auf den Erkenntnissen, dass Nickel oral wie inhalativ gleichsam wirksam ist, die kanzerogenen Wirkungen nicht quantifizierbar sind und Hinweise für eine erhöhte Sensibilität von Kindern gegenüber der kanzerogenen Wirkung vorliegen, wurden im Rahmen der Plausibilitätsprüfung die berechneten Werte durch 5 dividiert.</p>
Quantifizierung der Wirkung orale Aufnahme - toxisch inhalative Aufnahme - toxisch inhalative Aufnahme - kanzerogen	<p>Quelle: UBA (1999ff)</p> <p>TRD: 80 ng/(kg KG*d) Resorption: 6 % SF (a,b,c,d): 1.000 (1,10,10,10)</p> <p>TRD: 10 ng/m³ Resorption: - SF (a,b,c,d): 1.000 (10,1,10,10)</p> <p>Krebsrisiko 10⁻⁵: 40 ng/m³ (zum Zeitpunkt der Ableitung 1999: UR-); im Addendum 2005 (EIKMANN et al. 1999ff): UR+ für Nickeloxid (40 ng/m³); lösliche Nickelverbindungen (14 ng/m³) Resorption: -</p>
Nutzungsszenarien	<p>Für die Nutzungsszenarien ‚Kinderspielflächen‘, ‚Wohngebiete‘ und ‚Park- und Freizeitanlagen‘ sind die beiden möglichen Aufnahmepfade (inhalativ und oral) gleichbedeutend und müssen parallel betrachtet werden, während im Szenario ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ die inhalative Aufnahme die Beurteilung dominiert.</p> <p>Für ‚Nutzgärten‘ existiert kein Beurteilungswert für Nickel (es wurde lediglich im Hinblick auf Wachstumsbeeinträchtigungen ein Prüfwert für ‚Ackerbauflächen‘ (AN) abgeleitet).</p>
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> • Für Nickel sind der inhalative und der orale Aufnahmepfad bei der Betrachtung von Kinderspiel gleichbedeutend und daher sind beide in der Detailuntersuchung zu berücksichtigen. • Im Rahmen der Plausibilitätsprüfung wurde berücksichtigt, dass Nickel auch ein kanzerogenes, nicht zu quantifizierendes Potenzial hat und Kinder eine höhere Sensibilität gegenüber den kanzerogenen Wirkungen haben. Diese Aspekte führen zu einem Abschlag der berechneten Werte um den Faktor 5. • Für ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ wird der für die inhalative Aufnahme berechnete Wert als Prüfwert übernommen.
Beurteilungswerte Bodenluft	Keine Relevanz

Bezeichnung	Nickel (CAS-Nr.: 7440-02-0)	
Beurteilungswerte Innenraumluft (Staub)	Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige Stoffe im Hausstaub (AGÖF 2004): 5 mg/kg (Hintergrundwert) 20 mg/kg (Normalwert) 30 mg/kg (Auffälligkeitswert) Kontaktallergen!	
tolerierbare tägliche Aufnahmemenge (TDI)	13 µg/(kg KG * d) nach EFSA (2020)	
Beurteilungswerte Lebensmittel	keine Angabe Auswertungen zu Hintergrundexposition vgl. EFSA 2015; 2020	
Trinkwasser	0,02 mg/l (Grenzwert TrinkwV 2023)	
Harmonisierte Einstufung - Anhang VI der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP-Verordnung)	<u>Gefahrenklasse, -kategorie, -kodierung</u> Skin Sens. 1 Carc. 2 STOT RE 1	<u>Kodierung der Gefahrenhinweise</u> H317: Kann allergische Hautreaktionen verursachen H351: Kann vermutlich Krebs erzeugen (<i>Expositionsweg angeben, sofern schlüssig belegt ist, dass diese Gefahr bei keinem anderen Expositionsweg besteht</i>) H372 **: Schädigt die Organe (<i>alle betroffenen Organe nennen, sofern bekannt</i>) bei längerer oder wiederholter Exposition (<i>Expositionsweg angeben, sofern schlüssig belegt ist, dass diese Gefahr bei keinem anderen Expositionsweg besteht</i>)
Weitere Verweise	Stellungnahmen des BfR bzgl. Nickel als Kontaktallergen. Weitere Informationen finden sich bei EIKMANN et al. (1999ff), IGS NRW etc.	

Expositionsabschätzung zu Nickel (CAS-Nr.: 7440-02-0)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahmepfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze ³	Wirkendpunkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Kinderspielflächen	70 mg/kg TM ¹	inhalative und orale Aufnahme		toxisch	Resorptionsverfügbarkeit
Wohngebiete	140 mg/kg TM ¹				Bestimmung in der Feinkornfraktion < 63 µm
					Resorptionsverfügbarkeit
					Bestimmung in der Feinkornfraktion < 63 µm
		nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad			
Park- und					Resorptionsverfügbarkeit

Expositionsabschätzung zu Nickel (CAS-Nr.: 7440-02-0)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahmepfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze ³	Wirkendpunkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Freizeitanlagen	350 mg/kg TM ¹				Bestimmung in der Feinkornfraktion < 63 µm
Industrie- und Gewerbegegenstände	900 mg/kg TM ¹	inhalative Aufnahme		toxisch	Bestimmung in der Feinkornfraktion < 63 µm
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
Nutzgärten	-		systemisch: mäßig relevant Verschmutzung: relevant Gaspfad: - Deposition: relevant	toxisch	
Haus- und Kleingärten	70 mg/kg TM ^{1, *} * Prüfwert für Kinderspielflächen	inhalative und orale Aufnahme		toxisch	Bestimmung in der Feinkornfraktion < 63 µm
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
			systemisch: mäßig relevant Verschmutzung: relevant Gaspfad: - Deposition: relevant		
Sport- und Bolzplätze	250 mg/kg TM ²	inhalative Aufnahme		toxisch	Bestimmung in der Feinkornfraktion < 63 µm
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad

¹ Prüfwert nach BBodSchV.
² Orientierender Bodenbeurteilungswert nach DELSCHEN et al. (2006)
³ Siehe hierzu *Arbeitshilfe Tabelle 9*

Quellen:

AGÖF (Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V.) (2004): AGÖF-Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige organische Verbindungen und Schwermetalle im Hausstaub. Fassung Frühjahr 2004. Online: https://www.agoef.de/fileadmin/user_upload/dokumente/orientierungswerte/AGOEF-Hausstaub-Orientierungswerte-2004.pdf

BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).

BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung). Online: <http://www.bfr.bund.de/de/start.html>

DELSCHEN, T.; BERTGES, W.-D.; LEISNER-SAABER, J. (2006): Bewertung von Schadstoffbelastungen auf Sport- und Bolzplätzen nach Maßstäben des Bodenschutzes. In: Bodenschutz 2/2006, S. 44–48.

- EFSA (EUROPEAN FOOD AND SAFETY AUTHORITY) (2015): Scientific Opinion on the risks to public health related to the presence of nickel in food and drinking water. EFSA Journal 2015;13(2):4002.
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM) (2020): Schrenk, D.; Bignami, M.; Bodin, L.; Chipman, J.K.; del Mazo, J.; Grasl-Kraupp, B.; Hogstrand, C.; Hoogenboom, L.R.; Leblanc, J-C.; Nebbia, C.S.; Ntzani, E.; Petersen, A.; Sand, S.; Schwerdtle, T.; Vleminckx, C.; Wallace, H.; Guérin, T.; Massanyi, P.; Van Loveren, H.; Baert, K.; Gergelova, P.; Nielsen, E.: Scientific Opinion on the update of the risk assessment of nickel in food and drinking water. EFSA Journal 2020;18(11):6268, 101 pp.
- EIKMANN, T.; HEINRICH, U.; HEINZOW, B.; KONIETZKA, R. (Hrsg.) (1999ff): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen – Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- IGS NRW: Informationssystem Gefährliche Stoffe. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Online: <https://igsvtu.lanuv.nrw.de/home/>
- TrinkwV (2023): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV). Trinkwasserverordnung vom 20. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 159).
- UBA (Umweltbundesamt) (1999ff): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. Erich Schmidt Verlag, Losblattsammlung 1999 mit Ergänzungen, Berlin.
- VERORDNUNG (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), OJ L 353, 31.12.2008, p. 1–1355.

Quecksilber

Bezeichnung	Quecksilber (CAS-Nr.: 7439-97-6, elementar)
Vorkommen	<p>Quecksilber ist ein Schwermetall, das in der Umwelt sowohl elementar als auch in Form anorganischer und organischer Verbindungen auftritt. Hauptanwendungsbereiche sind bzw. waren Batterien, Leuchtstoffröhren, Thermometer, Farben, Holzschutzmittel, medizinische Anwendungen sowie die Zahnheilkunde (Amalgam). Organische Quecksilberverbindungen zur Pflanzenbehandlung sind in Deutschland mittlerweile nicht mehr zugelassen.</p> <p>Von den anorganischen Quecksilberverbindungen sind im Boden am häufigsten das lösliche Quecksilber(II)chlorid und das schwerlösliche Quecksilber(II)sulfid (Zinnober) oder elementares Quecksilber anzutreffen. Methylquecksilber als organische Verbindung kann z. B. infolge biotischer Methylierungsprozesse durch Boden-Mikroorganismen entstehen. Der prozentuale Anteil von Methylquecksilber am Gesamtquecksilbergehalt, liegt üblicherweise im Bereich von 0,1–1 %, kann aber in besonders mit Quecksilber kontaminierten Regionen bis zu 10 % betragen (POTGETER 1998). In Moorböden können aufgrund der anaeroben Bedingungen auch bis zu 40 % des Gesamtquecksilbers als Methylquecksilber vorliegen (LITZ et al. 2004). Als Erklärung für die üblicherweise geringen Anteile wird angenommen, dass das Gleichgewicht für die Bildung bzw. Retention von Methylquecksilber im Boden ungünstig ist (vgl. SCHUSTER 1991). Wahrscheinlich wird das Gleichgewicht zwischen Methylquecksilberbildung und -abbau durch den Gehalt an Methylquecksilber kontrolliert, so dass eine Akkumulation von Methylquecksilber verhindert wird. SCHUSTER (1991) schließt in der Literaturstudie: „[...] nur im Falle, dass das (mikrobiologisch gesteuerte) Gleichgewicht durch anthropogene Belastung des Bodens durch direkte Zufuhr von Methylquecksilber gestört wird, ist eine Anreicherung dieser organischen Quecksilberverbindung zu befürchten.“</p> <p>Quecksilber ist bei Raumtemperatur flüssig und kann auf Grund seines Dampfdruckes vergleichsweise leicht in die Umgebungsluft übergehen und somit inhalativ wirksam werden.</p>
Humantoxikologische Bewertung	Die Besonderheit bei Quecksilber liegt in der unterschiedlichen Wirkweise von elementarem bzw. anorganisch oder organisch gebundenem Quecksilber. Während bei elementarem und organisch gebundenem Quecksilber Effekte auf das Nervensystem sowie fruchtschädigende Wirkungen im Vordergrund stehen, sind bei anorganischen Quecksilberverbindungen die Wirkungen auf Niere und das Immunsystem bewertungsrelevant. Insgesamt gelten organische Quecksilberverbindungen als vergleichsweise toxischer und besser resorbierbar.
Quantifizierung der Wirkung	Quelle: UBA (1999ff)
Quecksilber anorganisch (und elementar)	
orale Aufnahme - toxisch	TRD: 15 ng/(kg KG*d) (V) Resorption: 7 % SF (a,b,c,d): 200 (10,1,10,2)
inhalative Aufnahme - toxisch	TRD: 30 ng/(kg KG*d) (V) Resorption: 80 % (Hg _{elementar} ; Hg-Dampf); 40 % (Hg _{anorg} ; Staub) SF (a,b,c,d): 50 (1,5,1,10)

Bezeichnung	Quecksilber (CAS-Nr.: 7439-97-6, elementar)
Quecksilber organisch	
orale Aufnahme - toxisch	TRD: 50 ng/(kg KG*d) (V) Resorption: 100 % SF (a,b,c,d): 15 (1,5,1,3)
inhalative Aufnahme - toxisch	TRD: - Resorption: -
Nutzungsszenarien	<p>Während in den Nutzungsszenarien ‚Kinderspielflächen‘, ‚Wohngebiete‘ und ‚Park- und Freizeitanlagen‘ die toxischen Wirkungen nach oraler Exposition die Ableitung der Bodenwerte begründen, dominiert in den Nutzungsszenarien ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ sowie ‚Sport- und Bolzplätze‘ im Prinzip die inhalative Aufnahme bodenbürtiger Stäube die Bewertung. Allerdings ergeben sich für ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ aufgrund der geringen inhalativen Wirksamkeit von Quecksilber unpraktikabel hohe Werte, so dass im Zuge der Plausibilitätsprüfung letztlich der zweifache Prüfwert für ‚Park- und Freizeitanlagen‘ angesetzt wird, um sicherzustellen, dass es bei Einhaltung dieses Prüfwertes nicht zu sekundären Verunreinigungen auf umliegenden, ggf. empfindlicher genutzten Flächen kommen kann (durch Abschwemmung, Verwehung etc.).</p> <p>Der orientierende Bodenbeurteilungswert für ‚Sport- und Bolzplätze‘ wurde (aufgrund fehlender TRD-Werte für organisches Quecksilber) auf den toxikologischen Grundlagen für anorganisches Quecksilber abgeleitet. Zur Festlegung des Beurteilungswertes wurde anschließend eine Kappung unter Berücksichtigung des Prüfwertes für ‚Park- und Freizeitanlagen‘ vorgenommen.</p> <p>Für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze konnten nur geringe Zusammenhänge zwischen Boden- und Pflanzengehalten erkannt werden, so dass der Prüfwert im Wesentlichen auf Abschätzungen aus üblichen Hintergrundbelastungen basiert (Faktor 10).</p>
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgrund der unterschiedlichen Wirkweisen anorganischer und organischer Quecksilberverbindungen ist eine Prüfung der am Standort anzutreffenden Bindungsform bedeutsam. • Ist beispielsweise das Vorkommen organischer Quecksilberverbindungen unwahrscheinlich oder auszuschließen, kann die Beurteilung anhand der spezifizierten Prüfwerte für anorganische Quecksilberverbindungen erfolgen. • Für anorganische Quecksilberverbindungen kann beispielsweise auch die Resorptionsverfügbarkeit überprüft werden, während dieses Verfahren beim organischen Quecksilber nicht zielführend ist (Verflüchtigung während der Extraktion). • Bei Hinweisen auf das Vorkommen elementaren Quecksilbers muss dessen Flüchtigkeit berücksichtigt werden und ggf. Bodenluftmessungen oder Raumluftmessungen durchgeführt werden (s.u.).
Beurteilungswerte Bodenluft	ggf. bei Hinweisen auf metallisches (elementares) Quecksilber prüfen!
Beurteilungswerte Innenraumluft (Staub)	Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige Stoffe im Hausstaub (AGÖF 2004): 0,15 mg/kg (Hintergrundwert) 0,5 mg/kg (Normalwert) 1 mg/kg (Auffälligkeitswert)
metallischer Dampf:	Richtwerte der IRK UBA (1999): 0,035 µg/m³ (Richtwert I) 0,35 µg/m³ (Richtwert II)

Bezeichnung	Quecksilber (CAS-Nr.: 7439-97-6, elementar)	
Beurteilungswerte Lebensmittel	0,3–1 mg/kg in Fischereierzeugnissen und Muscheln (EU-VO 2023/915) 0,1 mg/kg Nahrungsergänzungsmittel (EU-VO 2023/915) 0,1 mg/kg Salz (EU-VO 2023/915)	
Trinkwasser	0,001 mg/l (Grenzwert TrinkwV 2023)	
Harmonisierte Einstufung - Anhang VI der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP-Verordnung)	<u>Gefahrenklasse, -kategorie, -kodierung</u> Acute Tox. 2 * STOT RE 1 Aquatic Acute 1 Aquatic Chronic 1 Repr. 1B	<u>Kodierung der Gefahrenhinweise</u> H330: Lebensgefahr bei Einatmen H372 **: Schädigt die Organe (<i>alle betroffenen Organe nennen, sofern bekannt</i>) bei längerer oder wiederholter Exposition (<i>Expositionsweg angeben, sofern schlüssig belegt ist, dass diese Gefahr bei keinem anderen Expositionsweg besteht</i>) H400: Sehr giftig für Wasserorganismen H410: Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung H360D ***: Kann das Kind im Mutterleib schädigen.
Weitere Verweise	Stellungnahmen des BfR, Stellungnahmen der Kommission Biomonitoring des UBA Stoffmonographien und Stellungnahmen der IRK beim UBA. Weitere Informationen finden sich bei EIKMANN et al. (1999ff), IGS NRW etc. Eine umfassende integrierte Bewertung von Quecksilber anhand der Erhebungen der Umweltprobenbank des Bundes (UPB) wurde 2015 vom Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin erstellt.	

Expositionsabschätzung für Quecksilber (gesamt)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahme-pfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze	Wirkendpunkt auf den Menschen ⁴	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Kinderspielflächen	10 mg/kg TM ¹	orale Aufnahme		toxisch	Prüfung auf Bindungsform
Wohngebiete	20 mg/kg TM ¹				
Park- und Freizeitanlagen	50 mg/kg TM ¹				
Industrie- und Gewerbegrundstücke	100 mg/kg TM ¹	inhalative Aufnahme Plausibilität		toxisch	Prüfung auf Bindungsform

Expositionsabschätzung für Quecksilber (gesamt)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahme-pfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze	Wirkendpunkt auf den Menschen ⁴	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Nutzgärten	5 mg/kg TM ¹		systemisch: geringe Relevanz Verschmutzung: - Gaspfad: - Deposition: -	toxisch	nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Pflanzenpfad
Haus- und Kleingärten	10 mg/kg TM ¹ . * * Prüfwert für Kinderspielflächen	orale Aufnahme		toxisch	Prüfung auf Bindungsform
	5 mg/kg TM ¹		systemisch: geringe Relevanz Verschmutzung: - Gaspfad: - Deposition: -		nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Pflanzenpfad
Sport- und Bolzplätze	250 mg/kg TM ²	inhalative Aufnahme		toxisch	Prüfung auf Bindungsform

Expositionsabschätzung für Quecksilber (anorganisch)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahme-pfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze	Wirkendpunkt auf den Menschen ⁴	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Kinderspielflächen	25 mg/kg TM ³	orale Aufnahme		toxisch	Resorptionsverfügbarkeit
Wohngebiete	50 mg/kg TM ³				Resorptionsverfügbarkeit
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
Park- und Freizeitanlagen	120 mg/kg TM ³				Resorptionsverfügbarkeit
Industrie- und Gewerbegrundstücke	-* *Ableitung vorhanden	inhalative Aufnahme		toxisch	Zugänglichkeit der Fläche, Lage zum Umfeld, Nutzungen im Umfeld prüfen Möglichkeiten sekundärer Verunreinigungen prüfen und Prüfschritte auswählen (ggf. RV oder Feinkornfraktion < 63 µm)

Expositionsabschätzung für Quecksilber (anorganisch)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahme-pfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze	Wirkendpunkt auf den Menschen ⁴	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Nutzgärten	-		systemisch: - Verschmutzung: relevant Gaspfad: - Deposition: relevant	-	
Haus- und Kleingärten	25 mg/kg TM ³ , * * Prüfwert für Kinderspielflächen	orale Aufnahme		toxisch	Resorptionsverfügbarkeit
	-		systemisch: - Verschmutzung: relevant Gaspfad: - Deposition: relevant		nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
Sport- und Bolzplätze	250 mg/kg TM ²	inhalative Aufnahme		toxisch	Feinkornfraktion < 63 µm nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad

Expositionsabschätzung für Quecksilber (organisch)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahme-pfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze	Wirkendpunkt auf den Menschen ⁴	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Kinderspielflächen	5 mg/kg TM ³	orale Aufnahme		toxisch	nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
Wohngebiete	10 mg/kg TM ³				
Park- und Freizeitanlagen	25 mg/kg TM ³				
Industrie- und Gewerbegrundstücke	-	inhalative Aufnahme		toxisch	Zugänglichkeit der Fläche, Lage zum Umfeld, Nutzungen im Umfeld prüfen Möglichkeiten sekundärer Verunreinigungen prüfen und Prüfschritte auswählen (ggf. RV oder Feinkornfraktion < 63 µm)

Expositionsabschätzung für Quecksilber (organisch)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahme-pfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze	Wirkendpunkt auf den Menschen ⁴	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Nutzgärten	-		systemisch: - Verschmutzung: - Gaspfad: mäßig relevant Deposition: -	-	
Haus- und Kleingärten	5 mg/kg TM ³ . * * Prüfwert für Kinderspielflächen	orale Aufnahme		toxisch	nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
	-		systemisch: geringe Relevanz Verschmutzung: - Gaspfad: mäßig relevant Deposition: -		
Sport- und Bolzplätze	-	inhalative Aufnahme		toxisch	

¹ Prüfwert nach BBodSchV.
² Orientierender Bodenbeurteilungswert nach DELSCHEN et al. 2006, wenn im betrachteten Expositionsszenario ausschließlich der inhalative Expositionspfad maßgebend ist. Es ist parallel zu prüfen, ob der orale Expositionspfad maßgebend ist, so dass der Prüfwert für ‚Park- und Freizeitanlagen‘ heranzuziehen ist
³ Spezifizierter Prüfwert nach Prüfwertableitung UBA 1999ff (F 830).
⁴ Siehe hierzu *Arbeitshilfe Tabelle 9*

Quellen:

- AGÖF (Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V.) (2004): AGÖF-Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige organische Verbindungen und Schwermetalle im Hausstaub. Fassung Frühjahr 2004. Online: https://www.agoef.de/fileadmin/user_upload/dokumente/orientierungswerte/AGOEF-Hausstaub-Orientierungswerte-2004.pdf
- BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).
- BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung). Online: <http://www.bfr.bund.de/de/start.html>
- DELSCHEN, T.; BERTGES, W.-D.; LEISNER-SAABER, J. (2006): Bewertung von Schadstoffbelastungen auf Sport- und Bolzplätzen nach Maßstäben des Bodenschutzes. In: Bodenschutz 2/2006, S. 44–48.
- EIKMANN, T.; HEINRICH, U.; HEINZOW, B.; KONIETZKA, R. (Hrsg.) (1999ff): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen – Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- FRAUNHOFER ITEM (2015): Integrierte Bewertung von Quecksilber anhand der Erhebungen der Umweltprobenbank des Bundes (UPB). Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Juli 2015. Online: https://www.umweltprobenbank.de/upb_static/fck/download/Endbericht_Integrierte_Bewertung_Hg_2015_08_10_Web.pdf
- IGS NRW: Informationssystem Gefährliche Stoffe. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Online: <https://igsvtu.lanuv.nrw.de/home/>
- IRK UBA (1999): Richtwerte für die Innenraumluft – Quecksilber, BGBl. 42 (1999) S.168–174. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/Quecksilber.pdf>

- LITZ N.; WILCKE W.; WILKE B.-M. (Hrsg.) (2004): Bodengefährdende Stoffe: Bewertung, Stoffdaten, Ökotoxikologie, Sanierung – Ergänzbare Loseblattsammlung. WILEY-VCH Verlag, Weinheim.
- POTGETER H. (1998): Entwicklung und Anwendung eines neuartigen Analysenverfahrens zur Bestimmung quecksilberorganischer Verbindungen in Sedimenten mit Hilfe eines gekoppelten SFC-AFS-Systems; Dissertation Universität Hamburg. Online: <https://d-nb.info/956124275/34>
- SCHUSTER E. (1991): Quecksilberkontaminierte Böden. Eine Literaturstudie zur Einschätzung des Verhaltens von Quecksilber und seinen Verbindungen. Studie im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen.
- TrinkwV (2023): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV). Trinkwasserverordnung vom 20. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 159).
- UBA (Umweltbundesamt) (1999ff): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. Erich Schmidt Verlag, Loseblattsammlung 1999 mit Ergänzungen, Berlin.
- VERORDNUNG (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), OJ L 353, 31.12.2008, p. 1–1355.
- VERORDNUNG (EU) 2023/915 DER KOMMISSION vom 25. April 2023 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), Amtsblatt der Europäischen Union, L 119, 5.5.2023, p. 103–157. Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0915>

Cyanide

Bezeichnung	Cyanide (CAS-Nr.: 57-12-5)
Vorkommen	Cyanide sind die Salze der Blausäure. Sie dissoziieren in Wasser leicht unter Freisetzung des Cyanidions. Cyanwasserstoff (HCN) ist leicht flüchtig und gut wasserlöslich in Boden und Grundwasser. Der typische Geruch nach Bittermandelöl charakterisiert sein Vorkommen, beispielsweise auch in einer Vielzahl von Pflanzen (Obstkerne, Bittermandeln).
Humantoxikologische Bewertung	Cyanide zeichnen sich durch eine hohe akute Toxizität aus. Sie blockieren die zelluläre Atmung und damit die Energiegewinnung. Die Akutwirkung der Cyanide betrifft hauptsächlich das Zentralnervensystem mit z. T. irreversiblen Schäden. Im Tierversuch werden kontinuierliche Dosierungen besser toleriert als einmalige Gaben.
Quantifizierung der Wirkung	Quelle: UBA (1999ff) TRD: 10 µg/(kg KG*d) (aber: akut 0,56 mg/kg letal!) Resorption: 100 % SF (a,b,c,d): 10 (1,1,1,10) Krebsrisiko 10 ⁻⁵ : - Resorption: - TRD: 10 µg/(kg KG*d) Resorption: 70 % SF (a,b,c,d): 10 (1,1,1,10)
Nutzungsszenarien	Aufgrund der hohen akuten Toxizität der Cyanide ist die Betrachtung der einmaligen Aufnahme von größeren Bodenmengen, wie sie bei Kleinkindern beim Spielen vorkommen kann, beurteilungsbestimmend. Da einmalige Bodenkontakte in allen Szenarien gleichermaßen möglich sind (das Vorliegen offenen Bodens vorausgesetzt), wird für die Nutzungsszenarien ‚Kinderspielflächen‘, ‚Wohngebiete‘ und ‚Park- und Freizeitanlagen‘ gleichermaßen ein Prüfwert von 50 mg/kg abgeleitet. Im Nutzungsszenario ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ wird davon ausgegangen, dass höchstens ältere Kinder Zugang zu der Fläche haben können, so dass daher der Prüfwert im Hinblick auf einmalige Expositionen verdoppelt wird.
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> • Beurteilungsrelevant sind einmalige (orale) Expositionen • Die Expositionsannahmen sind für die drei Nutzungsszenarien ‚Kinderspielflächen‘, ‚Wohngebiete‘, ‚Park- und Freizeitanlagen‘ gleich, für ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ verdoppelt. • Der Abstand zwischen letalen Wirkungen und ersten Vergiftungsercheinungen wird durch einen Faktor von 10 abgebildet. • Die Untersuchung der Resorptionsverfügbarkeit ist nicht geeignet, da das Verfahren die leicht freisetzbaren Cyanide nicht erfassen kann.
Beurteilungswerte Bodenluft	Keine Relevanz
Beurteilungswerte Innenraumluft (Staub)	Keine

Bezeichnung	Cyanide (CAS-Nr.: 57-12-5)
Beurteilungswerte Lebensmittel	<p>Entsprechend VO EG Nr. 149/2008 (zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 396/2005 zur Festlegung der Anhänge II, III und IV mit Rückstandshöchstgehalten) für Hydrogencyanid (Cyanide, ausgedrückt als Hydrogencyanid):</p> <p>15 mg/kg: Getreide</p> <p>Entsprechend VO EG Nr. 1334/2008 (über Aromen und bestimmte Lebensmittelzutaten mit Aromaeigenschaften):</p> <p>50 mg/kg HCN: Nougat, Marzipan</p> <p>5 mg/kg HCN: Steinfruchtoobstkonserven</p> <p>35 mg/kg HCN: alkoholische Getränke</p> <p>Entsprechend EU-VO 2023/915 (Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten) für Blausäure, einschließlich in Blausäureglycosiden gebundener Blausäure:</p> <p>10 mg/kg: Maniok-Mehl, Tapiokamehl</p> <p>50 mg/kg: Maniok (frisch, geschält)</p> <p>20 mg/kg: unverarbeitete Aprikosenkerne für den Endverbraucher</p> <p>35 mg/kg: unverarbeitete Mandeln für den Endverbraucher</p> <p>150 mg/kg: unverarbeitete Leinsamen für den Endverbraucher</p>
Trinkwasser	0,05 mg/l (Grenzwert TrinkwV 2023)
Weitere Verweise	Mitteilungen des BfR (z. B. zu Marzipan und Persipan vom 03.03.2015), EIKMANN et al. (1999ff), IGS NRW etc.

Expositionsabschätzung für Cyanide (CAS-Nr.: 57-12-5)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahmepfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze	Wirkendpunkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Kinderspielflächen	50 mg/kg TM ¹	orale Aufnahme		akut toxisch	Bestimmung leicht freisetzbare Cyanide (ersatzweise für Resorptionsverfügbarkeit)
Wohngebiete	50 mg/kg TM ¹				
Park- und Freizeitanlagen	50 mg/kg TM ¹				
Industrie- und Gewerbegrundstücke	100 mg/kg TM ¹	orale Aufnahme		akut toxisch	
Nutzgärten	-				
Haus- und Kleingärten	50 mg/kg TM ¹ . * * Prüfwert für Kinderspielflächen	orale Aufnahme		akut toxisch	
Sport- und Bolzplätze	50 mg/kg TM ¹ (wie Park- und Freizeitanlagen)	orale Aufnahme		akut toxisch	

¹ Prüfwert nach BBodSchV.

Quellen:

BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).

BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung). Online: <http://www.bfr.bund.de/de/start.html>

BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung) (2015): Neue Daten aus BfR-Humanstudie: Kein Cyanid-Risiko bei Verzehr von Marzipan und Persipan, Mitteilung Nr. 006/2015 des BfR vom 3. März 2015, Online: <https://www.bfr.bund.de/cm/343/neue-daten-aus-bfr-humanstudie-kein-cyanid-risiko-bei-verzehr-von-marzipan-und-persipan.pdf>

EIKMANN, T.; HEINRICH, U.; HEINZOW, B.; KONIETZKA, R. (Hrsg.) (1999ff): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen – Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung. Erich Schmidt Verlag, Berlin.

IGS NRW: Informationssystem Gefährliche Stoffe. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Online: <https://igsvtu.lanuv.nrw.de/home/>

TrinkwV (2023): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV). Trinkwasserverordnung vom 20. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 159).

UBA (Umweltbundesamt) (1999ff): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. Erich Schmidt Verlag, Lo-seblattsammlung 1999 mit Ergänzungen, Berlin.

VERORDNUNG (EG) Nr. 149/2008 der Kommission vom 29. Januar 2008 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 396/2005 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Festlegung der Anhänge II, III und IV mit Rückstandshöchstgehalten für die unter Anhang I der genannten Verordnung fallenden Erzeugnisse (Text von Bedeutung für den EWR).

VERORDNUNG (EG) Nr. 1334/2008 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. Dezember 2008 über Aromen und bestimmte Lebensmittelzutaten mit Aromaeigenschaften zur Verwendung in und auf Lebensmitteln sowie zur Änderung der Verordnung (EWG) Nr. 1601/91 des Rates, der Verordnungen (EG) Nr. 2232/96 und (EG) Nr. 110/2008 und der Richtlinie 2000/13/EG.

VERORDNUNG (EU) 2023/915 DER KOMMISSION vom 25. April 2023 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), Amtsblatt der Europäischen Union, L 119, 5.5.2023, p. 103–157. Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0915>

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)




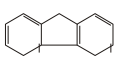
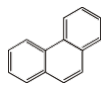
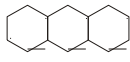
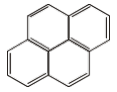
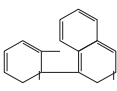
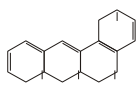
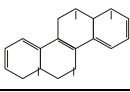
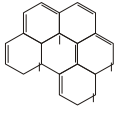
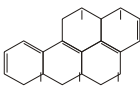
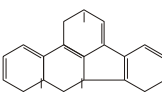
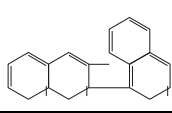
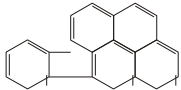
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) entstehen bei der unvollständigen Verbrennung von organischem Material (z. B. Holz, Öl, Benzin, Dieselöl, Stroh) in Kraftwerken, Kleinf Feuerungsanlagen und Motoren. Die Stoffgruppe umfasst mehrere hundert Einzelsubstanzen, die aus miteinander verbundenen aromatischen Benzolringsystemen bestehen. Der kleinste und einfachste Vertreter ist das zweikernige Naphthalin, der bekannteste Vertreter der PAK ist das Benzo(a)pyren mit fünf Ringen. Mit Ausnahme von Naphthalin sind die PAK schwerflüchtig und gering wasserlöslich.

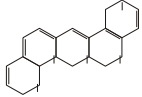
PAK werden im Boden hauptsächlich an die organische Substanz gebunden, wobei die Bindung mit zunehmender Molekularmasse und damit zunehmender Hydrophobie zunimmt. Die Kinetik, Bindungsstärke und Reversibilität der Sorption der PAK hängt dabei von verschiedenen Bestandteilen des Bodens ab, aber auch von Alterungsprozessen, die Abbau, Aufnahme und Transport verfügbarer Anteile beeinflussen können.

Die Zusammensetzung der PAK bei Kontaminationen im Bereich von Kokereien, Gaswerken oder Teermischwerken und Teeröllagern schwankt insbesondere hinsichtlich der höher molekularen PAK in der Regel nur in bestimmten Grenzen. PAK aus Hausbrand oder Abgasen weisen eine vergleichbare Zusammensetzung auf und führen in urbanen Bereichen zu einer erhöhten Grundbelastung gegenüber ländlichen Bereichen (ZEDDEL 2016).

Aus der Stoffgruppe der PAK werden üblicherweise die 16 PAK-EPA untersucht, die im Jahre 1976 von der U.S. EPA in die „priority pollutant list“ aufgenommen wurden und sich international als Referenzgrößen durchgesetzt haben. In vielen Fällen wird Benzo(a)pyren als Bezugssubstanz stellvertretend für die Gruppe der PAK untersucht und bewertet. Bei Hinweisen auf Naphthalin muss diesem Vertreter der PAK aufgrund seines vergleichsweise flüchtigen Verhaltens gesondert Beachtung gewidmet werden.

Entsprechend der Anlage 2, Tabelle 4 Fußnote 3 BBodSchV ist „der Boden [...] auf alle PAK₁₆ hin zu untersuchen. Die Prüfwerte beziehen sich auf den Gehalt an Benzo(a)pyren im Boden. Benzo(a)pyren repräsentiert dabei die Wirkung typischer PAK-Gemische auf ehemaligen Kokereien, ehemaligen Gaswerksgeländen und ehemaligen Teermischwerken/-öllager. Weicht das PAK-Muster oder der Anteil von Benzo(a)pyren an der Summe der Toxizitätsäquivalente im zu bewertenden Einzelfall deutlich von diesen typischen PAK-Gemischen ab, so ist dies bei der Anwendung der Prüfwerte zu berücksichtigen. Liegen die siedlungsbedingten Hintergrundwerte oberhalb der Prüfwerte für Benzo(a)pyren, ist dies bei der Bewertung der Untersuchungsergebnisse gemäß § 15 zu berücksichtigen“.

Einzelverbindung	CAS-Nr.	Strukturformel	Summenformel	Anzahl der Ringe
Naphthalin	91-20-3		C ₁₀ H ₈	2
Acenaphthylen	208-96-8		C ₁₂ H ₈	3
Acenaphthen	83-32-9		C ₁₂ H ₁₀	3
Fluoren	86-73-7		C ₁₃ H ₁₀	3
Phenanthren	85-01-8		C ₁₄ H ₁₀	3
Anthracen	120-12-7		C ₁₄ H ₁₀	3
Pyren	129-00-0		C ₁₆ H ₁₀	4
Fluoranthen	206-44-0		C ₁₆ H ₁₀	4
Benz(a)anthracen	56-55-3		C ₁₆ H ₁₀	4
Chrysen	218-01-9		C ₁₆ H ₁₀	4
Benzo(ghi)perylen	191-24-2		C ₂₂ H ₁₂	6
Benzo(a)pyren	50-32-8		C ₂₀ H ₁₂	5
Benzo(b)fluoranthen	205-99-2		C ₂₀ H ₁₂	5
Benzo(k)fluoranthen	207-08-9		C ₂₀ H ₁₂	5
Indeno(1,2,3-cd)pyren	193-39-5		C ₂₂ H ₁₂	6

Einzelverbindung	CAS-Nr.	Strukturformel	Summenformel	Anzahl der Ringe
Dibenzo(a,h)anthracen	53-70-3		C ₂₂ H ₁₄	5

Während Einzelvertreter mit geringer Ringzahl, wie Naphthalin, Acenaphthylen, Acenaphthen, Fluoren sowie Phenanthren als vergleichsweise wasserlöslich anzusehen sind, steht bei den höher kondensierten Vertretern deren Lipophilie im Vordergrund. Für niedrig kondensierte PAK mit geringer Ringzahl (z. B. Naphthalin) ist mit einer Verflüchtigung aus wässrigen Lösungen (ausgedrückt durch die Henry-Konstante) zu rechnen. Darüber hinaus kann die räumliche Anordnung der Benzolringe im Molekül Hinweise auf die relative Stabilität der Verbindung und damit auf ihre Persistenz in der Umwelt geben. Die geringste Stabilität weisen PAK auf, deren Ringe linear konfiguriert sind (z. B. Anthracen), während Einzelstoffe, deren Ringe angular (gewinkelt) angeordnet sind, wie z. B. Phenanthren und Chrysen, als stabil gelten.

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK₁₆) vertreten durch Benzo(a)pyren

Bezeichnung	PAK (PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren)
Vorkommen	PAK werden im Boden hauptsächlich an die organische Substanz gebunden, wobei die Bindung mit zunehmender Molekularmasse und damit zunehmender Hydrophobie zunimmt. Die Kinetik, Bindungsstärke und Reversibilität der Sorption der PAK hängt dabei von verschiedenen Bestandteilen des Bodens ab.
Humantoxikologische Bewertung	<p>PAK können oral, inhalativ (gasförmig oder partikulär gebunden) oder dermal aufgenommen werden und in den menschlichen Organismus gelangen.</p> <p>Die akute Toxizität der PAK ist mäßig bis gering. Nach langfristigen Expositionen stehen bei den höher kondensierten PAK mit 4 Ringen und mehr deren kanzerogene Wirkung im Vordergrund; toxische Wirkungen (Schädigung von Blut, Leber und Nieren, Beeinträchtigung der Fortpflanzungsfähigkeit, Embryotoxizität, immunsuppressive Wirkungen, schwache östrogene oder antiöstrogene Wirkungen) wurden für Vertreter der PAK mit 2–4 Ringen im Tierversuch bei Verabreichung hoher Dosen beobachtet.</p> <p>Naphthalin erfordert ein besonderes Augenmerk, sowohl was dessen physikalisch-chemische als auch toxikologische Eigenschaften anbetrifft (vgl. „Naphthalin“).</p> <p>Während eine Quantifizierung der kanzerogenen Potenz mit Hilfe eines slope factors¹ auf Basis der vorliegenden Daten für die meisten der PAK nicht möglich ist, existieren Konzepte für die Anwendung von Äquivalenzfaktoren (KALBERLAH et al. 1999, RIVM 2001). Mit Hilfe dieses methodischen Ansatzes wird die relative Potenz von Einzelsubstanzen einer Stoffgruppe im Verhältnis zu einer Bezugssubstanz angegeben. Üblicherweise wird Benzo(a)pyren als Bezugssubstanz zur Betrachtung der Gruppe der PAK herangezogen.</p> <p>Für die Ableitung eines Prüfwertes für PAK wurden weitere Untersuchungen durchgeführt und ausgewertet, die der Tatsache Rechnung tragen, dass bei erhöhten Benzo(a)pyren-Gehalten im Boden auch andere (toxikologisch relevante) PAK in einem bestimmten Mischungsverhältnis vorliegen, die es gilt, in der Bewertung zu berücksichtigen.</p> <p>So wurde schließlich für die Ableitung der Prüfwerte für PAK mit Benzo(a)pyren als Bezugssubstanz eine lebenslang gesundheitlich akzeptable Körperdosis von 0,87 ng BaP/kg Körpergewicht und Tag (für ein zusätzliches Krebsrisiko von 10⁻⁵) errechnet (FOBIG 1999). Die Auswertungen berücksichtigen, dass diese Dosis dem zusätzlichen Krebsrisiko von 10⁻⁵ bei oraler Exposition aller kanzerogenen PAK-EPA im Gemisch (untersucht im Steinkohleteer) entspricht.</p> <p>Kinder sind dabei als sensibelste Nutzergruppe anzusehen, da ihnen eine besondere Empfindlichkeit gegenüber genotoxischen Kanzerogenen zugesprochen wird. Vor diesem Hintergrund wurde für Benzo(a)pyren aufgrund von Daten aus Tierstudien ein zusätzlicher Empfindlichkeitsfaktor von 5 für die Berechnung der Prüfwerte vorgeschlagen (FOBIG 1999).</p>
Quantifizierung der Wirkung orale Aufnahme - kanzerogen	<p>Quelle: FOBIG (1999)</p> <p>Krebsrisiko 10⁻⁵: 0,87 ng BaP/(kg KG*d) (Bezugssubstanz für Gruppe der PAK, untersucht in Steinkohleteergemisch)</p> <p>Resorption: -</p>

¹ Slope factor: Kanzerogenes Risiko für eine lebenslang oral aufgenommene Dosis von beispielsweise 1 µg/(kg KG * Tag).

Bezeichnung	PAK (PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren)
Nutzungsszenarien	Während in den Nutzungsszenarien ‚Kinderspielflächen‘, ‚Wohngebiete‘ und ‚Park- und Freizeitanlagen‘ die kanzerogenen Wirkungen nach oraler Exposition die Ableitung der Bodenwerte bestimmen, dominiert in den Nutzungsszenarien ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ und ‚Sport- und Bolzplätze‘ die kanzerogene Wirkung nach Inhalation.
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> • Die Prüfwerte betrachten Benzo(a)pyren, dessen Wirkung durch Exposition gegenüber einem Steinkohlenteergemisch untersucht wurde. Damit repräsentiert der Gehalt des Benzo(a)pyren die Wirkung des Gemisches. • Kinder gelten als besonders empfindlich, so dass ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor von 5 berücksichtigt wurde. • Der so errechnete Prüfwert für Kinderspielflächen beträgt 0,23 mg BaP/kg Boden (vgl. FOBIG 1999). • Gleichzeitig wurde abgeschätzt, dass die dermale Exposition eine vergleichbare Relevanz hat. • Unter Berücksichtigung der damals zugrunde gelegten Hintergrundbelastung (0,36 mg BaP/kg Boden) wurde der Prüfwert für ‚Kinderspielflächen‘ auf 0,5 mg BaP/kg Boden festgelegt. <p><u>Empfohlene Vorgehensweise bei Prüfwertüberschreitung:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Prüfung der PAK-Muster <ul style="list-style-type: none"> - Abgleich mit Musterabweichungen - Einzelfallprüfung bei Überschreitungen - Prüfung der Summe der Toxizitätsäquivalente (Anteil Benzo(a)pyren in der Regel 30–60 %) 2. Berücksichtigung der Hintergrundgehalte 3. Bestimmung der Resorptionsverfügbarkeit (RV) der (hochmolekularen) PAK und Anwendung der ermittelten RV [%] auf die PAK₁₆-Prüfwerte (mit Benzo(a)pyren als Bezugssubstanz) <p>Bei der Prüfung der Resorptionsverfügbarkeit nach DIN 19738 ist anzumerken, dass das Verfahren nur für Benzo(a)pyren sowie die höher kondensierten, kanzerogenen PAK mit 5 und mehr Ringen (Benzo(ghi)perylen, Benzo(b)fluoranthren, Benzo(k)fluoranthren, Indeno(1,2,3-cd)perylen, Di-benzo(a,h)anthracen) validiert wurde (UBA 2020).</p>
Beurteilungswerte Bodenluft	Keine Relevanz
Beurteilungswerte Innenraumluft	<p>vorläufige Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige Stoffe im Hausstaub (AGÖF 2007) für Summe PAK nach EPA:</p> <p>0,7 mg/kg (Normalwert)</p> <p>7,4 mg/kg (Auffälligkeitswert)</p>
Beurteilungswerte Lebensmittel	<p>Höchstgehalte für Benzo(a)pyren und für die Summe von Benzo(a)pyren, Benzo(a)anthracen, Benzo(b)fluoranthren und Chrysen (EU-VO 2023/915):</p> <p>1–10 µg/kg für Benzo(a)pyren in diversen Lebensmitteln</p> <p>1–50 µg/kg für Summe von Benzo(a)pyren, Benzo(a)anthracen, Benzo(b)fluoranthren und Chrysen in diversen Lebensmitteln</p>
Trinkwasser	0,0001 mg/l Grenzwert TrinkwV 2023 (Summe aus Benzo(b)fluoranthren, Benzo(k)fluoranthren, Benzo(ghi)perylen, Indeno(1,2,3-cd)pyren)

Bezeichnung	PAK (PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren)	
Harmonisierte Einstufung - Anhang VI der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP-Verordnung)	<u>Gefahrenklasse, -kategorie, -kodierung</u> z. B. für Benzo(a)pyren:	<u>Kodierung der Gefahrenhinweise</u>
	Skin Sens. 1	H317: Kann allergische Hautreaktionen verursachen
	Muta. 1B	H340: Kann genetische Defekte verursachen (<i>Expositionsweg angeben, sofern schlüssig belegt ist, dass diese Gefahr bei keinem anderen Expositionsweg besteht</i>)
	Carc. 1B	H350: Kann Krebs erzeugen (<i>Expositionsweg angeben, sofern schlüssig belegt ist, dass diese Gefahr bei keinem anderen Expositionsweg besteht</i>)
	Aquatic Acute 1	H400: Sehr giftig für Wasserorganismen
	Aquatic Chronic 1	H410: Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung
	Repr. 1B	H360FD: Kann die Fruchtbarkeit beeinträchtigen. Kann das Kind im Mutterleib schädigen.
Weitere Verweise	Erlasse der Länder zur Bewertung von PAK, ZEDDEL (2016)	

PAK (PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahmepfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze ³	Wirkendpunkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Kinderspielflächen	0,5 mg/kg TM ¹	orale Aufnahme		kanzerogen	Resorptionsverfügbarkeit
Wohngebiete	1 mg/kg TM ¹				nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
					Resorptionsverfügbarkeit
Park- und Freizeitanlagen	1 mg/kg TM ¹			kanzerogen	Feinkornfraktion < 63 µm
Industrie- und Gewerbegrundstücke	5 mg/kg TM ¹	inhalative Aufnahme		kanzerogen	nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad

PAK (PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahme-pfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze ³	Wirkend-punkt auf den Men-schen	Untersuchungen zur Expositionsabschät-zung
Nutzgärten	1 mg/kg TM ¹		systemisch: ge-ringe Relevanz für Benzo(a)pyren und höher kon-densierte PAK Verschmutzung: relevant Gaspfad: mäßig relevant für 2–3 Ring-PAK Deposition: rele-vant für Benzo(a)pyren und höher kon-densierte PAK	kanzerogen	nutzungsabhängige Expositionsbedingun-gen Pflanzenpfad
Haus- und Kleingärten	0,5 mg/kg TM ^{1, *} * Prüfwert für Kinderspielflä-chen	orale Aufnahme		kanzerogen	Resorptionsver-fügbarekeit nutzungsabhängige Expositionsbe-dingungen Direktpfad
	1 mg/kg TM ^{1, 4}		systemisch: ge-ringe Relevanz für Benzo(a)pyren und höher kon-densierte PAK Verschmutzung: relevant Gaspfad: mäßig relevant für 2–3 Ring-PAK Deposition: rele-vant für Benzo(a)pyren und höher kon-densierte PAK	kanzerogen	nutzungsabhängige Expositionsbedingun-gen Pflanzenpfad
Sport- und Bolzplätze	4 mg/kg TM ²	inhalative Aufnahme		kanzerogen	Feinkornfraktion < 63 µm nutzungsabhängige Expositionsbe-dingungen Direktpfad

¹ Prüfwert nach BBodSchV.
² Orientierender Bodenbeurteilungswert nach DELSCHEN et al. (2006), wenn im betrachteten Expositionsszenario ausschließlich der inhalative Expositionspfad maßgebend ist. Es ist parallel zu prüfen, ob der orale Expositionspfad maßgebend ist, so dass der Prüfwert für ‚Park- und Freizeitanlagen‘ heranzuziehen ist.
³ Siehe hierzu *Arbeitshilfe Tabelle 9*
⁴ Der Prüfwert der BBodSchV für ‚Nutzgärten‘ gilt für die Einzelsubstanz Benzo(a)pyren

Quellen:

- AGÖF (Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V.) (2007): Vorläufige AGÖF-Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige organische Verbindungen im Hausstaub Online: <https://www.agoef.de/orientierungswerte/agoef-hausstaub-orientierungswerte/agoef-hausstaub-orientierungswerte-2007.html#c1023>
- BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).
- DELSCHEN, T.; BERTGES, W.-D.; LEISNER-SAABER, J. (2006): Bewertung von Schadstoffbelastungen auf Sport- und Bolzplätzen nach Maßstäben des Bodenschutzes. In: Bodenschutz 2/2006, S. 44–48.
- DIN 19738 (2017-06): Resorptionsverfügbarkeit von organischen und anorganischen Schadstoffen aus kontaminiertem Bodenmaterial. Beuth-Verlag, Berlin.
- FOBIG (Forschungs- und Beratungsinstitut Gefahrstoffe FoBiG GmbH) (1999): Grundlagen für die Bewertung von Kontaminationen des Bodens mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen. Mit Korrekturen vom März 2004. Bericht zum F+E-Vorhaben 298 73 771 im Auftrag des Umweltbundesamtes. Freiburg.
- KALBERLAH, F.; HASSAUER, M.; KONIETZKA, R.; SCHNEIDER, B. (1999): Methode zur Ableitung von TRD-Werten. In: EIKMANN, T.; HEINRICH, U.; HEINZOW, B.; KONIETZKA, R. (Hrsg.): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen – Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- RIVM (RIJKSINSTITUUT VOOR VOLKSGEZONDHEID EN MILIEU) (2001): Re-evaluation of human-toxicological maximum permissible risk levels. RIVM Report 711 701 025. Online: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/711701025.pdf>
- TrinkwV (2023): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV). Trinkwasserverordnung vom 20. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 159).
- UBA (Umweltbundesamt) (2020): Robustheitsuntersuchung zur Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen in Böden. Forschungskennzahl 37 14 71 217 0. Texte 86/2020.
- VERORDNUNG (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), OJ L 353, 31.12.2008, p. 1–1355.
- VERORDNUNG (EU) 2023/915 DER KOMMISSION vom 25. April 2023 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), Amtsblatt der Europäischen Union, L 119, 5.5.2023, p. 103–157. Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0915>
- ZEDDEL A. (2016): Prüfwerte für PAK. Bewertung Polyzyklischer Aromatischer Kohlenwasserstoffe bezüglich des Wirkungspfadens Boden-Mensch. In: Altlasten spektrum, Heft 6, S. 213–219.
- Erlasse der Länder

Naphthalin

Bezeichnung	Naphthalin (CAS-Nr.:91-20-3)												
Vorkommen	Naphthalin ist eine Verbindung aus zwei kondensierten Benzolringen. Die Hauptquellen des Eintrags sind Steinkohle-, Braunkohle-, Mineralöl- und Pyrolyseölverarbeitung, industrielle Prozesse sowie Kraftfahrzeugverkehr. Die Substanz wird als Insektizid, Antiseptikum und Wurmmittel verwendet und ist Bestandteil von Mottenkugeln (typischer Geruch). Naphthalin ist wasserdampflich, leicht sublimierbar und schwerlöslich in Wasser.												
Humantoxikologische Bewertung	Nach oraler, inhalativer oder dermaler Exposition führt Naphthalin im Tierversuch zum Abbau der roten Blutkörperchen und Blutarmut (hämolytische Anämie), zur Trübung der Linse (Katarakt des Auges), zentralnervösen Störungen sowie zu toxischen Effekten für den Fötus. Darüber hinaus besteht der Verdacht, dass Naphthalin nach inhalativer Aufnahme kanzerogen wirkt. Es liegen jedoch keine eindeutigen epidemiologischen Studien vor, die diesen Verdacht bestätigen. Von der IARC ist Naphthalin als möglicherweise krebserzeugend für den Menschen (Gruppe 2B) eingestuft (WHO-IARC 2002).												
Quantifizierung der Wirkung	Quelle: FOBIG (1999) <table border="0"> <tr> <td>orale Aufnahme - toxisch</td> <td>TRD: 30 µg/(kg KG*d) (Nephrotox, Hämatotox)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Resorption: 85 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>SF (a,b,c,d): 1.000 (10,1,10,10)</td> </tr> <tr> <td>inhalative Aufnahme - toxisch</td> <td>Referenzkonz.: 10 µg/m³</td> </tr> <tr> <td></td> <td>SF (a,b,c,d): 1.000 (1,10,10,10)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Resorption: entfällt</td> </tr> </table> inhalative Aufnahme - kanzerogen Eine quantitative Krebsrisikoabschätzung liegt nicht vor. Allerdings kann aus einer Studie an Mäusen (NTP 1992) eine Risikoabschätzung mit Hilfe der CEL _{min} -Methode ² durchgeführt werden, die ein Krebsrisiko von 1:100.000 (10 ⁻⁵) bei 2,7 µg/m ³ erwarten lässt (FOBIG 1999).	orale Aufnahme - toxisch	TRD: 30 µg/(kg KG*d) (Nephrotox, Hämatotox)		Resorption: 85 %		SF (a,b,c,d): 1.000 (10,1,10,10)	inhalative Aufnahme - toxisch	Referenzkonz.: 10 µg/m ³		SF (a,b,c,d): 1.000 (1,10,10,10)		Resorption: entfällt
orale Aufnahme - toxisch	TRD: 30 µg/(kg KG*d) (Nephrotox, Hämatotox)												
	Resorption: 85 %												
	SF (a,b,c,d): 1.000 (10,1,10,10)												
inhalative Aufnahme - toxisch	Referenzkonz.: 10 µg/m ³												
	SF (a,b,c,d): 1.000 (1,10,10,10)												
	Resorption: entfällt												
Nutzungsszenarien	Basierend auf der kanzerogenen Wirkung nach inhalativer Aufnahme unter Betrachtung des Expositionspfad Boden-Raumluft wurden für die Nutzungsszenarien ‚Wohngebiete‘ und ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ orientierende Hinweiswerte abgeleitet (FOBIG 1999). Für ‚Park- und Freizeitanlagen‘ konnte kein Prüfwert ermittelt werden. Die für ‚Kinderspielflächen‘ durchgeführte Berechnung – basierend auf der nichtkanzerogenen Wirkung nach oraler Bodenaufnahme – ergab einen unpraktikabel hohen Wert.												
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> Naphthalin als flüchtiger Vertreter der PAK muss gesondert berücksichtigt werden, da der inhalative Aufnahmepfad bei entsprechend hohem Anteil an Naphthalin Bedeutung erlangen kann und daher mit zu berücksichtigen ist. Bei Hinweisen (z. B. Geruch) auf das Vorkommen von Naphthalin sind entsprechende Untersuchungen (Bodenluft und/oder Raumluft) sinnvoll. 												
Beurteilungswerte Bodenluft	10 mg/m ³ (orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe, LABO 2008)												
Beurteilungswerte Innenraumluft	RW I: 0,01 mg/m ³ (V) (IRK-UBA 2013) RW II: 0,03 mg/m ³ (V) (IRK-UBA 2013)												

² CEL_{min}-Methode: Vom UBA (vgl. KONIETZKA 1999) vorgeschlagene Methode zur Risikoabschätzung bei ungenügender Datenlage. Dazu wird die in einem Tierversuch ermittelte Konzentration (CEL_{min}) herangezogen, bei der ca. 10 % der Tiere kanzerogene Effekte zeigen (carcinogenic effect level). Unter Zuhilfenahme eines Sicherheitsfaktors von 10.000 wird schließlich CEL_{min/10.000} ermittelt.

Bezeichnung	Naphthalin (CAS-Nr.:91-20-3)	
Beurteilungswerte Innenraumluft (Staub)	vorläufige Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige Stoffe im Hausstaub (AGÖF 2007) < 0,2 mg/kg (Auffälligkeitswert)	
Beurteilungswerte Lebensmittel	Keine Angaben	
Grenzwert TrinkwV	Keine Angaben	
Harmonisierte Einstufung - Anhang VI der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP-Verordnung)	<u>Gefahrenklasse, -kategorie, -kodierung</u> Acute Tox. 4 * Carc. 2 Aquatic Acute 1 Aquatic Chronic 1	<u>Kodierung der Gefahrenhinweise</u> H302: Gesundheitsschädlich bei Verschlucken H351: Kann vermutlich Krebs erzeugen (<i>Expositionsweg angeben, sofern schlüssig belegt ist, dass diese Gefahr bei keinem anderen Expositionsweg besteht</i>) H400: Sehr giftig für Wasserorganismen H410: Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung
Weitere Verweise	vgl. Stoffprofile in ATSDR, IGS NRW, GESTIS, HSDB	

Expositionsabschätzung für Naphthalin					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahmepfad (Direkt-pfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze	Wirkendpunkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Kinderspielflächen	-				
Wohngebiete	10 mg/kg TM ¹	inhalative Aufnahme (Gas)		kanzerogen	Bodenluftmessungen; Innenraumluftmessungen
Park- und Freizeitanlagen	-				
Industrie- und Gewerbegrundstücke	100 mg/kg TM ¹	inhalative Aufnahme (Gas)		kanzerogen	Bodenluftmessungen; Innenraumluftmessungen
Nutzgärten	-				
Haus- und Kleingärten	-				
Sport- und Bolzplätze	-				

¹ Orientierender Hinweiswert (Expositionspfad Boden-Raumluft) nach Prüfwertableitung FOBIG (1999).

Quellen
AGÖF (Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V.) (2007): Vorläufige AGÖF-Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige organische Verbindungen im Hausstaub Online: https://www.agoef.de/orientierungswerte/agoef-hausstaub-orientierungswerte/agoef-hausstaub-orientierungswerte-2007.html#c1023
ATSDR (AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY): Toxicological profiles, National Technical

- Information Service (NTIS). Online: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles>
- FOBIG (Forschungs- und Beratungsinstitut Gefahrstoffe FoBiG GmbH) (1999): Grundlagen für die Bewertung von Kontaminationen des Bodens mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen. Mit Korrekturen vom März 2004. Bericht zum F+E-Vorhaben 298 73 771 im Auftrag des Umweltbundesamtes. Freiburg.
- GESTIS-Stoffdatenbank (Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. Online: <https://gestis.dguv.de>
- HSDB (HAZARDOUS SUBSTANCES DATA BANK). National Library of Medicine (NLM), Bethesda, USA.
- IGS NRW: Informationssystem Gefährliche Stoffe. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Online: <https://igsvtu.lanuv.nrw.de/home/>
- IRK-UBA (2013): Richtwerte für die Innenraumluft: Naphthalin und Naphthalin-ähnliche Verbindungen, Mitteilung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Kommission Innenraumlufthygiene und der Obersten Landesgesundheitsbehörden, Bundesgesundheitsblatt 56 (10), S. 1448–1459. Online: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/naphthen_rw_irl-2_2013-10.pdf
- LABO (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (2008): Bewertungsgrundlagen für Schadstoffe in Altlasten – Informationsblatt für den Vollzug. Stand: 01.09.2008 (ergänzt Juni 2009). Online: https://www.labo-deutschland.de/documents/34_Infoblatt_Altlasten_01092008_e69_34f.pdf
- NTP (NATIONAL TOXICOLOGY PROGRAM) (1992): Toxicology and Carcinogenesis Studies of Naphthalene in B6C3F1 Mice, Inhalation Studies Technical Report Series No. 410, NIH Publication 92-3141, Research Triangle Park, 1992.
- VERORDNUNG (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), OJ L 353, 31.12.2008, p. 1–1355.
- WHO-IARC (International Agency for Research on Cancer) (2002): Some Traditional Herbal Medicines, Some Mycotoxins, Naphthalene and Styrene. IARC MONOGRAPHS ON THE IDENTIFICATION OF CARCINOGENIC HAZARDS TO HUMANS, Volume 82.

Pflanzenschutzmittel

Pflanzenschutzmittel dienen dem Schutz von Pflanzen, Pflanzenteilen oder Pflanzenprodukten (Erntegut, Saatgut) gegen mikrobielle, pilzliche, pflanzliche bzw. tierische Schädlinge, der Beeinflussung der Pflanzenproduktion sowie der Bekämpfung von Hygieneschädlingen.

Hexachlorcyclohexan (HCH-Gemisch oder β -HCH)

Bezeichnung	Hexachlorcyclohexan (HCH, technisch: CAS-Nr.: 608-73-1)
Vorkommen	Hexachlorcyclohexan (HCH) ist ein monozyklischer chlorierter Kohlenwasserstoff und kommt in der Umwelt nicht natürlich vor. Je nach äquatorialer oder axialer Position der Chlorsubstituenten werden 8 Stereoisomere unterschieden, von denen 5 in nennenswerter Menge in technischem HCH (t-HCH) enthalten sind und nur eines (γ -HCH) insektizide Wirkung aufweist. In der Regel besteht t-HCH aus α -HCH (65-79 %), β -HCH (7-20 %), γ -HCH (Lindan) (14-15 %), δ -HCH (6-10 %) und ϵ -HCH (3-4 %). Da α - und γ -Isomere flüchtiger sind als das β -Isomer und sich t-HCH durch abiotische und biotische Vorgänge über α -HCH und δ -HCH zu β -HCH, dem stabilsten Isomer, umwandelt, reichert sich β -HCH in Böden an. Für t-HCH besteht in Deutschland ein Anwendungsverbot für Pflanzenschutzmittel. Aufgrund ihrer hohen Lipophilie und schlechten biologischen Abbaubarkeit werden HCH in Organismen akkumuliert.
Humantoxikologische Bewertung	Hinsichtlich humantoxikologischer Wirkungen zeigen die HCH-Isomere unterschiedliche Toxizitätsprofile. Akut wirken γ -HCH sowie auch α -HCH toxischer als das β -Isomer, während aufgrund der hohen Akkumulationstendenz β -HCH bei längerer Exposition die höchste Toxizität aufweist. HCH können oral, inhalativ und dermal aufgenommen werden und in den Organismus gelangen, wobei für die orale und inhalative Aufnahme eine Resorptionsquote von 100 % angenommen wird, für dermale Expositionen werden Resorptionsquoten von 40 % beschrieben. Als sensibelste Effekte haben sich sowohl nach kurzfristiger als auch nach langfristiger Exposition die hepatotoxischen Effekte gezeigt, die auf der Freisetzung lysosomaler Enzyme (saure Phosphatase, β -Glucosidase, Kathepsin D) basieren und die durch Schädigung lysosomaler Membranen hervorgerufen werden. Lindan ist von der IARC (2018) als Humankarzinogen (Gruppe 1) eingestuft.
Quantifizierung der Wirkung	Quelle: UBA (1999ff)
orale Aufnahme - toxisch	TRD: 20 ng/(kg KG*d) (Hepatotoxizität) Resorption: 100 % SF (a,b,c,d): 1.000 (10,1,10,10)
orale Aufnahme - kanzerogen	Krebsrisiko 10 ⁻⁵ : 6 ng/(kg KG*d) (UR+) Resorption: 100 %
inhalative Aufnahme - toxisch	TRD: 5 ng/(kg KG*d) (Hepatotoxizität) Resorption: 100 % SF (a,b,c,d): 1.000 (10,1,10,10)
inhalative Aufnahme - kanzerogen	Krebsrisiko 10 ⁻⁵ : 20 ng/m ³ (UR+) Resorption: 100 %

Bezeichnung	Hexachlorcyclohexan (HCH, technisch: CAS-Nr.: 608-73-1)
Nutzungsszenarien	In den Nutzungsszenarien ‚Kinderspielflächen‘, ‚Wohngebiete‘ und ‚Park- und Freizeitanlagen‘ bestimmen die toxischen Wirkungen nach oraler Aufnahme die Ableitung der Bodenwerte. Für das Nutzungsszenario ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ wurde der berechnete Wert aus Gründen der Plausibilität (Abstand zu den Hintergrundwerten) halbiert. In ‚Nutzgärten‘ dominiert der Verschmutzungspfad die Schadstoffzufuhr über den Verzehr von Gemüse und Obst.
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> HCH-Isomere haben eine unterschiedlich hohe Toxizität. Die Festlegung auf Basis einzelner TRD-Werte erschien jedoch nicht sinnvoll, da HCH oft als Gemisch vorliegt oder abiotische und biologische Isomerisierungen stattfinden, so dass in vielen Fällen Mischexpositionen zu erwarten sind. Um der additiven Wirkung der HCH-Isomere Rechnung zu tragen, wurde für Mischexpositionen ein TRD-Wert von 0,02 µg/(kg KG * Tag) für alle HCH-Isomere abgeleitet, wobei gilt: $\text{Summe HCH} = \frac{\text{Dosis } \alpha\text{-HCH}}{5} + \text{Dosis } \beta\text{-HCH} + \frac{\text{Dosis } \gamma\text{-HCH}}{16,5}$ Zur Berechnung der Prüfwerte der BBodSchV wird für die Betrachtung langfristiger Wirkungen eine vergleichende Berechnung sowohl für die hepatotoxischen wie auch für die kanzerogenen Wirkungen hinsichtlich der Risikoabschätzung für technisches HCH durchgeführt. Bei den dort zugrunde gelegten Expositionsszenarien ergeben sich jedoch für die toxischen Wirkungen die etwas niedrigeren Beurteilungsmaßstäbe. Für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch liegen keine Beurteilungsmaßstäbe vor.
Beurteilungswerte Bodenluft	Keine Relevanz
Beurteilungswerte Innenraumluft (Staub)	Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige Stoffe im Hausstaub (AGÖF 2007): Normalwert: < 0,1 mg/kg (γ-HCH; Lindan) Auffälligkeitswert: 0,3 mg/kg (γ-HCH; Lindan) < 0,1 mg/kg (α-HCH) < 0,2 mg/kg (β-HCH) < 0,1 mg/kg (δ-HCH)
Beurteilungswerte Lebensmittel	In der EU-VO 2017/978 sind für verschiedene Lebensmittelgruppen Rückstandshöchstgehalte von 0,01 mg/kg (= untere analytische Bestimmungsgrenze) für α-HCH, β-HCH und γ-HCH aufgeführt. .
Trinkwasser	0,0001 mg/l (Pestizide) als Einzelsubstanz (TrinkwV 2023)
Weitere Verweise	vgl. UBA (1999ff), EIKMANN et al. (1999ff), IGS NRW, BfR etc.

Expositionsabschätzung für Hexachlorcyclohexan (HCH, technisch: CAS-Nr.: 608-73-1)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahme-pfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutz-pflanze ²	Wirkend-punkt auf den Men-schen	Untersuchungen zur Expositionsab-schätzung
Kinderspielflächen	5 mg/kg TM ¹	orale Aufnahme		toxisch	Resorptionsverfügbarkeit**
Wohngebiete	10 mg/kg TM ¹				Resorptionsverfügbarkeit**

Expositionsabschätzung für Hexachlorcyclohexan (HCH, technisch: CAS-Nr.: 608-73-1)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahme-pfad (Direktpfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze ²	Wirkend-punkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
Park- und Freizeitanlagen	25 mg/kg TM ¹				Resorptionsverfügbarkeit**
Industrie- und Gewerbegrundstücke	400 mg/kg TM ^{1, a}	inhalative Aufnahme		kanzerogen	Feinkornfraktion < 63 µm nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
Nutzgärten	<i>(0,05 mg/kg TM^{1, ***}) (Prüfwert für Grünlandflächen, Schutzziel Futtermittelqualität)</i>		systemisch: - Verschmutzung: relevant Gaspfad: relevant Deposition: -	toxisch	
Haus- und Kleingärten	5 mg/kg TM ^{1, *} * Prüfwert für Kinderspielflächen	orale Aufnahme		toxisch	Resorptionsverfügbarkeit** nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
	<i>(0,05 mg/kg TM^{1, ***}) (Prüfwert für Grünlandflächen, Schutzziel Futtermittelqualität)</i>		systemisch: - Verschmutzung: relevant Gaspfad: relevant Deposition: -		
Sport- und Bolzplätze	-				

¹ Prüfwert nach BBodSchV.

² Siehe hierzu *Arbeitshilfe Tabelle 9*

^a Wert durch Plausibilitätsprüfung begründet.

** Die Untersuchung der Resorptionsverfügbarkeit wurde zwar im Rahmen der Überprüfung der DIN 19738 validiert, allerdings zählt die Untersuchung dieses Parameters nicht zu den praxisüblichen Verfahren, so dass die laborseitige Machbarkeit im Vorfeld zu klären ist. Ein Forschungsvorhaben mit Screeninguntersuchungen zur Implementierung der DIN 19738 und Bewertung der Resorptionsverfügbarkeit von organischen Schadstoffen im Vollzug der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung läuft derzeit beim UBA unter der FKZ 3718 74 299 0.

*** Es wird angenommen, dass für HCH der systemische Pfad über die Wurzel in andere Pflanzenteile eine Rolle spielt. Ansteigende Bodenhalte von HCH führen zu höheren Gehalten in Pflanzen. Auch eine Aufnahme von HCH aus der Gasphase über die Blätter ist möglich. So wurde ein Prüfwert für HCH von 0,05 mg/kg Boden für Grünland mit dem Schutzziel Futtermittelqualität abgeleitet.

Quellen

- AGÖF (Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V.) (2007): Vorläufige AGÖF-Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige organische Verbindungen im Hausstaub Online: <https://www.agoef.de/orientierungswerte/agoef-hausstaub-orientierungswerte/agoef-hausstaub-orientierungswerte-2007.html#c1023>
- BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).
- BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung). Online: <http://www.bfr.bund.de/de/start.html>
- EIKMANN, T.; HEINRICH, U.; HEINZOW, B.; KONIETZKA, R. (Hrsg.) (1999ff): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen – Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- EU-VO 2017/978: Verordnung (EU) 2017/978 der Kommission vom 9. Juni 2017 zur Änderung der Anhänge II, III und V der Verordnung (EG) Nr. 396/2005 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Höchstgehalte an Rückständen von Fluopyram, Hexachlorcyclohexan (HCH), Alpha-Isomer, Hexachlorcyclohexan (HCH), Beta-Isomer, Hexachlorcyclohexan (HCH), Summe der Isomere außer dem Gamma-Isomer, Lindan (Hexachlorcyclohexan (HCH), Gamma-Isomer), Nikotin und Profenofos in oder auf bestimmten Erzeugnissen. Amtsblatt der Europäischen Union, L 151, 14. Juni 2017.
- IARC (International Agency for Research on Cancer) (2018): IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans; volume 113): DDT, Lindane, and 2,4-D. ISBN 978-92-832-0179-3.
- IGS NRW: Informationssystem Gefährliche Stoffe. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Online: <https://igsvtu.lanuv.nrw.de/home/>
- TrinkwV (2023): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV). Trinkwasserverordnung vom 20. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 159).
- UBA (Umweltbundesamt) (1999ff): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. Erich Schmidt Verlag, Loseblattsammlung 1999 mit Ergänzungen, Berlin.
- UBA (Umweltbundesamt) (in Veröffentlichung): Screeninguntersuchungen zur Implementierung der DIN 19738 und Bewertung der Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen im Vollzug der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. FKZ 3718 74 299 0.

Polychlorierte Biphenyle (PCB₆)

PCB sind synthetische Produkte, die durch Chlorierung von Biphenyl hergestellt werden und eine Verbindungsklasse von insgesamt 209 möglichen Verbindungen (Kongeneren) umfassen. Die einzelnen Verbindungen unterscheiden sich in ihrem Chlorierungsgrad sowie der Stellung der Chloratome am Biphenylgerüst.

PCB wurden als Kühl- und Isoliermittel in der Elektroindustrie, als Hydraulikflüssigkeit in der Maschinenindustrie und als Wärmeübertragungsflüssigkeit in vielen Industriezweigen eingesetzt (geschlossene Anwendung). Zugleich dienten sie auch als Weichmacher und Brandverzögerer für Lacke, Farben, Klebstoffe, Dichtungsmassen, Kunststoffe und Verpackungsmittel (offene Anwendung). Zum Einsatz kamen PCB-Gemische mit ca. 20–68 % Chlorierungsgrad. In den Handelsnamen wie z. B. Aroclor 1248 ist der Chloranteil (48 % Chlor) erkennbar.

Die Produktion und Anwendung von PCB ist in Deutschland seit den 1980er Jahren verboten. Dennoch werden sie aufgrund ihrer Persistenz und ihrem Potenzial, sich in der Nahrungskette anzureichern, auch heute noch in zahlreichen Umweltmedien nachgewiesen (EIKMANN et al. 1999ff; UBA 2011).

Grundsätzlich können sich PCB-Gemische in ihrer Zusammensetzung erheblich unterscheiden. In der Umwelt reichern sich einzelne PCB-Kongeneren unterschiedlich an und ergeben – im Vergleich zu den in die Umwelt emittierten technischen PCB-Gemischen – abweichende Zusammensetzungen in den Umweltmedien.

Die Messung der Konzentrationen aller potentiell auftretenden 209 PCB-Kongeneren in Umweltmedien und im Organismus wäre sehr aufwändig und deshalb in der Praxis nicht sinnvoll. Daher wurden verschiedene Versuche unternommen, geeignete Leitsubstanzen auszuwählen, die eine Extrapolation auf den PCB-Gesamtgehalt erlauben. Nach einem in der Bundesrepublik Deutschland üblichen Verfahren wird der Gesamt-PCB-Gehalt aus der Summe der Gehalte von sechs Leitsubstanzen (PCB-Kongeneren 28, 52, 101, 138, 153 und 180) und Multiplikation mit dem Faktor 5 abgeschätzt. Die Summe (PCB₆) wird als geeigneter Indikator für das Vorkommen von nicht dioxinähnlichen (non-dioxin like (ndl-)) PCB in der Nahrungskette, für die PCB-Belastung der Umwelt und für die PCB-Exposition des Menschen betrachtet (UBA 2015)³.

Nachfolgend findet sich eine Übersicht der sechs Leitkongeneren der ndl-PCB.

ndl-PCB (nicht dioxinähnliche PCB)			
Typ	IUPAC	Struktur	Beurteilungsgrundlage
PCB ₆ (Ball-schmitter)	PCB-28	2,4,4'-TriCB	Beurteilung toxischer Wirkungen mit Hilfe des TRD-Wertes von 15 ng/(kg KG*d)*
	PCB-52	2,2',5,5'-TetraCB	
	PCB-101	2,2',4,5,5'-PentaCB	
	PCB-138	2,2',3,4,4',5'-HexaCB	
	PCB-153	2,2',4,4',5,5'-HexaCB	
	PCB-180	2,2',3,4,4',5,5'-HeptaCB	

³ Seit 2008 muss in Deutschland für die Untersuchung von festen Abfällen auf PCB die europäische Norm DIN EN 15308 angewandt werden. Gemäß dieser Norm muss, neben den sechs Indikator-PCB, zusätzlich auch PCB-118 (das zu den dl-PCB zählt) bestimmt werden. Die Gesamt-PCB-Konzentration von PCB-haltigen Materialien wird jedoch wie bisher als „Summe der Konzentrationen der sechs Indikator-PCB, multipliziert mit dem Faktor 5“ berechnet (UBA 2015).

* Abgeleiteter TRD-Wert nach HASSAUER & KALBERLAH (1999).

Für die Beurteilung der von PCB und PCDD/F verursachten dioxinähnlichen Wirkungen werden 12 Verbindungen aus der Gruppe der PCB sowie 17 Kongenere der Dioxine und Furane analytisch bestimmt. Eine Übersicht der 12 Leitkongenere der dl-PCB ist im Folgenden aufgeführt.

dl-PCB (dioxinähnliche PCB)				
Typ	IUPAC	Struktur	WHO-TEF (1998)	WHO-TEF (2005)*
non-ortho-PCB	PCB-77	3,3',4,4'-TetraCB	0,0001	0,0001
	PCB-81	3,4,4',5-TetraCB	0,0001	0,0003
	PCB-126	3,3',4,4',5-PentaCB	0,1	0,1
	PCB-169	3,3',4,4',5,5'-HexaCB	0,01	0,03
mono-ortho-PCB	PCB-105	2,3,3',4,4'-PentaCB	0,0001	0,00003
	PCB-114	2,3,4,4',5-PentaCB	0,0005	0,00003
	PCB-118	2,3',4,4',5-PentaCB	0,0001	0,00003
	PCB-123	2',3,4,4',5-PentaCB	0,0001	0,00003
	PCB-156	2,3,3',4,4',5-HexaCB	0,0005	0,00003
	PCB-157	2,3,3',4,4',5'-HexaCB	0,0005	0,00003
	PCB-167	2,3',4,4',5,5'-HexaCB	0,00001	0,00003
	PCB-189	2,3,3',4,4',5,5'-HeptaCB	0,0001	0,00003
* In einer im Jahr 2022 von der WHO abgehaltenen Ad-hoc-Sachverständigenkonsultation wurden die Toxizitätsäquivalenzfaktoren (TEF) der WHO von 2005 für dioxinähnliche Verbindungen, einschließlich einiger PCB, neu bewertet. Eine Aktualisierung der WHO-TEF-Werte ist zu erwarten.				

Die Beurteilung der Toxizität der Kongenere erfolgt mit Hilfe von Toxizitätsäquivalenten (TEQ). Die höchste Giftigkeit weisen das 2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin (TCDD), das maßgeblich beim Unfall in Seveso (1976) freigesetzt wurde, sowie das 1,2,3,7,8-Pentachlordibenzodioxin auf. Diesen Kongeneren wird ein Toxizitätsäquivalentfaktor von jeweils 1 zugeordnet. Allen anderen relevanten Einzelsubstanzen werden im Vergleich Toxizitätsäquivalentfaktoren < 1 zugeordnet. Die Summe der Toxizitätsäquivalente der Einzelverbindungen in einer Probe ergibt die Gesamttoxizität der Probe (TEQ-Wert) (vgl. UBA 2015).

Darüber hinaus können industriell hergestellte PCB mit polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen (PCDD/F, kurz: Dioxine) kontaminiert sein. In technischen PCB-Gemischen ist zwar der Anteil der PCDD/F meist unter 10 %, jedoch können durch partielle Oxidation (z. B. bei unvollständiger Verbrennung oder katalytischer Konversion) aus den PCB PCDD/F gebildet werden. Aus diesem Grund ist bei Vorliegen von PCB in Böden eine mögliche gleichzeitige Kontamination durch PCDD/F zu prüfen (vgl. z. B. EIKMANN et al. 1999ff; LUA NRW 2002, UBA 2015).

Bezeichnung	PCB ₆ (PCB-Kongenerne 28, 52, 101, 138, 153 und 180)
Vorkommen	<p>PCB gelangten historisch überwiegend durch Einträge über die Atmosphäre in die verschiedenen Umweltkompartimente und sind dort in Böden und Sedimenten gespeichert. PCB haben lipophile und hydrophobe Eigenschaften und können durch pflanzliche und tierische Biota aufgenommen werden. Das Potenzial für Abbau und Verstoffwechslung/Ausscheidung im tierischen Organismus ist relativ gering und führt zur Bioakkumulation insbesondere höher chlorierter PCB in der Nahrungskette. Aufgrund ihrer Eigenschaften als persistente organische Schadstoffe (POP von <i>persistent organic pollutants</i>) finden sich PCB heute ubiquitär in der Umwelt.</p> <p>Aufgrund ihrer Lipophilie und sehr schlechten biologischen Abbaubarkeit reichern sich PCB in Organismen an. Im Menschen finden sich PCB insbesondere im Fettgewebe, im Blutserum sowie in der Muttermilch.</p> <p>Da der Kenntnisstand für eine selektive Beurteilung der Einzelkongenerne noch nicht ausreicht, basiert die Gefährdungsabschätzung nach aktuellem Stand weiterhin auf Konventionen zur Berechnung der PCB-Gesamtbelastung, ausgehend von einigen Leitverbindungen (s.o.).</p>
Humantoxikologische Bewertung	<p>Nach Exposition wurden beim Menschen Schädigungen der Haut, des Nervensystems und der Leber sowie immunologische Effekte und Schädigungen von Kindern PCB-exponierter Mütter beobachtet. Im Niedrigdosisbereich stehen die Wirkungen auf die Entwicklung des Zentralnerven- und des Immunsystems bei Säuglingen und Kleinkindern im Vordergrund. PCB sind von der IARC (2015) als krebserzeugend für den Menschen (Gruppe 1) eingestuft und von der MAK-Kommission (DFG 2015) der Kanzerogenitätskategorie 4 zugeordnet (krebserzeugend, MAK-Wert ableitbar; nicht-ge-notoxischer Wirkungsmechanismus ist vordergründig).</p>
Quantifizierung der Wirkung	<p>Quelle: UBA (1999ff)</p> <p>TRD: 15 ng/(kg KG*d) (V)</p> <p>Resorption: 100 %</p> <p>SF (a,b,c,d): 300 (1,10,3,10)</p> <p>Entfällt</p>
<p>orale Aufnahme - toxisch</p> <p>inhalative Aufnahme - kanzerogen</p>	<p>In den Nutzungsszenarien ‚Kinderspielflächen‘, ‚Wohngebiete‘ und ‚Park- und Freizeitanlagen‘ bestimmen die toxischen Wirkungen nach oraler Aufnahme die Ableitung der Bodenwerte. Für die Nutzungsszenarien ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ sowie ‚Sport- und Bolzplätze‘ konnten für die inhalative Aufnahme keine Berechnungen durchgeführt werden, da hierfür keine abgesicherten Bewertungsgrundlagen vorliegen. Die Prüfwerte für ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ wurden daher pragmatisch abgeschätzt.</p> <p>In ‚Nutzgärten‘ dominiert der Verschmutzungspfad die Schadstoffzufuhr über den Verzehr von Gemüse und Obst.</p>

Bezeichnung	PCB ₆ (PCB-Kongener 28, 52, 101, 138, 153 und 180)
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> Die Gruppe der PCB kann eingeteilt werden, in die nicht dioxinähnlichen PCB (ndl-PCB) sowie in die dioxinähnlichen PCB (dl-PCB). Die ndl-PCB werden mit Hilfe der PCB₆ (nach Ballschmiter) untersucht und mit Hilfe der Prüfwerte bewertet. Die dl-PCB sind bei Betrachtung des Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt mit Hilfe der Toxizitätsäquivalente (nach WHO-TEF 2005) zusammen mit Dioxinen (polychlorierte Dibenzoparadioxine (PCDD)) und Furanen (polychlorierten Dibenzofuranen (PCDF)) als Summe zu bewerten. Begründet ist dies mit dem gleichen Wirkungsmechanismus. Für die Summe der PCDD und PCDF <u>und</u> der dl-PCB nach der DIN EN 16190 sind in der BBodSchV Maßnahmenwerte ausgewiesen. Partikulär gebundene PCB können sich von außen in der Wachsschicht, der Kutikula anreichern. Die anhaftende Verschmutzung, die insbesondere bei Futtermitteln eine Rolle spielt, ist abhängig von der Pflanzenart (z. B. weist Gras häufig höhere Bodenanteile auf als Mais), sowie der Bodenart und der Erntetechnik (beispielsweise 1-2 cm oder 5 cm über dem Erdreich).
	<ul style="list-style-type: none"> Für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch liegen keine Beurteilungsmaßstäbe vor. Nutztiere wie Rinder, Schafe und Hühner können bei der Nahrungsaufnahme anhaftenden Boden (Verschmutzungspfad) und die darin enthaltenen PCB aufnehmen und im Gewebe anreichern.
Beurteilungswerte Bodenluft	Keine Relevanz
Beurteilungswerte Innenraumluft (Staub)	<p>Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige Stoffe im Hausstaub (AGÖF 2007):</p> <p><u>Normalwert:</u> < 0,1 mg/kg (PCB 101; PCB 138; PCB 153; PCB 180)</p> <p><u>Auffälligkeitswert:</u> < 0,1 mg/kg (PCB 28, PCB 52) 0,1 mg/kg (PCB 101) 0,3 mg/kg (PCB 138, PCB 153) 0,2 mg/kg (PCB 180) 4,5 mg/kg (PCB Summe nach LAGA)</p>
Beurteilungswerte Lebensmittel	<p>PCB₆ (EU-VO 2023/915):</p> <ul style="list-style-type: none"> - 300 ng/g Frischgewicht für Muskelfleisch von Wildaal sowie dessen Erzeugnisse - 200 ng/g Frischgewicht für Fischleber; für Muskelfleisch von wild gefangenen Dornhai - 200 ng/g Fett für Öle von Meerestieren - 125 ng/g Frischgewicht für Muskelfleisch von wild gefangenen Süßwasserfisch sowie dessen Erzeugnisse - 75 ng/g Frischgewicht für Fischereierzeugnisse und Muscheln - 40 ng/g Fett für Fleisch und Fleischerzeugnisse von Rindern, Schafen, Ziegen, Schweinen, Geflügel außer genießbare Nebenerzeugnisse der Schlachtung, für Fett von Rindern, Schafen, Schweinen, Geflügel, gemischte tierische Fette; Fett für Rohmilch, Milcherzeugnisse; für Eier und Eierzeugnisse, ausgenommen Gänseeier; für pflanzliche Öle und Fette - 3,0 ng/g Frischgewicht für Leber und ihre Verarbeitungserzeugnisse von Rindern, Ziegen, Schweinen, Geflügel, Pferden, Schafen - 1,0 ng/g Frischgewicht für Säuglinge und Kleinkinder bestimmte Lebensmittel

Bezeichnung	PCB ₆ (PCB-Kongenere 28, 52, 101, 138, 153 und 180)	
Trinkwasser	Keine	
Harmonisierte Einstufung - Anhang VI der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP-Verordnung)	<u>Gefahrenklasse, -kategorie, -kodierung</u> STOT RE 2* Aquatic Acute 1 Aquatic Chronic 1	<u>Kodierung der Gefahrenhinweise</u> H373**: Kann die Organe schädigen (<i>alle betroffenen Organe nennen, sofern bekannt</i>) bei längerer oder wiederholter Exposition (<i>Expositionsweg angeben, sofern schlüssig belegt ist, dass diese Gefahr bei keinem anderen Expositionsweg besteht</i>) H400: Sehr giftig für Wasserorganismen H410: Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung
Weitere Verweise	vgl. UBA, EIKMANN et al. (1999ff) etc.	

Expositionsabschätzung für PCB ₆ (PCB-Kongenere 28, 52, 101, 138, 153 und 180)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahme-pfad (Direkt-pfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze ²	Wirkendpunkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Kinderspielflächen	0,4 mg/kg TM ¹	orale Aufnahme		toxisch	Resorptionsverfügbarkeit**
Wohngebiete	0,8 mg/kg TM ¹				Resorptionsverfügbarkeit**
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direkt-pfad
Park- und Freizeitanlagen	2 mg/kg TM ¹	orale Aufnahme		toxisch	Resorptionsverfügbarkeit**
Industrie- und Gewerbegrundstücke	40 mg/kg TM ^{1, a}	inhalative Aufnahme		kanzerogen	Feinkornfraktion < 63 µm
					nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direkt-pfad

Expositionsabschätzung für PCB ₆ (PCB-Kongenere 28, 52, 101, 138, 153 und 180)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahme-pfad (Direkt-pfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze ²	Wirkendpunkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Nutzgärten	(0,2 mg/kg TM ^{1, ***}) (Maßnahmenwert für Grünlandflächen, Schutzziel Futtermittelqualität)		systemisch: geringe Relevanz Verschmutzung: relevant Gaspfad: mäßig relevant für v. a. gering chlorierte PCB Deposition: relevant	toxisch	
Haus- und Kleingärten	0,4 mg/kg TM ^{1, *} * Prüfwert für Kinderspielflächen	orale Aufnahme		toxisch	Resorptionsverfügbarkeit**
	(0,2 mg/kg TM ^{1, ***}) (Maßnahmenwert für Grünlandflächen, Schutzziel Futtermittelqualität)		systemisch: geringe Relevanz Verschmutzung: relevant Gaspfad: mäßig relevant für v. a. gering chlorierte PCB Deposition: relevant		nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direkt-pfad
Sport- und Bolzplätze	-				

¹ Prüfwert nach BBodSchV.

² Siehe hierzu *Arbeitshilfe Tabelle 9*

^a Wert durch Plausibilitätsprüfung begründet.

** Die Untersuchung der Resorptionsverfügbarkeit wurde zwar im Rahmen der Überprüfung der DIN 19738 validiert, allerdings zählt die Untersuchung dieses Parameters nicht zu den gängigen Verfahren, so dass die Kosten zur Durchführung derzeit vergleichsweise hoch anzusetzen sind. In einem Ringversuch zur Validierung des DIN-Verfahrens wurden für PCB die methodischen Grenzen des Verfahrens aufgezeigt, so dass in der Praxis oft weiterhin von einer 100%igen Resorptionsverfügbarkeit ausgegangen wird. Im Einzelfall sollte jedoch die Anwendbarkeit des DIN-Verfahrens nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden.

*** Derzeit liegt noch kein Prüfwert für PCB für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze vor. Lediglich für Grünlandnutzung wurde ein Maßnahmenwert für Grünlandflächen (in Hinblick auf die Anreicherung von PCB in der Nahrungskette) abgeleitet.

Quellen:

AGÖF (Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V.) (2007): Vorläufige AGÖF-Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige organische Verbindungen im Hausstaub Online: <https://www.agoef.de/orientierungswerte/agoef-hausstaub-orientierungswerte/agoef-hausstaub-orientierungswerte-2007.html#c1023>

BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).

- DFG (2015): MAK- und BAT-Werte-Liste 2015. Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. Mitteilung 51.
- DIN 19738 (2017-06): Resorptionsverfügbarkeit von organischen und anorganischen Schadstoffen aus kontaminiertem Bodenmaterial. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN 15308 (2016-12): Charakterisierung von Abfällen - Bestimmung ausgewählter polychlorierter Biphenyle (PCB) in festem Abfall mittels Gaschromatographie mit Elektroneneinfang-Detektion oder massenspektrometrischer Detektion. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN 16190 (2019-10): Boden, behandelter Bioabfall und Schlamm - Bestimmung von Dioxinen und Furanen sowie Dioxin-vergleichbaren polychlorierten Biphenylen mittels Gaschromatographie und hochauflösender massenspektrometrischer Detektion (HR GC-MS).
- EIKMANN, T.; HEINRICH, U.; HEINZOW, B.; KONIETZKA, R. (Hrsg.) (1999ff): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen – Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- IARC (2015): Polychlorinated Biphenyls and Polybrominated Biphenyls. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Volume 107.
- HASSAUER, M.; KALBERLAH, F. (1999): Polychlorierte Biphenyle. In Eikmann, T.; Heinrich, U.; Heinzow, B.; Konietzka, R. (Hrsg.) (1999ff): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen – Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- LUA NRW (Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen) (2002): Toxikologische Bewertung polychlorierter Biphenyle (PCB) bei inhalativer Aufnahme. Materialien Nr. 62.
- UBA (Umweltbundesamt) (1999ff): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. Erich Schmidt Verlag, Loseblattsammlung 1999 mit Ergänzungen, Berlin.
- UBA (Umweltbundesamt) (2011): Expositions Betrachtung und Beurteilung des Transfers von Dioxinen, dioxinähnlichen PCB und PCB. Literaturstudie. Forschungskennzahl 3709 72 228. Texte 57/2011. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/expositionsbetrachtung-beurteilung-des-transfers>
- UBA (Umweltbundesamt) (2015): Analyse und Trendabschätzung der Belastung der Umwelt und von Lebensmitteln mit ausgewählten POPs und Erweiterung des Datenbestandes der POP-Dioxin-Datenbank des Bundes und der Länder mit dem Ziel pfadbezogener Ursachenaufklärung. Forschungskennzahl 3712 65 407 1; Dokumentationen 114/2015. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-trendabschaetzung-der-belastung-der-umwelt>
- VERORDNUNG (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), OJ L 353, 31.12.2008, p. 1-1355.
- VERORDNUNG (EU) 2023/915 DER KOMMISSION vom 25. April 2023 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), Amtsblatt der Europäischen Union, L 119, 5.5.2023, p. 103–157. Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0915>

Chlorphenole

Chlorphenole sind aufgrund ihrer vielfältigen Anwendungen in technischen Produkten, aber auch ihrer Verwendung als Zwischenprodukt chemischer Synthesen von Farben, Arzneimitteln, Polymeren und Bioziden ubiquitär in der Umwelt vorhanden. Auch in zivilisatorisch wenig beeinflussten Gebieten werden Chlorphenole im Erdboden, in Pflanzen und Mikroorganismen nachgewiesen. Von besonderer Bedeutung ist das Pentachlorphenol (PCP), das in Deutschland bis zum Verbot 1989 im Außen- und Wohnbereich als fungizid wirksames Holzschutzmittel angewendet wurde. Auch die Natriumsalze der Tetrachlorphenole sind zum Schutz frisch geschlagener Hölzer und als Fungizid in Tischlerplatten eingesetzt worden. Chlorphenole, hierbei insbesondere Pentachlorphenol, wurden über viele Jahre angewendet, um Oberflächenverwitterung von Hölzern im Inneren von Gebäuden, im Außenbereich und für Lebensmittelverpackungskisten sowie Transportpaletten zu verhindern. Aufgrund eines unterschiedlichen Chlorierungsgrades und wegen der verschiedenen Chlorpositionen zur funktionellen Gruppe gibt es 19 kongenere Strukturen für Chlorphenole mit sehr unterschiedlichen physikochemischen und toxischen Eigenschaften. Die sehr unterschiedlichen physikochemischen und chemischen Eigenschaften der Chlorphenole gehen auf die unterschiedliche Ausprägung der Salzbildung (stark pH-abhängig) in wässrigen Systemen und der Substitution der Aromatenwasserstoffe durch voluminöse Chloratome zurück. Bemerkenswert ist die hohe Wasserdampflichkeit der Chlorphenole.

Pentachlorphenol (PCP) (C₆Cl₅OH)

Bezeichnung	Pentachlorphenol (PCP) (CAS-Nr.: 87-86-5)
Vorkommen	Pentachlorphenol (PCP) ist eine organische Substanz mit phenolischem Geruch. Es ist mäßig flüchtig und in saurem Milieu nimmt die Löslichkeit in Wasser ab. PCP kommt nicht natürlich in der Umwelt vor. Es wurde als biozider Wirkstoff in Holzschutzmitteln, Kühlschmierstoffen, zur Farbkonservierung und in der Leder-, Textil- und Klebstoffindustrie verwendet. Seit 1989 besteht ein Herstellungs-, Inverkehrbringungs- und Anwendungsverbot für PCP. PCP kann mit PCDD/F verunreinigt sein. PCP können auch durch mikrobiellen Abbau aus chlorhaltigen Pestiziden entstehen. PCP reichert sich über die Nahrungskette, besonders in Fischen und Vögeln, an.
Humantoxikologische Bewertung	PCP beeinflusst den Prozess der zellulären Energieversorgung durch die Entkopplung der oxidativen Phosphorylierung. Durch diese gewebeunspezifischen Effekte können durch PCP verursachte Wirkungen im gesamten Körper auftreten und unterschiedliche toxische Effekte hervorrufen. Relevante toxikologische Endpunkte des PCP umfassen die fruchtschädigende Wirkung, die Störung des Schilddrüsenhormonhaushaltes, immunologische Wirkungen und die Effekte auf Leber, Niere und das Blutbild. Die Effekte auf die Schilddrüse gelten aktuell als die sensibelsten. Im Vergleich mit Berechnungen kanzerogener Wirkungen wurden jedoch die schlecht abgesicherten Daten zur Kanzerogenität beurteilungsbestimmend. Von der MAK-Kommission (DFG 1990) ist PCP der Kanzerogenitätskategorie 2 (Stoff, der als krebserzeugend für den Menschen anzusehen ist) zugeordnet. Von der IARC (WHO-IARC 2016) ist PCP als Humankarzinogen der Gruppe 1 eingestuft.
Quantifizierung der Wirkung	<p>Quelle: UBA (1999ff)</p> <p>orale Aufnahme - toxisch TRD: 3 µg/(kg KG*d) (Schilddrüseneffekte, endokrine Effekte) Resorption: 100 % SF (a,b,c,d): 1.000 (1,10,10*,10) (* wurde 2005 auf 3 reduziert)</p> <p>orale Aufnahme - kanzerogen Krebsrisiko 10⁻⁵: 0,08 µg/(kg KG*d) (UR-) Resorption: -</p> <p>inhalative Aufnahme - toxisch TRD: nicht abgeleitet</p> <p>inhalative Aufnahme - kanzerogen Krebsrisiko 10⁻⁵: entfällt</p>
Nutzungsszenarien	<p>In den Nutzungsszenarien ‚Kinderspielflächen‘, ‚Wohngebiete‘ und ‚Park- und Freizeitanlagen‘ bestimmen die kanzerogenen Wirkungen nach oraler und dermaler Aufnahme (Gesamtaufnahmerate = Bodenaufnahmerate_{oral} + Bodenaufnahmerate_{dermal}) die Ableitung der Bodenwerte.</p> <p>Für die Nutzungsszenarien ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ sowie ‚Sport- und Bolzplätze‘ konnten für die inhalative Aufnahme keine Berechnungen durchgeführt werden, da hierfür keine abgesicherten Bewertungsgrundlagen vorliegen. Prüfwerte für ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ wurden daher zunächst nicht abgeleitet bzw. pragmatisch festgelegt (vgl. BBodSchV).</p> <p>In ‚Nutzgärten‘ dominiert der Verschmutzungspfad die Schadstoffzufuhr über den Verzehr von Gemüse und Obst.</p>
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> Die Kanzerogenität nach oraler und dermaler Aufnahme bestimmt die PCP-Beurteilung. Für ‚Industrie und Gewerbegrundstücke‘ wurde der Prüfwert, orientierend an der oralen Aufnahme pragmatisch festgelegt und aufgrund der einheitlichen Anwendung des Plausibilitätskriteriums „Abschwemmungen, Verwehungen, Rutschungen“ auf 500 mg/kg festgesetzt. Für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch liegen keine Beurteilungsmaßstäbe vor.

Bezeichnung	Pentachlorphenol (PCP) (CAS-Nr.: 87-86-5)	
Beurteilungswerte Bodenluft	geringe Bedeutung (vgl. UBA 1999ff)	
Richtwerte für Raumluft	RW I: 0,0001 mg/m ³ RW II: 0,001 mg/m ³ (AIR 1997)	
Beurteilungswerte Innenraumluft (Staub)	Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige Stoffe im Hausstaub (AGÖF 2007): <u>Normalwert:</u> < 0,2 mg/kg <u>Auffälligkeitswert:</u> 1,5 mg/kg	
Beurteilungswerte Lebensmittel	0,01 mg/kg (allgemeine Höchstmenge in Lebensmittel nach Anlage 5 der Rückstands-Höchstmengenverordnung (RHmV), zuletzt geändert 2020)	
Trinkwasser	0,0001 mg/l (Pestizide) als Einzelsubstanz (TrinkwV 2023)	
Harmonisierte Einstufung - Anhang VI der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP-Verordnung)	<u>Gefahrenklasse, -kategorie, -kodierung</u> Acute Tox. 3 * Skin Irrit. 2 Eye Irrit. 2 Acute Tox. 2 * STOT SE 3 Carc. 2 Aquatic Acute 1 Aquatic Chronic 1	<u>Kodierung der Gefahrenhinweise</u> H301: Giftig bei Verschlucken H311: Giftig bei Hautkontakt H315: Verursacht Hautreizungen H319: Verursacht schwere Augenreizung H330: Lebensgefahr bei Einatmen H335: Kann die Atemwege reizen H351: Kann vermutlich Krebs erzeugen (<i>Expositionsweg angeben, sofern schlüssig belegt ist, dass diese Gefahr bei keinem anderen Expositionsweg besteht</i>) H400: Sehr giftig für Wasserorganismen H410: Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung
Weitere Verweise	vgl. UBA, EIKMANN et al. (1999ff), IGS NRW, BfR etc.	

Expositionsabschätzung für Pentachlorphenol (PCP) (CAS-Nr.: 87-86-5)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahme-pfad (Direkt-pfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze	Wirkend-punkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Ex-positionsabschätzung
Kinderspielflächen	50 mg/kg TM ^{1, a}	orale Aufnahme		kanzerogen	Resorptionsverfügbarkeit**
Wohngebiete	100 mg/kg TM ^{1, a}				Resorptionsverfügbarkeit**
					nutzungsabhängige Ex-positionsbedingungen Di-rektpfad
Park- und	250 mg/kg TM ^{1, a}				Resorptionsverfügbarkeit**

Expositionsabschätzung für Pentachlorphenol (PCP) (CAS-Nr.: 87-86-5)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahme-pfad (Direkt-pfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze	Wirkend-punkt auf den Men-schen	Untersuchungen zur Ex-positionsabschätzung
Freizeitanlagen					
Industrie- und Gewerbegrund-stücke	500 mg/kg TM ^{1, a}	orale Aufnahme		kanzerogen	Zugänglichkeit der Fläche, Lage zum Umfeld, Nutzungen im Umfeld prüfen Möglichkeiten sekundärer Verunreinigungen prüfen und Prüfschritte auswählen (ggf. RV oder Feinkornfraktion < 63 µm)
Nutzgärten	-			.	
Haus- und Kleingärten	50 mg/kg TM ^{1, *} * Prüfwert für Kinderspielflächen	orale Aufnahme		kanzerogen	Resorptionsverfügbarkeit** nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direkt-pfad
Sport- und Bolzplätze	-				

¹ Prüfwert nach BBodSchV.
^a Wert durch Plausibilitätsprüfung begründet

** Die Untersuchung der Resorptionsverfügbarkeit wurde zwar im Rahmen der Überprüfung der DIN 19738 validiert, allerdings zählt die Untersuchung dieses Parameters nicht zu den praxisüblichen Verfahren, so dass die laborseitige Machbarkeit im Vorfeld zu klären ist. Ein Forschungsvorhaben mit Screeninguntersuchungen zur Implementierung der DIN 19738 und Bewertung der Resorptionsverfügbarkeit von organischen Schadstoffen im Vollzug der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung läuft derzeit beim UBA unter der FKZ 3718 74 299 0.

Quellen:

AGÖF (Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V.) (2007): Vorläufige AGÖF-Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige organische Verbindungen im Hausstaub Online: <https://www.agoef.de/orientierungswerte/agoef-hausstaub-orientierungswerte/agoef-hausstaub-orientierungswerte-2007.html#c1023>

AIR (Ausschuss für Innenraumrichtwerte) (1997). Online: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/kommissionen-arbeitsgruppen/ausschuss-fuer-innenraumrichtwerte#ausschuss-fur-innenraumrichtwerte-air>

BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).

BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung). Online: <http://www.bfr.bund.de/de/start.html>

DFG (1990): Pentachlorphenol [MAK Value Documentation in German language, 1990]. In The MAK-Collection for Occupational Health and Safety.

DIN 19738 (2017-06): Resorptionsverfügbarkeit von organischen und anorganischen Schadstoffen aus kontaminiertem Bodenmaterial. Beuth-Verlag, Berlin.

EIKMANN, T.; HEINRICH, U.; HEINZOW, B.; KONIETZKA, R. (Hrsg.) (1999ff): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen – Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung. Erich Schmidt Verlag, Berlin.

IGS NRW: Informationssystem Gefährliche Stoffe. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Online: <https://igsvtu.lanuv.nrw.de/home/>

- TrinkwV (2023): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV). Trinkwasserverordnung vom 20. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 159).
- UBA (Umweltbundesamt) (1999ff): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. Erich Schmidt Verlag, Loseblattsammlung 1999 mit Ergänzungen, Berlin.
- UBA (Umweltbundesamt) (in Veröffentlichung): Screeninguntersuchungen zur Implementierung der DIN 19738 und Bewertung der Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen im Vollzug der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. FKZ 3718 74 299 0.
- Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), OJ L 353, 31.12.2008, p. 1-1355.
- Verordnung über Höchstmengen an Rückständen von Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmitteln in oder auf Lebensmitteln (Rückstands-Höchstmengenverordnung, RHmV), in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. Oktober 1999 (BGBl. I S. 2082; 2002 I S. 1004), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 16. Juli 2020 (BGBl. I S. 1699) geändert worden ist.
- WHO-IARC (International Agency for Research on Cancer) (2016): Pentachlorophenol and Some Related Compounds. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans (2016: Lyon, France), IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans; volume 117.

Chlorbenzole

Die chloresubstituierten Benzole leiten sich vom Benzol ab, bei dem ein oder mehrere Wasserstoffatome durch ein Chloratom ersetzt werden. Auf diese Weise ergeben sich 12 verschiedene Verbindungen, die sich in Substitutionsgrad und Symmetrie voneinander unterscheiden. Man unterscheidet nach der Anzahl der Chloratome und deren Position am Ring in:

- Monochlorbenzol,
- Dichlorbenzole
(Strukturisomere 1,2-Dichlorbenzol, 1,3-Dichlorbenzol, 1,4-Dichlorbenzol),
- Trichlorbenzole,
(Strukturisomere 1,2,3-Trichlorbenzol, 1,2,4-Trichlorbenzol, 1,3,5-Trichlorbenzol),
- Tetrachlorbenzole
(Strukturisomere 1,2,3,4-Tetrachlorbenzol, 1,2,3,5-Tetrachlorbenzol, 1,2,4,5-Tetrachlorbenzol)
- Pentachlorbenzol
- Hexachlorbenzol

Chlorbenzole finden oder fanden in der Vergangenheit vielfache Verwendungen, beispielsweise als Zwischenprodukt bei der Herstellung von Arzneimitteln, Pflanzenschutzmitteln, Desinfektionsmitteln, Konservierungsstoffen, Farbstoffen etc. Aufgrund ihrer meist geringen Abbaubarkeit können Chlorbenzole im Boden oder anderen Umweltmedien vorkommen, auch wenn für einige Vertreter (z. B. HCB) seit vielen Jahren ein Anwendungsverbot besteht.

Hexachlorbenzol (HCB) (C₆Cl₆)

Bezeichnung	Hexachlorbenzol (HCB) (CAS-Nr.: 118-74-1)
Vorkommen	Hexachlorbenzol (HCB) ist eine organische Substanz ohne natürlichen Vorkommens. HCB wurde zur Behandlung von Saatgut verwendet und es entsteht bei der Herstellung verschiedener chlorhaltiger Industriechemikalien. HCB kann mit PCDD/F verunreinigt sein. Aufgrund seiner Lipophilie und hohen Persistenz kann sich HCB in der Nahrungskette anreichern. Im Körper sowie in der Muttermilch reichert sich HCB aufgrund der schlechten biologischen Abbaubarkeit an. Für HCB besteht ein vollständiges Anwendungsverbot.
Humantoxikologische Bewertung	HCB verursacht nach oraler Exposition eine vermehrte Bildung bestimmter Porphyrine in der Leber, Leberschäden und neurotoxische Wirkungen, im Tierversuch insbesondere auch reproduktionstoxische und immunotoxische Wirkungen, die sich im Vergleich als die sensibelsten Endpunkte erwiesen. Die Wirkung nach inhalativer Aufnahme ist schlecht untersucht.
Quantifizierung der Wirkung	Quelle: UBA (1999ff)
orale Aufnahme - toxisch	TRD: 30 ng/(kg KG*d) (Reproduktionstoxizität) (V) Resorption: 100 % SF (a,b,c,d): 3.000 (10,10,3,10)
orale Aufnahme - kanzerogen	Krebsrisiko 10 ⁻⁵ : 0,006 µg/(kg KG*d) (UR-) Resorption: -
inhalative Aufnahme - toxisch	TRD: nicht abgeleitet
inhalative Aufnahme - kanzerogen	Krebsrisiko 10 ⁻⁵ : entfällt
Nutzungsszenarien	In den Nutzungsszenarien ‚Kinderspielflächen‘, ‚Wohngebiete‘ und ‚Park- und Freizeitanlagen‘ bestimmen die toxischen Wirkungen nach oraler Aufnahme die Ableitung der Bodenwerte. Für die Nutzungsszenarien ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ sowie ‚Sport- und Bolzplätze‘ konnten für die inhalative Aufnahme keine Berechnungen durchgeführt werden, da hierfür keine abgesicherten Bewertungsgrundlagen vorliegen. Der Prüfwert für ‚Industrie- und Gewerbegrundstücke‘ wurde daher pragmatisch festgelegt (vgl. BBodSchV). In ‚Nutzgärten‘ dominiert der Verschmutzungspfad die Schadstoffzufuhr über den Verzehr von Gemüse und Obst.
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> Für ‚Industrie und Gewerbegrundstücke‘ wurde der Prüfwert pragmatisch festgelegt. Für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch liegen keine Beurteilungsmaßstäbe vor.
Beurteilungswerte Bodenluft	geringe Bedeutung (vgl. UBA 1999ff)
Richtwerte für Raumluft	-
Beurteilungswerte Innenraumluft (Staub)	Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige Stoffe im Hausstaub (AGÖF 2007): <u>Auffälligkeitswert:</u> < 0,2 mg/kg

Bezeichnung	Hexachlorbenzol (HCB) (CAS-Nr.: 118-74-1)	
Beurteilungswerte Lebensmittel	- EU-VO 2016/1866: 0,005 mg/kg Milch 0,005 mg/kg Muskelgewebe von Schweinen, Rindern, Schafen, Ziegen, Einhufern, Geflügel 0,01 mg/kg Fettgewebe, Leber, Nieren von Schweinen, Rindern, Schafen, Ziegen, Einhufern, Geflügel 0,01 mg/kg Vogeleier 0,01 mg/kg Honig 0,01 mg/kg Früchte, Schalenfrüchte, Gemüse, Hülsenfrüchte, Ölfrüchte, Getreide, Zuckerpflanzen 0,02 mg/kg verschiedene Ölsaaten, außer Kürbiskerne (0,05 mg/kg) 0,02 mg/kg Tees, Kaffee, Kräutertees, Kakao, Johannisbrot, Hopfen, verschiedene Gewürze (z. B. Samengewürze, Fruchtgewürze, Rindengewürze, Knospengewürze)	
Trinkwasser	0,0001 mg/l (Pestizide) als Einzelsubstanz (TrinkwV 2023)	
Harmonisierte Einstufung - Anhang VI der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP-Verordnung)	<u>Gefahrenklasse, -kategorie, -kodierung</u> Carc. 1B STOT RE 1 Aquatic Acute 1 Aquatic Chronic 1	<u>Kodierung der Gefahrenhinweise</u> H350: Kann Krebs erzeugen (<i>Expositionsweg angeben, sofern schlüssig belegt ist, dass diese Gefahr bei keinem anderen Expositionsweg besteht</i>) H372 **: Schädigt die Organe (<i>alle betroffenen Organe nennen, sofern bekannt</i>) bei längerer oder wiederholter Exposition (<i>Expositionsweg angeben, sofern schlüssig belegt ist, dass diese Gefahr bei keinem anderen Expositionsweg besteht</i>) H400: Sehr giftig für Wasserorganismen H410: Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung
Weitere Verweise	vgl. UBA (1999ff), EIKMANN et al. (1999ff), IGS NRW, BfR etc.	

Expositionsabschätzung für Hexachlorbenzol (HCB) (CAS-Nr.: 118-74-1)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahme-pfad (Direkt-pfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze	Wirkend-punkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
Kinderspielflächen	4 mg/kg TM ¹	orale Aufnahme		toxisch	Resorptionsverfügbarkeit**
Wohngebiete	8 mg/kg TM ¹				Resorptionsverfügbarkeit**
					nutzungsabhängige

Expositionsabschätzung für Hexachlorbenzol (HCB) (CAS-Nr.: 118-74-1)					
Nutzungsszenario	Prüfwert	Relevanter Aufnahme-pfad (Direkt-pfad)	Übergang in / auf Nutzpflanze	Wirkend-punkt auf den Menschen	Untersuchungen zur Expositionsabschätzung
					Expositionsbedingungen Direktpfad
Park- und Freizeitanlagen	20 mg/kg TM ¹				Resorptionsverfügbarkeit**
Industrie- und Gewerbegrundstücke	200 mg/kg TM ^{1, a}	orale Aufnahme		toxisch	Zugänglichkeit der Fläche, Lage zum Umfeld, Nutzungen im Umfeld prüfen Möglichkeiten sekundärer Verunreinigungen prüfen und Prüfschritte auswählen (ggf. RV oder Feinkornfraktion < 63 µm)
Nutzgärten	<i>(0,5 mg/kg TM^{1, ***}) (Prüfwert für Grünlandflächen, Schutzziel Futtermittelqualität)</i>		Verschmutzung / Gas-pfad	toxisch	
Haus und Kleingärten	4 mg/kg TM ^{1, *} * Prüfwert für Kinderspielflächen	orale Aufnahme		toxisch	Resorptionsverfügbarkeit**
	<i>(0,5 mg/kg TM^{1, ***}) (Prüfwert für Grünlandflächen, Schutzziel Futtermittelqualität)</i>		Verschmutzung / Gas-pfad		nutzungsabhängige Expositionsbedingungen Direktpfad
Sport- und Bolzplätze	-				

¹ Prüfwert nach BBodSchV.
^a Wert durch Plausibilitätsprüfung begründet.

** Die Untersuchung der Resorptionsverfügbarkeit wurde zwar im Rahmen der Überprüfung der DIN 19738 validiert, allerdings zählt die Untersuchung dieses Parameters nicht zu den praxisüblichen Verfahren, so dass die laborseitige Machbarkeit im Vorfeld zu klären ist. Ein Forschungsvorhaben mit Screeninguntersuchungen zur Implementierung der DIN 19738 und Bewertung der Resorptionsverfügbarkeit von organischen Schadstoffen im Vollzug der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung läuft derzeit beim UBA unter der FKZ 3718 74 299 0.

*** Es wird angenommen, dass für HCB der systemische Pfad über die Wurzel in andere Pflanzenteile in gewissem Umfang möglich, aber von untergeordneter Bedeutung ist. Die Aufnahme der lipophilen Substanz über die Cuticula der Blätter (Verschmutzung und Aufnahme durch die Luft) spielt eine wesentlichere Rolle. Die Verflüchtigung von HCB aus dem Boden kann eine bedeutende Kontaminationsquelle für oberirdische Pflanzenteile sein. Die HCB-Gehalte von Pflanzen, die auf HCB-kontaminierten Böden wachsen, sind umso höher, je näher sie am Boden wachsen und je größer die Blattoberfläche ist. So wurde ein Prüfwert für HCB von 0,5 mg/kg Boden für Grünland mit dem Schutzziel Futtermittelqualität abgeleitet (BBodSchV).

Quellen:

- AGÖF (Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V.) (2007): Vorläufige AGÖF-Orientierungswerte für mittel- und schwerflüchtige organische Verbindungen im Hausstaub Online: <https://www.agoef.de/orientierungswerte/agoef-hausstaub-orientierungswerte/agoef-hausstaub-orientierungswerte-2007.html#c1023>
- BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).
- BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung). Online: <http://www.bfr.bund.de/de/start.html>
- DIN 19738 (2017-06): Resorptionsverfügbarkeit von organischen und anorganischen Schadstoffen aus kontaminiertem Bodenmaterial. Beuth-Verlag, Berlin.
- EIKMANN, T.; HEINRICH, U.; HEINZOW, B.; KONIETZKA, R. (Hrsg.) (1999ff): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen – Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- EU-VO 2016/1866: VERORDNUNG (EU) 2016/1866 DER KOMMISSION; vom 17. Oktober 2016 zur Änderung der Anhänge II, III und V der Verordnung (EG) Nr. 396/2005 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Höchstgehalte an Rückständen von 3-Decen-2-on, Acibenzolar-S-methyl und Hexachlorbenzol in oder auf bestimmten Erzeugnissen (Text von Bedeutung für den EWR); C/2016/6533; OJ L 286, 21.10.2016, p. 4-3.
- IGS NRW: Informationssystem Gefährliche Stoffe. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Online: <https://igsvtu.lanuv.nrw.de/home/>
- TrinkwV (2023): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV). Trinkwasserverordnung vom 20. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 159).
- UBA (Umweltbundesamt) (1999ff): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. Erich Schmidt Verlag, Loseblattsammlung 1999 mit Ergänzungen, Berlin.
- UBA (Umweltbundesamt) (in Veröffentlichung): Screeninguntersuchungen zur Implementierung der DIN 19738 und Bewertung der Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen im Vollzug der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. FKZ 3718 74 299 0.
- VERORDNUNG (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), OJ L 353, 31.12.2008, p. 1-1355.

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)

Bei den per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) handelt es sich um eine Stoffgruppe mit über 4.700 bekannten Einzelsubstanzen, die aufgrund ihrer stabilen fluorierten Kohlenstoffketten schwer abbaubar sind (hohe thermische und chemische Stabilität), somit eine sehr hohe Persistenz aufweisen und in Spuren mittlerweile ubiquitär (Hinweis auf atmosphärischen Transport) nachweisbar sind (LAWA/LABO 2021, BMUV 2022). Sie unterscheiden sich in der Länge ihrer Alkylkette (Unterscheidung zwischen kurzkettigen und langkettigen PFAS), welche vollständig („per-“) oder teilweise („poly-“) fluoriert ist, sowie in ihrer funktionellen Gruppe (EFSA 2020). Beispielhafte Vertreter dieser Stoffgruppe sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Substanz	Akronym	CAS-Nr.	Kettenlänge*
Perfluorcarbonsäuren (PFCAs)			
Perfluorbutansäure	PFBA	375-22-4	kurzkettig
Perfluorpentansäure	PFPeA	2706-90-3	
Perfluorhexansäure	PFHxA	307-24-4	
Perfluorheptansäure	PFHpA	375-85-9	
Perfluoroctansäure	PFOA	335-67-1	langkettig
Perfluorononansäure	PFNA	375-95-1	
Perfluordecansäure	PFDA	335-76-2	
Perfluorundecansäure	PFUnDA	2058-94-8	
Perfluordodecansäure	PFDoDA	307-55-1	
Perfluortridecansäure	PFTTrDA	72629-94-8	
Perfluorsulfonsäuren (PFSA)			
Perfluorbutansulfonsäure	PFBS	375-73-5	kurzkettig
Perfluorpentansulfonsäure	PFPeS	2706-91-4	
Perfluorhexansulfonsäure	PFHxS	355-46-4	langkettig
Perfluorheptansulfonsäure	PFHpS	357-92-8	
Perfluoroctansulfonsäure	PFOS	1763-23-1	
Perfluorononansulfonsäure	PFNS	68259-12-1	
Perfluordodecansulfonsäure	PFDoDS	79780-39-5	
Perfluortridecansulfonsäure	PFTTrDS	791563-89-8	
* nach OECD			

PFAS sind anthropogenen Ursprungs und finden vielfältige Anwendungen. Sie gelangen daher auch auf unterschiedlichen Eintragspfaden in die Umwelt (z. B. bei ihrer Herstellung, Verarbeitung, Verwendung, Entsorgung). Zu unterscheiden sind punktuelle Belastungen (z. B. aufgrund der Verwendung von PFAS-haltigen Feuerlöschschaum, durch Galvanikbetriebe etc.) und diffuse Belastungen (z. B. infolge der Verwendung als Beschichtung von Konsumgütern, in Lebensmittelverpackungen etc.) (LAWA/LABO 2021, BMUV 2022). Zu diffusen Kontaminationen kommt es beispielsweise infolge der Aufbringung PFAS-belasteter

Materialien (wie Kompost-Papierschlamm-Gemischen, Klärschlamm, Bodenmaterial etc.) auf Flächen (LAWA/LABO 2021, BMUV 2022).

PFAS (insbesondere kurzkettige PFAS) können von Pflanzen aufgenommen werden (EFSA 2020).

PFAS haben ein bioakkumulierendes Potenzial und reichern sich in der Nahrungskette an. Für PFOA werden im Menschen Eliminierungshalbwertszeiten von 2 bis 10 Jahren und für PFOS von 3 bis 27 Jahren angegeben (ATSDR 2021). Kurzkettige PFAS weisen deutlich kürzere Halbwertszeiten auf (einige Tage (z. B. PFBA) bis zu einem Monat (PFBS)) (EFSA 2020; ATSDR 2021). Während PFOA und PFOS, die bereits seit den 1950er Jahren Anwendung finden, die am besten untersuchten PFAS sind, gibt es zu den anderen Vertretern der Stoffgruppe nur wenige toxikologische Daten (LAWA/LABO 2021, ATSDR 2021).

Die meisten PFAS scheinen gut im Gastrointestinaltrakt resorbierbar zu sein. Sie werden nach Resorption im Körper verteilt, wobei hohe Mengen in Leber, Nieren und Blut (gebunden am Albumin) zu finden sind (EFSA 2020). Laut EFSA machen PFOS, PFOA, PFHxS, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFHpS bei Erwachsenen 96,6 % und bei Kindern 93,4 % der im Serum detektierten PFAS aus (EFSA 2020), wobei PFOS bei Erwachsenen und PFOA und PFOS bei Kindern den höchsten Anteil haben. Die Ausscheidung der PFAS erfolgt über den Urin, Fäzes und die Muttermilch (EFSA 2020).

In Versuchstieren führten PFCAs nach wiederholter Exposition u. a. zu einem erhöhten relativen Lebergewicht, in höheren Dosen zur Beeinflussung des Lipidstoffwechsels und zu hepatotoxischen Effekten (EFSA 2020). Auch für PFBS, PFHxS und PFOS stellte sich die Zunahme des Lebergewichtes als ein empfindlicher Endpunkt heraus (EFSA 2020).

Epidemiologische Studien deuten u. a. auf Effekte auf das Immunsystem, die Leber und auf kardiovaskuläre Effekte hin (ATSDR 2021). Von der IARC ist PFOA als krebserregend für den Menschen (Gruppe 1) und PFOS als möglicherweise krebserregend für den Menschen (Gruppe 2B) eingestuft (ZAHM et al. 2023).

Von der EFSA (2020) wurde für die Summe aus PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS eine zulässige wöchentliche Aufnahmemenge (TWI) von 4,4 ng/kg Körpergewicht abgeleitet. Als empfindlichster Endpunkt wurde hierbei die Immuntoxizität (verminderte Impfreaktion bei Kindern) betrachtet.

Im Frühjahr 2023 veröffentlichte die US-amerikanische Umweltbehörde (U.S. EPA) vorläufige gesundheitliche Bewertungen für einige toxikologisch gut untersuchte PFAS zur Kommentierung. Die U.S. EPA hat in diesem Zuge u. a. sogenannte RfD-Werte (chronic reference dose) für die nicht-krebserzeugenden Wirkungen der beiden Einzelstoffe PFOA und PFOS abgeleitet, d. h. Abschätzungen der lebenslang tolerierbaren täglichen Aufnahmemengen über den oralen Aufnahmepfad. Der vorgeschlagene RfD-Wert für PFOA beträgt 0,03 ng/kg Körpergewicht und Tag und wurde auf der Grundlage epidemiologischer Studien zur Immuntoxizität (verminderte Impfreaktion bei Kindern), zu Entwicklungsstörungen (reduziertes Geburtsgewicht) sowie zu erhöhtem Cholesterinspiegel abgeleitet (U.S. EPA 2023a). Der vorgeschlagene RfD-Wert für PFOS beträgt 0,1 ng/kg Körpergewicht und Tag und wurde ebenfalls auf der Grundlage epidemiologischer Studien (Entwicklungsstörungen/ reduziertes Geburtsgewicht sowie erhöhter Cholesterinspiegel) abgeleitet (U.S. EPA 2023b). Zusätzlich hat die U.S. EPA Abschätzungen zu den Risiken aufgrund der krebserzeugenden Wirkungen der beiden Einzelstoffe PFOA und PFOS erarbeitet; für PFOA waren dabei die erhöhten Inzidenzen an Nierenkrebs in einer epidemiologischen Studie aus den USA maßgeblich, für PFOS das Auftreten von Leberkrebs im Tierversuch (Ratte).

Eine Empfehlung zur Überwachung von Perfluoralkylsubstanzen in Lebensmitteln wurde im Jahr 2022 von der Europäischen Kommission gegeben (EMPFEHLUNG (EU) 2022/1431).

In der EU-VO 2023/915 sind für PFOS, PFOA, PFNA und PFHxS als Einzelsubstanz und für deren Summe in Lebensmitteln Höchstgehalte festgelegt. Beispielsweise gilt für Fleisch von Rindern, Schweinen und Geflügel für PFOS ein Wert von 0,3 µg/kg, für PFOA von 0,8 µg/kg, für PFNA von 0,2 µg/kg, für PFHxS von 0,2 µg/kg und für die Summe aus PFOS, PFOA, PFNA und PFHxS ein Höchstgehalt von 1,3 µg/kg.

Nach der TrinkwV (2023) gilt ab 12.01.2026 für die Summe PFAS-20 (PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTrDA, PFBS, PFPeS, PFHxS, PFHpS, PFOS, PFNS, PFDS, PFUnDS, PFDoDS und PFTrDS) ein Grenzwert von 0,00010 mg/l und ab dem 12.01.2028 für die Summe PFAS-4 (PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS) ein Grenzwert von 0,000020 mg/l.

Weitere Informationen zu PFAS finden sich z. B. in dem LAWA/LABO Fachbericht der PFAS-Koordinierungsgruppe (LAWA/LABO 2021), im „Leitfaden zur PFAS-Bewertung - Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerunreinigungen sowie für die Entsorgung PFAS-haltigen Bodenmaterials“ der Bund/Länder Arbeitsgruppe PFAS (PFC) (BMUV 2022), in der Veröffentlichung des Umweltbundesamtes zu PFAS (UBA 2020), in der Veröffentlichung der EFSA (2020) und der ATSDR (2021) oder unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/chemikalien-reach/stoffe-ihre-eigenschaften/stoffgruppen/pfc-portal-start>.

Quellen / Literatur:

- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) (2021): Toxicological Profile for Perfluoroalkyls. U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta.
- BMUV (2022): Leitfaden zur PFAS-Bewertung - Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerunreinigungen sowie für die Entsorgung PFAS-haltigen Bodenmaterials. Erarbeitet durch die Bund/Länder Arbeitsgruppe PFAS (PFC).
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM) (2020): Schrenk D, Bignami M, Bodin L, Chipman JK, del Mazo J, Grasl-Kraupp B, Hogstrand C, Hoogenboom LR, Leblanc J-C, Nebbia CS, Nielsen E, Ntzani E, Petersen A, Sand S, Vleminckx C, Wallace H, Barregard L, Ceccatelli S, Cravedi J-P, Halldorsson TI, Haug LS, Johansson N, Knutsen HK, Rose M, Roudot A-C, Van Loveren H, Vollmer G, Mackay K, Riolo F and Schwerdtle T. Scientific Opinion on the risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. EFSA Journal 2020;18(9):6223, 391 pp. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223>.
- Empfehlung (EU) 2022/1431 der Kommission vom 24. August 2022 zur Überwachung von Perfluoroalkylsubstanzen in Lebensmitteln. C/2022/5001. OJ L 221, 26.8.2022, p. 105-109.
- LAWA/LABO (Bund/Länderarbeitsgemeinschaften Wasser (LAWA) und Bodenschutz (LABO)) (2021): Fragestellungen zur konsistenten Ableitung von Bewertungskriterien für die Medien Grund- und Oberflächenwasser sowie Boden vor dem Hintergrund neuer EFSA-Empfehlungen. Fachbericht der PFAS-Koordinierungsgruppe.
- TrinkwV (2023): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV). Trinkwasserverordnung vom 20. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 159).
- UBA (Umweltbundesamt) (2020): PFAS. Gekommen, um zu bleiben. Das Magazin „Schwerpunkt“ des Umweltbundesamtes 1/2019.
- U.S. EPA (2023a): PUBLIC COMMENT DRAFT. Toxicity Assessment and Proposed Maximum Contaminant Level Goal for Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in Drinking Water. EPA Document No. EPA 822P23005.
- U.S. EPA (2023b): PUBLIC COMMENT DRAFT. Toxicity Assessment and Proposed Maximum Contaminant Level Goal for Perfluorooctane Sulfonic Acid (PFOS) in Drinking Water. EPA Document No. EPA 822P23007.
- VERORDNUNG (EU) 2023/915 DER KOMMISSION vom 25. April 2023 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 (Text von Bedeutung für den EWR), Amtsblatt der Europäischen Union, L 119, 5.5.2023, p. 103–157. Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0915>
- ZAHM, S.; BONDE, J.P.; CHIU W.A.; HOPPIN, J.; KANNO, J.; ABDALLAH, M.; BLYSTONE, C.R.; CALKINS, M.M.; DONG, G.H. (2023): Carcinogenicity of perfluorooctanoic acid and perfluorooctanesulfonic acid. The Lancet Oncology, 2023, ISSN 1470-2045, [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(23\)00622-8](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(23)00622-8)

Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW)

Als Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) werden die im Wesentlichen nur aus Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen aufgebauten organischen Verbindungen in Rohöl sowie in den durch Aufarbeitung dieses Rohstoffs (z. B. Raffination) erhaltene Produkte (z. B. Benzin, Diesel, Schmieröl) zusammengefasst. Im Rohöl sind hauptsächlich aliphatische (geradkettige, verzweigte, zyklische) und aromatische (ein- und mehrringige) Kohlenwasserstoffe enthalten, die je nach Herkunft unterschiedlich verteilt sind. Die Konzentration an aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen in den Erdölprodukten hängt somit von der Zusammensetzung des Rohöls sowie von Aufarbeitungs- und Weiterverarbeitungsschritten (z. B. Blending, Additive) ab. Einzelne Stoffe oder Stoffgruppen der MKW sind als toxikologisch relevant zu betrachten (z. B. Benzol, PAK). Die schadstoffspezifischen Expositionspfade hängen insbesondere von den im Gemisch vorhandenen Molekülgrößen bzw. Kettenlängen und den damit verbundenen physikalisch-chemischen Eigenschaften (Flüchtigkeit, Löslichkeit etc.) ab.

In Verbindung mit den an kontaminierten Standorten angetroffenen Verunreinigungen können die MKW wie folgt klassifiziert werden:

Benzin: enthält hohe Konzentrationen an BTEX und anderen Monoaromaten sowie verzweigten Alkanen, niedrige Konzentrationen an n-Alkanen, Alkenen, Cycloalkanen und Naphthalinen sowie sehr niedrige PAK-Konzentrationen. Es wird somit charakterisiert durch kurzkettige (C_5 – C_{10}), niedrig siedende (Siedebereich 36 – 175 °C), leicht flüchtige und gut wasserlösliche (ca. 100 mg/l) Kohlenwasserstoffe. Für Benzin-Kohlenwasserstoffe stehen somit der inhalative Pfad über Ausgasungen aus dem Boden und der orale Pfad durch Trinken von kontaminiertem Wasser (nach Auswaschung aus dem Boden) im Vordergrund.

Kerosin: besteht überwiegend aus n- und iso-Alkanen, Cycloalkanen und zu einem geringeren Anteil aus Alkylaromaten. Benzol und Toluol kommen in Spuren vor. Kerosin wird charakterisiert durch kurz- bis mittelkettige (C_8 – C_{17}), leicht flüchtige und relativ gut wasserlösliche (ca. 10 – 100 mg/l) Kohlenwasserstoffe im mittleren Siedebereich (150 – 280 °C). Für Kerosin-Kohlenwasserstoffe steht somit der orale Pfad durch Trinken von kontaminiertem Wasser (nach Auswaschung aus dem Boden) im Vordergrund. Des Weiteren ist eine inhalative und orale Aufnahme durch Einatmen und Verschlucken von kontaminiertem Bodenstaub nicht auszuschließen.

Diesel und leichtes Heizöl enthalten hohe Konzentrationen an n-Alkanen, geringere Konzentrationen an verzweigten Alkanen, Cycloalkanen, Monoaromaten und PAK (Naphthalin, Acenaphthen, Phenanthren, Fluoren und andere PAK mit ihren Alkylderivaten) sowie sehr niedrige BTEX-Konzentrationen. Diesel und leichtes Heizöl werden charakterisiert durch mittelkettige (C_9 – C_{24}), mittelflüchtige und relativ gut wasserlösliche (ca. 5 – 20 mg/l) Kohlenwasserstoffe im mittleren Siedebereich (160 – 390 °C). Für diese MKW-Produkte steht somit der orale Pfad durch Trinken von kontaminiertem Wasser (nach Auswaschung aus dem Boden) im Vordergrund. Des Weiteren ist eine inhalative und orale Aufnahme durch Einatmen und Verschlucken von kontaminiertem Bodenstaub nicht auszuschließen.

Schmieröl ist charakterisiert durch mittel- bis langkettige ($> C_{17}$), schwerflüchtige und schwer wasserlösliche Kohlenwasserstoffe (verzweigte und zyklische Alkane) im hohen Siedebereich (300 – 525 °C). Schmieröle können als Beimengungen PAK enthalten. Für Schmieröl steht somit der inhalative sowie orale Pfad durch Einatmen und Verschlucken von kontaminiertem Bodenstaub im Vordergrund.

Schweres Heizöl und **Bitumen** sind charakterisiert durch langkettige ($> C_{40}$), nicht flüchtige und unlösliche Kohlenwasserstoffe im hohen Siedebereich. Für schweres Heizöl und Bitumen stehen somit der inhalative sowie der orale Pfad hinsichtlich Einatmen bzw. Verschlucken von kontaminiertem Bodestaub im Vordergrund.

Aus dieser Vielzahl an Einzelsubstanzen mit ihren zum Teil sehr unterschiedlichen Expositionspfaden und toxischen Wirkungen und aus der Tatsache, dass derzeit standardmäßig zumeist nur der Summenparameter KW-Index analysiert wird, ergibt sich eine Schwierigkeit der toxikologischen Beurteilung von MKW Gemischen.

Der Parameter KW-Index erfasst die im Gaschromatogramm zwischen n-Decan C_{10} und n-Tetracontan C_{40} auftretenden Kohlenwasserstoffe, die in ihren chemisch-physikalischen Eigenschaften eine große Bandbreite aufweisen. Zusätzlich werden methodenbedingt bei der Extraktreinigung bestimmte Kohlenwasserstoffgruppen (z. B. PAK) vollständig oder teilweise abgetrennt und analytisch somit nicht erfasst. Um dennoch eine toxikologische Beurteilung zu ermöglichen, ist es daher zielführend, einerseits die Kohlenwasserstoffe in Fraktionen ähnlicher physikalisch-chemischer Eigenschaften einzuteilen und für diese Fraktionen toxikologische Vergleichswerte festzulegen. Andererseits sind in Ergänzung zu den Fraktionen ausgewählte toxikologisch relevante Leitsubstanzen aus den oben genannten Gruppen zu definieren und für diese sind toxikologische Vergleichswerte zur Verfügung zu stellen.

Im Auftrag des UBA wurde daher im Jahr 2005 die Studie „Bewertung von Mineralölkohlenwasserstoffen und Erarbeitung einer Begründung für einen Prüfwert gemäß BBodSchV für den Direktpfad Boden-Mensch“ erarbeitet (vgl. LABO 2017).

Da eine Bewertung von Hunderten von Einzelsubstanzen wegen der fehlenden toxikologischen Daten und wegen des enormen analytischen Aufwandes nicht leistbar ist, werden die MKW gemäß dieser Studie in aliphatische und aromatische (einkernige Aromaten, Naphthalin und alkylsubstituierte Naphthaline) Kohlenwasserstoffe unterteilt. Die aliphatischen und aromatischen Teilmengen werden weiter in Fraktionen unterteilt, von denen angenommen werden kann, dass die Einzelverbindungen dieser Fraktionen eine ähnliche toxische Wirkung aufweisen. Für jede Fraktion wird die Gesamtwirkung auf die Wirkung einer typischen und ausreichend untersuchten Einzelsubstanz oder Stoffgruppe bezogen.

Im Ergebnis wurden ausschließlich für flüchtige und damit inhalativ wirksame Inhaltsstoffe der MKW Prüfwerte abgeleitet. Eine Bewertung der bisher häufig bestimmten MKW-Summe ‚ C_{10} - C_{40} ‘ bezüglich des Wirkungspfades Boden-Mensch ist damit nicht möglich!

Für die Ableitung der Prüfwerte erfolgte eine Unterteilung der toxikologisch relevanten MKW in folgende **vier aliphatische (AL) und drei aromatische (AR) Fraktionen**:

MKW-Fraktion	Siedebereich (ca., in °C)	Wohngebiete (in mg/kg TM)	Industrie- und Gewerbegrundstücke (in mg/kg TM)
AL0	> 36 – 69	Keine Prüfwerte abgeleitet	
AL1	> 69 – 128	20	200
AL2	> 128 – 175	30	300
AL3	> 175 – 216	150	1500
AL4	> 216 – 287	700	7000
„C ₁₀ -C ₄₀ “	> 175 – 525	Keine Prüfwerte ableitbar	
AR0	> 69 – 151	Prüfwerte für BTEX-Verbindungen	
AR1	> 151 – 175	100	500
AR2	> 175 – 216	20	80
AR3	> 216 – 217	70	350

(Quelle: LABO 2017)

Die Einteilung der Fraktionen nach (LABO 2017) erfolgt dabei mithilfe des Konzeptes der äquivalenten Kohlenstoffzahl (EC-Zahl), die den einzelnen Verbindungen (unabhängig ihrer realen Kohlenstoffzahl) zugewiesen werden. Die EC-Zahl (ECN) bezieht sich auf die Retentionszeiten in einer unpolaren Gaschromatographie-Säule.

MKW-Fraktion	Äquiv. Kohlenstoffzahl (ECN)
AL1	> 6 bis 8
AL2	> 8 bis 10
AL3	> 10 bis 12
AL4	> 12 bis 16
AR1	> 9 bis 10
AR2	> 10 bis 12
AR3	> 12 bis 15

Quellen:

DIN EN ISO 11504 (2018-01): Bodenbeschaffenheit – Beurteilung der Wirkung von mit Mineralölkohlenwasserstoffen verunreinigten Böden (ISO 11504:2017); Deutsche Fassung EN ISO 11504:2017. Beuth Verlag, Berlin

LABO (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (2017): Bewertung von Mineralölkohlenwasserstoffen (MKW) bezüglich des Wirkungspfades Boden-Mensch bei einer potentiellen Belastung über Boden, Bodenluft und Innenraumluft; LABO-Hilfestellung für den Vollzug. Online: https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO_MKW-Bewertung_2017_12.pdf

UMWELTBUNDESAMT AT (2011): Arbeitshilfe zur Expositionsabschätzung und Risikoanalyse an kontaminierten Standorten. Endbericht zum Arbeitspaket 2 des Projektes „Altlastenmanagement 2010“ (Neuausrichtung der Beurteilung und Sanierung von kontaminierten Standorten), REPORT REP-0351, Wien. Online: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0351.pdf>

**Arbeitshilfe zur Expositionsabschätzung
in der Detailuntersuchung
für den Wirkungspfad Boden-Mensch**

**Anhang 3
Methoden und Konventionen**

Dezember 2023

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Verzeichnis der Abbildungen	III
Verzeichnis der Tabellen	III
Verzeichnis der Gleichungen	IV
1. Methoden zur humantoxikologischen Schadstoffbewertung	1
1.1. Beurteilung chronisch-toxisch wirksamer Stoffe zur Prüfwertableitung	1
1.2. Beurteilung kanzerogener Stoffe zur Prüfwertableitung	3
1.3. Beurteilung akut wirksamer Stoffe zur Prüfwertableitung	4
1.4. Beurteilung weiterer Stoffe ohne Prüfwertableitung	4
2. Methoden zur Expositionsabschätzung	6
2.1. Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt	6
2.1.1. Bodenabhängige Expositionsbedingungen	6
2.1.1.1. Orale Aufnahme von Schadstoffen aus dem Boden – Ermittlung der Resorptionsverfügbarkeit	7
2.1.1.2. Inhalative Aufnahme partikelgebundener Schadstoffe – Ermittlung der Schadstoffanreicherung in der Feinkornfraktion	8
2.1.1.3. Dermale Aufnahme von Schadstoffen (perkutan)	9
2.1.2. Nutzungsabhängige Expositionsbedingungen	10
2.1.2.1. Standards zur Bodenaufnahmerate	12
2.1.2.2. Standards zur Expositionshäufigkeit und -dauer	14
2.2. Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch	15
2.2.1. Bodenabhängige Expositionsbedingungen	15
2.2.1.1. Bodenluftuntersuchungen	15
2.2.2. Nutzungsabhängige Expositionsbedingungen	16
2.2.2.1. Gebäudeart und -zustand	17
2.2.2.2. Gebäudenutzung	18
2.2.3. Innenraumluftmessungen	22
2.3. Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch	23
2.3.1. Anreicherungsverhalten von Nutzpflanzen	23
2.3.2. Bodenabhängige Expositionsbedingungen	26
2.3.2.1. Pflanzenverfügbare Gehalte	26
2.3.2.2. Transferabschätzung Boden-Nutzpflanze	27
2.3.2.3. Abschätzung pflanzenverfügbarer Gehalte aus Gesamtgehalten im Boden	28
2.3.3. Nutzungsabhängige Expositionsbedingungen	29
2.3.3.1. Anbaubedingungen und Verzehrsmengen	29
2.3.4. Ermittlung der Schadstoffzufuhr	35
2.4. Pflanzenuntersuchungen	37
2.4.1. Pflanzenspektrum und Anbaubedingungen	37
2.4.2. Probennahme, Analytik und Ermittlung der Schadstoffzufuhr	39

Literaturverzeichnis41

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung A1: Ermittlung von Präferenzgruppen und deren Verzehrsmengen am Beispiel Cadmium-hochanreichernder Pflanzen (Quelle: LANUV 2014)33

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle A1: Expositionsannahmen zur Ableitung von Prüfwerten für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (orale Aufnahme) (nach LANUV 2014) 10

Tabelle A2: Expositionsannahmen zur Ableitung von Prüfwerten für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (inhalative Aufnahme) (nach LANUV 2014)11

Tabelle A3: Expositionsannahmen zur Ableitung von Prüfwerten für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (dermale Aufnahme) (Quelle: LANUV 2014)..... 12

Tabelle A4: Zusammenstellung von Verdünnungsannahmen für den Übergang Bodenluft zu Innenraumluft für unterschiedliche Fallszenarien nach SEEGER (1999) 17

Tabelle A5: Expositionsannahmen zur Quantifizierung der inhalativen Schadstoffaufnahme über die Raumluft (nach UBA 1999ff; AGLMB 1995) 18

Tabelle A6: Beispielhafte Expositionsannahmen zur Quantifizierung der inhalativen Schadstoffaufnahme über die Raumluft verschiedener Nutzungen (nach UBA 1999ff; AGLMB 1995).....21

Tabelle A7: Zuordnung von Gemüsearten zu spezifischen Anreicherungsklassen für den systemischen Pfad für Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Quecksilber und Zink (Quelle: LANUV 2014) sowie Thallium (Quelle: LABO 1998)24

Tabelle A8: Zuordnung von Gemüsearten zu spezifischen Anreicherungsklassen für den systemischen Pfad für Benzo(a)pyren und PCB (Quelle: LANUV 2014)25

Tabelle A9: Zuordnung von Gemüsearten zu spezifischen Anreicherungsklassen nach allen Aufnahmepfaden für Benzo(a)pyren (Quelle: LANUV 2014)26

Tabelle A10: Ernteerträge in Nutzgärten (KTBL 1991) 30

Tabelle A11: Mittlere Ernteerträge für unterschiedlich stark anreichernde Gemüsearten in kg/m² (nach LUA NRW 2001).....31

Tabelle A12: Angaben aller Befragten zum Gesamt-Gemüseverzehr aus Eigenanbau im Kleingarten (n = 805) (Quelle: LANUV 2014) 31

Tabelle A13: Mittlere Verzehrsmengen zur Beurteilung bodenbedingter Schadstoffbelastungen differenziert nach Anreicherungsklassen (Quelle: LANUV 2014)32

Tabelle A14: Ungünstige Verzehrsmengen von Präferenzgruppen zur Beurteilung bodenbedingter Schadstoffbelastungen differenziert nach Anreicherungsklassen (Quelle: LANUV 2014)34

Tabelle A15: Indikatorpflanzen für Aufwuchsuntersuchungen auf schadstoffbelasteten Böden (Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Quecksilber, Zink, Benzo(a)pyren, PCB) (Quelle: LANUV 2014)38

Verzeichnis der Gleichungen

Gleichung A1:	Ermittlung der inneren gefahrenbezogenen Körperdosis (toxische Stoffe) (nach UBA 1999ff, B010, Kapitel 2.3.2).....	2
Gleichung A2:	Ermittlung der zugeführten gefahrenbezogenen Körperdosis (toxische Stoffe) (nach UBA 1999ff, B010, Kapitel 2.3.1).....	2
Gleichung A3:	Berücksichtigung der Hintergrundexposition zur Ableitung von Prüfwerten für toxisch wirksame Stoffe (nach UBA 1999ff, B010, Kapitel 2.3.1)	3
Gleichung A4:	Ermittlung der gefahrenbezogenen Körperdosis (kanzerogene Stoffe) (nach UBA 1999ff, B010, Kapitel 2.4.1.1.2)	3
Gleichung A5:	Ermittlung der gefahrenbezogenen Körperdosis (akut toxische Stoffe) (nach UBA 1999ff, B010, Kapitel 2.4.1.5.)	4
Gleichung A6:	Allgemeine Berechnung der Schadstoffaufnahme (äußeren Exposition) (nach UBA 1999ff)	6
Gleichung A7:	Beurteilungswerte für die aktuelle Nutzung (B _{Wa}) für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch, inhalative Aufnahme (B _{Wa} ^{flüchtig-Bodenluft}) (nach UBA 1999ff)	19
Gleichung A8:	Regressionsgleichungen zur Berechnung von Schadstoffgehalten in Pflanzen nach systemischer Aufnahme (Quelle: LANUV 2014).....	27
Gleichung A9:	Regressionsgleichung zur Abschätzung pflanzenverfügbarer Gehalte im Boden (Quelle: LANUV 2014).....	28
Gleichung A10:	Allgemeine Berechnung der Anbaufläche pro Person aus Verzehrsmenge und Ernteertrag (Quelle: LANUV 2014).....	34
Gleichung A11:	Berechnung von Anbauflächen pro Person in Abhängigkeit der Verzehrsmengen verschieden anreichernder Gemüsearten (Quelle: LANUV 2014).....	34
Gleichung A12:	Berechnung der Schadstoffzufuhr über den Verzehr von Nutzpflanzen (nach LANUV 2014, verändert)	35

1. Methoden zur humantoxikologischen Schadstoffbewertung

Im Rahmen der Ableitung der Prüfwerte für die BBodSchV wurden sowohl das Modell zur humantoxikologischen Bewertung von Schadstoffen im Boden beschrieben, als auch Szenarien entwickelt, die die Exposition des Menschen gegenüber den Schadstoffen beschreiben. Die nachfolgenden Ausführungen basieren im Wesentlichen auf den Ableitungsmethoden und -maßstäben (UBA 1999ff) sowie auf Texten von LANUV (2014).

Zur Beurteilung gesundheitsschädlicher Wirkungen werden für toxische Stoffe Konzepte für Dosis-Wirkungs-Beziehungen und Wirkschwellen herangezogen, für kanzerogene Stoffe Krebsrisikoabschätzungen. Da der **Gefahrenbegriff** im Sinne des BBodSchG mit der **hinreichenden Wahrscheinlichkeit eines Schadenseintrittes** verknüpft ist, werden schließlich für Stoffe mit und ohne Wirkschwelle nach dem Konzept von KONIETZKA & DIETER (1998) unter Verwendung spezifischer Gefahrenfaktoren (F_{Gef}) für alle Stoffe gefahrenbezogene Körperdosen (GD) ermittelt.

1.1. Beurteilung chronisch-toxisch wirksamer Stoffe zur Prüfwertableitung

Für die Beurteilung von Stoffen mit **chronisch-toxischen Wirkungen** werden nach BBodSchV tolerierbare resorbierte Dosen (TRD) als Bewertungsmaßstab herangezogen. TRD-Werte kennzeichnen definitionsgemäß die tägliche innere Belastung durch einen Schadstoff, bei der nach dem gegenwärtigen Stand der Kenntnis auch bei empfindlichen Personen und lebenslanger Exposition nicht mit Gesundheitsschädigungen zu rechnen ist.

Der bodenschutzrechtliche Gefahrenbegriff orientiert sich an der „hinreichenden Wahrscheinlichkeit“ eines Schadenseintritts. Um dieser Definition gerecht werden zu können, wird ein Gefahrenfaktor, der auf Basis der Datenqualität festgelegt wird, berücksichtigt. Dabei wird sichergestellt, dass die gefahrenbezogene Beurteilungsschwelle bei unsicherer humanmedizinischer Datenlage nur geringfügig über einem epidemiologisch abgeleiteten oder abgeschätzten Niveau liegt, bei dem auch für empfindliche Personen keine Beeinträchtigungen entstehen (NOAEL_e^1), sich in jedem Fall aber deutlich unterhalb einer Dosis, bei der es bei

¹ NOAEL_e : No Observed Adverse Effect Level für empfindliche Personen

der gesunden erwachsenen Bevölkerung zu ersten erkennbaren Effekten kommen kann, befindet (LOAEL_E²). Kombinationswirkungen unterschiedlicher Schadstoffe wurden bei den Ableitungen generell nicht berücksichtigt.

Gleichung A1: Ermittlung der inneren gefahrenbezogenen Körperdosis (toxische Stoffe) (nach UBA1999ff, B010, Kapitel 2.3.2)

$$\text{Innere gefahrenbezogene Körperdosis (toxisch, in ng/kg KG*d)} = \text{TRD (in ng/kg KG*d)} * F_{\text{Gef}}$$

mit:

TRD (in ng/kg KG*d) = tolerierbare resorbierte (innere) Dosis

F_{Gef} = Gefahrenfaktor (i. d. R. 2–10)

Die mittels *Gleichung A1* ermittelte gefahrenbezogene Körperdosis bezieht sich auf die innere Exposition (Exⁱ). Um von der inneren Körperdosis auf die von außen zugeführte Dosis rückzuschließen, wird die (jeweils stoff- und aufnahmepfadspezifische) Resorptionsquote berücksichtigt. Mittels dieser wird angegeben, welcher Anteil einer zugeführten Schadstoffdosis tatsächlich im Organismus resorbiert und biologisch wirksam wird. Falls keine (experimentellen) Daten zur Resorptionsquote vorliegen, wird die Resorption – sofern die qualitative Betrachtung der Stoffeigenschaften für eine gute Bioverfügbarkeit spricht – mit 100 % angenommen.

Gleichung A2: Ermittlung der zugeführten gefahrenbezogenen Körperdosis (toxische Stoffe) (nach UBA 1999ff, B010, Kapitel 2.3.1)

Zugeführte gefahrenbezogene Körperdosis (in ng/kg KG*d)

$$= \frac{\text{Innere gefahrenbezogene Körperdosis (Ex}^i\text{) (in ng/kg KG*d)}}{\text{Resorptionsquote}} = \frac{\text{TRD (in ng/kg KG*d)} * F_{\text{Gef}}}{\text{Resorptionsquote}}$$

mit:

TRD (in ng/kg KG*d) = tolerierbare resorbierte (innere) Dosis

F_{Gef} = Gefahrenfaktor (i. d. R. 2–10)

Resorptionsquote = stoff- und aufnahmepfadspezifische Resorption; Regelannahme, sofern nicht abweichend angegeben: 100 % = 1

Die anschließende Ableitung der Prüfwerte erfolgt für **chronisch toxisch wirkende Schadstoffe** unter Berücksichtigung üblicher Hintergrundexpositionen. Üblicherweise wird davon

² LOAEL_E: Lowest Observed Adverse Effect Level für Allgemeinbevölkerung

ausgegangen, dass 80 % des TRD-Wertes durch die Hintergrundexposition ausgeschöpft werden kann (vgl. UBA 1999ff). Als Formel ausgedrückt:

Gleichung A3: Berücksichtigung der Hintergrundexposition zur Ableitung von Prüfwerten für toxisch wirksame Stoffe (nach UBA 1999ff, B010, Kapitel 2.3.1)

$$\text{Prüfwert (in mg/kg Boden)} = \frac{\text{Zugeführte Dosis (in ng/kg KG*d)} * (F_{\text{Gef}} - \text{Standardwert Hintergrund})}{\text{Bodenaufnahmerate (in mg/kg KG*d)}}$$

mit:

$$\text{Zugeführte Dosis (in ng/kg KG*d)} = \frac{\text{TRD (in ng/kg KG*d)}}{\text{Resorptionsquote}}$$

und:

TRD (in ng/kg KG*d) = tolerierbare resorbierte (innere) Dosis

F_{Gef} = Gefahrenfaktor (i. d. R. 2–10)

Resorptionsquote = stoff- und aufnahmepfadspezifische Resorption; Regelannahme, sofern nicht abweichend angegeben: 100 % = 1

Standardwert Hintergrund = Berücksichtigung der Hintergrundexposition über Nahrungsmittel und Umgebungsluft; Regelannahme: 80 % des TRD-Wertes = 0,8

1.2. Beurteilung kanzerogener Stoffe zur Prüfwertableitung

Bei **kanzerogenen Stoffen**, für die keine Wirkschwelle angegeben werden kann, wird von einer resorbierten Körperdosis ausgegangen, die einem **zusätzlichen** Krebsrisiko von 1:100.000 entspricht. Die Hintergrundexposition muss daher nicht gesondert berücksichtigt werden. Das Risiko entspricht konventionsgemäß dem Schutzniveau eines TRD-Wertes.

Zur Herstellung des Gefahrenbezuges nach BBodSchV wurde ein zusätzlicher Faktor von 5 eingeführt, mit dem sich ein gefahrenbezogenes, zusätzliches und akzeptables Risiko von 5:100.000 errechnet.

Gleichung A4: Ermittlung der gefahrenbezogenen Körperdosis (kanzerogene Stoffe) (nach UBA 1999ff, B010, Kapitel 2.4.1.1.2)

$$\text{Gefahrenbezogene Körperdosis (kanzerogen, in ng/kg KG*d)} = \text{Dosis bei Risiko } 10^{-5} \text{ (in ng/kg KG*d)} * F_{\text{Gef}}$$

mit:

Risiko 10^{-5} = festgelegte Konvention zur Risikoabschätzung

F_{Gef} = Gefahrenfaktor (5 für Kanzerogene)

1.3. Beurteilung akut wirksamer Stoffe zur Prüfwertableitung

Einige Stoffe, z. B. Arsen oder Cyanide, gelten darüber hinaus als **akut toxisch**. Bei diesen Stoffen bilden Daten aus Tierversuchen zur akuten Toxizität oder aber Informationen aus Fallbeschreibungen (Unfälle, Suizide etc.) die Grundlage für die Ableitung von Prüfwerten. Ein Gefahrenfaktor wird in diesem Fall nicht angewendet.

Gleichung A5: Ermittlung der gefahrenbezogenen Körperdosis (akut toxische Stoffe) (nach UBA 1999ff, B010, Kapitel 2.4.1.5.)

$$\text{Gefahrenbezogene Körperdosis (akut)} = \frac{\text{letale Dosis}}{\text{SF}}$$

mit:

SF = Sicherheitsfaktor (10 zur Berücksichtigung des Abstandes zwischen letaler Wirkung und ersten Vergiftungserscheinungen)

Sofern Akutwerte überschritten werden, ist zu prüfen, ob Gefahr im Verzug ist und somit sofortiger Handlungsbedarf besteht.

1.4. Beurteilung weiterer Stoffe ohne Prüfwertableitung

Liegen für einen relevanten Stoff keine Prüfwerte bzw. Prüfwertvorschläge nach BBodSchV im weitesten Sinne vor, sind nach § 15 Abs. 4 BBodSchV „für seine Bewertung die zur Ableitung der festgelegten Prüf- und Maßnahmenwerte [der BBodSchV] herangezogenen Methoden und Maßstäbe zu beachten“. Die Methoden und Maßstäbe sind im Bundesanzeiger Nummer 161a vom 28. August 1999 und in der vom UBA herausgegebenen Loseblattsammlung „Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten“ (UBA 1999ff) veröffentlicht.

Dazu sind insbesondere Angaben zur humantoxikologischen Bewertung des zu betrachtenden Stoffes sowie zur Hintergrundbelastung erforderlich, und es muss abschließend in einer Plausibilitätsprüfung die Anwendbarkeit des abgeleiteten Bewertungsmaßstabes überprüft werden.

Das Ergebnis der Berechnung sollte dann einer Plausibilitätsprüfung unterzogen werden, in der Aspekte zur möglichen akuten Toxizität eines Stoffes und ggf. vorliegende Informationen aus Human-Biomonitoring-Studien berücksichtigt werden sollten. Darüber hinaus sind Pfad-

zu-Pfad-Vergleiche bezüglich der inhalativen und oralen Belastung sowie Abgleiche mit Hintergrundgehalten in Böden und Grenzwerten in anderen Umweltmedien (Luft, Nahrung) durchzuführen.

Als Ergebnis der Plausibilitätsprüfung können schließlich **Prüfwert-Vorschläge** für den zu betrachtenden Stoff begründet werden, die für das jeweils betrachtete Expositionsszenario in mg/kg Boden angegeben werden.

Diese deutlich als vorläufig zu kennzeichnenden Werte können im Sinne von Prüfwerten die Grundlage für Expositionsbewertungen bilden, sollten jedoch möglichst in Rücksprache mit zuständigen Fachbehörden abgestimmt oder konsentiert werden.

2. Methoden zur Expositionsabschätzung

Allgemein kann die äußere Exposition (Ex^a) des Menschen gegenüber einem Schadstoff wie folgt ausgedrückt werden:

Gleichung A6: Allgemeine Berechnung der Schadstoffaufnahme (äußeren Exposition) (nach UBA 1999ff)

Schadstoffaufnahme Ex^a	
= bodenabhängige Expositionsbedingungen * nutzungsabhängige Expositionsbedingungen	
mit:	
Ex^a (in $\mu\text{g}/\text{kg KG}\cdot\text{d}$)	= äußere Exposition gegenüber einem Schadstoff
und mit:	
Bodenabhängige Expositionsbedingungen:	
Wirksamer Gehalt = Gesamtgehalt C_B * $f_{\text{Wirksamkeit}}$	
mit:	
C_B (in mg/kg)	= Gesamtgehalt des Stoffes im Boden (Fraktion < 2 mm)
$f_{\text{Wirksamkeit}}$	= Faktor für bodenabhängige Expositionsbedingungen (z. B. Resorptionsverfügbarkeit, Feinkornfraktion < 63 μm)
Nutzungsabhängige Expositionsbedingungen:	
Aufnahmerate (in $\text{g}/\text{kg KG}\cdot\text{d}$) = $\frac{A \text{ (in g/d)} * n \text{ (in g/d)}}{\text{KG (in kg)} * 365 \text{ d/a}}$ * Expositionszeitfaktor L	
mit:	
A (in g/d)	= Aufnahmemenge des Zufuhrmediums pro Tag
KG (in kg)	= Körpergewicht in kg
N (in d/a)	= Expositionshäufigkeit in Tagen pro Jahr
Expositionszeitfaktor L	= 1 für toxisch wirksame Stoffe bzw. i. d. R. 8,75 (70/8) für Kanzerogene; da die Exposition von 8 Jahren in der Kindheit auf eine Lebenszeit von 70 Jahren für Risikoabschätzungen hochgerechnet wird.

Grundlage für die Expositionsabschätzung bilden die Prüfwerte der BBodSchV.

2.1. Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt

2.1.1. Bodenabhängige Expositionsbedingungen

Zur Prüfung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen ($f_{\text{Wirksamkeit}}$), die die Wirksamkeit der Schadstoffe im Boden im Hinblick auf die menschliche Gesundheit konkretisieren, liegen je nach relevantem Aufnahmepfad unterschiedliche Verfahren vor.

2.1.1.1 Orale Aufnahme von Schadstoffen aus dem Boden – Ermittlung der Resorptionsverfügbarkeit

Mit dem in der DIN 19738 geregelten Verfahren sollen die Verhältnisse im Magen-Darm-Trakt unter Laborbedingungen mit Hilfe synthetischer Verdauungssäfte (Magen- und Darmsaft) physiologienah abgebildet werden. Dazu werden im ersten Schritt 2 g Feinboden (Fraktion < 2 mm) mit 100 ml synthetischem Magensaft sowie Vollmilchpulver als Lebensmittelzusatz versetzt und für zwei Stunden bei einer Temperatur von 37 °C und einem pH-Wert von 2 bis 4 extrahiert. Im nächsten Schritt werden 100 ml synthetischer Darmsaft zugefügt. Die Extraktion dauert bei einer Temperatur von 37 °C und einem pH-Wert von 7,5 drei Stunden. Es folgen die Abtrennung von Extrakt und festem Rückstand durch Zentrifugation sowie die Bestimmung der jeweiligen Schadstoffgehalte. Die Angabe des resorptionsverfügbaren Gehalts (RV-Gehalt) bzw. der daraus abgeleitete resorptionsverfügbare Anteil erfolgt gemäß DIN 19738 als Mittelwert aus den Ergebnissen zweier einzelner Extraktionen. Bei Abweichungen der beiden Einzelwerte vom Mittelwert von mehr als $\pm 10\%$ des Mittelwertes werden Überlegungen zur Ursachenklärung erforderlich. Hierzu sind sowohl Daten und Hinweise aus der laboranalytischen Durchführung wie auch aus Standortkenntnissen und der Probennahme aus gutachterlicher Sicht heranzuziehen. Die gutachterliche Entscheidung über das Erfordernis einer weiteren Doppelbestimmung oder weiterer Messungen sollte insbesondere auch in Abhängigkeit von deren Abstand zum jeweiligen Beurteilungswert erfolgen.

Beispiel Blei

Beurteilungswert	= 70 mg/kg
Blei-RV _{1. Messung}	= 90 mg/kg
Blei-RV _{2. Messung}	= 60 mg/kg
Blei-RV _{Mittelwert}	= 75 mg/kg
Abweichung Blei-RV vom Mittelwert (in %)	= +/-20 %
Kleinster Abstand zum Beurteilungswert	= 10 mg/kg
Differenz der beiden Messwerte	= 30 mg/kg

Fazit: → Erfordernis einer weiteren Doppelbestimmung.

Zur Qualitätssicherung der Methode ist die Gesamtbilanz vorgesehen. Die Summe aus dem gemittelten resorptionsverfügbaren Gehalt und dem gemittelten Gehalt im Rückstand (Sediment) sollte rechnerisch den Gesamtgehalt ergeben. Gemäß DIN 19738 wird dabei eine Abweichung von maximal $\pm 20\%$ für tolerabel erachtet.

Bei der Auswertung der Untersuchungsergebnisse sollte immer auch eine Plausibilitätsprüfung erfolgen. Es gilt dabei zu bedenken, dass erhöhte Abweichungen in Bezug auf die Wiederfindungsrate nicht nur auf Ungenauigkeiten in der Bestimmung der mobilisierbaren und nicht mobilisierbaren Gehalte zurückzuführen sein können, sondern auch auf Ungenauigkeiten in Bezug auf den Gesamtgehalt. Im Ergebnis sollten aus diesem Untersuchungsschritt folgende Daten vorliegen:

- Gesamtgehalt in mg/kg
- Resorptionsverfügbare Gehalte aus Doppelbestimmung (Einzelwerte und Mittelwert) in mg/kg
- Berechnete resorptionsverfügbare Anteile bezogen auf den Gesamtgehalt (Einzelwerte und Mittelwert) in %
- Gesamtgehalte im Sediment aus Doppelbestimmung (Einzelwerte und Mittelwert) in mg/kg
- Berechnete Gesamtbilanz (Summe der Mittelwerte von mobilisierbarem und nicht mobilisierbarem Gehalt bezogen auf den Gesamtgehalt in %)

2.1.1.2 Inhalative Aufnahme partikelgebundener Schadstoffe – Ermittlung der Schadstoffanreicherung in der Feinkornfraktion

Für die Bewertung des inhalativen Aufnahmepfades ist humantoxikologisch insbesondere der **Schadstoffgehalt im Staub bzw. in der lungengängigen Fraktion** des Bodens ($< 10 \mu\text{m}$) entscheidend. Eine labortechnische Fraktionierung der lungengängigen Fraktion $< 10 \mu\text{m}$ ist allerdings sehr aufwändig. Hilfsweise wird daher auf die Analytik der Feinkornfraktion $< 63 \mu\text{m}$ des Bodens zurückgegriffen.

In den Standard-Expositionsannahmen wurde unterstellt, dass **Anreicherungs-faktoren** zur Quantifizierung der Anreicherung von Schadstoffen in der Feinkornfraktion anzusetzen sind. Hintergrund hierfür sind Ergebnisse aus Untersuchungen (vgl. EIKMANN et al. 1993; DRESCH et al. 1976), aus denen hervorgeht, dass beispielsweise die Bleigehalte mit abnehmender Korngröße in Tennenbelagsproben (untersucht wurden $< 300 \mu\text{m}$ bis $< 20 \mu\text{m}$) auf das 24-fache ansteigen. In der bezüglich der Staubexposition besonders relevanten Fraktion $< 20 \mu\text{m}$ waren um den Faktor 2–3 höhere Gehalte festzustellen als in der Fraktion zwischen 20 und $60 \mu\text{m}$ und um den Faktor 5 höhere Bleigehalte als in der Gesamtprobe ($< 2 \text{mm}$) (vgl. auch DELSCHEN et al. 2006).

Zu vergleichbaren Aussagen kommen auch BURGHARDT et al. (1997) in ihrem Forschungsvorhaben zur Schadstoffausbreitung bodenbürtiger Stäube. Für die Elemente Chrom und Nickel sowie auch für Arsen, Blei, Cadmium und Zink konnten in der potenziellen Gesamtstaubfraktion (< 63 µm) Anreicherungsfaktoren gegenüber der üblicherweise untersuchten Fraktion < 2 mm ermittelt werden, die jedoch zum Teil deutlich unter 5 lagen.

Vor diesem Hintergrund wurden als Standards zur Prüfwertableitung Anreicherungsfaktoren in der Feinkornfraktion < 63 µm in Höhe von 5 für anorganische Stoffe sowie 10 für organische Schadstoffe zur Charakterisierung des inhalativen Aufnahmepfades angenommen.

Zur Überprüfung des standortspezifischen Anreicherungsverhaltens einer Substanz im Feinkorn gegenüber der Gesamtfraktion im Boden kann es daher durchaus sinnvoll sein, die tatsächliche Schadstoffbelastung in der **Kornfraktion < 63 µm** des Bodens zu bestimmen (vgl. § 22 Abs. 2 BBodSchV). Nach DIN EN ISO 17892-4 bzw. ISO 11277 lassen sich Korngrößenfraktionen bis zu einem Durchmesser von < 63 µm absieben. Bestimmt werden dabei in Analogie zum Bodenmaterial selbst (hier Fraktion < 2 mm) die Gesamtgehalte bzw. besonders relevante Spezies/Bindungsformen (z. B. Chrom (VI)).

2.1.1.3 Dermale Aufnahme von Schadstoffen (perkutan)

Eine dermale (perkutane) Schadstoffaufnahme aus dem Boden ist bei entsprechendem Bodenkontakt möglich, wird jedoch insbesondere für anorganische Stoffe als vernachlässigbar angesehen (UBA 1999ff). Für organische Stoffe ist in Abhängigkeit ihres lipophilen Charakters sowie ihrer geringen Wasserlöslichkeit eine relevante Resorption durch die Haut möglich.

Exkurs: Bewertung von PAK

Im Rahmen der Überarbeitung der Prüfwerte wurde der Frage nach der **dermalen Aufnahme** der PAK nachgegangen, für die insbesondere eine lokal wirksame Kanzerogenität bekannt ist, die zu erhöhten Tumorzinidenzen der Haut führt. Damit steht hier nicht die systemische Aufnahme durch perkutane Resorption, sondern die lokale Wirkung am Zielorgan Haut im Vordergrund.

Es bereitet allerdings Schwierigkeiten, eine valide quantitative Abschätzung des Krebsrisikos bei dermalen Exposition vorzunehmen. Fragen, wie die geeignete Dosiswahl zur Speziesübertragung und der quantitativen Übertragbarkeit der an der Mäusehaut erhobenen Daten auf den Menschen, sind noch weitgehend ungeklärt. Wie Auswertungen (vgl. SCHNEIDER et al. 2000) zeigen, ist die Mäusehaut als ein sensitives Modell für die Kanzerogenität von Benzo(a)pyren anzusehen, das jedoch vermutlich eher eine Risikoobergrenze ermitteln lässt. Gleichzeitig wurden allerdings auch sehr starke individuelle Unterschiede in den wenigen Untersuchungen zur Empfindlichkeit des Menschen festgestellt (bis 25-fache Unterschiede in der metabolischen Kapazität), die Aussagen zur relativen Sensitivität des Menschen im Vergleich zum Mausmodell bezüglich der kanzerogenen Wirkung der PAK nicht ermöglichen.

Lediglich zur orientierenden Risikoabschätzung wurde im Mausmodell schließlich für die dermale Exposition gegenüber in Aceton gelöstem Benzo(a)pyren – unter dem Vorbehalt der oben genannten Einschränkungen – ein Risiko von 2,5 pro $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ und Tag ermittelt (Dosis bei Risiko $10^{-5} = 4 \text{ pg BaP}/\text{cm}^2$ und Tag). Für PAK-Gemische wurde ein Risiko von 35 pro $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ermittelt (Dosis bei Risiko $10^{-5} = 0,35 \text{ pg PAK}/\text{cm}^2$ und Tag). Den erhaltenen Risikoabschätzungen kommt dabei allerdings die Funktion einer Obergrenze eines zu erwartenden Risikos zu (SCHNEIDER et al. 2000).

Grundsätzlich sei darauf hingewiesen, dass die Versuche z. T. mit Benzo(a)pyren in Aceton gelöst durchgeführt wurden, so dass für die Übertragbarkeit der Daten auch die Frage nach der Verfügbarkeit der PAK aus Bodenpartikeln zu klären ist. Von FOBIG (1999) wurden hierzu Überlegungen angestellt, die auf Ergebnisse aus verschiedenen vergleichenden in-vivo-Applikationsversuchen mit PAK in Aceton oder Boden an Ratten- und Affenhaut zurückgehen.

Abgeleitet wurde daraus, dass Benzo(a)pyren aus Böden im Vergleich zu Benzo(a)pyren aus Aceton nur bis zu 25 % systemisch verfügbar ist. Mit Untersuchungen zur DNA-Addukt-Bildung in der Haut konnte weiter nachgewiesen werden, dass die systemische Verfügbarkeit von Benzo(a)pyren mit der Verfügbarkeit in der Haut gut korreliert.

Damit wurde ein Faktor von 0,25 zur Berücksichtigung der dermalen Verfügbarkeit von Benzo(a)pyren aus dem Boden abgeleitet. Die Expositionszeit wurde auf fünf Stunden abgeschätzt, basierend auf der Annahme, dass die Aufenthaltsdauer auf Kinderspielflächen zwei Stunden beträgt, und die Reinigung (Entfernung dermalen Exposition) erst innerhalb der nächsten drei Stunden erfolgt.

2.1.2. Nutzungsabhängige Expositionsbedingungen

Zur Entwicklung der Nutzungsszenarien wurden Standards zur Quantifizierung der (**nutzungsabhängigen**) **Expositionsbedingungen** herangezogen, die auf den Empfehlungen der AGLMB (1995) beruhen und für die verschiedenen Aufnahmepfade nachfolgend tabellarisch zusammengefasst sind (vgl. UBA 1999ff):

Tabelle A1: Expositionsannahmen zur Ableitung von Prüfwerten für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (orale Aufnahme) (nach LANUV 2014)

Parameter	Faktor/Annahme	Einheit
Alter der Nutzer (Jahre)	1–8	a
Körpergewicht (KG) der Nutzer	10	kg
Expositionshäufigkeit (Tage/Jahr):		
Kinderspielflächen	240	d/a
Wohngebiete	120	d/a
Park- und Freizeitanlagen	48	d/a
Bodenaufnahme, oral:	0,5	g/Spieltag
alternativ:		
Kinderspielflächen	120	g/a
Wohngebiete	60	g/a
Park- und Freizeitanlagen	24	g/a
Expositionszeitfaktor L für kanzerogene Substanzen (70a/8a)	8,75	dimensionslos
Bodenaufnahme, akut, einmalig	10	g

Die Quantifizierung des oralen Aufnahmepfades für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt zur Ableitung der Prüfwerte erfolgt gemäß den vorgegebenen Ableitungsmethoden (vgl. UBA 1999ff; Formeln 1 und 2).

Tabelle A2: Expositionsannahmen zur Ableitung von Prüfwerten für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (inhalative Aufnahme) (nach LANUV 2014)

Parameter	Faktor/Annahme	Einheit
Kinderspielflächen		
Alter der Nutzer	1–8	a
Körpergewicht (KG) der Nutzer	10	kg
Nutzungsfrequenz	240	d/a
Atemvolumen (mäßige Aktivität)	0,625	m ³ /h
Spielzeit mit relevanter Staubaufwirbelung	2	h/d
Staubkonzentration in der Luft	1	mg/m ³
Gewichtungsfaktor G für anteilige Aufenthaltszeit (24h/2h * 365d/240d)	18,25	dimensionslos
Expositionszeitfaktor L für kanzerogene Substanzen (70a/8a)	8,75	dimensionslos
Rate der inhalativen Bodenaufnahme	0,082	mg/kg KG*d
Sport- und Bolzplätze		
Alter der Nutzer*	7–8 (F-Jugend)	a
Körpergewicht (KG) der Nutzer	20	kg
Nutzungsfrequenz	104	d/a
Atemvolumen (mäßige Aktivität)	1,8	m ³ /h
Spielzeit mit relevanter Staubaufwirbelung	1,5	h/d
Staubkonzentration in der Luft	10	mg/m ³
Anteil Tage mit Staubbildung	0,3077	dimensionslos
Gewichtungsfaktor G für anteilige Aufenthaltszeit mit Staubbildung (24h/1,5h * 365d/104d * 1/0,3077)	182	dimensionslos
Expositionszeitfaktor L für kanzerogene Substanzen (70a/25a)	2,8	dimensionslos
Rate der inhalativen Bodenaufnahme	0,119	mg/kg KG*d
Industrie- und Gewerbestandteile		
Arbeitsdauer mit Exposition	600	h/a
Durchschnittliche Staubkonzentration in der Luft	0,382	mg/m ³
Arbeitszeit	20/40	a
Gewichtungsfaktor Z für anteilige Aufenthaltszeit (24h/8h * 365d/75d)	14,6	dimensionslos
Expositionszeitfaktor L für kanzerogene Substanzen (70a/20a bzw. 70a/40a)	51,6 / 25,8	dimensionslos

Parameter	Faktor/Annahme	Einheit
Allgemeine Annahmen		
Anreicherungsfaktor im Feinkorn		
für anorganische Stoffe	5	dimensionslos
für organische Stoffe	10	dimensionslos
* Für Nickel kommen dagegen auf Grund der lokalen Respirationstoxizität die Expositionsannahmen für die C-Jugend (12 bis 14 Jahre) zum Tragen (vgl. hierzu DELSCHEN et al. 2006).		

Die Quantifizierung des **inhalativen** Aufnahmepfades für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt zur Ableitung der Prüfwerte erfolgt gemäß den vorgegebenen Ableitungsmethoden (vgl. UBA 1999ff; Formeln 3 bis 9).

Tabelle A3: Expositionsannahmen zur Ableitung von Prüfwerten für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (dermale Aufnahme) (Quelle: LANUV 2014)

Parameter	Faktor/Annahme	Einheit
Spielflächen		
Alter der Nutzer	2–3	a
Körpergewicht (KG) der Nutzer	10	kg
Expositionshäufigkeit	240	d/a
Expositionszeit (Kontakt mit der Haut)	5	h/d
Bedeckte Körperoberfläche	2.100	cm ²
Bedeckung der Haut mit Boden	1,7	mg/cm ²
Expositionszeitfaktor L für kanzerogene Substanzen (= 70a/8a)	8,75	dimensionslos
Substanzspezifische Annahmen		
Resorption (z. B. PCP)	5	%

Die Quantifizierung des **dermalen** Aufnahmepfades für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt zur Ableitung der Prüfwerte erfolgt gemäß den vorgegebenen Ableitungsmethoden (vgl. UBA 1999ff; Formel 14).

Zur Prüfung nutzungsabhängiger Expositionsbedingungen werden in der Praxis üblicherweise Erhebungen zur Bestimmung der Bodenaufnahmerate durchgeführt sowie zur Aufenthaltshäufigkeit und -dauer der Nutzer auf der Fläche.

2.1.2.1 Standards zur Bodenaufnahmerate

Mit Hilfe der Standardannahmen lässt sich die über das Jahr gemittelte durchschnittliche Bodenaufnahmerate für die sensibelste Nutzergruppe ‚Kinder‘ auf ‚**Kinderspielflächen**‘ von

33 mg/kg Körpergewicht und Tag (bzw. 120 g pro Jahr) berechnen (vgl. hierzu UBA 1999ff). Für ‚**Wohngebiete**‘ wird ein Faktor 2 angesetzt, so dass von einer Bodenaufnahmerate von im Jahresmittel 16,5 mg/kg Körpergewicht und Tag (bzw. 60 g pro Jahr) ausgegangen wird.

Nach den Standardannahmen der Prüfwertableitung wird also für ‚Wohngebiete‘ von einer weniger intensiven Nutzung der Flächen durch spielende Kinder ausgegangen. Es wird daher angenommen, dass auf diesen Flächen Kinder an 240 Tagen im Jahr 0,25 g Boden bzw. an 120 Tagen im Jahr 0,5 g Boden beim Spielen aufnehmen.

Für ‚**Park- und Freizeitanlagen**‘ werden dementsprechend Annahmen von 0,1 g Bodenaufnahme an 240 Tagen bzw. 0,2 g an 120 Tagen bzw. 0,5 g Bodenaufnahme an 48 Tagen im Jahr unterstellt (Faktor 5 gegenüber ‚Kinderspielflächen‘; vgl. UBA 1999ff).

In den Standards zur Expositionsabschätzung (AGLMB 1995) wird empfohlen, als wahrscheinliche Bodenaufnahme von Kleinkindern im Alter von 1 bis 6 Jahren 0,02 bis 0,1 g pro Tag anzunehmen, als ungünstiger Fall gelten für Kinder im Alter von 1 bis 6 Jahren 0,1 bis 0,5 g pro Tag. Dabei wird darauf hingewiesen, dass dabei der Grad des Grasbewuchses oder die Bodenversiegelung, die Jahreszeit oder die Art des Bodens, die die aufgenommene Menge des Schadstoffes aus dem Boden beeinflussen, nicht berücksichtigt sind.

Neuere Untersuchungen von BOTHE (2004) zeigen, dass Kinder bis zu 2 Jahren beim Spielen maximal 0,149 g Boden pro Tag (im Mittel 0,12 g/d) aufnehmen. Allerdings wurden dort nur 10 Kinder in den Altersgruppen bis 2 Jahre untersucht, so dass nicht unbedingt die gesamte Spannbreite des möglichen Verhaltens von Kindern erfasst wurde.

Eine Anpassung der anzunehmenden Bodenaufnahmerate ist im Einzelfall gut zu begründen. Hierzu können Nutzungskartierungen und -auswertungen (vgl. LANUV 2014) oder beispielsweise vertiefende Auswertungen zu gebietsbezogenen Witterungsbedingungen etc. herangezogen werden.

Zur Betrachtung **einmaliger (hoher) Expositionen** gegenüber Schadstoffen im Boden mit **akuter Toxizität** sieht die Vorgehensweise zur Ableitung von Prüfwerten nach BBodSchV explizit ein Szenario für extreme Expositionsbedingungen vor. Dieses Szenario berücksichtigt, dass ein Kind (10 kg Körpergewicht) einmalig 10 g Boden verschluckt. Mit Hilfe eines Sicherheitsfaktors von 10 wird dann der Abstand zwischen letaler Wirkung und ersten Vergiftungserscheinungen berücksichtigt.

2.1.2.2 Standards zur Expositionshäufigkeit und -dauer

Die Expositionshäufigkeit hängt insbesondere vom Flächentyp ab. In einem intensiv genutzten Haus- oder Kleingarten ist erwartungsgemäß von einer stärkeren Nutzungsintensität auszugehen als in einem kleinen Vorgarten. Dieser Aspekt lässt sich näherungsweise durch die Nutzungsdauer (Stunden pro Tag bzw. Tage pro Jahr) beschreiben. Die Bewertung von ‚**Kinderspielflächen**‘ basiert auf einer Expositionshäufigkeit von 240 Tagen mit 2 Stunden täglicher Aufenthaltszeit.

Für ‚**Hausgärten**‘, in denen Kinder ebenfalls regelmäßig spielen können, wird die Anwendung dieses nach BBodSchV vorgegebenen Standards zur Abschätzung des Wirkungspfad des Boden-Mensch/Direktkontakt empfohlen.

‚**Kleingärten**‘ liegen im Gegensatz zu ‚Hausgärten‘ durchschnittlich 3 km vom Wohnhaus entfernt. Daher ist es möglich, dass die Aufenthaltszeiten in ‚Kleingärten‘ zumindest für Kleinkinder, die beaufsichtigt werden müssen, im Vergleich zu ‚Hausgärten‘ geringer ausfallen. Nach Auswertungen einer Studie zu Anbau- und Nutzungsgewohnheiten in Kleingärten in Nordrhein-Westfalen (vgl. LUA NRW 2001) halten sich in Kleingärten Kinder im Alter von 0 bis 8 Jahren (n = 55)³ im Mittel rund 125 Tage pro Jahr auf, Erwachsene im Alter von 21 bis 75 Jahren (n = 791) dagegen 187 Tage pro Jahr. Die entsprechenden 95. Perzentile liegen bei 213 bzw. 364 Tagen pro Jahr. Die Anwendung des nach BBodSchV vorgegebenen Standards von 240 Tagen pro Jahr erscheint vor diesem Hintergrund daher eher konservativ, ist jedoch in bestimmten Fällen je nach Lage der Kleingärten auch nicht auszuschließen. Zur grundsätzlichen Abschätzung des Wirkungspfad des Boden-Mensch/Direktkontakt in ‚Kleingärten‘ können daher ggf. auch weitergehende Überlegungen zur standortspezifischen Expositionshäufigkeit (Befragungen etc.) integriert werden.

Für die Expositionshäufigkeit und -dauer auf ‚**Sport- und Bolzplätzen**‘ wird für die Aufenthaltsdauer je nach Altersgruppe von zwei- bis dreimal wöchentlichen Trainings- bzw. Spielzeiten von je 90 Minuten ausgegangen. Für die Lebenszeitbetrachtung wird unterstellt, dass über einen Zeitraum von 25 Jahren entsprechende Aktivitäten auf Bolzplätzen stattfinden. Im Einzelfall ist daher zu prüfen, ob sich diese Standard-Expositionsannahmen begründet verringern lassen.

³ Eine weitere Differenzierung in verschiedene Altersgruppen war auf Grund der geringen Fallzahl nicht möglich, so dass diese Auswertungen nur begrenzt belastbare Aussagen für Kleinkinder (bis 2 Jahre) zulassen.

Da für die Staubbildung insbesondere die Witterungsverhältnisse eine Rolle spielen, wird außerdem davon ausgegangen, dass die erforderliche Trockenheit für eine entsprechende Staubbildung auf ‚Sport- und Bolzplätzen‘ in Deutschland lediglich in 16 von 52 Wochen im Jahr erreicht wird (ca. 30 %). Für die Betrachtung der ‚Kinderspielflächen‘ wird diesbezüglich kein Abschlag verwendet.

Zu prüfen ist also, ob belastbare Daten erhoben werden können oder vorliegen, die eine Reduktion der anzunehmenden Expositionszeiten, in denen tatsächlich eine relevante Staubentwicklung stattfindet, erlauben.

2.2. Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch

2.2.1. Bodenabhängige Expositionsbedingungen

Die Ausbreitung der flüchtigen Schadstoffe durch die Bodenluft erfolgt durch Diffusion und Konvektion. Dabei fördern lockere Böden aus mittel- bzw. grobkörnigem Substrat mit geringem Wassergehalt die Ausbreitung. In feinkörnigen, lehmig-tonigen Böden ist eine Migration dahingegen nur über wenige Meter möglich. Über (Kabel-)Kanäle, Schächte und Rohrleitungen können sich flüchtige Schadstoffe über relativ weite Entfernungen ausbreiten. Im Rahmen der Überprüfung der **bodenabhängigen Expositionsbedingungen** können Bodenluftuntersuchungen herangezogen werden.

2.2.1.1 Bodenluftuntersuchungen

In der Regel spielt die Bodenluft als Transport- und Ausbreitungsmedium in nicht bindigen Böden (z. B. Sanden oder Kiesen) und untergeordnet in Auflockerungszonen und geklüftetem Fels eine Rolle. In bindigen Böden wie Schluff oder Ton kann z. B. über Schrumpfungsrisse ein relevanter Gastransport erfolgen.

Bei der Wahl eines für die Erhebung von Daten geeigneten Messortes im Boden mit Bezug zu einem Gebäude ist die Möglichkeit von Anreicherungen unter Auffahrten, Terrassen und anderen versiegelten Freiflächen zu beachten. Messpunkte sind bevorzugt hier zu positionieren, soweit dies aufgrund der Versiegelung möglich ist. Sind Hauswände mit und ohne Drainagen vorhanden, sind unter dem worst-case-Aspekt die Wände ohne Drainagen zu wählen (ZEDDEL 2001).

Bei der Probennahme ist sicherzustellen, dass der die Messstelle umgebende Untergrund eine ausreichend gasdurchlässige Textur aufweist. Bodenluftkonzentrationen aus bindigen Schichten können nicht interpretiert werden, speziell, wenn das betrachtete Gebäude im Bereich inhomogener Schichtenfolgen oder Auffüllungen auch mit gut gasdurchlässigen Schichten in Verbindung steht.

Die Filterstrecke einer stationären Messstelle sollte im Normalfall erst ab 1,5 m unter Geländeoberkante (GOK) beginnen, um den Zutritt von Außenluft weitgehend auszuschließen. Der obere Meter ist mit einer Tondichtung gegenüber der Umgebungsluft abzudichten. Um einen möglichst direkten Bezug zur Bodenluft im Gebäude-Nahbereich zu erhalten, sollte die Länge der Filterstrecke auf ca. 1–2 m begrenzt werden.

Beim zweiphasigen Verfahren wird im ersten Schritt mittels einer Rammkernsondierung bzw. Kleinrammsonde Bodenfeststoff entnommen; der Bodenaufbau wird mittels Schichtenverzeichnis dokumentiert. In einem zweiten Schritt wird das entstandene Bohrloch mittels Packer nach oben hin zur Atmosphäre abgedichtet. Mittels Messsonde wird aus dem unterhalb der Packer befindlichen Hohlraum eine definierte Menge Bodenluft entnommen. Um sicherzustellen, dass keine atmosphärische Luft die Bodenluftprobe beeinflusst, sollten die Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentration in der Bodenluft kontinuierlich gemessen und im zeitlichen Verlauf dokumentiert werden.

Durch die Beprobungsstrategie sollten soweit möglich auch ungünstige Situationen abgedeckt werden wie beispielsweise Versiegelungseffekte nach anhaltenden Regenfällen, wenn auf Grund des Bodenaufbaus bei oberflächlicher Versiegelung durch wassergesättigte Schichten eine Anreicherung von Spurengasen möglich ist. Um die Auswirkung einer Versiegelung durch gefrorenen Boden abzuprüfen, können Messungen ggf. auch in den Wintermonaten vorgenommen werden, soweit Kondensationseffekte in der Probennahme- und Messapparatur durch entsprechende Isolierung ausgeschlossen werden.

2.2.2. Nutzungsabhängige Expositionsbedingungen

Beim Übergang der Bodenluft in die Innenraumluft wird davon ausgegangen, dass die Schadstoffkonzentration um 1:1.000 verdünnt wird. Dies wird für viele Fälle als ausreichend konservativ beschrieben. Dabei ist zu beachten, dass diese Verdünnung im Einzelfall bei sehr ungünstigen Bedingungen geringer ausfallen kann (z. B. $\leq 1:100$), was dann zu einer Risikounterschätzung führen würde. Sie kann aber auch – je nach Bausubstanz, Lage des Raumes

usw. – deutlich höher liegen (bis 1:5.000). Im Rahmen der Prüfung der **nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen** können nachfolgende Aspekte betrachtet werden.

2.2.2.1 Gebäudeart und -zustand

Je nach Art der betrachteten Gebäude/Gebäudeteile, der Gebäudesohle (unbefestigter Boden, Betonplatte), der Raumhöhen, der Lüftung (schlecht bis gering: Luftwechselzahl 0,1–0,5; mittel/normale Wohngebäude: ca. 1; gut/Arbeitsstätten: > 4) sowie der Annahmen zu durch Wind- und Temperatureinfluss verursachte Druckströmungen können für den Übergang von der Bodenluft in die Innenraumluft Verdünnungen von 1:25 bis 1:5.000 abgeleitet werden (vgl. *Tabelle A4*).

Tabelle A4: Zusammenstellung von Verdünnungsannahmen für den Übergang Bodenluft zu Innenraumluft für unterschiedliche Fallszenarien nach SEEGER (1999)

Gebäude	Situation	Transport	Annahme Verdünnung
Industriegebäude	durchlässiger Boden, gute Lüftung	diffusiv	1:3.000
Kellerraum	durchlässiger Boden, schlechte Lüftung	diffusiv	1:25
Wohngebäude A1	durchlässiger Boden, mittlere Lüftung	diffusiv	1:350
Wohngebäude A2	durchlässiger Boden, mittlere Lüftung, Heizperiode	diffusiv und advektiv	1:80
Wohngebäude B	dichter Boden, sehr geringe Lüftung	diffusiv	1:3.500
Wohngebäude C1	rissiger Boden, geringe Lüftung	diffusiv	1:5.000
Wohngebäude C2	rissiger Boden, geringe Lüftung, Heizperiode	diffusiv und advektiv	1:40

Bei bewohnten Kellern (Souterrain-Wohnungen) ist von einem geringeren Luftwechsel und damit entsprechend höheren Raumlufkonzentrationen auszugehen. Infolge von Temperaturdifferenzen zum umgebenden Erdreich kann aber eine Druckdifferenz durch aufsteigende Wärme zusätzlich einen advektiven Transport von Bodenluft in den Kellerraum bewirken (vgl. Beispiele Wohngebäude A2 und C2 in *Tabelle A4*). Damit ist vor allem bei Wohngebäuden zu rechnen. Auch durch eine Beton-Bodenplatte ohne Risse kann bei Temperaturdifferenz zwischen außen und innen ein Schadstofftransport erfolgen.

Die Luftzufuhr in Wohnräume setzt sich aus drei Komponenten zusammen:

- Infiltration von Außenluft und Bodenluft durch unkontrollierte Leckagen, durch Ritzen und Löcher im Gebäude, ggf. über den Keller,
- Ventilation durch offene Türen und Fenster,
- mechanische Belüftung durch Klimaanlage, Ventilatoren o. Ä.

Zu beachten ist allerdings auch, dass flüchtige Schadstoffe wie LCKW nach Eindringen in Kanäle oder Schächte je nach Quellstärke auch noch in mehrere hundert Meter entfernte Gebäude eindringen können. Dies lässt sich durch Modelle nicht erfassen.

2.2.2.2 Gebäudenutzung

Die Quantifizierung des Aufnahmepfades flüchtiger Stoffe über die Bodenluft in Gebäude erfolgt für den Wirkungspfad Boden-Mensch gemäß den vorgegebenen Ableitungsmethoden (vgl. UBA 1999ff; Formeln 10 bis 13) unter Verwendung folgender Standardannahmen:

Tabelle A5: Expositionsannahmen zur Quantifizierung der inhalativen Schadstoffaufnahme über die Raumluft (nach UBA 1999ff; AGLMB 1995)

Parameter	Faktor/Annahme	Einheit
Wohngebiete (inhalative Aufnahme von Gasen)		
Körpergewicht (KG) (Kleinkinder 1–3 Jahre)	10	kg
Nutzungsfrequenz Wohnräume (dauerhafte Nutzung)	24	h/d
Expositionsdauer (Kanzerogene) Wohnräume (dauerhafte Nutzung)	70	a
Atemrate (ungünstiger Fall) für ganztägige chronische Exposition (1–3 Jahre)	7	m ³ /d
Atemrate berechnet auf Lebenszeit (nach UBA 1999ff)	0,39	m ³ /kg KG*d
Industrie und Gewerbestandteile (inhalative Aufnahme von Gasen)		
Körpergewicht (KG) (Erwachsener)	70	kg
Nutzungsfrequenz Industrie und Gewerbe (dauerhafte Nutzung)	8 5 45	h/d d/w w/a
Expositionsdauer (Kanzerogene) Industrie und Gewerbe (Arbeitszeit)	40 (20)	a
Atemrate (ungünstiger Fall)	20	m ³ /d
Gewichtungsfaktor Z toxisch kanzerogen	4,85 8,5 (17)	dimensionslos dimensionslos

Zur Ableitung von Prüfwerten für das Szenario ‚Wohngebiete‘ bzw. Wohngebäude im Hinblick auf die Aufnahme leichtflüchtiger Schadstoffe, die aus der Bodenluft in die Raumluft gelangen, wird angenommen, dass die sensibelste Nutzergruppe der Kleinkinder im Alter von

1–3 Jahren und einem Körpergewicht von 10 kg im ungünstigen Fall ganztägig, d.h. 24 Stunden pro Tag der Raumluft ausgesetzt sind und ein Atemvolumen von 7 m³ pro Tag anzunehmen ist. Bei kanzerogenen Stoffen wird eine lebenslange Exposition von 70 Jahren und eine Atemrate von 0,39 m³ pro kg Körpergewicht und Tag unterstellt.

Für ‚**Industrie- und Gewerbegrundstücke**‘ wird davon ausgegangen, dass nur Erwachsene als Nutzergruppe in Betracht zu ziehen sind, mit einer Atemrate von 20 m³ pro Tag. Allerdings wird die Aufenthaltsdauer mit Hilfe eines Gewichtungsfaktors Z für übliche Arbeitszeiten angepasst. So wird von einer 40-Stunden-Woche in 45 Wochen pro Jahr ausgegangen. Für kanzerogene Stoffe wird zwischen einer Arbeitszeit bzw. Expositionsdauer von 20 und 40 Jahren unterschieden. Daraus ergeben sich zur Berücksichtigung der Arbeitszeit Gewichtungsfaktoren Z von 4,85 (toxische Stoffe) sowie 17 bzw. 8,5 (kanzerogene Stoffe).

Zur Prüfung nutzungsabhängiger Expositionsbedingungen werden in der Praxis üblicherweise Erhebungen zur Nutzung des Gebäudes durchgeführt. Ergeben sich dabei Hinweise, dass die Nutzung des Gebäudes deutlich von den Standardannahmen abweicht, können Abschätzungen sowohl zu Aufenthaltshäufigkeit und -dauer, als auch zur Art der Raumnutzung durchgeführt werden. Die Art der Raumnutzung kann ggf. Aufschluss für die Annahmen zum Alter der Nutzergruppe sowie auch zur Atemrate (leichte Aktivität / intensive Aktivität) geben.

Gleichung A7: Beurteilungswerte für die aktuelle Nutzung (BWa) für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch, inhalative Aufnahme (BWa_{flüchtig-Bodenluft}) (nach UBA 1999ff)

Chronisch toxisch:

$$BWa_{\text{flüchtig-Bodenluft}} = \frac{\text{TRD} * (F_{\text{Gef}} - 0,8) * \text{Körpergewicht} * TF_{\text{BR}} * \text{Gewichtungsfaktor G}}{\text{Atemvolumen} * \text{Resorption}}$$

Kanzerogen:

$$BWa_{\text{flüchtig-Bodenluft}} = \frac{\text{Dosis bei Risiko } 10^{-5} * F_{\text{Gef}} * \text{Körpergewicht} * TF_{\text{BR}} * \text{Gewichtungsfaktor G}}{\text{Atemvolumen} * \text{Resorption}}$$

mit:

TRD (in ng/kg KG*d) = tolerierbare resorbierte Dosis

F_{Gef} = Gefahrenfaktor (i. d. R. 2–10)

TF_{BR} = Faktor aus dem Verhältnis Bodenluft zu Raumluft (Standardannahme: 1.000)

Gewichtungsfaktor G = Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der aktuell stattfindenden Nutzung aus dem Verhältnis von der theoretischen zur tatsächlichen Nutzungsdauer (beispielsweise 24 h / 0,5 h = 48)

Berücksichtigung der Hintergrundexposition über Nahrungsmittel und Umgebungsluft; Regelannahme: 80 % des TRD-Wertes

Ein Gewichtungsfaktor G zur Berücksichtigung der aktuell stattfindenden weniger sensiblen Nutzung in wohnbaulich genutzten Räumen ergibt sich gemäß den Maßstäben nach UBA (1999ff) aus dem Verhältnis von der theoretischen zur tatsächlichen Nutzungsdauer (beispielsweise $24\text{h}/0,5\text{h} = 48$). Darüber hinaus ist für Kanzerogene zu berücksichtigen, dass sich das zusätzliche Krebsrisiko auf die Lebenszeit, die mit 70 Jahren angenommen wird, bezieht.

Exemplarisch wurden verschiedene Nutzungsszenarien definiert.

Dauerhaft genutzte Wohnräume:

Die täglichen Aufenthaltszeiten in Wohnbereichen werden mit 18 bis 24 Stunden pro Tag angesetzt. Da nicht auszuschließen ist, dass sich auch Kleinkinder im sensiblen Alter von 1 bis 3 Jahren sporadisch oder dauerhaft in diesen Räumen aufhalten, muss eine Lebenszeit von 0 bis 70 Jahren berücksichtigt werden.

Wohnräume untergeordneter Nutzung:

Kellerräume werden häufig nur als Lager- bzw. Heizungsräume genutzt. Sie werden eher sporadisch betreten, so dass die Annahme einer durchschnittlichen Aufenthaltsdauer von rund 0,5 Stunden pro Tag für solche Wohnräume untergeordneter Nutzung als ausreichend konservativ eingeschätzt wird. Es ist jedoch auch denkbar, dass in Kellerräumen kurzzeitige Aktivitäten mit hoher Atemrate stattfinden (z. B. Nutzung von Sportgeräten, Laufbändern, Schwimmen in Hallenbädern). Für diese Räume wird daher eine kurzzeitige Nutzung mit hoher körperlicher Aktivität und hohem Atemvolumen ($120\text{ m}^3/\text{d}$) angenommen. Als Nutzungsdauer wird eine Lebenszeit von 70 Jahren betrachtet.

Gewerblich genutzte Räume:

Bei gewerblicher Nutzung werden Aufenthaltszeiten von 8 Stunden pro Tag bzw. 40 Stunden pro Woche angenommen, bei unterschiedlich starker körperlicher Aktivität (mäßig und leicht). Für diese Räume wird eine Nutzergruppe von 20- bis 70-Jährigen über einen Aufenthaltszeitraum von insgesamt 40 Jahren betrachtet.

In Anlehnung an die Vorgaben, die im Rahmen der Ableitung von Prüfwerten für die BBodSchV vom Umweltbundesamt (vgl. UBA 1999ff) zur Beurteilung flüchtiger Stoffe getätigt wurden sowie den entsprechenden Ausführungen der AGLMB (1995) können zur Quantifizierung der Expositionsbedingungen Annahmen getroffen werden, die in *Tabelle A6* zusammengestellt sind.

Als Atemraten werden gemäß den Vorgaben der BBodSchV die ungünstigen Fälle nach AGLMB (1995) herangezogen, differenziert in unterschiedliche Aktivitätsstufen, die alle prinzipiell im Zuge der geschilderten Nutzungen angenommen werden können.

Zur Betrachtung lebenslanger Expositionen gegenüber Kanzerogenen wird vom UBA (1999ff) eine Atemrate von 0,39 m³/kg KG*d vorgeschlagen, die verschiedene Aktivitätsmuster und Körpergewichte je Lebensalter integriert. Das angenommene Körpergewicht ergibt sich gemäß den Vorgaben der BBodSchV (vgl. UBA 1999ff) aus den unteren Medianwerten nach AGLMB (1995), gemittelt über die Geschlechter.

Tabelle A6: Beispielhafte Expositionsannahmen zur Quantifizierung der inhalativen Schadstoffaufnahme über die Raumluft verschiedener Nutzungen (nach UBA 1999ff; AGLMB 1995)

Parameter	Faktor/Annahme	Einheit
Beispiel Raumnutzung (inhalative Aufnahme von Gasen)		
Alter	0–70	a
Körpergewicht (KG)		
Lebenszeit	64,3	kg
Kleinkinder 1–3 Jahre	10	kg
Erwachsene 20–70 Jahre	70	kg
Nutzungsfrequenz		
Wohnräume (dauerhafte Nutzung)	24	h/d
Wohnräume (untergeordnete Nutzung)	0,5	h/d
gewerblich genutzte Räume (dauerhafte Nutzung)	8	h/d
	5	d/w
	45	w/a
Expositionsdauer (Kanzerogene)		
Wohnräume	70	a
gewerblich genutzte Räume (Arbeitszeit)	40	a
Atemrate (ungünstiger Fall)		
für ganztägige chronische Exposition (1–3 Jahre)	7	m ³ /d
zeitlich begrenzte inhalative Exposition (20–70 Jahre):		
- Ruhe	17	m ³ /d
- leichte Aktivität	34	m ³ /d
- mäßige Aktivität	68	m ³ /d
- intensive Aktivität	120	m ³ /d
für ganztägige chronische Exposition (20–70 Jahre)	18	m ³ /d
Atemrate		
berechnet auf Lebenszeit (nach UBA 1999ff)	0,39	m ³ /kg KG*d

Kanzerogene in der Innenraumluft

Für kanzerogen wirkende Stoffe galt bis 2010 aus Sicht der IRK-UBA grundsätzlich das Minimierungsgebot. Mit der Veröffentlichung der IRK-UBA 2012 sollten dann jedoch auch für Kanzerogene der Kategorie 2 (nach CLP-VO) bei Vorliegen eines Wirkungsmechanismus, der einen Schwellenwert für den empfindlichsten toxischen Endpunkt begründet, Richtwerte abgeleitet werden. 2015 wurde das Bewertungskonzept auf alle Kanzerogene der Kategorien 1A, 1B und 2 erweitert und Modelle zur Risikoabschätzung beschrieben (AIR 2015).

Grundsätzlich beurteilt das Umweltbundesamt nur solche kanzerogenen Stoffe, für die eine Einstufung als krebs-erzeugend vorliegt und die in der Innenraumluft nachgewiesen sind. Das Vorkommen von Stoffen in der Innenraumluft soll dazu durch möglichst bundesweit repräsentativ erhobene Daten abgebildet und durch Referenzwerte (50. und 95. Perzentil) quantifiziert werden. Durch Abgleich des toxikologisch ermittelten Krebsrisikos einer Substanz in der Innenraumluft und dem (bundesweit erhobenen) Referenzwert dieses Stoffes in der Innenraumluft werden schließlich Leitwerte abgeleitet. Während die risikobezogenen Leitwerte mit einem theoretischen Krebsrisiko von 10^{-6} verbunden sind, stellt der vorläufige Leitwert einen technischen Wert dar, bestimmt durch den Referenzwert (95. Perzentil).

2.2.3. Innenraumluftmessungen

Zur Erhebung von Innenraumluftkonzentrationen sind nach IRK-UBA (2007) folgende Aspekte von Bedeutung:

Definition des Messzieles

Generell ist immer zuerst das Ziel der Messung bei der Planung zu definieren. Im vorliegenden Fall werden in der Regel folgende Ziele verfolgt:

- Überprüfung der Einhaltung eines Beurteilungswertes
- Überprüfung der Raumluftkonzentrationen im zeitlichen Verlauf (Vergleichsmessungen, Zeitreihen)

Nach IRK-UBA (2007) sind zur Prüfung, ob die Beurteilungswerte für die Innenraumluft eingehalten werden, Messungen unter üblichen Nutzungsbedingungen erforderlich. Vergleichsmessungen zeitlicher oder räumlicher Art erfordern standardisierte Messbedingungen, die reproduzierbare und vergleichbare Ergebnisse liefern.

Festlegung der Probennahmestrategie

Bei der messtechnischen Abbildung üblicher Nutzungsbedingungen geht es nach IRK-UBA (2007) um die Erfassung der tatsächlichen Exposition der Raumnutzer/innen.

In Langzeitmessungen zur Überprüfung chronischer Expositionen sollen daher die Lüftungs- und sonstigen Gewohnheiten beibehalten werden. Zur Standardisierung der Probennahme soll nach IRK-UBA (2007) in Räumen ohne definierte Lüftungsvorgabe (wohnhähnliche Nutzung) vor der Probennahme eine intensive Lüftung über mindestens fünf Minuten erfolgen,

um eine definierte Ausgangsbasis zu schaffen, an die sich eine längere Phase der Gleichgewichtseinstellung von mindestens acht Stunden (z. B. über Nacht) ohne Lüftung anschließt. Die Probenahme soll dann anschließend bei weiterhin geschlossenem Raum durchgeführt werden.

2.3. Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch

Die Quantifizierung der Schadstoffaufnahmemenge über den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch erfolgt anhand von Annahmen zum Übergang von Schadstoffen aus dem Boden in oder auf die Nutzpflanze sowie zu Anbaubedingungen und Verzehrsmengen verschiedener Gemüsearten.

2.3.1. Anreicherungsverhalten von Nutzpflanzen

Schadstoffe können prinzipiell über drei verschiedene Teilpfade vom Boden in oder auf Pflanzen übergehen: Durch systemische Aufnahme über die Wurzeln, durch die Aufnahme gasförmiger Substanzen über die Spaltöffnungen/Stomata bzw. Wachsschicht/Kutikula oder durch den sogenannten „Verschmutzungspfad“ (Anhaftungen von schadstoffbelastetem Bodenmaterial / Staub auf der Pflanzenoberfläche und zum Teil Anlagerung bzw. Aufnahme über die Kutikula). Neben der Immission werden Verschmutzungen von Nutzpflanzen insbesondere durch direkten Kontakt niedrig wachsender Pflanzenteile mit dem Boden, durch bei Regen hochspritzende Bodenpartikel oder untergeordnet durch Ablagerungen von aus dem Beet verwehten Bodenpartikeln verursacht.

Im Hinblick auf die Anreicherung von Schadstoffen in Pflanzen bestehen ausgeprägte Unterschiede zwischen Pflanzenarten und zum Teil sogar -sorten. Dies ist einerseits bedingt dadurch, dass bestimmte Nutzpflanzen (z. B. Grünkohl) auf Grund morphologischer Eigenschaften besonders empfindlich für äußerliche Schadstoffanlagerung sind und bei diesen Pflanzen der oberirdischen Bodenanhaftung bzw. der Deposition von Staub im Falle vorhandener Emittenten besondere Bedeutung zukommt. Andererseits verfügen bestimmte Pflanzenarten – wie beispielsweise Spinat für Cadmium – auf Grund physiologischer Besonderheiten über ein erhebliches Anreicherungs potenzial für bestimmte Schadstoffe. Neben diesen Art- und Sortenunterschieden kann es auch zu erheblichen Unterschieden im Hinblick auf die Verlagerung innerhalb der Pflanze in unterschiedliche Pflanzenorgane kommen. So weisen im Allgemeinen pflanzliche Organe in der Reihenfolge Wurzel > Blatt > Spross > Frucht/Samen abnehmende Schwermetallgehalte auf. Dabei sind allerdings auch Ausnahmen möglich.

Kürbisgewächse (Cucurbitaceae)

Kürbisgewächse (Cucurbitaceae) reichern Organochlorverbindungen, zum Beispiel bestimmte Pestizide aber auch Dioxine und Furane, aufgrund spezieller Austauschvorgänge zwischen Boden und Feinwurzeln in besonderem Ausmaß an. Das kann schon bei niedrigen Gehalten der Schadstoffe im Boden zu Höchstmengenüberschreitungen in den Ernteprodukten führen (vgl. FIBL 2012, HÜLSTER et al. 1994, REESE 2018, VOGT 2007).

Zur Charakterisierung des Anreicherungsverhaltens von Nutzpflanzen liegen zahlreiche Auswertungen von Daten und Literatur vor (vgl. LABO 1998, DELSCHEN & KÖNIG 1998; KNOCHHE et al. 1999, LANUV 2014, LUA BB 2010), die die Nutzpflanzen aufgrund des systemischen Aufnahmepfades den Anreicherungsklassen hoch, mittel und niedrig zuordnen. Nachfolgend finden sich schadstoffspezifische Übersichtstafeln dazu (*Tabelle A7 und A8*).

Tabelle A7: Zuordnung von Gemüsearten zu spezifischen Anreicherungsklassen für den systemischen Pfad für Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Quecksilber und Zink (Quelle: LANUV 2014) sowie Thallium (Quelle: LABO 1998)

	Arsen / Blei / Chrom / Quecksilber	Cadmium / Zink	Nickel	Thallium
hoch	-	Spinat Sellerie Mangold Endivie Pflücksalat Feldsalat Kopfsalat	-	Grünkohl
mittel	Pflücksalat Spinat Endivie Feldsalat Kopfsalat Mangold Möhren Rettich Schwarzwurzel	Chinakohl Grünkohl Möhren Porree Rote Bete Schwarzwurzel Kohlrabi Radieschen Rettich Zwiebel	Buschbohne Stangenbohne Tomate Erbse Pflücksalat Spinat Endivie Feldsalat Kopfsalat Mangold Möhren Rettich Schwarzwurzel	Brokkoli Mangold Radieschen Rettich Rote Bete Schwarzwurzel Sellerie Spinat Wirsing
niedrig	Radieschen Zwiebel Porree Rote Bete Sellerie Kartoffeln Blumenkohl Brokkoli Chinakohl Grünkohl Rotkohl Rosenkohl Spitzkohl Weißkohl Wirsing Kohlrabi	Buschbohne Erbse Gurke Blumenkohl Brokkoli Kürbis Paprika Rosenkohl Rotkohl Spitzkohl Stangenbohne Tomate Weißkohl Wirsing Zucchini Kartoffeln*	Radieschen Zwiebel Porree Rote Bete Sellerie Kartoffeln Blumenkohl Brokkoli Chinakohl Grünkohl Rotkohl Rosenkohl Spitzkohl Weißkohl Wirsing Kohlrabi	Blumenkohl Buschbohne Chinakohl Endivie Erbse Gurke Kohlrabi Kürbis Möhren Paprika Porree Rosenkohl Rotkohl Salat Spitzkohl Stangenbohne

	Arsen / Blei / Chrom / Quecksilber	Cadmium / Zink	Nickel	Thallium
	Buschbohne Erbse Gurke Stangenbohne Tomate Zucchini		Buschbohne Erbse Gurke Zucchini	Tomate Weißkohl Zucchini Zwiebel
* gilt für geschälte Kartoffeln				

Tabelle A8: Zuordnung von Gemüsearten zu spezifischen Anreicherungsklassen für den systemischen Pfad für Benzo(a)pyren und PCB (Quelle: LANUV 2014)

	Benzo(a)pyren	PCB
hoch	-	-
mittel	Salat Endivie Radieschen Rettich Spinat Mangold Zucchini Gurke Möhren Schwarzwurzel Feldsalat	Salat Endivie Spinat Zucchini Rettich Mangold Gurke Sellerie Möhren Schwarzwurzel Radieschen Rote Bete
niedrig	Zwiebeln Kartoffeln Rote Bete Sellerie Porree Kohlrabi Tomate Buschbohne Grünkohl Stangenbohne Rotkohl Weißkohl Wirsing Brokkoli Spitzkohl Erbse Blumenkohl Rosenkohl Chinakohl	Zwiebel Kartoffeln Porree Kohlrabi Tomate Buschbohne Grünkohl Stangenbohne Rotkohl Weißkohl Wirsing Brokkoli Spitzkohl Erbse Blumenkohl Rosenkohl Chinakohl

Ist für einen Schadstoff sowohl die systemische Aufnahme als auch der Verschmutzungspfad relevant, bieten sich Kombinationsübersichten an. Nachfolgend gibt *Tabelle A9* beispielhaft eine Übersicht des Anreicherungsverhaltens von Benzo(a)pyren unter Beachtung beider Aufnahmepfade.

Tabelle A9: Zuordnung von Gemüsearten zu spezifischen Anreicherungsklassen nach allen Aufnahmepfaden für Benzo(a)pyren (Quelle: LANUV 2014)

		Deposition / Verschmutzungspfad		
		hoch	mittel	niedrig
Systemischer Pfad	hoch	-	-	-
	mittel	Kopfsalat ¹ Endivie ¹ Spinat ¹ Mangold ¹ Feldsalat ¹ Pflücksalat ¹	-	Radieschen ² Rettich ² Zucchini ² Gurke ² Möhren ² Schwarzwurzel ² Kürbis ²
	niedrig	Grünkohl ¹ Erdbeeren ¹	Sellerie ² Porree ² Brokkoli ² Blumenkohl ² Wirsing ²	Zwiebeln ³ Kartoffeln ³ Rote Bete ³ Kohlrabi ³ Tomate ³ Buschbohne ³ Stangenbohne ³ Rotkohl ³ Weißkohl ³ Spitzkohl ³ Erbse ³ Rosenkohl ³ Chinakohl ³ Paprika ³

Zuordnung hinsichtlich der Kombination von Verschmutzungspfad und systemischem Pfad:

¹ höchste Anreicherungsstufe

² mittlere Anreicherungsstufe

³ niedrige Anreicherungsstufe

Kenntnisstand Anreicherungsverhalten organischer Schadstoffe

Im Gegensatz zu den Schwermetallen, über die in Bezug auf den Aufnahmepfad Boden-Pflanze vergleichsweise viel Informationen und Daten vorliegen, stellt sich der Kenntnisstand bezüglich organischer Schadstoffe lückenhafter dar. Lediglich in Einzelfällen kann dabei auf umfassendere Untersuchungen zurückgegriffen werden (z. B. PAK oder PCB). Bei diesen beiden Stoffgruppen spielt mit wenigen Ausnahmen der systemische Pfad eine eher untergeordnete Rolle. Vielmehr überwiegt der Verschmutzungspfad vor allem bei den mehrkernigen PAK (DELSCHEN et al. 1999) bzw. der Gaspfad bei niedrigchlorierten PCB (TRAPP & MATTHIES 1994a/1994b). Details hierzu finden sich auch in LFUG 2014.

Allgemein lässt sich bezüglich der Organika feststellen, dass die chemisch-physikalischen Eigenschaften der jeweiligen Substanz das Aufnahmevermögen bzw. das Verteilungsverhalten bestimmen, was vor allem über den n-Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizienten und die Henry-Konstante abgeschätzt werden kann.

2.3.2. Bodenabhängige Expositionsbedingungen

Im Rahmen der Prüfung der **bodenabhängigen Expositionsbedingungen** können nachfolgende Aspekte betrachtet werden.

2.3.2.1 Pflanzenverfügbare Gehalte

Für Schwermetalle liegen relativ gute Kenntnisse zur stoffspezifischen Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit vor. Zink und Cadmium verhalten sich danach deutlich mobiler als Nickel

oder gar Arsen, Blei, Chrom und anorganisches Quecksilber. Zudem ist die Bindungsform, in der die Metalle im Boden vorliegen, mobilitätsbeeinflussend. Sulfidisch oder oxidisch gebundene Metalle sind z. B. kaum mobil, während carbonatisch oder als Salze (z. B. Nitrat) vorliegende Metalle eher mobilisierbar sind und somit auch von der Pflanze leichter aufgenommen werden können.

Bestimmte Metalle (z. B. Chrom und Quecksilber) können im Boden in unterschiedlichen Bindungsformen/Oxidationsstufen mit jeweils völlig unterschiedlichem Mobilitätsverhalten vorliegen.

Zur Abschätzung, inwieweit bestimmte anorganische Schadstoffe aus dem Boden in Nutzpflanzen gelangen können, hat sich ein Verfahren zur Bestimmung der Pflanzenverfügbarkeit mittels Ammoniumnitratextraktion bewährt, das in der DIN ISO 19730 beschrieben und als Extraktionsverfahren zur Überprüfung des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze in Anlage 2 Tabelle 6 BBodSchV für Blei, Cadmium und Thallium vorgegeben ist. Ebenfalls angewendet wird die Ammoniumnitratextraktion für Arsen, Kupfer, Nickel und Zink im Hinblick auf Wachstumsbeeinträchtigungen, die allerdings als spezifisches Thema der Landwirtschaft nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeitshilfe sind. Die Eignung des Verfahrens wurde in der Literatur grundsätzlich auch für eine Reihe weiterer Elemente beschrieben (z. B. PRÜß 1992, LIEBE et al. 1997).

Bei dem genannten Verfahren nach DIN ISO 19730 wird die Bodenprobe (< 2 mm) für 2 Stunden bei 20 ± 2 °C mit 1 mol/l NH_4NO_3 -Lösung (Ammoniumnitrat) im Verhältnis 1:2,5 geschüttelt und anschließend filtriert.

2.3.2.2 Transferabschätzung Boden-Nutzpflanze

Für Blei und Cadmium ist aus diversen Felderhebungen und Freilanduntersuchungen sowie den Auswertungen der TRANSFER-Datenbank des Umweltbundesamtes bekannt, dass ein enger Zusammenhang zwischen den Gehalten in der Pflanze und den Gehalten im Ammoniumnitratextrakt des Bodens besteht (vgl. KNOCHÉ et al. 1999, LABO 1998, UBA 2015).

Basierend auf umfassenden Datenauswertungen von Boden- und Pflanzenproben wurden mit Hilfe von Regressionsfunktionen Transferbeziehungen ermittelt. Der Zusammenhang lässt sich allgemein wie folgt formulieren:

Gleichung A8: Regressionsgleichungen zur Berechnung von Schadstoffgehalten in Pflanzen nach systemischer Aufnahme (Quelle: LANUV 2014)

$$\log C_{Pfl} = \alpha + \gamma * \log C_{B-AN}$$

mit:

C_{Pfl} (in $\mu\text{g/g TM}$) = Stoffgehalt in der Pflanze

C_{B-AN} (in mg/kg) = Stoffgehalt im Boden, gemessen im Ammoniumnitratextrakt

α, γ : = berechnete Koeffizienten

Die Koeffizienten α und γ variieren in den einzelnen Regressionsbeziehungen in Abhängigkeit vom Schadstoff sowie von der Anreicherungsklasse (hoch-, mittel-, niedrigeranreichernd). Bisher konnten für Cadmium und für Blei entsprechende Beziehungen beziffert werden:

Beispiel Blei

Für Blei wurden folgende Zusammenhänge aufgestellt:

Mittelanreichernde Pflanzen: $\log C_{Pfl, \text{mittel}}$ (in $\mu\text{g/g TM}$) = $0,749 + 0,673 * \log C_{B-AN}$ (in mg/kg)

Niedrigeranreichernde Pflanzen: $\log C_{Pfl, \text{niedrig}}$ (in $\mu\text{g/g TM}$) = $-0,302 + 0,327 * \log C_{B-AN}$ (in mg/kg)

Beispiel Cadmium

Für Cadmium wurden folgende Zusammenhänge aufgestellt:

Hochanreichernde Pflanzen: $\log C_{Pfl, \text{hoch}}$ (in $\mu\text{g/g TM}$) = $1,791 + 0,842 * \log C_{B-AN}$ (in mg/kg)

Mittelanreichernde Pflanzen: $\log C_{Pfl, \text{mittel}}$ (in $\mu\text{g/g TM}$) = $1,128 + 0,857 * \log C_{B-AN}$ (in mg/kg)

Niedrigeranreichernde Pflanzen: $\log C_{Pfl, \text{niedrig}}$ (in $\mu\text{g/g TM}$) = $-0,350 + 0,208 * \log C_{B-AN}$ (in mg/kg)

Zur Beschreibung der Regressionsbeziehung für Blei (hochanreichernde Pflanzen) waren die vorliegenden Daten nicht ausreichend. Auch für andere Schadstoffe (z. B. Arsen, Chrom, Nickel und Quecksilber) konnten bisher keine belastbaren Transferbeziehungen aufgestellt werden.

2.3.2.3 Abschätzung pflanzenverfügbarer Gehalte aus Gesamtgehalten im Boden

Liegen keine Daten zu Blei- oder Cadmiumgehalten im Ammoniumnitratextrakt vor, sollten diese Untersuchungen im Rahmen der Detailuntersuchung nachgeholt werden. Hilfsweise können auch statistisch ermittelte Funktionen unter Berücksichtigung von Gesamtgehalten und pH-Werten herangezogen werden. Das Landesumweltamt NRW (vgl. LUA NRW 2005) hat dazu allgemeine Regressionsmodelle entwickelt.

Gleichung A9: Regressionsgleichung zur Abschätzung pflanzenverfügbarer Gehalte im Boden (Quelle: LANUV 2014)

$$\log C_{B-AN} = \alpha * \log C_B - \beta * \text{pH-Wert} + \gamma$$

mit:

C_{B-AN} (in mg/kg) = Stoffgehalt im Boden, gemessen im Ammoniumnitratextrakt

C_B (in mg/kg) = Stoffgehalt im Boden, gemessen im Königswasserextrakt

α, β, γ : = berechnete Koeffizienten

Beispiel Blei

Für Blei wurde folgender Zusammenhang ermittelt:

$$\log C_{B-AN} \text{ (in mg/kg)} = 0,765 * \log C_B \text{ (in mg/kg)} - 0,522 * \text{pH-Wert} + 0,221$$

Beispiel Cadmium

Für Cadmium wurde folgender Zusammenhang ermittelt:

$$\log C_{B-AN} \text{ (in mg/kg)} = 0,885 * \log C_B \text{ (in mg/kg)} - 0,513 * \text{pH-Wert} + 1,283$$

Sofern in einem Untersuchungsgebiet Daten über Gesamtgehalte und Gehalte im Ammoniumnitratextrakt vorliegen, besteht abweichend die Möglichkeit, einzelfallbezogene regionale oder gebietsbezogene Modelle abzuleiten. Diese können dann - unter Berücksichtigung fachlicher und statistischer Anforderungen hinsichtlich der Aussagegenauigkeit - zur Abschätzung pflanzenverfügbarer Stoffgehalte genutzt werden.

2.3.3. Nutzungsabhängige Expositionsbedingungen

Im Rahmen der Prüfung der **nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen** können nachfolgende Aspekte betrachtet werden.

2.3.3.1 Anbaubedingungen und Verzehrsmengen

Zur Abschätzung, welche Schadstoffmenge pro Person beim Verzehr von selbst angebautem Gemüse aufgenommen wird, sind neben der Kenntnis zum Schadstoffgehalt in den Nutzpflanzen (vgl. *Kapitel 2.3.1* und *2.3.2.2* sowie *Arbeitshilfe Kapitel 7.2.4* und *7.4*) insbesondere Informationen zu Anbaubedingungen und Verzehrsmengen erforderlich.

Im Regelfall bietet es sich an, die einzelnen Parameter zum Anbau- und Verzehrverhalten anhand von vorliegenden Literaturdaten abzuschätzen. Dabei kommt folgenden Parametern besondere Bedeutung zu: Nutzpflanzenspektrum, Anbaufläche, Ernteerträge, Anzahl der im Haushalt lebenden Personen, Verzehrsmengen.

In Einzelfällen kann es hilfreich sein, das Anbau- und Verzehrverhalten auch durch **Befragungen** zu ermitteln.

Zur Erfassung des Anbauverhaltens ist die Beantwortung folgender Fragen hilfreich:

- Welche Nutzpflanzenarten werden angebaut: z. B. Obst, Gemüse, Wurzelgemüse, Kräuter, Kartoffeln (vgl. Tabellen zum Anreicherungsverhalten in *Kapitel 2.3*)?
- Wie groß ist die jeweilige Anbaufläche?
- Von welchen Ernteerträgen ist auszugehen?
- Wie viele Personen sind am Verzehr beteiligt (und zu welchem Anteil)? Werden Kleinkinder mit Ernteprodukten aus dem Garten ernährt (und zu welchem Anteil)?
- Wie groß ist die Selbstversorgungsquote (alternativ zu obigen Erhebungen oder zur Plausibilitätsprüfung)?

Im Auftrag des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen (jetzt: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen) wurde im Jahr 2001 eine Verzehrsstudie in Kleingärten im Rhein-Ruhrgebiet mit dem Ziel durchgeführt, die Nutzungs- und Verzehrsgewohnheiten von Kleingärtnern zu ermitteln (vgl. LUA NRW 2001). In dieser Verzehrsstudie wurden zur Ermittlung des Pro-Kopf-Gemüseverzehrs aus dem eigenen Kleingarten Angaben zu Anbau, Ernte, Verderb und Verzehr erhoben. Die Daten können – sofern im Einzelfall keine Hinweise auf abweichende Bedingungen vorliegen – als Standardannahmen für durchschnittliche Ernteerträge sowie mittlere Verzehrsmengen wie folgt herangezogen werden.

Ernteerträge

In der Regel können die in *Tabelle A10* aufgelisteten allgemeinen Ernteerträge (vgl. KTBL 1991) sowie allgemeinen Verzehrsmengen als Obergrenze auf gärtnerisch genutzten Flächen angenommen werden.

Tabelle A10: Ernteerträge in Nutzgärten (KTBL 1991)

	Erträge (in kg/m ²)	Verzehr Erwachsener (in kg/a)	Flächenbedarf (in m ²)
Obst	1	37	37
Gemüse	3	73	24
Wurzelgemüse	3	7	2
Kräuter	1	< 1	< 1
Kartoffeln	4	55	14
Alle Angaben bezogen auf Frischmasse			

Aus der Summe [Gemüse + Wurzelgemüse + Kräuter + Kartoffeln] ergibt sich eine Fläche von 40 m² pro Person, auf welcher die für den Eigenverzehr bestimmten Nahrungspflanzen angebaut werden können.

Um die Schadstoffzufuhr über den Verzehr von Gartenerzeugnissen abschätzen zu können, ist auch das Anreicherungsverhalten der angebauten Gemüsearten von Bedeutung (vgl. *Kapitel 2.3.1*). In eine detaillierte Bewertung der Aufnahme können deshalb auch Ernteerträge und daraus zu erwartende Verzehrsmengen differenziert nach unterschiedlichen Anreicherungsklassen einbezogen werden.

Beispielhaft wurden aus den Daten der Verzehrstudie (LUA NRW 2001) durchschnittliche Ernteerträge für Gemüsearten, die Cadmium bzw. Benzo(a)pyren in unterschiedlicher Höhe aufnehmen, abgeleitet und verschiedenen Anreicherungsklassen zugeordnet.

Tabelle A11: Mittlere Ernteerträge für unterschiedlich stark anreichernde Gemüsearten in kg/m² (nach LUA NRW 2001)

	Cadmium	Benzo(a)pyren*
hoch anreichernde Gemüsearten	2,3	2,1
mittel anreichernde Gemüsearten	2,9	3,4
niedrig anreichernde Gemüsearten	3,6	3,4
* Für Benzo(a)pyren wurden die Anreicherungsklassen für die kombinierte Aufnahme (Verschmutzung und systemisch) herangezogen Alle Angaben bezogen auf Frischmasse		

Verzehrmenge

Aus der oben genannten Studie lässt sich bezüglich der Verzehrmenge pro kg Körpergewicht (KG) weder eine Altersabhängigkeit noch eine Abhängigkeit vom Geschlecht erkennen. Für weitere Betrachtungen kann daher auf die in *Tabelle A12* zusammengefasste Datengrundlage zurückgegriffen werden.

Tabelle A12: Angaben aller Befragten zum Gesamt-Gemüseverzehr aus Eigenanbau im Kleingarten (n = 805) (Quelle: LANUV 2014)

	Körpergewicht (in kg)	Gesamt-Gemüseverzehr aus Eigenanbau (in g/kg KG und Tag)	Gesamt-Gemüseverzehr aus Eigenanbau (in g/Person und Tag)
Minimum	7	0,02	0,3
Maximum	130	14,02	1.121,5
Mittelwert	71	2,18	155,6
Median	72	1,76	124,2
90. Perzentil	90	4,23	311,4
95. Perzentil	98	5,30	397,3
99. Perzentil	112	9,20	719,3
Alle Angaben bezogen auf Frischmasse			

Auch bei der Bestimmung der Verzehrsmengen ist eine Differenzierung nach unterschiedlich anreichernden Gemüsearten bzw. nach den drei Anreicherungsklassen möglich.

Aus diesem Grund wurden für die häufig verzehrten Gemüsearten **mittlere Verzehrsmengen** für die verschiedenen Anreicherungsklassen bestimmt, die als Standardannahme angesetzt werden können (vgl. *Tabelle A13*).

Tabelle A13: Mittlere Verzehrsmengen zur Beurteilung bodenbedingter Schadstoffbelastungen differenziert nach Anreicherungsklassen (Quelle: LANUV 2014)

	Angaben in g verzehrte Frischmasse pro kg Körpergewicht und Tag		
	hoch	mittel	niedrig
Arsen	0	0,29	1,91
Blei	0	0,29	1,91
Cadmium	0,17	0,66	1,36
Chrom	0	0,29	1,91
Nickel	0	0,61	1,51
Quecksilber	0	0,29	1,91
Zink	0,17	0,66	1,36
Benzo(a)pyren	0	0,47	1,82
Benzo(a)pyren*	0,33	0,52	1,45
PCB	0	0,53	1,64

* Hier werden der systemische Aufnahmepfad und der Verschmutzungspfad kombiniert betrachtet

Im Einzelfall kann es sinnvoll sein zu prüfen, ob auf der zu betrachtenden Anbaufläche regelmäßig Nutzpflanzen mit besonderem Anreicherungsverhalten für bestimmte Schadstoffe angebaut werden oder andere abweichende Anbaubedingungen vorherrschen (z. B. reine Grünkohlflächen, Erdbeerfeld, nur Obstbäume etc.). Sofern dies der Fall ist, sollte geprüft werden, ob die abweichenden Bedingungen so relevant sind, dass sie als „**ungünstige Bedingungen**“ zu berücksichtigen sind.

Wenn beispielsweise überproportional viel und häufig hochanreichernde Gemüsearten angebaut und verzehrt werden, könnten hierfür nicht der Mittelwert der Verzehrsmenge, sondern das 90. oder 95. Perzentil herangezogen werden (vgl. auch DELSCHEN & LEISNER-SAABER 1998). Allerdings ergibt sich dann bei Addition der entsprechenden Perzentilwerte aller Gemüsearten das Problem, dass der Gesamtverzehr in der Regel weit überschätzt wird. Zur Quantifizierung ungünstiger Verzehrsmengen wird daher die Ableitung von „**Präferenzgruppen**“ empfohlen.

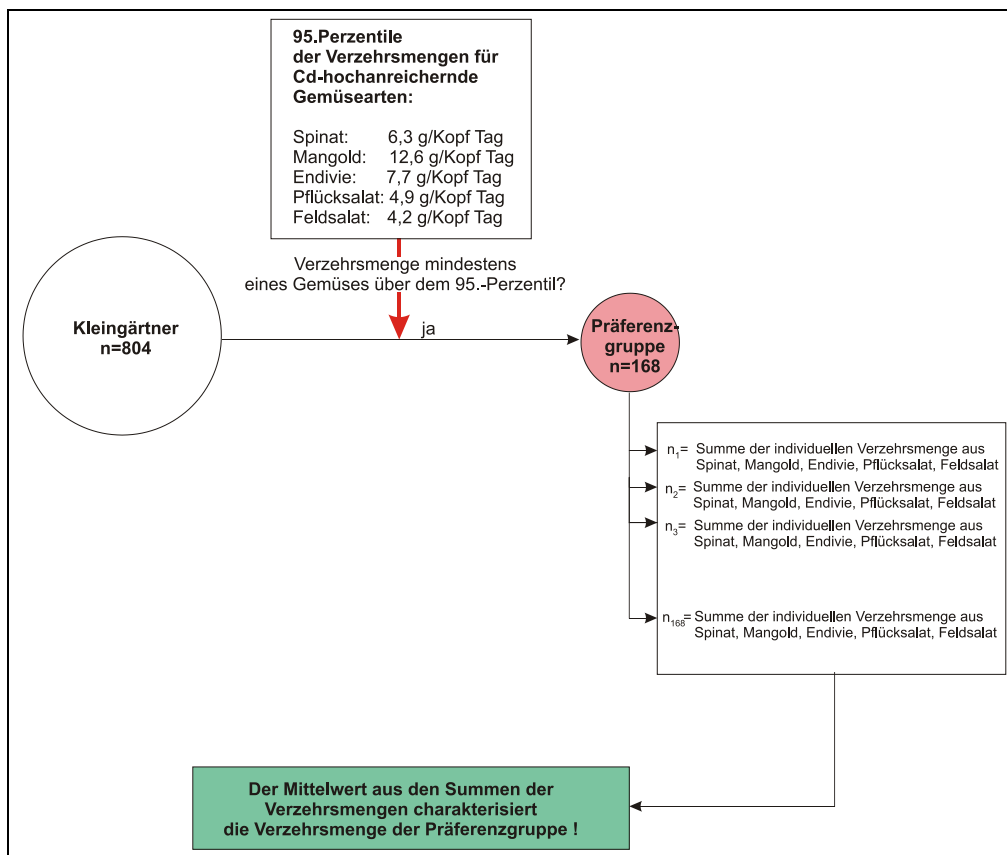


Abbildung A1: Ermittlung von Präferenzgruppen und deren Verzehrsmengen am Beispiel Cadmium-hochanreichernder Pflanzen (Quelle: LANUV 2014)

Zur Ermittlung von Präferenzgruppen wurde zunächst für alle Gemüsearten jeweils das 95. Perzentil der einzelnen Verzehrsmengen bestimmt. Im folgenden Schritt wurden dann all diejenigen Personen aus dem Datenpool herausgefiltert, deren Verzehr für mindestens eine der ausgewählten Gemüsearten über dem 95. Perzentil liegt. Für die ausgewählten Personen der Präferenzgruppe kann dann jeweils die Summe des tatsächlichen Verzehrs der Gemüsearten aus der ausgewählten Gemüse-Anreicherungsklasse ermittelt werden. Der Mittelwert aus den Summen des personenbezogenen Gemüseverzehr ergibt schließlich die Verzehrsmenge, die der definierten Präferenzgruppe (Mittelwert des Verzehrs bezogen auf die jeweilige Anreicherungsklasse) zugeordnet werden kann. Für die jeweiligen stofftypischen Anreicherungsklassen lassen sich so spezifische Verzehrsmengen ermitteln. Das gesamte Verfahren veranschaulicht die *Abbildung A1*.

In *Tabelle A14* sind die Werte dazu auf Basis der Daten aus der Verzehrsstudie zusammengefasst.

Tabelle A14: Ungünstige Verzehrsmengen von Präferenzgruppen zur Beurteilung bodenbedingter Schadstoffbelastungen differenziert nach Anreicherungsklassen (Quelle: LANUV 2014)

	Angaben in g Frischmasse pro kg Körpergewicht und Tag		
	hoch	mittel	niedrig
Arsen	0	0,57	2,65
Blei	0	0,57	2,65
Cadmium	0,36	1,14	2,11
Chrom	0	0,57	2,65
Nickel	0	1,02	2,23
Quecksilber	0	0,57	2,65
Zink	0,36	1,14	2,11
Benzo(a)pyren	0	0,82	2,66
Benzo(a)pyren*	0,60	0,99	2,34
PCB	0	0,92	2,48

* Hier werden der systemische Aufnahmepfad und der Verschmutzungspfad kombiniert betrachtet

Anbaufläche

Liegen bzgl. der Verzehrsmengen bzw. der für die jeweiligen Anreicherungsklassen abgeschätzten Ernteerträge Abweichungen von den Standardannahmen vor, kann aus den abweichenden Verhältnissen für eine abschließende Gefährdungsabschätzung schließlich auf die dafür erforderliche Anbaufläche pro Person (und Jahr) für den Einzelfall geschlossen werden.

Gleichung A10: Allgemeine Berechnung der Anbaufläche pro Person aus Verzehrsmenge und Ernteertrag (Quelle: LANUV 2014)

$$\text{Anbaufläche}_{\text{Einzelfall}} \text{ (in m}^2\text{/Person*Jahr)} = \frac{\text{Verzehrsmenge}_{\text{Einzelfall}} \text{ (in kg/Person*Jahr)}}{\text{Ernteerträge (in kg/m}^2\text{)}}$$

Bei einer Differenzierung nach Anreicherungsklassen ergibt sich:

Gleichung A11: Berechnung von Anbauflächen pro Person in Abhängigkeit der Verzehrsmengen verschieden anreichernder Gemüsearten (Quelle: LANUV 2014)

$$\begin{aligned} \text{Anbaufläche}_{\text{Einzelfall}} \text{ (in m}^2\text{/Person*Jahr)} = & \frac{\text{Verzehrsmenge}_{\text{hochanreichernd}} \text{ (in kg/Person*Jahr)}}{\text{Ernteerträge}_{\text{hochanreichernd}} \text{ (in kg/m}^2\text{)}} \\ & + \frac{\text{Verzehrsmenge}_{\text{mittelanreichernd}} \text{ (in kg/Person*Jahr)}}{\text{Ernteerträge}_{\text{mittelanreichernd}} \text{ (in kg/m}^2\text{)}} + \frac{\text{Verzehrsmenge}_{\text{niedriganreichernd}} \text{ (in kg/Person*Jahr)}}{\text{Ernteerträge}_{\text{niedriganreichernd}} \text{ (in kg/m}^2\text{)}} \end{aligned}$$

Anhand der Einzelfall-Anbaufläche im Vergleich zur Standardanbaufläche von 40 m² pro Person kann ein Expositionsquotient EQ_{AF} berechnet werden (vgl. *Arbeitshilfe Gleichung 12*).

Dieser Expositionsquotient kann für die Ableitung von einzelfallbezogenen Beurteilungswerten im Szenario ‚Nutzgärten‘ oder bei integrativen Bewertungsansätzen genutzt werden.

2.3.4. Ermittlung der Schadstoffzufuhr

Aus der Zusammenschau der Informationen zum Anbauverhalten der Nutzenden sowie dem Schadstoffinventar am Standort kann eine Abschätzung der Exposition durchgeführt werden. Hierzu ist aus den ermittelten Daten die Schadstoffzufuhr nach *Gleichung A12* zu berechnen.

Gleichung A12: Berechnung der Schadstoffzufuhr über den Verzehr von Nutzpflanzen (nach LANUV 2014, verändert)

Schadstoffzufuhr _{Pfl} (in µg/kg KG*d)	
= (VM _{hoch} * F _{TM} * EQ _{AF} * C _{Pfl, hoch}) + (VM _{mittel} * F _{TM} * EQ _{AF} * C _{Pfl, mittel}) + (VM _{niedrig} * F _{TM} * EQ _{AF} * C _{Pfl, niedrig})	
mit:	
VM _{hoch / mittel / niedrig} (in g FM/kg KG*d)	= Verzehrsmenge hoch- / mittel- / niedriganreichernder Pflanzen (schadstoffabhängig; vgl. <i>Tabelle A13</i> für Standardannahmen bzw. <i>Tabelle A14</i> wenn besondere Anbaubedingungen vorherrschen)
F _{TM}	= 0,1 (Faktor zur Umrechnung von Frisch- auf Trockenmasse)
EQ _{AF}	= Expositionsquotient Anbaufläche für den Einzelfall (vgl. <i>Arbeitshilfe Gleichung 12</i>); wurde kein EQ _{AF} berechnet, ist dieser = 1
C _{Pfl, hoch / mittel / niedrig} (in µg/g TM)	= Schadstoffgehalt in der Pflanze (hoch- / mittel- / niedriganreichernd)
C _{Pfl} kann durch Untersuchungen ermittelt oder auch abgeschätzt werden, z. B. mit Hilfe von Transferfunktionen (vgl. <i>Gleichung A8</i>).	
Für Cadmium ergibt sich danach beispielsweise:	
C _{Pfl, hoch} (in µg/g TM) = 10 ^{1,791 + 0,842 * log C_{B-AN}}	
mit:	
C _{B-AN} (in mg/kg)	= gemessener Bodengehalt im Ammoniumnitratextrakt

Die Werte für die jeweils anzusetzende Verzehrsmenge können der *Tabelle A13* (für Standardannahmen) bzw. *Tabelle A14* (wenn besondere Anbaubedingungen vorherrschen = ungünstige Verhältnisse) entnommen werden. Alternativ können eigene Einzelfallerhebungen herangezogen werden. Die Umrechnung der Angaben zu den Verzehrsmengen von Frisch- auf Trockenmasse kann mithilfe eines standardisierten Faktors von 0,1 erfolgen.

Der Schadstoffgehalt in der Pflanze kann durch Transferabschätzungen berechnet oder in Einzelfällen direkt über Pflanzenuntersuchungen ermittelt werden (vgl. *Kapitel 2.4*). Wird er über Transferabschätzungen berechnet, können für Cadmium und Blei die im *Kapitel 2.3.2.2* aufgeführten Regressionsgleichungen genutzt werden.

Als Beispiel würde sich für Cadmium im Falle ungünstiger Verzehrsmengen die im nachfolgenden Kasten dargestellte Schadstoffzufuhr ergeben:

Beispiel Cadmium (Quelle: LANUV 2014)

Im konkreten Fall wurden pflanzenverfügbare Cadmiumgehalte im Ammoniumnitratextrakt (AN) von 0,06 mg/kg bestimmt. Als Anbaufläche wird die Standardanbaufläche von 40 m² angenommen, so dass kein abweichender EQ_{AF} berechnet wurde. Bei Verwendung ungünstiger Verzehrsmengen berechnet sich die Cadmiumzufuhr – unter Berücksichtigung der Umrechnung von Frischmasse (FM) auf Trockenmasse (TM) – wie folgt (vgl. auch *Anhang 4: Fallbeispiel B*):

Schadstoffzufuhr_{Pfl} (in µg/kg KG*d) für Cadmium

$$\begin{aligned} &= (0,36 \text{ g FM/kg KG*d} * 0,1 * 10^{1,791 + 0,842 * \log 0,06 \text{ mg/kg}}) \\ &\quad + (1,14 \text{ g FM/kg KG*d} * 0,1 * 10^{1,128 + 0,857 * \log 0,06 \text{ mg/kg}}) \\ &\quad + (2,11 \text{ g FM/kg KG*d} * 0,1 * 10^{-0,35 + 0,208 * \log 0,06 \text{ mg/kg}}) \\ &= 0,21 \text{ µg/kg KG*d} + 0,14 \text{ µg/kg KG*d} + 0,05 \text{ µg/kg KG*d} = 0,4 \text{ µg/kg KG*d} \end{aligned}$$

Die so über den Anbau und Verzehr von Pflanzen zugeführten Schadstoffdosen werden humantoxikologisch abgeleiteten Beurteilungswerten gegenübergestellt. Im **Endergebnis** sind dann im Rahmen der abschließenden Gefährdungsabschätzung die Auswertungen für **alle relevanten Schadstoffe** für die untersuchte Fläche zusammenzuführen und aus bodenschutzrechtlicher Sicht festzustellen, ob der Gefahrenverdacht für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch insoweit ausgeräumt oder die Gefahr festgestellt wurde. Hierbei sind die relevanten Schadstoffe jeweils zu nennen.

Das Modell

Grundsätzlich können in das Modell auch Abweichungen hinsichtlich der Anbaugewohnheiten oder etwa der Nutzungsintensität (abweichende Ernteerträge, Nutzerstruktur etc.) integriert werden.

Ein Vorteil der Modellierung liegt darin, dass das in der Bewertung zugrunde gelegte System problemspezifisch konzipiert werden kann, so dass grundsätzlich alle boden-, parameter- und stoffbedingten Einflussfaktoren berücksichtigt werden können. Insofern bietet sich auch die Möglichkeit, alle Ausprägungen des Boden-Nutzpflanze-Pfades (über die Wurzel und Verteilung über das Xylem, die Aufnahme ausgasender Substanzen sowie in Ansätzen auch Annahmen zur Verschmutzung mit kontaminiertem Boden) vor dem Hintergrund des Schutzgutes menschliche Gesundheit zu bewerten.

In vielen Fällen ist es dazu allerdings auf Grund des begrenzten Wissensstandes erforderlich, auch aus fachgutachterlicher Sicht Annahmen zur Modellierung zugrunde zu legen, die (konservativ-realistisch) eine nachvollziehbare und langfristig gültige Abschätzung der Relevanz des Boden-Pflanze-Pfades ermöglichen. Im Detail ist diesbezüglich Forschungsbedarf zu konstatieren, der durch geeignete Methodenweiterentwicklung und -standardisierung auf der Basis bestehender Modelle noch zu leisten ist (vgl. auch DELSCHEN & LEISNER-SAABER 1998).

Als Fazit ist festzustellen, dass über die Modellierung des Transfers Boden-Nutzpflanze grundsätzlich das gesamte System Boden-Nutzpflanze-Mensch erfasst werden kann. Dieser Umstand und die mit der Modellierung einhergehende Nachvollziehbarkeit der Bewertung sind als große Vorteile zu werten. Soll der Boden-Nutzpflanze-Pfad im Zuge der vertiefenden Sachverhaltsermittlung näher abgeschätzt werden, so ist dieser Weg bei vertretbarem Aufwand oft die einzige Möglichkeit, eine abschließende und umfassende Bewertung des Pfades vorzunehmen.

Nachteilig ist anzumerken, dass mit einer Reihe von wissenschaftlichen Unsicherheiten und Annahmen umgegangen werden muss.

2.4. Pflanzenuntersuchungen

2.4.1. Pflanzenspektrum und Anbaubedingungen

Bei der Untersuchung von Nutzpflanzen ist die Auswahl der zu untersuchenden Pflanzenarten und -sorten von ausschlaggebender Bedeutung, da das Anreicherungsverhalten nicht nur zwischen den Pflanzenarten, sondern auch zwischen verschiedenen Sorten variiert. In Abhängigkeit von Schadstoffspektrum und zu betrachtendem Aufnahmepfad sollte daher eine angepasste Auswahl zu untersuchender Gemüsearten als Grundlage weitergehender Betrachtungen zur quantitativen Abschätzung der Schadstoffexposition dienen.

Für die Planung neu durchzuführender Untersuchungen sind Zielsetzung und Fragestellungen festzulegen und standörtliche Voraussetzungen (Kontaminationsquelle, Nutzungs- und Anbaugewohnheiten etc.) zu prüfen. Steht das zu erwartende Stoffspektrum fest, können parameterspezifisch Repräsentanten der relevanten Anreicherungsklassen entsprechend *Tabelle A7, A8 und A9* ausgewählt und mit den standörtlichen Anbaugewohnheiten im Einzelfall abgeglichen werden.

Diese können so gezielt aus vorzufindenden Pflanzen beprobt oder aber kontrolliert angebaut und untersucht werden. Liegen im Vorfeld der Untersuchungen zu wenig standörtliche Kenntnisse über die Schadstoffbelastung oder Nutzungssituation vor, um eine begründete Pflanzenauswahl treffen zu können, können auch folgende Indikatorpflanzen ausgewählt werden, die zum einen unterschiedliche und stoffspezifische Anreicherungsklassen repräsentieren und zum anderen häufig in ‚Nutzgärten‘ angebaut werden (vgl. hierzu LUA NRW 2001):

Tabelle A15: Indikatorpflanzen für Aufwuchsuntersuchungen auf schadstoffbelasteten Böden (Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Quecksilber, Zink, Benzo(a)pyren, PCB) (Quelle: LANUV 2014)

Gemüsearten (aufsteigend sortiert nach Häufigkeit des Anbaus)
Bohnen (Buschbohnen, Stangenbohnen)
Möhren / Schwarzwurzeln
Tomaten / Erbsen
Porree
Kopfsalat / Feldsalat
Radieschen
Grünkohl
Knollensellerie
Rote Bete
Endivie
Spinat / Mangold
Wirsing
Weißkohl / Rotkohl

Liegen bereits Pflanzenuntersuchungen vor, kann eine Zuordnung der Ergebnisse gemäß den Anreicherungsklassen vorgenommen werden.

Neben der Pflanzen- und Saatgutauswahl wirken sich insbesondere die Anbaubedingungen (wie Düngereinsatz, Bewässerung, Kulturdauer) auf die Schadstoffaufnahme in Pflanzen aus. Die Vergleichbarkeit von Daten kann daher nur durch möglichst standardisierte Aufwuchsbedingungen hergestellt werden, die gleichzeitig die standörtlich üblichen Anbau- und Nutzungsgewohnheiten integrieren.

Vorteilhaft kann daher sein, einheitliches Saatgut oder Pflanzenmaterial zu verwenden und in bestehenden Gärten eine Kooperation mit den Flächenbesitzern anzustreben, denen zu Beginn der Vegetationsperiode neben dem Pflanzenmaterial auch Anbau- und Pflegehinweise in Form eines Merkblattes ausgegeben werden (DELSCHEN & KÖNIG 1998).

2.4.2. Probennahme, Analytik und Ermittlung der Schadstoffzufuhr

Der Probennahme des Pflanzenmaterials kommt eine bedeutende Rolle bei der Gewährleistung der Repräsentativität für einen Standort zu. Daher sollte immer eine ausreichende Anzahl von Einzelproben entnommen werden (vgl. DELSCHEN & KÖNIG 1998). Die Probenahme sollte möglichst zum Zeitpunkt der Erntereife erfolgen (vgl. LRA RNK 2021).

Die Vorbereitung von Gemüsepflanzen zur Untersuchung ist im Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch (§ 64 LFGB) geregelt und umfasst die küchenfertige Aufbereitung, wie beispielsweise

- das Entfernen äußerer und schadhafter Pflanzenteile,
- ggf. das Schälen (z. B. bei Möhren, Kartoffeln) und
- das gründliche Waschen mit anschließendem Trockenschleudern.

Als Fazit ist festzuhalten, dass zur Ermittlung tatsächlicher Schadstoffbelastungen von Nutzpflanzen (unabhängig von der Quelle) Pflanzenuntersuchungen dienlich sein können. Für die Planung und Durchführung solcher Untersuchungen ist jedoch ein erheblicher Aufwand in zeitlicher wie finanzieller Hinsicht einzukalkulieren. Insbesondere da auch die zu erwartenden Aussagen zumeist unter dem Vorbehalt ungenügender zeitlicher Repräsentanz stehen, wird der Einsatz in der Praxis wohl eher speziellen Einzelfällen vorbehalten bleiben.

Bei der Konzeptionierung sollten mindestens zwei lokale Referenzstandorte mit Pflanzen auf unbelastetem Boden berücksichtigt werden (LANUV 2015). Die Ermittlung der Schadstoffzufuhr über die untersuchten Pflanzen erfolgt dann wiederum gemäß *Gleichung A12*.

Beispiel Cadmium (Quelle: LANUV 2014)

Liegen beispielsweise folgende Ergebnisse aus Pflanzenuntersuchungen (z. B. Mittelwerte der untersuchten Pflanzen) für Cadmium vor:

$$C_{\text{Pfl, hoch}} = 0,1 \text{ mg/kg FM}$$

$$C_{\text{Pfl, mittel}} = 0,05 \text{ mg/kg FM}$$

$$C_{\text{Pfl, niedrig}} = 0,01 \text{ mg/kg FM}$$

ergibt sich unter Verwendung mittlerer Verzehrsmengen folgende Cadmiumzufuhrmenge:

Schadstoffzufuhr_{Pfl} (in $\mu\text{g/kg KG}\cdot\text{d}$)

$$= (0,17 \mu\text{g/kg KG}\cdot\text{d} * 0,1 \mu\text{g/g}) + (0,66 \mu\text{g/kg KG}\cdot\text{d} * 0,05 \mu\text{g/g}) + (1,36 \mu\text{g/kg KG}\cdot\text{d} * 0,01 \mu\text{g/g})$$

$$= 0,064 \mu\text{g/kg KG}\cdot\text{d}$$

Sollen dagegen ungünstige Annahmen überprüft werden, ergibt sich für dasselbe Beispiel mit Hilfe der ungünstigen Verzehrsmengen folgende Cadmiumzufuhrmenge:

Schadstoffzufuhr_{Pfl} (in $\mu\text{g}/\text{kg KG}^*\text{d}$)

$$= (0,36 \mu\text{g}/\text{kg KG}^*\text{d} * 0,1 \mu\text{g}/\text{g}) + (1,14 \mu\text{g}/\text{kg KG}^*\text{d} * 0,05 \mu\text{g}/\text{g}) + (2,11 \mu\text{g}/\text{kg KG}^*\text{d} * 0,01 \mu\text{g}/\text{g})$$

$$= 0,11 \mu\text{g}/\text{kg KG}^*\text{d}$$

Literaturverzeichnis

- AGLMB (Arbeitsgemeinschaft der leitenden Medizinalbeamtinnen und -beamten der Länder) (1995): Standards zur Expositionsabschätzung – Bericht des Ausschusses für Umwelthygiene. Behörde für Arbeit, Gesundheit und Soziales (Hrsg.), Hamburg.
- AIR (Ausschuss für Innenraumrichtwerte) (2015): Gesundheitliche Bewertung krebserzeugender Verunreinigungen der Innenraumluft – erste Ergänzung zum Basisschema. Mitteilung des Ausschusses für Innenraumrichtwerte. Bundesgesundheitsblatt, (58), S. 769–773.
- BOTHE, M. (2004): Quantifizierung der Ingestion von Boden durch Kinder. In: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU 2004-647, Bonn.
- BURGHARDT, W.; HÖKE, S.; SAUER, D. (1997): Schadstoffgehalte und -ausbreitung bodenbürtiger Stäube in Stadt- und Industriegebieten. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Essen.
- DELSCHEN, T.; BERTGES, W.-D.; LEISNER-SAABER, J. (2006): Bewertung von Schadstoffbelastungen auf Sport- und Bolzplätzen nach Maßstäben des Bodenschutzrechtes. In: Bodenschutz 2/2006, S. 44–48.
- DELSCHEN, T.; HEMBROCK-HEGER, A.; LEISNER-SAABER, J.; SOPCZACK, D. (1999): Verhalten von PAK im System Boden/Pflanze: PAK-Belastung von Kulturpflanzen über den Luft-/Bodenpfad. In: UWSF-Z, Umweltchem. Ökotox., 11, 2; S. 79–87.
- DELSCHEN, T.; KÖNIG, W. (1998): Untersuchung und Beurteilung der Schadstoffbelastung von Kulturböden im Hinblick auf den Wirkungspfad Boden-Pflanze. In: König, W.; Utermann, J.; Kerth, M. (Hrsg.): Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Kapitel 3550, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- DELSCHEN, T.; LEISNER-SAABER, J. (1998): Selbstversorgung mit Gemüse aus Schwermetall-belasteten Gärten: Eine Gefährdungsabschätzung auf toxikologischer Basis. In: Bodenschutz 1/1998, S. 17–20.
- DIN 19738 (2017-06): Resorptionsverfügbarkeit von organischen und anorganischen Schadstoffen aus kontaminiertem Bodenmaterial. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN EN ISO 17892-4 (2017-04): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung; Deutsche Fassung EN ISO 17892-4 (2016).
- DIN ISO 19730 (2009-07): Bodenbeschaffenheit – Extraktion von Spurenelementen aus Böden mit Ammoniumnitratlösung. Beuth-Verlag, Berlin.

- DRESCH, W.; EINBRODT, H.; SCHRÖDER, A. (1976): Zur Beurteilung einer möglichen Gesundheitsgefährdung durch bleihaltige Sportplatzbeläge. In: Sportarzt und Sportmedizin. Heft 9, S. 216–220.
- EIKMANN, T.; BRAMMERTZ, A.; EIKMANN, S. (1993): Kriterien zur Beurteilung der inhalativen Aufnahme von Schadstoffen aus dem Boden – Beispiel: Kontamination von Sport- und Bolzplätzen. In: König, W.; Utermann, J.; Kerth, M. (Hrsg.): Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Kapitel 3595, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- FIBL (Forschungsinstitut für biologischen Landbau) (2012): Merkblatt Pestizidrückstände in Kürbisgewächsen. Frick, Schweiz. Online: <https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1478-pestizide-kuerbisgewaechse.pdf>
- FOBIG (Forschungs- und Beratungsinstitut Gefahrstoffe FoBiG GmbH) (1999): Grundlagen für die Bewertung von Kontaminationen des Bodens mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen. Mit Korrekturen vom März 2004. Bericht zum F+E-Vorhaben 298 73 771 im Auftrag des Umweltbundesamtes. Freiburg.
- HÜLSTER, A.; MÜLLER, J.; MARSCHNER, H. (1994): Soil-Plant Transfer of Polychlorinated Dibenzodioxins and Dibenzofurans to Vegetables of the Cucumber Family (Cucurbitaceae). Environmental Science & Technology, Vol. 28, Issue 6, S. 1110–1115.
- IRK-UBA (Umweltbundesamt) (2007): Beurteilung von Innenraumluftkonzentrationen mittels Referenz- und Richtwerten. Handreichung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. Bundesgesundheitsblatt, (50), S. 990–1005. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/Handreichung.pdf>
- IRK-UBA (Umweltbundesamt) (2012): Richtwerte für die Innenraumluft: erste Fortschreibung des Basisschemas. Mitteilung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Kommission Innenraumlufthygiene und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. Bundesgesundheitsblatt, (55), S.279–290. Online: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/Basisschema_2012.pdf
- ISO 11277 (2020-04): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden – Verfahren mittels Siebung und Sedimentation. Beuth-Verlag, Berlin.
- KNOCHE, H.; BRAND, P.; VIERECK-GÖTTE, L. (1999): Schwermetalltransfer Boden - Pflanze, Ergebnisse der Auswertungen hinsichtlich der Königswasser - Ammoniumnitrat-Extraktion anhand der Datenbank TRANSFER. UBA-Texte 11/99.
- KONIETZKA, R.; DIETER, H. (1998): Ermittlung gefahrenbezogener chronischer Schadstoffdosen zur Gefahrenabwehr beim Wirkungspfad Boden-Mensch. In: König, W.; Utermann, J.; Kerth, M. (Hrsg.): Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Kapitel 3530, Erich Schmidt Verlag, Berlin.

- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.) (1991): KTBL – Datensammlung Haushalt, 4. Auflage.
- LABO (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (1998): Eckpunkte zur Gefahrenbeurteilung des Wirkungspfades Bodenverunreinigungen/Altlasten – Pflanze. Ad-hoc-AG „Schwermetalltransfer Boden/Pflanze“ des AK „Bodenbelastung“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz. In: König, W.; Utermann, J.; Kerth, M. (Hrsg.): Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Kapitel 9009, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen) (2014): Weitere Sachverhaltsermittlungen bei Überschreitung von Prüfwerten nach BBodSchV für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Nutzpflanze; LANUV-Arbeitsblatt 22. Online: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/40022.pdf
- LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen) (2015): Probenahme von Nahrungspflanzen zur Prüfung, ob selbst angebautes Gemüse nach immissionsbedingten Einträgen verzehrt werden darf. LANUV-Arbeitsblatt 31. Online: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/40031.pdf
- LfUG (Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen) (2003): Detailuntersuchung; Handbuch zur Altlastenbehandlung Teil 7, z. T. aktualisiert 2006 und 2014. Online: https://www.boden.sachsen.de/download/Handbuch_ges_Internet_Januar2014.pdf
- LIEBE, F.; WELP, G.; BRÜMMER, G. W. (1997): Mobilität anorganischer Schadstoffe in Böden Nordrhein-Westfalens. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, Band 2, Essen.
- LRA RNK (Landratsamt Rhein-Neckar-Kreis) (2022): Anbau von Nahrungs- und Futterpflanzen auf mit Arsen und Schwermetallen belasteten Böden im Rhein-Neckar-Kreis; Leitfaden; 4. Fortschreibung. Online: https://rhein-neckar-kreis.landwirtschaft-bw.de/pb/_Lde/9408744/?LIST-PAGE=676418
- LUA BB (Landesumweltamt Brandenburg) (2010): Leitfaden zur Detailuntersuchung, Teil Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze.
- LUA NRW (Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen) (2001): Verzehrsstudie in Kleingärten im Rhein-Ruhrgebiet. Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, Band 14. Online: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/0_lua/malbo14_web.pdf
- LUA NRW (Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen) (2005): Abschätzung der Schwermetallmobilität in nordrhein-westfälischen Böden, Essen 28.01.2005. Online: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/boden/boschu-lua/Bericht_KW_AN_neu%202005-01-28.pdf
- PRÜEß, A. (1992): Vorsorgewerte und Prüfwerte für mobile und mobilisierbare, potentiell ökotoxische Spurenelemente in Böden, Verlag Ulrich E. Grauer.

- REESE, S (2018): Wirkung von Zuschlagstoffen auf die Pflanzenverfügbarkeit von Organochlorpestiziden in Gewächshausböden. Masterarbeit am Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg, unveröffentlicht.
- SCHNEIDER, K.; SCHUMACHER, U.; OLTMANN, J. (2000): PAK (Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe). In: Eikmann, T.; Heinrich, U.; Heinzow, B.; Konietzka, R. (Hrsg.) (1999ff): Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen – Ergänzbare Handbuch toxikologischer Basisdaten und ihre Bewertung. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- SEEGER, K.-J. (1999): Fachliche Grundlagen zur Beurteilung von flüchtigen organischen Substanzen in der Bodenluft bei Altlasten. Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, Wiesbaden: Hessische Landesanstalt für Umwelt (HLfU), Heft 263, 138 S.
- TRAPP, S.; MATTHIES, M. (1994a): Transfer von PCDD/F und anderen organischen Umweltchemikalien im System Boden-Pflanze-Luft. In: UWSF – Zeitschrift für Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung 6 (1), S. 31–40.
- TRAPP, S.; MATTHIES, M. (1994b): Transfer von PCDD/F und anderen organischen Umweltchemikalien im System Boden-Pflanze-Luft. In: UWSF – Zeitschrift für Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung 6 (3), S. 157–163.
- UBA (Umweltbundesamt) (Hrsg.) (1999ff): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. Erich Schmidt Verlag, Loseblattsammlung 1999 mit Ergänzungen, Berlin.
- UBA (Umweltbundesamt) (2015): Evaluierung vorhandener Daten zu Gesamt- und verfügbaren Stoffgehalten in Böden und in Nahrungs- und Futtermittelpflanzen bezüglich der Prüfwerte der BBodSchV im Pfad Boden-Pflanze. Forschungskennzahl 3713 71 227, UBA-FB 002666.
- VOGT, L. (2007): Wirkung von Aktivkohle im Boden auf die Dieldrinaufnahme von Gurkenfrüchten. Diplomarbeit an der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit dem Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL. Online: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/149829/eth-29501-01.pdf>
- ZEDDEL, A. (2001): Hinweise zur Bewertung von Chrom (III) nach der Methodik der BBodSchV für den Direktpfad Boden-Mensch. In: Altlasten spektrum 5/2001, S. 238–243.

**Arbeitshilfe zur Expositionsabschätzung
in der Detailuntersuchung
für den Wirkungspfad Boden-Mensch**

**Anhang 4
Fallbeispiel A: Kinderspielfläche**

Dezember 2023

Fallbeispiel A: Kinderspielfläche

	<p>Erfassung</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ Anhaltspunkte / Verdachtsmomente ⇒ Standortbeschreibung 	
	<p>Orientierende Untersuchung</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ Hinreichender Gefahrenverdacht ⇒ Feststellung akuter Gefährdungen (Boden-Mensch/Direktkontakt) 	
	<p>Detailuntersuchung</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ Expositionsabschätzung (Boden-Mensch/Direktkontakt) 	
	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Abschließende Gefährdungsabschätzung (Boden-Mensch/Direktkontakt) 	

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
1. Erfassung	1
1.1. Anhaltspunkte / Verdachtsmomente	1
1.2. Standortbeschreibung	1
2. Orientierende Untersuchung	3
2.1. Untersuchungskonzept	3
2.2. Probennahme und Analytik	4
2.3. Ergebnisse für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt	5
2.4. Beurteilung der Ergebnisse / Hinreichender Gefahrenverdacht	6
3. Detailuntersuchung	7
3.1. Überprüfung der zutreffenden Nutzungsszenarien inklusive der relevanten Wirkungs- und Aufnahmepfade	7
3.2. Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt	8
3.2.1. Festlegung des Prüfbedarfs	8
3.2.2. Prüfung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen	9
3.2.3. Prüfung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen	12
3.2.4. Abschließende Gefährdungsabschätzung des Wirkungspfades Boden- Mensch/Direktkontakt	12
Literaturverzeichnis	14

Tabellenverzeichnis

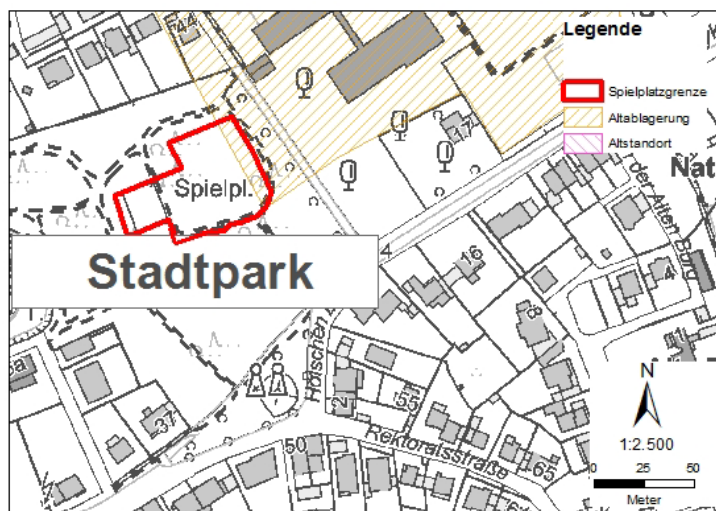
Tabelle A1:	Entnahmebereiche (ENB) und Erkundungsbereiche (ERK).....	4
Tabelle A2:	Probenbeschreibung	5
Tabelle A3:	Auswertung der Gesamtgehalte der Proben von ENB-1 und ENB-2 (in mg/kg TM)	6
Tabelle A4:	Auswertung der Gesamtgehalte der Proben von ENB-3 und ENB-4 (in mg/kg TM)	6
Tabelle A5:	Auswahl der am Standort relevanten Nutzungsszenarien und Wirkungspfade (vgl. <i>Arbeitshilfe Tabelle 1</i>).....	8
Tabelle A6:	Beurteilungsbestimmende Aufnahmepfade für die relevanten Schadstoffe (vgl. <i>Arbeitshilfe Tabelle 2</i>).....	8
Tabelle A7:	Untersuchungen zur Abschätzung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen.....	9
Tabelle A8:	Ergebnisse der Detailuntersuchung (in mg/kg TM)	9
Tabelle A9:	Beurteilungswerte für die Resorptionsverfügbarkeit (in mg/kg TM).....	10
Tabelle A10:	Auswertung der resorptionsverfügbaren Gehalte (in mg/kg TM).....	10
Tabelle A11:	Beurteilungswerte Feinkornfraktion < 63 µm (in mg/kg TM).....	11
Tabelle A12:	Auswertung der Gehalte in der Feinkornfraktion < 63 µm (in mg/kg TM)	11
Tabelle A13:	Auswertung der Gesamtgehalte (in mg/kg TM).....	11

1. Erfassung

1.1. Anhaltspunkte / Verdachtsmomente

Eine Kommune beabsichtigt, eine systematische Untersuchung zur Gefährdungsabschätzung von Kinderspielplätzen nach Bodenschutzrecht durchzuführen.

In einem ersten Durchgang sollen zunächst diejenigen Kinderspielplätze, die im Bereich von Altstandorten und Altablagerungen liegen oder direkt an diese angrenzen betrachtet werden.



In diese Gruppe fällt der Spielplatz ‚Im Stadtpark‘.

Im Rahmen einer Erkundung wurden auf der Fläche der benachbarten Altablagerung zehn Rammkernsondierungen durchgeführt, wobei im untersuchten Sondenmaterial z. T. erhöhte Gehalte an PAK sowie Arsen, Blei, Chrom und Zink festgestellt wurden. Untersuchungen der Bodenluft ergaben dahingegen keine Auffälligkeiten.

1.2. Standortbeschreibung

Der ca. 2.650 m² große Spielplatz ist Teil einer Parkanlage und frei zugänglich. Eine Abtrennung des Spielplatzes von der Umgebung mittels Zaun oder ähnlichem ist nicht vorhanden. Der Spielplatz besteht insgesamt aus vier Teilflächen.

Teilfläche 1:

Zentral liegt eine große Rasenfläche, in deren Innerem ein ausgedehnter Sandspielbereich eingebettet ist. Der Sandspielbereich ist dabei mit einer Vielzahl an Spielgeräten versehen (später ‚ENB-1‘).



Teilfläche 2:

Westlich der Rasenfläche erstreckt sich ein separater, mit einem niedrigen Zaun umgrenzter Spielbereich für Kleinkinder. Das Areal ist als Sandfläche ausgebildet, wobei im Randbereich eine deutliche Rasenbildung eingesetzt hat. Auch hier befinden sich viele Spielgeräte (später ‚ENB-2‘).



Teilfläche 3:

Nördlich der großen Rasenfläche erstreckt sich ein von Hecken und Gehölzen eingefasster Platz aus Tennenmaterial mit Basketballkörben (später ‚ENB-3‘).

Teilfläche 4:

Südlich der großen Rasenfläche verläuft ein Weg aus roter Asche. Von diesem zweigt ein kleiner Pfad in nördlicher Richtung ab, der die große Rasenfläche vom Spielbereich der Kleinkinder trennt (später ‚ENB-4‘).

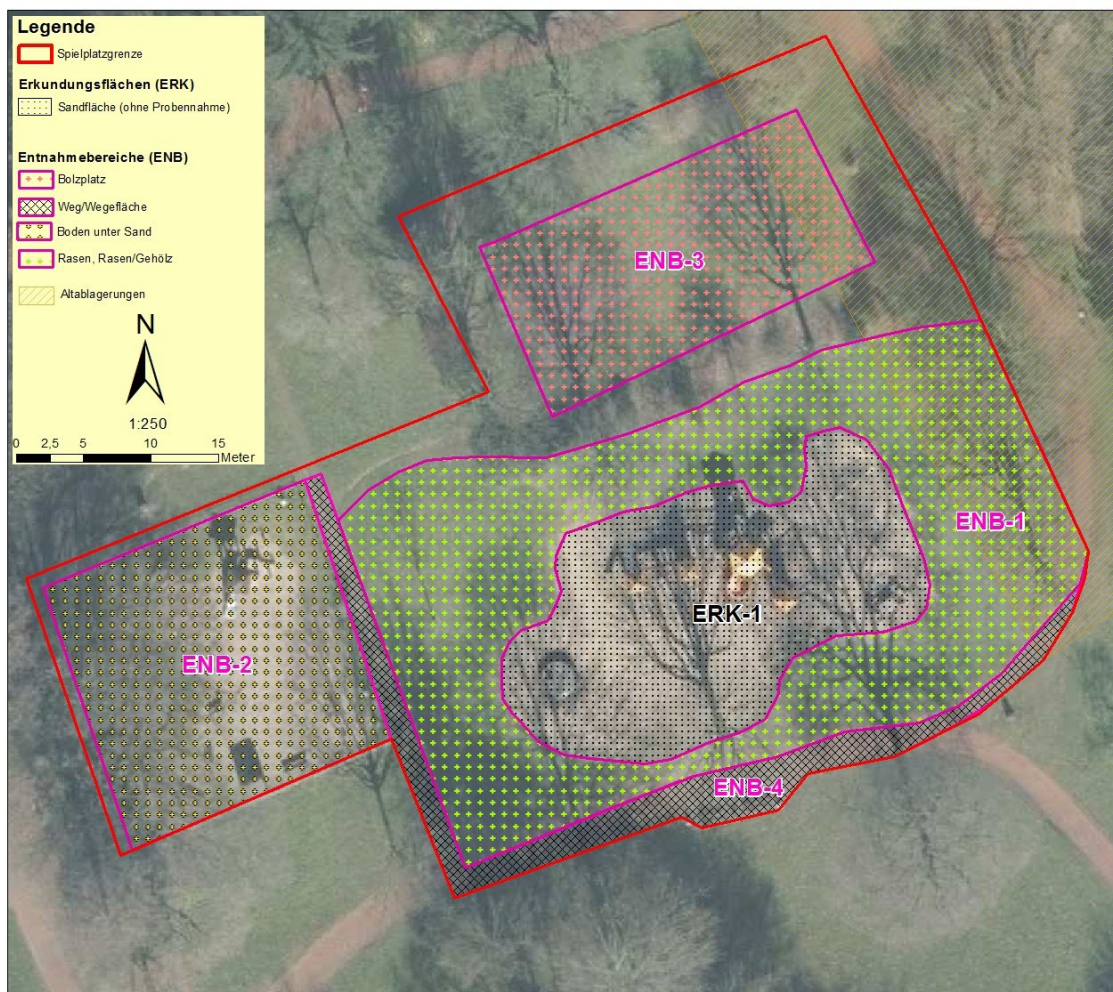


2. Orientierende Untersuchung

2.1. Untersuchungskonzept

Gemäß Konzept war die große Rasenfläche zu beproben und zu untersuchen. Darüber hinaus war das Tennenmaterial des Basketballplatzes und des Weges oberflächennah zu beproben und zu untersuchen.

Die ausgedehnte Sandspielfläche sowie die Fläche des Kleinkinderspielbereichs waren zu erkunden und je nach Verunreinigung zu beproben, ebenso der Boden unterhalb der Sandlagen, sofern hier keine Trennschichten (Magerbeton etc.) vorliegen und die Sandlagen nicht ausreichend mächtig sind (< 30 cm).



2.2. Probennahme und Analytik

Die Beprobung erfolgte gemäß den methodischen Vorgaben der BBodSchV. Die Bodenproben wurden schichtbezogen mit der Schlitzsonde (\varnothing 36 mm) in der Regel für die Tiefenstufen 0–10 cm und 10–30 cm gewonnen. Dabei wurde Material aus 20 Einstichen zu jeweils einer Mischprobe vereinigt.

Tabelle A1: Entnahmebereiche (ENB) und Erkundungsbereiche (ERK)

ENB-ID	Fläche [m ²]	Nutzung	Typ	Bemerkung
ENB-1	895	Rasen	Oberboden	---
ENB-2	428	Sandfläche (Kleinkinder)	Boden unter Sand	Sandlage unauffällig
ENB-3	344	Basketballplatz	Tennenmaterial	---
ENB-4	166	Weg	Tennenmaterial	---
ERK-1	467	zentrale Sandfläche	---*	60 cm unauffällige Sandlage

* Spielsand ist nicht Gegenstand der BBodSchV

Die Entnahme der Proben des Tennenmaterials des Weges bzw. des Basketballplatzes erfolgte dahingegen oberflächennah mit der Handschaufel.

Tabelle A2: Probenbeschreibung

Proben-ID	Tiefe	Typ	Bemerkung
ENB-1-1	0–10 cm	Oberboden	---
ENB-1-2	10–30 cm	Oberboden	---
ENB-2-2	15–30 cm	Boden unter Sand	Sandlage unauffällig
ENB-3-1	0–10 cm	Tennenmaterial	---
ENB-4-1	0–10 cm	Tennenmaterial	---

Insgesamt fünf Mischproben dieses Standortes wurden im Labor nach den methodischen Vorgaben der BBodSchV auf die anorganischen Parameter Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink sowie die organischen Parameter polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) – inklusive Benzo(a)pyren – untersucht. Verwendet wurde dazu die Fraktion < 2 mm.

2.3. Ergebnisse für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt

Die *Tabellen A3* und *A4* enthalten die im Rahmen der orientierenden Untersuchung ermittelten Gesamtgehalte. Sie wurden den Prüfwerten bzw. orientierenden Bodenbeurteilungswerten für das jeweilige Nutzungsszenario gegenübergestellt.

Im vorliegenden Fall werden die Teilflächen ENB-1 und ENB-2 dem Nutzungsszenario ‚Kinderspielflächen‘ zugeordnet.

Im Fall des für Spielzwecke nur untergeordnet genutzten Wegebereiches ENB-4 wurde entschieden, die Prüfwerte des Nutzungsszenarios ‚Park- und Freizeitanlagen‘ heranzuziehen.

Im Fall des Bolzplatzes ENB-3 wird – über die Bewertung anhand des Nutzungsszenarios ‚Park- und Freizeitanlagen‘ hinausgehend – auf die orientierenden Bodenbeurteilungswerte für ‚Sport- und Bolzplätze‘ (DELSCHEN et al. 2006) zurückgegriffen, da hier bei der Bewertung nicht die orale Schadstoffaufnahme durch Kleinkinder im Vordergrund steht, sondern die inhalative Aufnahme der Schadstoffe durch ältere Kinder bzw. Jugendliche.

Tabelle A3: Auswertung der Gesamtgehalte der Proben von ENB-1 und ENB-2 (in mg/kg TM)

	Prüfwert Kinderspielflächen	ENB-1-1	ENB-1-2	ENB-2-2
		0–10 cm	10–30 cm	15–30 cm
Arsen	25	7	9	15
Blei	200	129	177	62
Cadmium	10	0,5	0,7	0,5
Chrom _{gesamt}	200	246	24	64
Kupfer	---	25	35	53
Nickel	70	18	21	36
Quecksilber	10	0,16	0,28	0,15
Zink	---	129	149	112
PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren	0,50	2,20	0,30	0,45

--- Kein Prüfwert definiert

Orange: Überschreitung des Prüfwertes für Kinderspielflächen, Gefahrenverdacht für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt nicht ausgeräumt

Tabelle A4: Auswertung der Gesamtgehalte der Proben von ENB-3 und ENB-4 (in mg/kg TM)

	Orientierender Bodenbeurteilungswert Sport- und Bolzplätze	ENB-3-1	Prüfwert Park- und Freizeitanlagen	ENB-4-1
		0–10 cm		0–10 cm
Arsen	100	185	125 / 100*	29
Blei	5.000	980	1.000	1.350
Cadmium	40	5,3	50	1,3
Chrom _{gesamt}	100	69	400	25
Kupfer	---	611	---	94
Nickel	250	78	350	26
Quecksilber	250	0,10	50	0,50
Zink	---	526	---	789
PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren	4	0,06	1	0,03

--- Kein Prüfwert / orientierender Bodenbeurteilungswert definiert

* Der Wert von 100 mg/kg gilt zur Prüfung akuter Wirkungen von Arsen nach kurzfristiger Aufnahme

Orange: Überschreitung des orientierenden Bodenbeurteilungswertes für Sport- und Bolzplätze bzw. des Prüfwertes für Park- und Freizeitanlagen, Gefahrenverdacht für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt nicht ausgeräumt

2.4. Beurteilung der Ergebnisse / Hinreichender Gefahrenverdacht

Für die Teilfläche ENB-2 wurde keine Prüfwertüberschreitung festgestellt. Ein Gefahrenverdacht konnte hier mithin ausgeräumt werden. Im Fall von Entnahmebereich ENB-1 ist der Gefahrenverdacht in Bezug auf Chrom und PAK/Benzo(a)pyren nicht ausgeräumt. Gleiches gilt für den Entnahmebereich ENB-4 in Bezug auf Blei.

Im Bereich des Basketballplatzes (ENB-3) überschreitet der Gesamtgehalt an Arsen den orientierenden Bodenbeurteilungswert für ‚Sport- und Bolzplätze‘ und auch den Prüfwert für ‚Park- und Freizeitanlagen‘. Der Gesamtgehalt liegt mit 185 mg/kg auf einem Niveau, für das akute Gefährdungen nicht ausgeschlossen werden können (bei einem zugrunde gelegten Akutwert von 100 mg/kg; vgl. *Arbeitshilfe Tabelle 3*).

Für die Entnahmebereiche, für die der Gefahrenverdacht nicht ausgeräumt werden konnte, waren nunmehr weitere Sachverhaltsermittlungen im Rahmen der Detailuntersuchung inklusive einer Expositionsabschätzung durchzuführen.

Für den Entnahmebereich mit Überschreitung des Akutwertes (ENB-3) waren darüber hinaus Sofortmaßnahmen zu prüfen. Da die Fläche frei zugänglich für Kleinkinder ist, wurden temporäre Maßnahmen erforderlich, solange die Frage einer Gefahr nicht abschließend geklärt war. In diesem Fall bot es sich an, die Zugänglichkeit des Areals durch Absperrungen zu unterbinden.

3. Detailuntersuchung

3.1. Überprüfung der zutreffenden Nutzungsszenarien inklusive der relevanten Wirkungs- und Aufnahmepfade

Aufgrund der im Rahmen der orientierenden Untersuchung festgestellten Prüfwertüberschreitungen sind weitergehende Sachverhaltsermittlungen im Rahmen der Detailuntersuchung inklusive einer Expositionsabschätzung notwendig.

Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse sind im vorliegenden Fall folgende Nutzungsszenarien und Wirkungspfade zu berücksichtigen:

Tabelle A5: Auswahl der am Standort relevanten Nutzungsszenarien und Wirkungspfade (vgl. Arbeitshilfe Tabelle 1)

Nutzungsszenarien	Wirkungspfade			
	Boden-Mensch/ Direktkontakt	Boden-Bodenluft- Mensch	Boden-Nutz- pflanze-Mensch	Boden-(Futterpflanze-) Nutztier-Mensch
Kinderspielflächen	X	-		
Park- und Freizeitanlagen	X	-		
Sport- und Bolzplätze	X	-		
<p>dunkelgrau: Wirkungspfad für das Nutzungsszenario nicht relevant</p> <p>X Wirkungspfad am Standort relevant</p> <p>- Wirkungspfad am Standort nicht relevant</p>				

Das Schadstoffpotenzial lässt folgende Wirkungspfade und Aufnahmepfade relevant werden:

Tabelle A6: Beurteilungsbestimmende Aufnahmepfade für die relevanten Schadstoffe (vgl. Arbeitshilfe Tabelle 2)

Wirkungspfade	Aufnahmepfade			
	oral	inhalativ (Staub)	inhalativ (Gas)	dermal
Boden-Mensch/Direktkontakt	Arsen Blei PAK/Benzo(a)pyren	Arsen* Chrom**		-
Boden-Bodenluft-Mensch			-	
Boden-Nutzpflanze-Mensch	-			
Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch	-			
<p>dunkelgrau: Aufnahmepfad für den Wirkungspfad nicht relevant</p> <p>- Aufnahmepfad am Standort nicht relevant</p> <p>* Für das Nutzungsszenario Sport- und Bolzplätze</p> <p>** Unter Beachtung der Oxidationsstufe</p>				

3.2. Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt

3.2.1. Festlegung des Prüfbedarfs

Auf der Kinderspielfläche ‚Im Stadtpark‘ ist im Rahmen der Detailuntersuchung der Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt weiter zu untersuchen. Dabei ist für die Parameter Arsen, Blei und PAK/Benzo(a)pyren der orale Aufnahmepfad, für Arsen und Chrom der inhalative Aufnahmepfad zu prüfen.

Im Fall Chrom ist zu beachten, dass auch die Oxidationsstufe, in der es vorliegt (Chrom_{gesamt}, Chrom (III) bzw. Chrom (VI)), beurteilungsrelevant ist.

3.2.2. Prüfung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen

Die zu betrachtenden Stoffe und Aufnahmepfade bestimmen die Untersuchungen zur Prüfung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen. Für insgesamt drei Proben war eine weitere Beurteilung des oralen Aufnahmepfades vorzunehmen. Daher erfolgte jeweils eine Untersuchung der Resorptionsverfügbarkeit gemäß DIN 19738 für Benzo(a)pyren (ENB-1-1), Arsen (ENB-3-1) sowie Blei (ENB-4-1). Die Ergebnisse dienen auch der Bewertung der akuten Gefährdung im Hinblick auf Arsen für die Teilfläche ENB-3.

Für die Teilflächen ENB-3 und ENB-4 war darüber hinaus eine weitere Sachverhaltsermittlung im Hinblick auf den inhalativen Aufnahmepfad notwendig – auf der Teilfläche ENB-1 hinsichtlich Chrom sowie auf der Teilfläche ENB-3 hinsichtlich Arsen (Szenario ‚Sport- und Bolzplätze‘). Hierfür war die Verfügbarkeit der Schadstoffe in der Feinkornfraktion < 63 µm zu prüfen. Da für die inhalative Aufnahme von Bodenpartikeln in der Regel die obersten 2 cm maßgebend sind, erfolgte auf beiden Flächen eine erneute Entnahme von Mischproben – diesmal aus dem Tiefenbereich 0–2 cm (ENB-1-0 und ENB-3-0).

Tabelle A7: Untersuchungen zur Abschätzung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen

Probe	Parameter	Untersuchungen
ENB-1-0	Chrom	Gehalt in der Feinkornfraktion < 63 µm (Chrom _{gesamt} und Chrom (VI))
ENB-1-1	PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren	Resorptionsverfügbarkeit
ENB-3-0	Arsen	Gehalt in der Feinkornfraktion < 63 µm
ENB-3-1	Arsen	Resorptionsverfügbarkeit
ENB-4-1	Blei	Resorptionsverfügbarkeit

Für die Proben ENB-1-0 und ENB-3-0 wurde zusätzlich der Gesamtgehalt an Chrom bzw. Arsen bestimmt.

Tabelle A8: Ergebnisse der Detailuntersuchung (in mg/kg TM)

Probe	Parameter	Gesamtgehalt (< 2 mm)	Gehalt in der Feinkornfraktion (< 63 µm)	Resorptionsverfügbarer Gehalt (< 2 mm)
ENB-1-0	Chrom	230	1.200 (105*)	n. b.
ENB-1-1	PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren	2,2	n. b.	0,4
ENB-3-0	Arsen	171	293	n. b.
ENB-3-1	Arsen	185	n. b.	36
ENB-4-1	Blei	1.350	n. b.	310
* Gehalt an Chrom (VI)				
n. b. = nicht bestimmt				

Resorptionsverfügbarkeit:

Grundlage für die Beurteilungswerte bezüglich gemessener, resorptionsverfügbarer Gehalte nach DIN 19738 (< 2 mm) bilden in der Regel die Prüfwerte der BBodSchV. Ausnahmen sind in der *Arbeitshilfe Kapitel 5.2.4* beschrieben (vgl. *Arbeitshilfe Gleichung 1* und *Kasten Ausnahmen* sowie UBA 1999ff).

Tabelle A9: Beurteilungswerte für die Resorptionsverfügbarkeit (in mg/kg TM)

	BW_{RV} Kinderspielflächen	BW_{RV} Park- und Freizeitanlagen
PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren	0,5	1,0
Arsen	25	100 ¹⁾
Blei	70	360

¹⁾ Der Wert gilt zur Prüfung akuter Wirkungen von Arsen (resorptionsverfügbar) nach kurzfristiger Aufnahme

Die im Rahmen der Detailuntersuchung ermittelten resorptionsverfügbaren Gehalte wurden den Beurteilungswerten für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung BW_{RV} gegenübergestellt. Alternativ könnte der EQ_{RV} berechnet und dem BW_{gesamt} gegenübergestellt werden (vgl. *Arbeitshilfe Gleichung 2* und *4*).

Tabelle A10: Auswertung der resorptionsverfügbaren Gehalte (in mg/kg TM)

Probe	Parameter	Gesamtgehalt	RV-Gehalt	BW _{RV}	EQ _{RV}	BW _{gesamt} **
ENB-1-1	PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren	2,2	0,4	0,5	0,18	2,8
ENB-3-1	Arsen	185	36	100*	0,19	526
ENB-4-1	Blei	1.350	310	360	0,23	1.565

Orange: Überschreitung des Beurteilungswertes BW_{RV} (bezogen auf gemessene resorptionsverfügbare Gehalte) bzw. des Beurteilungswertes BW_{gesamt} (bezogen auf gemessene Gesamtgehalte)

* bezüglich akuter Wirkungen

** zur Berechnung wurde der gerundete EQ_{RV} verwendet

Am Standort wurden resorptionsverfügbare Anteile für Benzo(a)pyren von 18 %, für Arsen von 19 % und für Blei von 23 % festgestellt (vgl. EQ_{RV}).

Die Beurteilungswerte für die Teilflächen ENB-1, ENB-3 und ENB-4 werden für Arsen, Blei und PAK/Benzo(a)pyren im Hinblick auf die orale Aufnahme unterschritten, so dass der Gefahrenverdacht für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt für diese Parameter – auch für akute Wirkungen – insoweit ausgeräumt wurde.

Feinkornfraktion < 63 µm:

Zur Beurteilung der ermittelten Messwerte in der Feinkornfraktion < 63 µm sind je nach Parameter Beurteilungswerte ($BW_{s_{\text{Feinkornfraktion}}}$) festzulegen. Grundlage hierfür bilden in der Regel die Prüfwerte der BBodSchV, die hier mit dem standardmäßig berücksichtigten Anreicherungsfaktor für die Feinkornfraktion von 5 (Metalle) zu multiplizieren sind (vgl. *Arbeitshilfe Gleichung 5*).

Tabelle A11: Beurteilungswerte Feinkornfraktion < 63 µm (in mg/kg TM)

Parameter	$BW_{s_{\text{Feinkornfraktion}}}$ Kinderspielflächen	$BW_{s_{\text{Feinkornfraktion}}}$ Sport- und Bolzplätze
Chrom _{gesamt}	1.000	500
Chrom (VI)	650	200
Arsen	-	500

Die im Rahmen der Detailuntersuchung ermittelten Gehalte in der Feinkornfraktion < 63 µm wurden den Beurteilungswerten für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung gegenübergestellt.

Tabelle A12: Auswertung der Gehalte in der Feinkornfraktion < 63 µm (in mg/kg TM)

Probe	Parameter	Gehalt in der Feinkornfraktion (< 63 µm)	$BW_{s_{\text{Feinkornfraktion}}}$
ENB-1-0	Chrom _{gesamt}	1.200	1.000
ENB-1-0	Chrom (VI)	105	650
ENB-3-1	Arsen	293	500

Orange: Überschreitung des Beurteilungswertes $BW_{s_{\text{Feinkornfraktion}}}$ (bezogen auf gemessene Gehalte in der Feinkornfraktion < 63 µm)

Alternativ könnte der $EQ_{\text{Feinkornfraktion}}$ berechnet und die ermittelten Gesamtgehalte dem $BW_{s_{\text{gesamt}}}$ gegenübergestellt werden (vgl. *Arbeitshilfe Gleichung 6*).

Tabelle A13: Auswertung der Gesamtgehalte (in mg/kg TM)

Probe	Parameter	Gesamtgehalt (< 2 mm)	Prüfwert / orientierender Bodenbeurteilungswert	$EQ_{\text{Feinkornfraktion}}$	$BW_{s_{\text{gesamt}}}$ *
ENB-1-0	Chrom _{gesamt}	230	200	1,04	192
ENB-1-0	Chrom (VI)	n. b.		n. b.	n. b.
ENB-3-1	Arsen	185	100	0,32	313

Orange: Überschreitung des Beurteilungswertes $BW_{s_{\text{gesamt}}}$ (bezogen auf gemessene Gesamtgehalte)
n. b. = nicht bestimmt
* zur Berechnung wurde der gerundete $EQ_{\text{Feinkornfraktion}}$ verwendet

Im Fall Chrom überschreitet der in der Feinkornfraktion $< 63 \mu\text{m}$ gemessene Gehalt an $\text{Chrom}_{\text{gesamt}}$ mit 1.200 mg/kg den Beurteilungswert $\text{BWs}_{\text{Feinkornfraktion}}$ von 1.000 mg/kg (analog ergibt sich eine Überschreitung beim Vergleich der Gesamtgehalte).

Wie die Untersuchungen auf Chrom (VI) jedoch ergeben haben, unterschreitet der letztlich maßgebliche Gehalt an Chrom (VI) mit 105 mg/kg den entsprechenden Beurteilungswert $\text{BWs}_{\text{Feinkornfraktion}}$ von 650 mg/kg. Bezüglich Arsen wird der $\text{BWs}_{\text{Feinkornfraktion}}$ bzw. $\text{BWs}_{\text{gesamt}}$ ebenfalls unterschritten.

Damit wurden die Beurteilungswerte für die **sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung** der Teilflächen ENB-1 und ENB-3 für Arsen und Chrom (VI) im Hinblick auf die inhalative Aufnahme unterschritten, so dass der Gefahrenverdacht für den Wirkungspfad Boden-Mensch für diese Parameter insoweit ausgeräumt wurde.

3.2.3. Prüfung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen

Abgesehen von der grundlegenden Zuordnung von Entnahmebereichen zu relevanten Nutzungsszenarien sind bei ‚Kinderspielflächen‘ (wie beispielsweise auf Kinderspielplätzen) Untersuchungen zu **nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen** nicht zielführend, da bei expliziten ‚Kinderspielflächen‘ grundsätzlich eine Nutzung in vollem Umfang möglich sein sollte. Entsprechend wird im vorliegenden Fall darauf verzichtet und die aktuelle Nutzung wird der sensibelsten planungsrechtlich zulässigen Nutzung gleichgesetzt.

3.2.4. Abschließende Gefährdungsabschätzung des Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt

Die Untersuchung des Spielplatzes ‚Im Stadtpark‘ ergab zwar in der orientierenden Untersuchung für Blei, Chrom und PAK/Benzo(a)pyren eine Überschreitung von Prüfwerten der BBodSchV bzw. für Arsen eine Überschreitung des orientierenden Bodenbeurteilungswertes für ‚Sport- und Bolzplätze‘. Betroffen davon waren dabei die Entnahmebereiche ENB-1 und ENB-4 bzw. ENB-3.

Der Gefahrenverdacht konnte hier allerdings im Rahmen der anschließenden Detailuntersuchung mit Hilfe der Abschätzung bodenabhängiger Expositionsbedingungen ausgeräumt werden. Dies gilt auch für den im Hinblick auf Arsen zunächst bestehenden Verdacht akuter Wirkungen. Die daraufhin durchgeführten temporären Maßnahmen zur Gefahrenabwehr konnten dementsprechend wieder aufgehoben werden.

Für den Entnahmebereich ENB-2 konnte der Gefahrenverdacht bereits im Rahmen der orientierenden Untersuchung ausgeräumt werden.

Eine Differenzierung zwischen aktueller und planungsrechtlich zulässiger Nutzung wird im vorliegenden Fall nicht vorgenommen, da bei expliziten ‚Kinderspielflächen‘ grundsätzlich eine Nutzung in vollem Umfang möglich sein sollte, vorausgesetzt allerdings die Beibehaltung der differenzierten Teilflächennutzungen.

Bei einer (derzeit nicht erkennbaren) Umgestaltung der Teilflächen würde ggf. eine Neubewertung erforderlich. Dies sollte den zuständigen Fachämtern und -behörden entsprechend mitgeteilt werden.

Literaturverzeichnis

DELSCHEN, T.; BERTGES, W.-D.; LEISNER-SAABER, J. (2006): Bewertung von Schadstoffbelastungen auf Sport- und Bolzplätzen nach Maßstäben des Bodenschutzes. In: Bodenschutz 2/2006, S. 44–48.

UBA (Umweltbundesamt) (Hrsg.) (1999ff): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. Erich Schmidt Verlag, Loseblattsammlung 1999 mit Ergänzungen, Berlin.

**Arbeitshilfe zur Expositionsabschätzung
in der Detailuntersuchung
für den Wirkungspfad Boden-Mensch**

**Anhang 4
Fallbeispiel B: Hausgarten**

Dezember 2023

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
1. Erfassung	1
1.1. Anhaltspunkte / Verdachtsmomente	1
1.2. Standortbeschreibung	1
2. Orientierende Untersuchung	3
2.1. Untersuchungskonzept	4
2.2. Probennahme und Analytik	4
2.3. Ergebnisse für die Wirkungspfade Boden-Mensch/Direktkontakt und Boden-Nutzpflanze-Mensch	5
2.4. Beurteilung der Ergebnisse / Hinreichender Gefahrenverdacht	6
3. Detailuntersuchung	7
3.1. Überprüfung der zutreffenden Nutzungsszenarien inklusive der relevanten Wirkungs- und Aufnahmepfade	7
3.2. Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt	8
3.2.1. Festlegung des Prüfbedarfs	8
3.2.2. Prüfung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen	9
3.2.3. Prüfung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen	11
3.2.4. Abschließende Gefährdungsabschätzung des Wirkungspfades Boden-Mensch/Direktkontakt	13
3.3. Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch	13
3.3.1. Festlegung des Prüfbedarfs	13
3.3.2. Prüfung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen	14
3.3.3. Prüfung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen	14
3.3.4. Abschließende Gefährdungsabschätzung des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze-Mensch	15
3.4. Integrative Betrachtung der Wirkungspfade Boden-Mensch/Direktkontakt und Boden-Nutzpflanze-Mensch	16
3.5. Zusammenfassung der abschließenden Gefährdungsabschätzung	18
Literaturverzeichnis	18

Tabellenverzeichnis

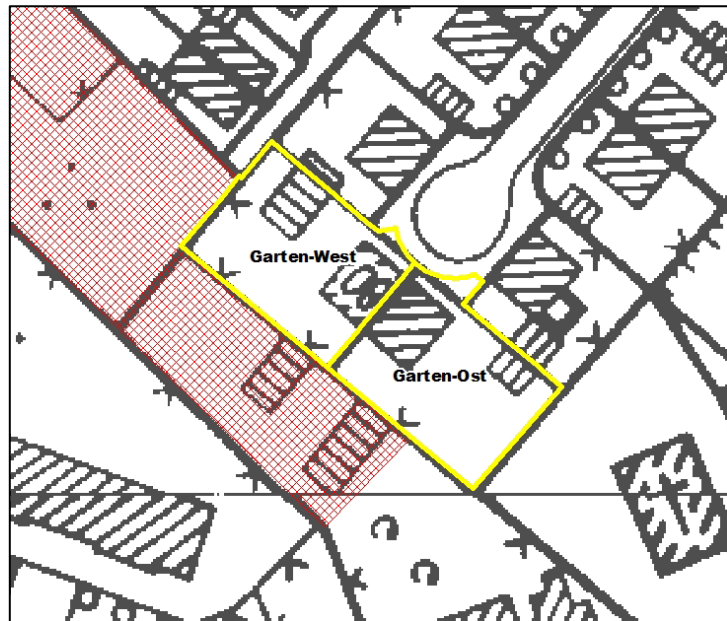
Tabelle A1:	Ergebnisse der Bodenfeststoffuntersuchungen (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Gehalte) aus den oberflächennahen Mischproben (in mg/kg TM).....	5
Tabelle A2:	Auswahl der am Standort relevanten Nutzungsszenarien und Wirkungspfade (vgl. <i>Arbeitshilfe Tabelle 1</i>).....	7
Tabelle A3:	Beurteilungsbestimmende Aufnahmepfade für die relevanten Schadstoffe (vgl. <i>Arbeitshilfe Tabelle 2</i>).....	8
Tabelle A4:	Untersuchungen zur Abschätzung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen.....	9
Tabelle A5:	Ergebnisse der Detailuntersuchung (in mg/kg TM)	9
Tabelle A6:	Beurteilungswert Quecksilber _{anorg} (in mg/kg TM).....	10
Tabelle A7:	Beurteilungswerte für die Resorptionsverfügbarkeit (in mg/kg TM).....	10
Tabelle A8:	Auswertung der resorptionsverfügbaren Gehalte (in mg/kg TM).....	11
Tabelle A9:	Berechnung der täglichen Bodenaufnahmemenge im Garten Ost (in g/d).....	12

1. Erfassung

1.1. Anhaltspunkte / Verdachtsmomente

Auf einem gewerblich genutzten Grundstück wurden im Rahmen von Bodenuntersuchungen anlässlich eines geplanten Bodenaushubs (Entsorgungsanalytik) erhöhte Gehalte an Antimon, Blei und Quecksilber festgestellt.

Parallel zu den Feststoffuntersuchungen hatte der Eigentümer des Gewerbegrundstücks aufgrund der gewerblichen Vornutzung vorsorglich Bodenluftuntersuchungen durchgeführt. Die dabei festgestellten Gehalte an flüchtigen Komponenten wie BTEX, LCKW waren unauffällig.



Eine aufgrund der Auffälligkeiten vorgenommene Luftbild- und Grundkartenauswertung bestätigte, dass sowohl das betroffene Gewerbegrundstück als auch zwei angrenzende Wohngrundstücke in der Vergangenheit aufgehöhht wurden. Allerdings ließ sich nicht aufklären, woher das damalige Aufhöhungsmaterial stammte, d. h. welcher Quelle die festgestellten Bodenbelastungen zuzuordnen waren. Daraufhin stellte sich die Frage, ob auch eine Belastung der beiden nördlich angrenzenden, wohnbaulich genutzten Grundstücke gegeben ist.

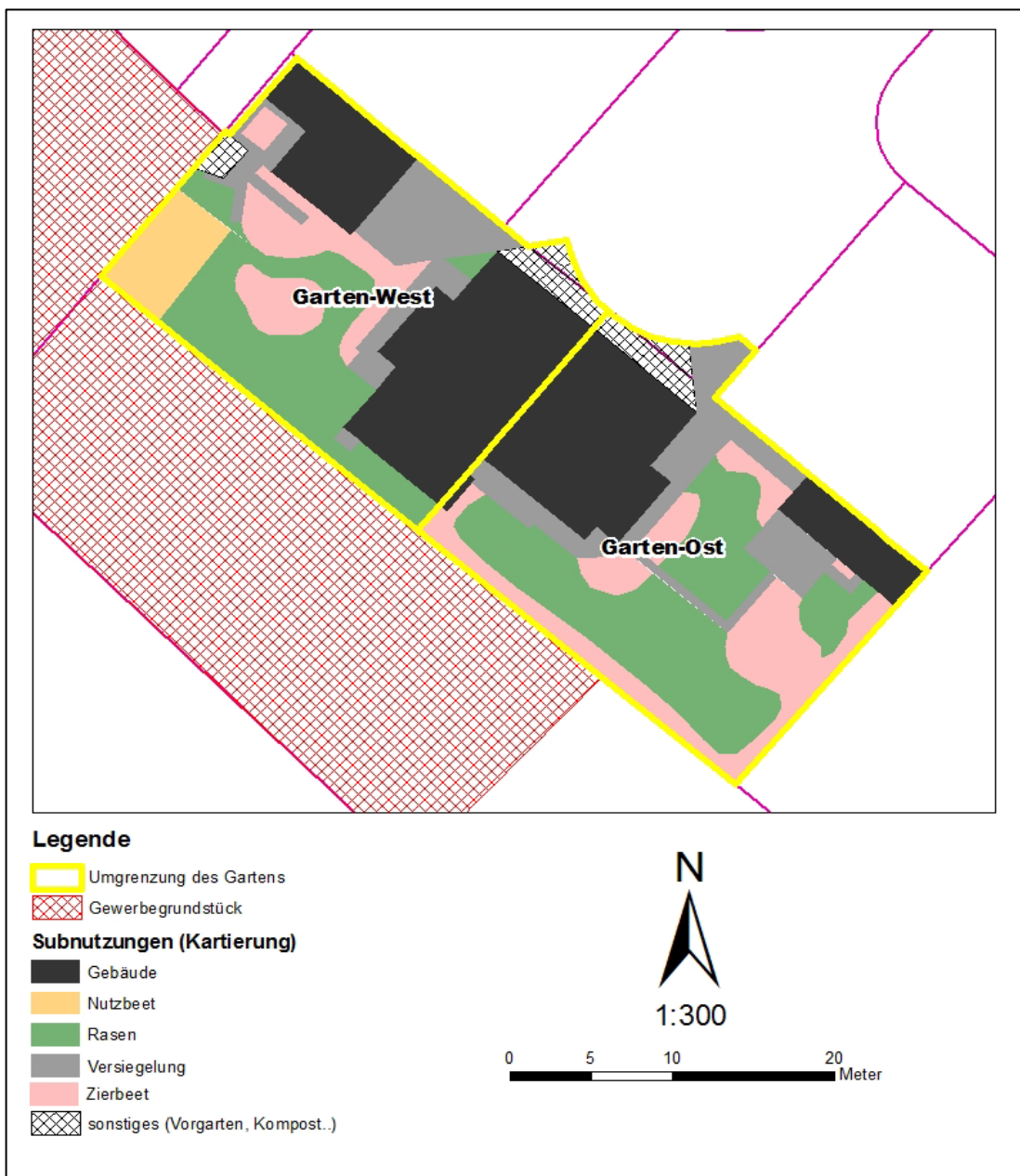
Eine aufgrund der Auffälligkeiten vorgenommene Luftbild- und Grundkartenauswertung bestätigte, dass sowohl das betroffene Gewerbegrundstück als auch zwei angrenzende Wohngrundstücke in der Vergangenheit aufgehöhht wurden. Allerdings ließ sich nicht aufklären, woher das damalige Aufhöhungsmaterial stammte, d. h. welcher Quelle die festgestellten Bodenbelastungen zuzuordnen waren. Daraufhin stellte sich die Frage, ob auch eine Belastung der beiden nördlich angrenzenden, wohnbaulich genutzten Grundstücke gegeben ist.

1.2. Standortbeschreibung

Bei den beiden betrachteten Grundstücken handelt es sich um Gärten mit jeweils einer Doppelhaushälfte. Das westliche Grundstück umfasst eine Fläche von ca. 650 m², das östliche Grundstück eine Fläche von ca. 700 m².

Neben den überbauten Flächen und weiteren versiegelten Flächen bestehen die Grundstücke im Wesentlichen aus Rasenflächen, Zier- und Nutzbeeten. Auf dem **westlichen Grundstück** lebt ein Paar mit Kind. Es werden Nutzpflanzen angebaut. Das **östliche Grundstück** bewohnt ein Rentnerpaar. Ein Nutzbeet fehlt dort.

Garten West	
	
Nutzbeet	Rasen, Zierbeet, Schaukel
	
Rasen, Zierbeet, Pflasterung	Zierbeet, Rasen, Schaukel
Garten Ost	
	
Pflasterung, Zierbeet	Rasen, Zierbeet
	
Rasen, Zierbeet	Rasen, Zierbeet



2. Orientierende Untersuchung

Aufgrund der vorliegenden Anhaltspunkte für eine schädliche Bodenveränderung wurden die beiden Wohngrundstücke zunächst einer orientierenden Untersuchung unterzogen.

2.1. Untersuchungskonzept

Für die beiden Grundstücke wurde das Nutzungsszenario ‚Hausgärten‘ und dabei die Wirkungspfade Boden-Mensch/Direktkontakt sowie Boden-Nutzpflanze-Mensch mit der jeweils sensibelsten Nutzung ‚Kinderspielflächen‘ bzw. ‚Nutzgärten‘ als maßgeblich eingeschätzt. Das Szenario beinhaltet auch eine anzunehmende Kombination aus beiden Wirkungspfaden (integrative Betrachtung). Abgesehen von den versiegelten und überbauten Flächen sowie den nur untergeordnet nutzbaren Vorgärten waren die übrigen Teilflächen des jeweiligen Gartens zu untersuchen. Eine Unterteilung des jeweiligen Gartens in verschiedene Entnahmebereiche wurde entsprechend § 22 Absatz 3 und 4 BBodSchV nicht vorgenommen, da planungsrechtlich in allen Gartenbereichen intensive Kinderspielaktivitäten sowie Nutzpflanzenanbau zulässig sind und keine Hinweise auf eine heterogene Belastung der Fläche vorlagen (vgl. § 19 Absatz 4 BBodSchV).

2.2. Probennahme und Analytik

Die Beprobung erfolgte gemäß den methodischen Vorgaben der BBodSchV. Die Bodenproben wurden schichtbezogen mit der Schlitzsonde (Ø 36 mm) für die Tiefenstufen 0–10 cm, 10–30 cm und 30–60 cm gewonnen. Da keine klare Trennung von (humosem) Ober- und Unterboden vorgenommen werden konnte, wurden ausschließlich die Tiefenbereiche nach Anlage 3 Tabelle 3 der BBodSchV beprobt. Es sollte eine kombinierte Beprobung für beide Wirkungspfade (Boden-Mensch/Direktkontakt und Boden-Nutzpflanze-Mensch) erfolgen. Es wurde Material aus 20 Einzeleinstichen zu jeweils einer Mischprobe vereinigt.

Insgesamt sechs Mischproben (drei tiefenbezogene Mischproben jeweils für den westlichen und den östlichen Garten) wurden im Labor auf die anorganischen Parameter Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink sowie die organischen Parameter polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) – inklusive Benzo(a)pyren – untersucht.

Weiterhin analysiert wurden die pflanzenverfügbaren Gehalte für Blei und Cadmium im Ammoniumnitratextrakt (AN) sowie der pH-Wert des Bodens. Die Analytik erfolgte dabei zusammenfassend für die Tiefenstufe 0–30 cm (Mischung des Probenmaterials der Probe_{0-10 cm} und Probe_{10-30 cm} im Verhältnis 1:2).

Verwendet für die Analytik wurde die Bodenfraktion < 2 mm.

2.3. Ergebnisse für die Wirkungspfade Boden-Mensch/Direktkontakt und Boden-Nutzpflanze-Mensch

Die folgende Tabelle enthält die im Rahmen der orientierenden Untersuchung ermittelten Gesamtgehalte und pflanzenverfügbaren Gehalte (im Ammoniumnitratextrakt) in den Bodenmischproben. Diese Gehalte werden den Prüf- und Maßnahmenwerten der jeweils sensibelsten Nutzung („Kinderspielflächen“ bzw. „Nutzgärten“) gegenübergestellt.

Tabelle A1: Ergebnisse der Bodenfeststoffuntersuchungen (Gesamtgehalte und pflanzenverfügbare Gehalte) aus den oberflächennahen Mischproben (in mg/kg TM)

Garten West					
	Prüfwerte Kinderspielflächen	Prüf- / Maßnahmenwerte Nutzgärten ¹	W-1	W-2	W-3
			0–10 cm	10–30 cm	30–60 cm
Antimon	50	---	75	26	30
Arsen	25	200	18	13	12
Blei	200	---	310	180	190
Cadmium	10 / 2**	---	3,5**	1,9	0,5
Chrom _{gesamt}	200	---	27	25	23
Kupfer	---	---	18	18	17
Nickel	70	---	21	20	20
Quecksilber _{gesamt}	10	5	12	4,9	2,3
Zink	---	---	193	190	196
PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren	0,50	---	0,10	0,09	0,20
Benzo(a)pyren	---	1			
Blei (AN)	---	0,1	0,08*		0,07
Cadmium (AN)	---	0,04 / 0,1	0,05*		0,03
pH-Wert	---	---	6,5*		6,3

Garten Ost					
	Prüfwerte Kinderspielflächen	Prüf- / Maßnahmenwerte Nutzgärten ¹	O-1	O-2	O-3
			0–10 cm	10–30 cm	30–60 cm
Antimon	50	---	78	52	26
Arsen	25	200	21	18	17
Blei	200	---	360	280	195
Cadmium	10 / 2**	---	1,2	0,9	0,6
Chrom _{gesamt}	200	---	27	31	25
Kupfer	---	---	18	24	19
Nickel	70	---	20	20	19
Quecksilber _{gesamt}	10	5	4,8	4,2	5,3
Zink	---	---	191	150	201
PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren	0,50	---	0,18	0,30	0,20
Benzo(a)pyren	---	1			
Blei (AN)	---	0,1	0,09*		0,13
Cadmium (AN)	---	0,04 / 0,1	0,03*		0,01
pH-Wert	---	---	6,3*		6,4

¹ Die Prüfwerte gelten für die Beurteilung der Schadstoffgehalte in Nutzgärten in der Bodentiefe 0-30 cm. Für größere Bodentiefen gelten nach § 15 BBodSchV die 1,5-fachen Werte

--- Kein Prüf- oder Maßnahmenwert definiert

* Bestimmt an der gewichteten Mischprobe 0–10 cm und 10–30 cm Tiefe

** Integrativ für Haus- und Kleingärten

Orange: Überschreitung des Prüfwertes für Kinderspielflächen bzw. des Prüf-/Maßnahmenwertes für Nutzgärten, Gefahrenverdacht für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt bzw. Boden-Nutzpflanze-Mensch nicht ausgeräumt

2.4. Beurteilung der Ergebnisse / Hinreichender Gefahrenverdacht

Im Fall des Gartens West kann der Gefahrenverdacht hinsichtlich Antimon, Blei und Quecksilber in Bezug auf den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (Nutzungsszenario ‚Kinderspielflächen‘) nicht ausgeräumt werden. Gleiches gilt für Quecksilber und Cadmium in Bezug auf den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch. Für Cadmium wird darüber hinaus auch der integrativ zu betrachtende Prüfwert von 2 mg für Haus- und Kleingärten überschritten.

Für den **Garten Ost** kann der Gefahrenverdacht für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (Nutzungsszenario ‚Kinderspielflächen‘) im Hinblick auf Antimon und Blei nicht ausgeräumt werden. Für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch sind hingegen keine Überschreitungen von Prüf- bzw. Maßnahmenwerten festzustellen.

3. Detailuntersuchung

3.1. Überprüfung der zutreffenden Nutzungsszenarien inklusive der relevanten Wirkungs- und Aufnahmepfade

Aufgrund der im Rahmen der orientierenden Untersuchung festgestellten Prüfwertüberschreitungen sind weitergehende Sachverhaltsermittlungen im Rahmen der Detailuntersuchung inklusive einer Expositionsabschätzung notwendig. Soweit nicht bereits im Rahmen der orientierenden Untersuchungen berücksichtigt, sind die zu betrachtenden Nutzungsszenarien inklusive der relevanten Wirkungs- und Aufnahmepfade festzulegen.

Da es in beiden Gärten durchaus möglich ist, dass (zukünftig) Kinderspiel und ein Anbau von Nutzpflanzen stattfinden, ist unabhängig von der aktuellen Nutzung das Nutzungsszenario ‚Hausgärten‘ und die damit einhergehenden sensibelsten planungsrechtlich zulässigen Nutzungen (‚Kinderspielflächen‘ bzw. ‚Nutzgärten‘) zu berücksichtigen. Für die Bewertung sind daher im vorliegenden Fall folgende Szenarien und Wirkungspfade relevant:

Tabelle A2: Auswahl der am Standort relevanten Nutzungsszenarien und Wirkungspfade (vgl. Arbeitshilfe Tabelle 1)

Nutzungsszenarien	Wirkungspfade			
	Boden-Mensch/ Direktkontakt	Boden-Bodenluft- Mensch	Boden-Nutz- pflanze-Mensch	Boden-(Futterpflanze-) Nutztier-Mensch
Haus- und Kleingärten	X	-	X	X*
X Wirkungspfad am Standort relevant - Wirkungspfad am Standort nicht relevant * Der Wirkungspfad Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch wird im vorliegenden Praxisbeispiel nicht weiter ausgeführt, da geeignete Beurteilungsmaßstäbe bisher fehlen bzw. nur hilfsweise herangezogen werden können (vgl. <i>Arbeitshilfe Kapitel 8</i>)				

Folgende Wirkungspfade und Aufnahmepfade sind schadstoffspezifisch relevant:

Tabelle A3: Beurteilungsbestimmende Aufnahmepfade für die relevanten Schadstoffe (vgl. Arbeitshilfe Tabelle 2)

Wirkungspfade	Aufnahmepfade			
	oral	inhalativ (Staub)	inhalativ (Gas)	dermal
Boden-Mensch/Direktkontakt	Antimon (W, O) Blei (W, O) Cadmium (W) Quecksilber* (W)	-		-
Boden-Bodenluft-Mensch			-	
Boden-Nutzpflanze-Mensch	Cadmium (W) Quecksilber* (W)			
Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch	**			

dunkelgrau: Aufnahmepfad für den Wirkungspfad nicht relevant
 - Aufnahmepfad am Standort nicht relevant
 W = **Garten West**; O = **Garten Ost**
 * Unter Beachtung der Bindungsform
 ** Der Wirkungspfad Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch wird im vorliegenden Praxisbeispiel nicht weiter ausgeführt, da geeignete Beurteilungsmaßstäbe bisher fehlen bzw. nur hilfsweise herangezogen werden können (vgl. *Arbeitshilfe Kapitel 8*)

Zusätzlich ist im Hinblick auf Cadmium eine integrative Betrachtung für die Wirkungspfade Boden-Mensch/Direktkontakt und Boden-Nutzpflanze-Mensch erforderlich.

3.2. Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt

3.2.1. Festlegung des Prüfbedarfs

Im Fall des **Gartens West** ist der Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt für die relevanten Parameter Antimon, Blei und Quecksilber in Bezug auf den oralen Aufnahmepfad zu prüfen. Bei Quecksilber ist zu beachten, dass hier die Bindungsform (anorganisch bzw. organisch) beurteilungsrelevant ist. Für Cadmium besteht weiterer Prüfbedarf zur Beurteilung des integrativen Pfads.

Für den **Garten Ost** umfasst die Detailuntersuchung bezüglich der **sensibelsten planungsrechtlich zulässigen Nutzung** weitere Prüfungen für Antimon und Blei im Hinblick auf den oralen Aufnahmepfad.

3.2.2. Prüfung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen

Die zu betrachtenden Stoffe und Aufnahmepfade bestimmen die Untersuchungen zur Prüfung der **bodenabhängigen Expositionsbedingungen**.

Tabelle A4: Untersuchungen zur Abschätzung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen

Probe	Parameter	Untersuchungen
Garten West		
W-1	Antimon, Blei, Cadmium	Resorptionsverfügbarkeit
W-1	Quecksilber	Bindungsform (organisch / anorganisch)
Garten Ost		
O-1	Antimon, Blei	Resorptionsverfügbarkeit
O-2*	Antimon, Blei	Resorptionsverfügbarkeit
* Untersuchung ggf. verzichtbar (Untersuchung der höher belasteten Vergleichsprobe O-1)		

Eine Probe des **westlichen Gartens** sowie eine Probe des **östlichen Gartens** wurden im Labor im Hinblick auf die Resorptionsverfügbarkeit untersucht. Außerdem wurde in einer Probe die Bindungsform durch Bestimmung der Gehalte an organischem Quecksilber untersucht. Sofern Quecksilber überwiegend anorganisch gebunden vorkommt, ist auch hier eine Überprüfung der Resorptionsverfügbarkeit möglich.

Tabelle A5: Ergebnisse der Detailuntersuchung (in mg/kg TM)

Probe	Parameter	Gesamtgehalt (< 2 mm)	Resorptionsverfügbare Gehalt (< 2 mm)
Garten West			
W-1	Antimon	75	41
W-1	Blei	310	110
W-1	Cadmium	3,5	1,7
W-1	Quecksilber _{gesamt}	12	n. b.
W-1	Quecksilber _{org}	< 0,001	n. b.
Garten Ost			
O-1	Antimon	78	37
O-1	Blei	360	155
n. b. = nicht bestimmt			

Bindungsform:

Bei der Untersuchung der Bindungsform des Quecksilbers in der Probe (W-1) mit Prüfwertüberschreitung wurden allenfalls geringe Gehalte an **organisch gebundenem Quecksilber** ermittelt (< 0,001 mg/kg). Insofern ist davon auszugehen, dass es sich bei den ermittelten 12 mg/kg Quecksilber (weitgehend) um anorganisches Quecksilber handelt.

Zur abschließenden Beurteilung der sensibelsten planungsrechtlich zulässigen Nutzung findet daher der spezifizierte Prüfwert für **anorganisches Quecksilber** Anwendung (vgl. *Arbeitshilfe Tabelle 6*).

Tabelle A6: Beurteilungswert Quecksilber_{anorg} (in mg/kg TM)

	Spezifizierter Prüfwert ‚Bindungsform‘ Hausgärten / Kinderspielflächen
Quecksilber (anorganisch)	25

Der in der betreffenden Probe ermittelte Gesamtgehalt an (anorganischem) Quecksilber von 12 mg/kg liegt deutlich unter diesem Wert. Damit wurde der von Quecksilber ausgehende Gefahrenverdacht auch für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung im Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt für den **Garten West** ausgeräumt.

Resorptionsverfügbarkeit:

Für Antimon und Blei ermöglicht die Bestimmung der Resorptionsverfügbarkeit nach DIN 19738 die weitergehende Gefahrenbeurteilung über den oralen Aufnahmepfad (Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt). Für Cadmium dienen diese Untersuchungen dazu, eine integrative Betrachtung der Wirkungspfade Boden-Mensch/Direktkontakt und Boden-Nutzpflanze-Mensch zu ermöglichen.

Grundlage für die Beurteilungswerte für gemessene, resorptionsverfügbare Gehalte nach DIN 19738 (< 2 mm) bilden in der Regel die Prüfwerte der BBodSchV. Ausnahmen sind in der *Arbeitshilfe Kapitel 5.2.4* beschrieben (vgl. *Arbeitshilfe Gleichung 1* und *Kasten Ausnahmen* sowie UBA 1999ff).

Tabelle A7: Beurteilungswerte für die Resorptionsverfügbarkeit (in mg/kg TM)

	BW _{SRV} Hausgärten / Kinderspielflächen
Antimon	50
Blei	70
Cadmium	10

Die im Rahmen der Detailuntersuchung ermittelten resorptionsverfügbaren Gehalte wurden den Beurteilungswerten für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung BW_{SRV} (‚Hausgärten‘ / ‚Kinderspielflächen‘) gegenübergestellt. Alternativ könnte der EQ_{RV} berechnet und dem BW_{gesamt} gegenübergestellt werden (vgl. *Arbeitshilfe Gleichung 2* und *4*).

Tabelle A8: Auswertung der resorptionsverfügbaren Gehalte (in mg/kg TM)

Probe	Parameter	Gesamtgehalt	RV-Gehalt	BW _{RV}	EQ _{RV}	BW _{gesamt} *
Garten West						
W-1	Antimon	75	41	50	0,55	91
W-1	Blei	310	110	70	0,35	200
W-1	Cadmium	3,5	1,7	10	0,49	20
Garten Ost						
O-1	Antimon	78	37	50	0,47	106
O-1	Blei	360	155	70	0,43	163
<p>Orange: Überschreitung des Beurteilungswertes BW_{RV} (bezogen auf gemessene resorptionsverfügbare Gehalte) bzw. des Beurteilungswertes BW_{gesamt} (bezogen auf gemessene Gesamtgehalte)</p> <p>* zur Berechnung wurde der gerundete EQ_{RV} verwendet</p>						

Für den **Garten West** werden die standortspezifisch abgeleiteten Beurteilungswerte für die **sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung** für die Parameter Antimon und Cadmium unterschritten, so dass der Gefahrenverdacht für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt für diese Stoffe ausgeräumt werden konnte. Für den Parameter Blei wurde für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt dagegen eine Gefahr festgestellt.

Da auch aktuell im gesamten Garten mit (intensiven) Kinderspielaktivitäten zu rechnen ist, gilt dies sowohl für die **sensibelste planungsrechtlich zulässige als auch für die aktuelle Nutzung**. Weitere Prüfschritte zu aktuellen nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen erübrigen sich damit.

Für den **Garten Ost** wurde ebenfalls eine Überschreitung des Beurteilungswertes BW_{RV} für Blei festgestellt. Für das hier betrachtete Nutzungsszenario ‚Hausgärten‘ ist somit unter Berücksichtigung der **sensibelsten planungsrechtlich zulässigen Nutzung** eine Gefahr festzustellen. Es bestehen nun zwei Möglichkeiten: Entweder werden ohne weitere Prüfung Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen ausgesprochen, die auch zukünftig intensive Kinderspielaktivitäten verhindern oder es werden weitere spezifizierende Schritte zur **Prüfung der aktuellen Nutzung** vorgenommen.

3.2.3. Prüfung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen

Für den **Garten West** entfällt die Prüfung nutzungsabhängiger Expositionsbedingungen.

Mit Hilfe von Untersuchungen zu **nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen** war für den **Garten Ost** zu überprüfen, inwieweit der Gefahrenverdacht für die **aktuelle Nutzung** ausgeräumt werden kann oder eine Gefahr festzustellen ist.

Zur Überprüfung wurde das Verfahren zur Abschätzung der aktuellen Bodenaufnahmemenge (falls Kinder sich ggf. gelegentlich im **Garten-Ost** aufhalten) unter Berücksichtigung der Bodenbedeckung herangezogen. Dieses basiert auf der Erfahrung, dass Kinder beim Spielen weniger Boden aufnehmen, wenn der Boden dichter bewachsen oder gar versiegelt und somit weniger zugänglich ist. Auf Grundlage der Nutzungskartierung wurde der **Garten Ost** in Subnutzungen unterschiedlicher Exposition (Zugänglichkeit) differenziert, deren jeweiliger Anteil an der zugänglichen Fläche bestimmt und damit eine – über die gesamte Freifläche gewichtet – gemittelte Bodenaufnahmemenge berechnet (vgl. *Arbeitshilfe Tabellen 7 und 8*).

Tabelle A9: Berechnung der täglichen Bodenaufnahmemenge im Garten Ost (in g/d)

Subnutzung	Bodenaufnahmemenge (in g/d)	Bemerkung	Intensität der Exposition	Fläche (in m ²)	Anteil an zugänglicher Fläche	Gewichtete Bodenaufnahmemenge (in g/d)
Versiegelung, Überbauung*	---	i. d. R. kein Bodenkontakt	Ohne	440		
Rasen	0,1	geschlossene Rasendecke, direkter Kontakt kaum möglich	Gering	140	54 %	0,054
Zierbeete (auch lockere Gehölzbestände)	0,25	offener Boden, direkter Kontakt eingeschränkt möglich	Mittel	120	46 %	0,115
Nutzbeete	0,25	offener Boden, direkter Kontakt eingeschränkt möglich	Mittel	0	0 %	0
Summe (zugänglich)				260	100 %	0,169

* Versiegelte und bebaute Flächen werden bei der Ermittlung der Gesamtfläche nicht mit einbezogen

Mit Hilfe der ermittelten Bodenaufnahmemenge wurde nun der Expositionsquotient EQ_{BA} für den **Garten Ost** berechnet (vgl. *Arbeitshilfe Gleichung 7*).

$$EQ_{BA} = \frac{\text{Bodenaufnahmemenge}_{\text{aktuell}} \text{ (in g/d)}}{\text{Bodenaufnahmemenge}_{\text{Standard Kinderspielfläche}} \text{ (in g/d)}} = \frac{0,169 \text{ g/d}}{0,5 \text{ g/d}} = 0,338$$

Unter Berücksichtigung der aktuellen nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen sowie des ermittelten **Expositionsquotienten (EQ_{BA})** wird für die **aktuelle Nutzung** der **Beurteilungswert BW_{RV}** für Blei abgeleitet (vgl. *Arbeitshilfe Gleichung 10*). Dieser Wert bezieht sich auf resorptionsverfügbare Gehalte (siehe oben). Da für die Aufenthaltshäufigkeit keine abweichenden Einzelfall-Annahmen zu treffen sind, bleibt sie in der folgenden Formel unberücksichtigt ($EQ_{AH} = 1$).

$$BW_{aRV} = \frac{\text{Prüfwert BBodSchV}}{EQ_{BA} * EQ_{AH}} = \frac{BW_{sRV}}{EQ_{BA} * EQ_{AH}} = \frac{70 \text{ mg/kg}}{0,338 * 1} = 207 \text{ mg/kg TM}$$

Der für den **Garten Ost** im oberen Horizont ermittelte Gehalt an resorptionsverfügbarem Blei liegt mit 155 mg/kg unter dem entsprechenden Beurteilungswert für die **aktuelle Nutzung** von 207 mg/kg. Damit wird der Gefahrenverdacht für die aktuelle Nutzung insoweit ausgeräumt.

3.2.4. Abschließende Gefährdungsabschätzung des Wirkungspfades Boden-Mensch/Direktkontakt

Im **Garten West** wurde eine Gefahr für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt sowohl für die sensibelste planungsrechtlich zulässige als auch für die aktuelle Nutzung („Kinderspielflächen“) hinsichtlich des Parameters Blei festgestellt. Hier sind entsprechende Maßnahmen erforderlich.

Im **Garten Ost** konnte der nach der orientierenden Untersuchung weiterhin bestehende Gefahrenverdacht durch eine Expositionsabschätzung für die **aktuelle Nutzung** ausgeräumt werden. Deshalb sind derzeit keine Maßnahmen zur Unterbindung des Direktkontaktes erforderlich. Hinsichtlich der **sensibelsten planungsrechtlich zulässigen Nutzung** („Kinderspielflächen“) wurde in Bezug auf Blei für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt allerdings eine Gefahr festgestellt. Es sind daher Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen zur Festschreibung des Status quo der aktuellen Nutzung zu empfehlen.

3.3. Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch

3.3.1. Festlegung des Prüfbedarfs

Für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch bestand nach den Ergebnissen der orientierenden Untersuchungen für den **Garten West** ein Gefahrenverdacht für Quecksilber. Für Cadmium war die integrative Wirkung der Pfade Boden-Mensch/Direktkontakt und Boden-Nutzpflanze-Mensch zu prüfen. Zudem wurde eine geringfügige Überschreitung des Maßnahmenwertes für Cadmium auf Flächen mit Gemüseanbau in 0–30 cm Tiefe festgestellt.

Für den **Garten Ost** wurden in der orientierenden Untersuchung für diesen Wirkungspfad keine Prüf- oder Maßnahmenwertüberschreitungen festgestellt, so dass weitere Prüfungen hierzu entfallen.

3.3.2. Prüfung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen

Da für beide Gärten bereits aus der orientierenden Untersuchung Ergebnisse zu den pflanzenverfügbaren Gehalten an Blei und Cadmium und ebenso Angaben zum pH-Wert vorlagen, wurden weitergehende Untersuchungen zur Ermittlung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen als nicht zielführend erachtet.

3.3.3. Prüfung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen

Für den Garten West war zu überprüfen, inwieweit der Gefahrenverdacht im Rahmen der Detailuntersuchung ausgeräumt werden kann oder eine Gefahr festzustellen ist. Für eine abschließende Beurteilung wurden zur Überprüfung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen die Anbaubedingungen (Nutzpflanzenspektrum, Anbaufläche pro Person) in dem Garten geprüft. Zur Ableitung der Prüfwerte der BBodSchV wurde standardmäßig eine Anbaufläche von 40 m² pro Person zugrunde gelegt, auf der ein übliches Spektrum verschiedener Nutzpflanzen angenommen wird. Es liegen in diesem Fall keine Hinweise vor, dass besondere Anbauvorlieben bestehen, so dass außer Anbaufläche und Personenanzahl keine weiteren Parameter betrachtet werden müssen. Durch die Ermittlung der Anbaufläche wird somit überprüft, inwieweit die vorliegende Situation von den Standardannahmen abweicht.

Da sich die Größe der derzeitigen Anbaufläche ändern kann, wird zunächst eine theoretische Abschätzung vorgenommen, mit welcher üblichen Anbaufläche in einem solchen Garten zu rechnen wäre (,realistische worst-case-Abschätzung'). Hierfür wird für die Freifläche des Gartens folgende Aufteilung angenommen (vgl. Arbeitshilfe Kapitel 7.3.2): 50 % Rasen, 30 % Zierbeete, 20 % Nutzbeete. Das vorliegende Grundstück ist 650 m² groß, ca. 440 m² sind überbaut und versiegelt, so dass als Freifläche für eine Gartennutzung 260 m² anzusetzen wären. 20 % davon ergeben ca. 50 m² Anbaufläche für Nutzpflanzen, für einen (theoretischen) 2-Personen-Haushalt 25 m² Anbaufläche pro Person.

Für die Abschätzung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch ergibt sich damit folgender Expositionsquotient (vgl. Arbeitshilfe Gleichung 12):

$$EQ_{AF} = \frac{\text{Anbaufläche}_{\text{Einzelfall}} \text{ (in m}^2\text{/Person)}}{\text{Anbaufläche}_{\text{Standard}} \text{ (in m}^2\text{/Person)}} = \frac{25 \text{ m}^2\text{/Person}}{40 \text{ m}^2\text{/Person}} = 0,625$$

Mit Hilfe der *Arbeitshilfe Gleichung 13* kann damit jeweils der einzelfallbezogene Beurteilungswert BW_{Pfi} für die relevanten Parameter abgeleitet werden:

$$BW_{Pfi} = \frac{\text{Prüfwert / Maßnahmenwert BBodSchV}}{EQ_{AF}} = \frac{0,04 \text{ mg/kg}}{0,625} = 0,064 \text{ mg/kg TM für Cadmium (AN)}$$

$$BW_{Pfi} = \frac{\text{Prüfwert / Maßnahmenwert BBodSchV}}{EQ_{AF}} = \frac{5 \text{ mg/kg}}{0,625} = 8 \text{ mg/kg TM für Quecksilber}$$

Der gemessene Cadmiumgehalt von 0,05 mg Cd/kg (Ammoniumnitratextrakt) liegt danach unterhalb des Beurteilungswertes für den Einzelfall BW_{Pfi} von 0,064 mg Cd/kg (AN); der Gefahrenverdacht ist ausgeräumt.

Für Quecksilber wäre hingegen eine Gefahr festgestellt, da der Messwert mit 12 mg Hg/kg den BW_{Pfi} von 8 mg Hg/kg überschreitet. Allerdings werden derzeit im betreffenden Garten lediglich auf einer Fläche von insgesamt 35 m² Nutzpflanzen angebaut, deren Ernte von drei Personen verzehrt wird. Über die oben genannten Gleichungen ergibt sich damit ein EQ_{AF} von 0,292 und für Quecksilber ein BW_{Pfi} von 17,1 mg/kg, so dass die Gefahr für die derzeitige Nutzung ausgeräumt werden kann.

3.3.4. Abschließende Gefährdungsabschätzung des Wirkungspfades Boden-Nutzpflanze-Mensch

Im **Garten West** konnte der nach der orientierenden Untersuchung weiterhin bestehende Gefahrenverdacht für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch durch **Quecksilber** und **Cadmium** bei der derzeitigen Nutzungsintensität ausgeräumt werden. Demzufolge sind derzeit keine Maßnahmen erforderlich. Unter Berücksichtigung einer theoretisch anzunehmenden **Nutzungsintensität** („realistisches worst-case-Szenario“) wäre allerdings im Hinblick auf Quecksilber eine Gefahr **festzustellen**. Bei Änderungen der Nutzung in Richtung größerer Sensibilität (deutliche Vergrößerung der Anbauflächen pro Person) wären Maßnahmen erforderlich. Zur Festlegung geeigneter Maßnahmen würde sich daher anbieten, die maximal tolerable Anbaufläche pro Person zu berechnen und für das Grundstück festzuschreiben (vgl. *Arbeitshilfe Gleichung 14*).

$$AF_{\max} = \frac{\text{Prüfwert / Maßnahmenwert BBodSchV (in mg/kg)}}{\text{Gehalt im Boden (in mg/kg)}} * \text{Anbaufläche}_{\text{Standard}} \text{ (in m}^2\text{/Person)}$$

$$AF_{\max} = \frac{5 \text{ mg/kg}}{12 \text{ mg/kg}} * 40 \text{ m}^2\text{/Person} = 16,7 \text{ m}^2\text{/Person}$$

Bei dem festgestellten Quecksilbergehalt im Boden von 12 mg/kg wäre eine Anbaufläche von 16 m² pro Person maximal tolerabel.

Im Falle der gemessenen Cadmiumgehalte ist darüber hinaus eine integrative Betrachtung der Wirkungspfade Boden-Nutzpflanze-Mensch und Boden-Mensch/Direktkontakt in ‚Hausgärten‘ obligat, so dass hier die Ermittlung der Schadstoffzufuhrmenge notwendig wird.

3.4. Integrative Betrachtung der Wirkungspfade Boden-Mensch/Direktkontakt und Boden-Nutzpflanze-Mensch

Da Cadmium sowohl über den Direktpfad als auch über den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch aufgenommen wird, ist bei Überschreitung des Prüfwertes für Haus- und Kleingärten auch eine integrative Betrachtung der Wirkungspfade erforderlich.

Für den **Garten West** wurden daher die Schadstoffzufuhren über die beiden Wirkungspfade ermittelt (vgl. *Arbeitshilfe Gleichung 15* und *16*) und integrativ betrachtet (vgl. *Arbeitshilfe Gleichung 17* und *18*).

Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt („Kinderspielflächen“):

Schadstoffzufuhr_{Direktpfad} (in µg/kg KG*d)

$$= \text{RV-Gehalt (in mg/kg Boden)} * \text{Bodenaufnahme}_{\text{Standard Kinderspielfläche}} \text{ (in g Boden/kg KG*d)}$$

$$= 1,7 \text{ mg Cd/kg} * \frac{0,5 \text{ g Boden/d} * 240 \text{ d/a}}{365 \text{ d/a} * 10 \text{ kg KG}} = 1,7 \text{ mg Cd/kg} * 0,033 \text{ g Boden/kg KG*d}$$

$$= 0,056 \text{ µg/kg KG*d für Cadmium}$$

Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch:

Schadstoffzufuhr_{Pfl} (in µg/kg KG*d)

$$= (VM_{\text{hoch}} * F_{\text{TM}} * EQ_{\text{AF}} * C_{\text{Pfl, hoch}}) + (VM_{\text{mittel}} * F_{\text{TM}} * EQ_{\text{AF}} * C_{\text{Pfl, mittel}}) + (VM_{\text{niedrig}} * F_{\text{TM}} * EQ_{\text{AF}} * C_{\text{Pfl, niedrig}})$$

$$= (0,17 \text{ g FM/kg KG*d} * 0,1 * 0,625 * 10^{1,791 + 0,842 * \log 0,05 \text{ mg/kg}}) + (0,66 \text{ g FM/kg KG*d} * 0,1 * 0,625 * 10^{1,128 + 0,857 * \log 0,05 \text{ mg/kg}}) + (1,36 \text{ g FM/kg KG*d} * 0,1 * 0,625 * 10^{-0,35 + 0,208 * \log 0,05 \text{ mg/kg}})$$

$$= 0,0527 \text{ µg/kg KG*d} + 0,0425 \text{ µg/kg KG*d} + 0,0204 \text{ µg/kg KG*d} = 0,1156 \text{ µg/kg KG*d für Cadmium}$$

mit:

$VM_{\text{hoch / mittel / niedrig}}$ (in g FM/kg KG*d) = Verzehrsmenge hoch- / mittel- / niedrigerer Pflanzen (schadstoffabhängig; vgl. *Anhang 3: Tabelle A13* für Standardannahmen bzw. *Tabelle A14*, wenn besondere Anbaubedingungen vorherrschen)

F_{TM}	= 0,1 (Faktor zur Umrechnung von Frisch- auf Trockenmasse; vgl. <i>Anhang 3</i>)
EQ_{AF}	= 0,625 (Expositionsquotient Anbaufläche für den Einzelfall)
$C_{Pfl, \text{hoch / mittel / niedrig}}$ (in $\mu\text{g/g TM}$)	= Schadstoffgehalt in der Pflanze (hoch- / mittel- / niedrig-anreichernd)
C_{Pfl} kann durch Untersuchungen ermittelt oder auch abgeschätzt werden, z. B. mit Hilfe von Transferfunktionen (vgl. <i>Anhang 3: Gleichung A8</i>).	
Für diesen Einzelfall ergibt sich danach beispielsweise:	
$C_{Pfl, \text{hoch}}$ (in $\mu\text{g/g TM}$) = $10^{1,791 + 0,842 \cdot \log C_{B-AN}}$	
mit:	
C_{B-AN} (in mg/kg)	= 0,05 (gemessener Bodengehalt im Ammoniumnitratextrakt)

Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt und Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch (integrativ):

Schadstoffzufuhr _{integrativ} = Schadstoffzufuhr _{Direktpfad} + Schadstoffzufuhr _{Pfl}	
Schadstoffzufuhr _{integrativ} = 0,056 $\mu\text{g/kg KG}^*\text{d}$ + 0,1156 $\mu\text{g/kg KG}^*\text{d}$ = 0,1716 $\mu\text{g/kg KG}^*\text{d}$ für Cadmium	
Gemäß <i>Arbeitshilfe Gleichung 18</i> kann die integrative Schadstoffzufuhr wie folgt beurteilt werden:	
Schadstoffzufuhr (in $\mu\text{g/kg KG}^*\text{d}$) $\leq \frac{\text{TRD} \cdot (F_{Gef} - \text{Standardwert Hintergrund}) \text{ (in } \mu\text{g/kg KG}^*\text{d})}{\text{Resorptionsquote}}$	
Schadstoffzufuhr (in $\mu\text{g/kg KG}^*\text{d}$) $\leq \frac{0,025 \mu\text{g/kg KG}^*\text{d} \cdot (1,4 - 0,8)}{0,05} = 0,3 \mu\text{g/kg KG}^*\text{d}$	
mit:	
TRD (in $\mu\text{g/kg KG}^*\text{d}$)	= tolerierbare resorbierte Dosis (0,025, siehe Stoffdatenblatt zu Cadmium in <i>Anhang 2</i>)
F_{Gef}	= Gefahrenfaktor (1,4 ¹ , siehe Stoffdatenblatt zu Cadmium in <i>Anhang 2</i>)
Standardwert Hintergrund	= 0,8
Resorptionsquote	= 5 % = 0,05 (siehe Stoffdatenblatt zu Cadmium in <i>Anhang 2</i>)

Die für Cadmium anzusetzende maximal zulässige Schadstoffzufuhr (über den oralen Aufnahmepfad) von 0,3 $\mu\text{g/kg KG}^*\text{d}$ ¹ wird im vorliegenden Einzelfall mit 0,17 $\mu\text{g/kg KG}^*\text{d}$ nicht überschritten.

¹ Zur Ableitung des integrativen Prüfwertes wurde für Cadmium ein Gefahrenfaktor (F_{Gef}) von 1,4 verwendet, vgl. DELSCHEN (1998). Dieser wird für das vorliegende Fallbeispiel übernommen. Ein F_{Gef} von 2, wie er in UBA (1999ff) aufgeführt wird, ergäbe eine tolerierbare Schadstoffzufuhr von 0,6 $\mu\text{g/kg KG}^*\text{d}$.

3.5. Zusammenfassung der abschließenden Gefährdungsabschätzung

Für den **Garten West** ist die Gefahr für den **Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt** sowohl für die sensibelste planungsrechtlich zulässige als auch für die aktuelle Nutzung (‚Hausgärten‘ / ‚Kinderspielflächen‘) hinsichtlich des Parameters Blei festgestellt. Hier sind entsprechende Maßnahmen erforderlich. Für den **Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch** ist im Falle eines ‚realistischen worst-case-Szenarios‘ bezüglich einer üblicherweise anzunehmenden Anbaufläche für Nutzpflanzen durch Überschreitungen des einzelfallbezogenen Beurteilungswertes für Quecksilber eine Gefahr festzustellen. Die derzeitige Nutzung der Fläche mit einem Nutzpflanzenanbau in geringem Umfang ist jedoch ohne Gefahr möglich. Maximal tolerabel wäre eine Anbaufläche von 16 m² pro Person. Bezüglich Cadmium konnte der Gefahrenverdacht ausgeräumt werden. Da mit sinkendem pH-Wert das Risiko der Schadstoffaufnahme durch Nutzpflanzen steigt, sind jedoch unabhängig davon Empfehlungen zur Anhebung des pH-Wertes sinnvoll. Die integrative Betrachtung der Wirkungspfade hat für Cadmium den Gefahrenverdacht ebenfalls ausgeräumt. Da bei Änderungen der Nutzung beispielsweise durch Vergrößerung der Anbauflächen ggf. weitere Maßnahmen erforderlich werden, sind entsprechende Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen notwendig.

Für den **Garten Ost** wurde eine Gefahr für den **Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt** für Blei für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung als ‚Hausgarten‘ festgestellt. Unter aktuellen Nutzungsbedingungen wurde der Gefahrenverdacht ausgeräumt. Es werden Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen zur Festschreibung des Status quo der aktuellen Nutzung empfohlen, da bei Änderungen der Nutzung in Richtung größerer Sensibilität ggf. Maßnahmen erforderlich werden bzw. im Falle einer Umgestaltung (Änderung der Subnutzungsanteile) eine Neubewertung notwendig wäre. Für den **Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch** konnte der Gefahrenverdacht ausgeräumt werden.

Literaturverzeichnis

- DELSCHEN, T. (1998): Pfadintegrierte Bewertung von Bodenbelastungen in Haus- und Kleingärten – Teil 2: Prüfwerte für das Nutzungsszenario „Wohngärten“. In: Altlasten spektrum 6/1998, S. 336–342.
- UBA (Umweltbundesamt) (Hrsg.) (1999ff): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. Erich Schmidt Verlag, Loseblattsammlung 1999 mit Ergänzungen, Berlin.

**Arbeitshilfe zur Expositionsabschätzung
in der Detailuntersuchung
für den Wirkungspfad Boden-Mensch**

**Anhang 4
Fallbeispiel C: LCKW-Schaden**

Dezember 2023

Fallbeispiel C: LCKW-Schaden (ehemalige Großreinigung)

	<p>Erfassung</p> <ul style="list-style-type: none">⇒ Anhaltspunkte / Verdachtsmomente⇒ Standortbeschreibung	
	<p>Orientierende Untersuchung</p>	
	<ul style="list-style-type: none">⇒ Hinreichender Gefahrenverdacht (Boden-Mensch/Direktkontakt) (Boden-Bodenluft-Mensch)	
	<p>Detailuntersuchung</p> <ul style="list-style-type: none">⇒ Expositionsabschätzung (Boden-Mensch/Direktkontakt) (Boden-Bodenluft-Mensch)	
	<ul style="list-style-type: none">⇒ Abschließende Gefährdungsabschätzung (Boden-Mensch/Direktkontakt) (Boden-Bodenluft-Mensch)	

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
1. Erfassung	1
1.1. Anhaltspunkte / Verdachtsmomente	1
1.2. Standortbeschreibung	2
2. Orientierende Untersuchung	2
2.1. Untersuchungskonzept	2
2.2. Probennahme und Analytik	3
2.3. Geologie und Hydrologie	5
2.4. Ergebnisse für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch	6
2.5. Ergebnisse für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (nur KiTa-Bereich).....	7
2.6. Beurteilung der Ergebnisse / Hinreichender Gefahrenverdacht.....	7
3. Detailuntersuchung	8
3.1. Überprüfung der zutreffenden Nutzungsszenarien inklusive der relevanten Wirkungs- und Aufnahmepfade	8
3.2. Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt	9
3.2.1. Festlegung des Prüfbedarfs.....	9
3.2.2. Prüfung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen	9
3.2.3. Prüfung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen.....	11
3.2.4. Abschließende Gefährdungsabschätzung des Wirkungspfades Boden- Mensch/Direktkontakt.....	11
3.3. Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch.....	12
3.3.1. Festlegung des Prüfbedarfs.....	12
3.3.2. Prüfung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen	12
3.3.3. Prüfung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen.....	13
3.3.4. Innenraumluftmessungen	14
3.3.5. Abschließende Gefährdungsabschätzung des Wirkungspfades Boden-Bodenluft- Mensch.....	16
Literaturverzeichnis	17

Tabellenverzeichnis

Tabelle A1:	Ergebnisse der Bodenfeststoffuntersuchungen aus den Sondierungen (in mg/kg TM).....	6
Tabelle A2:	Ergebnisse der Bodenluftuntersuchungen, Mittelwerte aus zwei Wiederholungsmessungen (in mg/m ³).....	7
Tabelle A3:	Ergebnisse der Bodenfeststoffuntersuchungen (< 2 mm) aus den oberflächennahen Mischproben (in mg/kg TM).....	7
Tabelle A4:	Auswahl der am Standort relevanten Nutzungsszenarien und Wirkungspfade (vgl. <i>Arbeitshilfe Tabelle 1</i>).....	9
Tabelle A5:	Beurteilungsbestimmende Aufnahmepfade für die relevanten Schadstoffe (vgl. <i>Arbeitshilfe Tabelle 2</i>).....	9
Tabelle A6:	Ergebnisse der Resorptionsverfügbarkeitsuntersuchungen nach DIN 19738 (< 2 mm) (in mg/kg TM)	10
Tabelle A7:	Beurteilungswerte für die Resorptionsverfügbarkeit (in mg/kg TM).....	10
Tabelle A8:	Ergebnisse der Innenraumluftmessungen – Passivsammler, 7 Tage (in µg/m ³)	15
Tabelle A9:	Innenraumluft-Richtwerte vom AIR 2017 (in µg/m ³)	15

1. Erfassung

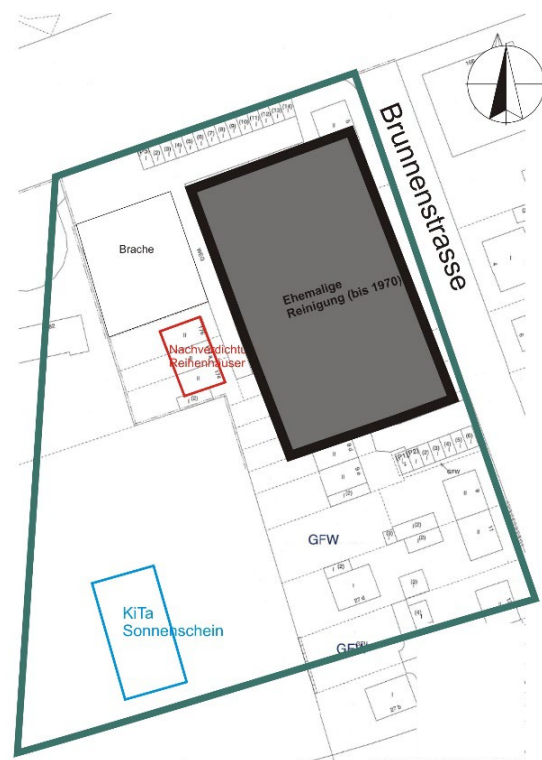
1.1. Anhaltspunkte / Verdachtsmomente

Aufgrund erhöhter LCKW-Konzentrationen im Grundwasser nordwestlich der grün umrahmten Fläche einer ehemaligen chemischen Reinigung und wegen Planungen zusätzlicher Wohngebäude auf dem in den 70er Jahren mit Reihenhäusern bebauten Standortes wurde eine Gefährdungsabschätzung durchgeführt.

Die historischen Recherchen ergaben, dass sich von Beginn des 20. Jahrhunderts bis ca. 1970 im Untersuchungsbereich ehemals eine chemische Großreinigung befand. Als Reinigungsmittel kamen unterschiedliche Stoffe zum Einsatz, die bedingt durch den früher üblichen Umgang mit derartigen Betriebsmitteln vermutlich in erheblichem Umfang in den Untergrund eingetragen wurden.

Nach Schließung des Standorts folgte ein unkontrollierter Abbruch der Gebäude und der Infrastruktureinrichtungen Anfang der 70er Jahre, bei dem es zu einem massiven Eintrag von Schweröl und weiteren Stoffen in den Untergrund gekommen sein muss.

Die ersten Häuser waren 1977 bezugsfertig. Insgesamt befinden sich heute zahlreiche Einfamilienhäuser sowie eine Kindertagesstätte auf bzw. direkt angrenzend an das Gelände der ehemaligen chemischen Reinigung.



Das Baumaterial der abgebrochenen Häuser und Hallen ist zumindest teilweise auf der Fläche verblieben – nach Luftbildauswertung ist dieses Material im Bereich der KiTa Sonnenschein zu verorten.

1.2. Standortbeschreibung

Die Fläche der ehemaligen Reinigung sowie die Umgebung ist durch eine Einfamilien-/Reihenhausbebauung gekennzeichnet. Die Reihenhäuser besitzen in der Regel einen unversiegelten, rückwärtig gelegenen Ziergarten.



Die übrigen Bereiche sind entweder überbaut oder mit Terrassen bzw. Wegbefestigungen versiegelt. Im Südwesten befindet sich auf bzw. angrenzend der altlastverdächtigen Fläche außerdem eine KiTa mit einer großen umgebenden Spielfläche.

2. Orientierende Untersuchung

2.1. Untersuchungskonzept

Im Rahmen der historischen Recherche wurde aufgrund der bekannten Vornutzung als chemische Reinigung folgendes Schadstoffpotenzial benannt:

- Lösemittel: Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW) und ihre Abbauprodukte
- Leichtes Heizöl (C₉–C₂₂) (Siedepunkt: 150–390 °C)
- Schweres Heizöl (C₂₀–C₇₀) (Siedepunkt: 300–700 °C)

Auf Basis dieser Auswertungen wurde das Untersuchungskonzept zur Beurteilung der möglichen Boden- und Grundwasserverunreinigungen entwickelt und mit der zuständigen Behörde abgestimmt.

Für die Einfamilienhaus- und Reihenhausbebauung wurde das Nutzungsszenario ‚Hausgärten‘ mit den relevanten Wirkungspfaden Boden-Mensch/Direktkontakt (sensibelste Nutzung: ‚Kinderspielflächen‘) und Boden-Nutzpflanze-Mensch (‚Nutzgärten‘) identifiziert. Die KiTa war hinsichtlich des Wirkungspfades Boden-Mensch/Direktkontakt mit der Nutzung ‚Kinderspielflächen‘ zu bewerten. Für beide Nutzungsszenarien war außerdem der Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch maßgeblich.

Das Konzept zur orientierenden Untersuchung sah vor, Rammkernsondierungen zur Erkundung möglicher Bodenverunreinigungen in allen relevanten Bereichen jeweils bis zum organoleptischen Gutbefund bzw. bis zum oberen Grundwasserleiter abzuteufen. Die Bohrungen sollten zu Bodenluftmessstellen (1 Zoll Durchmesser, Ausbau 1 m Voll, 2 m Filterrohr) für Wiederholungsmessungen ausgebaut und gegen atmosphärische Luft mit Ton und Zement abgedichtet werden.

Aufgrund der räumlichen Nähe der KiTa mit anzunehmender sensibler Nutzung im Südwesten der Untersuchungsfläche wurde empfohlen, dort ebenfalls Sondierungen vorzusehen. Darüber hinaus wurde wegen des Verdachts der Ablagerung von Abbruchmaterialien eine flächendeckende Beprobung des Oberbodens durch **oberflächennahe Mischproben** zur Untersuchung auf Schwermetalle und PAK zur Betrachtung des Wirkungspfades Boden-Mensch durchgeführt.

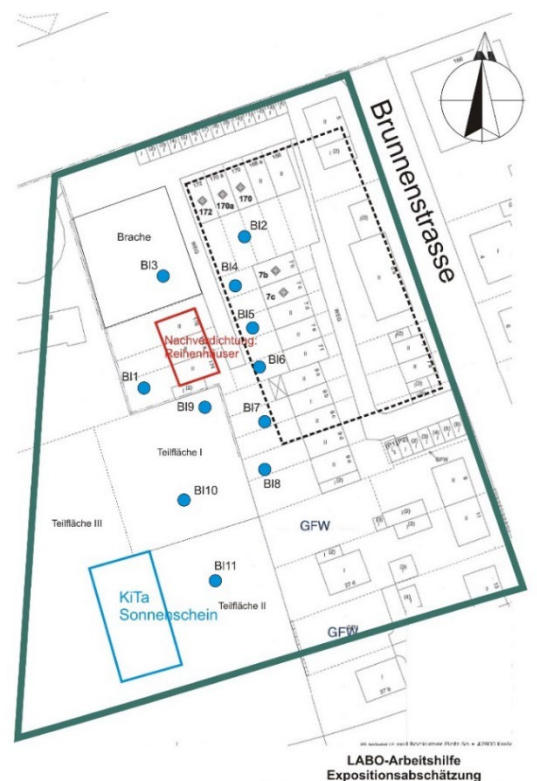
2.2. Probennahme und Analytik

Insgesamt wurde an 11 mit der Fachbehörde abgestimmten und vor Ort festgelegten Bohrpunkten eine Sondierung bis zur Grundwasseroberfläche abgeteuft. Die Bohrpunkte im Bereich der ehemaligen Chemischen Reinigung richteten sich nach möglichen Eintragsbereichen (Lösungsmittellager, Maschinenstandorte, Abwasserübergabeschächte), im Außenbereich nach den Standorten der Tanks, dem vermuteten Öleintrag und weiteren Bohrpunkten im Bereich der Abwasserleitung.

Die Bohrtiefe schwankte zwischen 3 m und max. 8 m. Am gewonnenen Bohrkern erfolgte eine Bodenansprache und Überprüfung nach organoleptischen Auffälligkeiten. Es wurden sowohl Feststoffproben als auch Bodenluftproben entnommen.

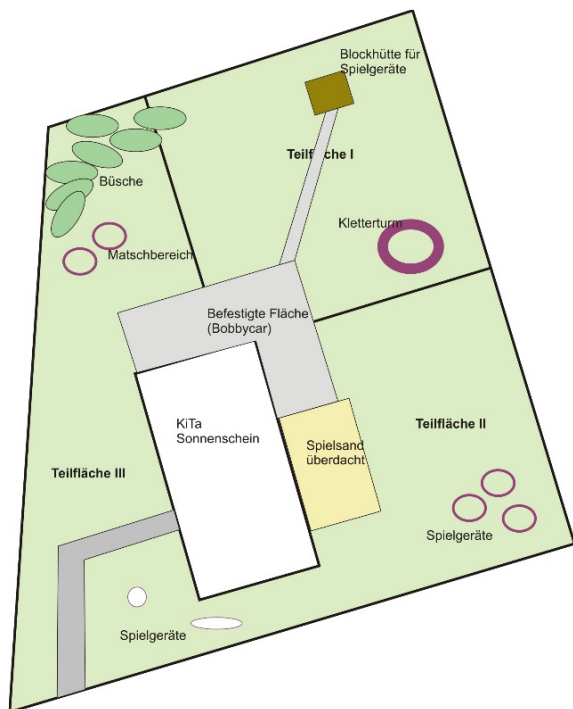
Im Folgenden wird der Teil der Untersuchungen beschrieben, der bezüglich des Wirkungspfadefes Boden-(Bodenluft-)Mensch interpretierbar ist. Untersuchungen auf mobile Stoffe werden immer auch bezüglich des Wirkungspfadefes Boden-Grundwasser geplant; das Fallbeispiel führt dies jedoch nicht weiter aus.

Die Feststoffprobennahme erfolgte je Meter bzw. nach Schichtwechsel oder nach Auffälligkeit. Aus den Proben sowie unter Zugrundelegung der Vor-Ort-Befunde wurden Feststoffproben, die die höchste organoleptische Auffälligkeit zeigten, zur Analytik ausgewählt. Im Falle keiner Auffälligkeit im gesamten Bohrprofil wurde eine der Proben zum Nachweis untersucht.



Insgesamt wurden **11 Feststoffproben** auf die Parameter Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) sowie LCKW, aufgrund geruchlicher Auffälligkeiten auch BTEX im Feststoff untersucht (vgl. *Tabelle A1*).

Die Untersuchung auf Mineralölkohlenwasserstoffe (C₁₀–C₄₀) ergab dabei lediglich in größerer Tiefe (> 3,0 m) auffällige Gehalte. Auf die Bewertung bezüglich des Wirkungspfadefes Boden-Grundwasser wird im Folgenden nicht weiter eingegangen. Bezüglich des Wirkungspfadefes Boden-Bodenluft-Mensch wurde die Bewertung der BTEX-Aromaten als flüchtige Komponente der Mineralölkohlenwasserstoffe als ausreichend angesehen (vgl. *Arbeitshilfe Kapitel 4.1.4* und *6.2.1* sowie *Anhang 2*).



Aus den 8 Sondierungen, die zur Bodenluftmessstelle ausgebaut wurden, erfolgte die Bodenluftprobennahme in **zwei Wiederholungsmessungen**, im zeitlichen Abstand von 3 Monaten. Die Bodenluftproben wurden auf LCKW sowie BTEX untersucht (*Tabelle A2*).

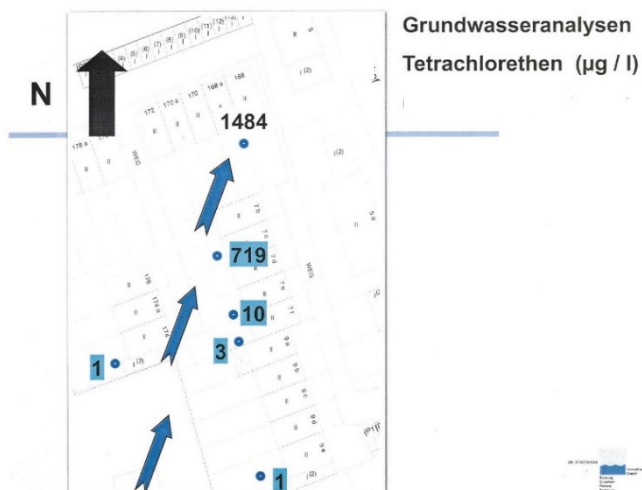
Für den Bereich der KiTa wurden eine Nutzungskartierung durchgeführt und für die Probennahme insgesamt drei Teilflächen gebildet, so dass insgesamt **6 Mischproben** für die Entnahmebereiche 0–0,10 m und 0,10–0,30 m entnommen wurden. Die Proben wurden auf Schwermetalle und PAK untersucht (*Tabelle A3*).

2.3. Geologie und Hydrologie

Im Bereich des Untersuchungsgebietes bestehen die vorhandenen Deckschichten (1–2 m unter GOK) aus sandigen Schluffen, die als Lößlehm ausgeprägt sind.

Unterlagert werden diese Deckschichten von kiesigen Mittel- bis Grobsanden. Diese stellen einen gut durchlässigen Grundwasserleiter dar. Die Grundwasserfließrichtung ist nach Nordost gerichtet. Der Grundwasserflurabstand liegt bei mindestens 5 m unter GOK.

Die Messungen im Grundwasser bestätigen den Eintrag von Tetrachlorethen von der Fläche der ehemaligen chemischen Reinigung.



2.4. Ergebnisse für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch

Die Ergebnisse der laboranalytischen Untersuchungen auf die flüchtigen Stoffe zeigen, dass ein Schadensschwerpunkt im zentralen Bereich der Untersuchungsfläche in unmittelbarer Umgebung der ehemaligen Reinigung liegt.

Feststoff-Gesamtgehalte:

Im nördlichen und zentralen Bereich der ehemaligen Reinigung (BI2, BI3, BI4, BI5) wurde ein weiteres Schadenszentrum festgestellt. Als Hauptschadstoff wurde Tetrachlorethen (max. 58 mg/kg) nachgewiesen. BTEX waren im Feststoff lediglich in zwei Feststoffproben (Sondierung 4 und 5) nachweisbar, mit Gehalten von 0,65 bzw. 0,22 mg/kg (Summe BTEX).

Die Messwerte werden den orientierenden Hinweisen für flüchtige Stoffe der LABO (2008) gegenübergestellt.

Tabelle A1: Ergebnisse der Bodenfeststoffuntersuchungen aus den Sondierungen (in mg/kg TM)

Sondierung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe Bodenfeststoff Wohngebiete
Entnahmetiefe (in m)	0,9-1,5	1,6-2,4	1,5-2,3	3,0-4,8	1,7-2,5	0,9-1,7	0,9-1,6	1,0-1,8	0,9-1,6	0,7-1,6	0,8-1,7	
Benzol	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,07	0,06	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,1
Toluol	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,15	0,1	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	10
Ethylbenzol	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,06	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	3
Xylole	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,37	0,06	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	10
Tetrachlorethen (PER)	0,5	49	51	58	39	3,5	11	1,8	11	0,4	0,5	1,5
Summe LCKW	0,5	50,13	51	59,25	40,18	4,04	11,93	1,89	11	1,35	0,5	---

Orange: Überschreitung des orientierenden Hinweiswertes, Gefahrenverdacht für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch nicht ausgeräumt

Bodenluftkonzentrationen:

Die LCKW-Konzentrationen (Summe) in der Bodenluft werden dominiert durch die gemessenen Tetrachlorethen-Konzentrationen, die einen Anteil von ca. 95 % an der Summe LCKW einnehmen.

Die gemessenen Bodenluftkonzentrationen variieren je nach Zeitpunkt der Probennahme. Die höchsten Konzentrationen wurden im Sommer erreicht und liegen bei maximal 19.000 mg/m³ (Sondierung 2).

Tabelle A2: Ergebnisse der Bodenluftuntersuchungen, Mittelwerte aus zwei Wiederholungsmessungen (in mg/m³)

Sondierung	1	2	3	4	7	9	10	11	Orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe Bodenluft Wohngebiete
Wetter	Bewölkt	Bewölkt	Bewölkt	Bewölkt	Regen	Regen	Regen	Regen	
Temperatur	21 °C	21 °C	21 °C	21 °C	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C	
Entnahmetiefe (in m)	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	
Benzol	< 0,007	< 0,007	< 0,007	0,02	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	10
Toluol	< 0,007	< 0,007	< 0,007	0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	1.000
Ethylbenzol	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	200
Xylole	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,007	1.000
Tetrachlorethen (PER)	79	19.000	1.200	8.500	320	120	72	1,9	70
Summe LCKW	80	19.212	1.208	8.537	321	121	72	2,0	---
Orange: Überschreitung des orientierenden Hinweiswertes, Gefahrenverdacht für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch nicht ausgeräumt									

2.5. Ergebnisse für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt (nur KiTa-Bereich)

Die Oberbodenuntersuchungen im Bereich der KiTa ergaben folgende Gehalte:

Tabelle A3: Ergebnisse der Bodenfeststoffuntersuchungen (< 2 mm) aus den oberflächennahen Mischproben (in mg/kg TM)

Teilfläche	I	I	II	II	III	III	Prüfwerte Kinderspielflächen
Tiefe (in m)	0,0-0,1	0,1-0,3	0,0-0,1	0,1-0,3	0,0-0,1	0,1-0,3	
Arsen	28	19	15	13	9	7	25
Blei	220	170	95	90	77	79	200
Cadmium	1,1	0,9	0,6	0,6	0,4	0,3	10
Chrom _{gesamt}	35	30	28	29	31	36	200
Nickel	55	59	31	28	13	10	70
Kobalt	260	220	50	60	35	30	300
Quecksilber	0,5	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	10
PAK ₁₆ vertreten durch Benzo(a)pyren	0,49	0,4	0,48	0,3	0,3	0,35	0,5
Orange: Überschreitung des Prüfwertes, Gefahrenverdacht für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt nicht ausgeräumt							

2.6. Beurteilung der Ergebnisse / Hinreichender Gefahrenverdacht

Die Ergebnisse der wiederholten Bodenluftuntersuchungen zeigen eine hohe Belastung der Untersuchungsfläche mit Tetrachlorethen, so dass der Gefahrenverdacht nicht ausgeräumt

werden konnte. Da im Umfeld eine Nutzung durch Einfamilien-/Reihenhausbebauung vorliegt, sind Detailuntersuchungen für den **Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch** erforderlich.

Auf der Fläche der KiTa (Sondierungen 9–11) wurde in zwei Sondierungen ebenfalls der orientierende Hinweiswert für Tetrachlorethen in der Bodenluft überschritten. Die im Bereich der Abwasserleitung gesetzten Ansatzpunkte könnten auf Einträge aus dieser Leitung hinweisen – für eine Beurteilung der Einträge in das KiTa-Gebäude sind sie aufgrund der Entfernung nur bedingt geeignet. Zwar weist der dem Gebäude nächstgelegene Messpunkt B11 keine Überschreitung auf, jedoch wurden auf Grund der Sensibilität der Nutzung auch für die KiTa Detailuntersuchungen für den **Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch** zur Beweissicherung empfohlen, ebenso für die Gartenhütte.

Auf der Fläche der KiTa liegen darüber hinaus Prüfwertüberschreitungen für Arsen und Blei für die Teilfläche I vor, so dass Detailuntersuchungen für den **Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt** erforderlich werden.

3. Detailuntersuchung

3.1. Überprüfung der zutreffenden Nutzungsszenarien inklusive der relevanten Wirkungs- und Aufnahmepfade

Aufgrund der im Rahmen der orientierenden Untersuchung festgestellten Ergebnisse sind weitergehende Sachverhaltsermittlungen im Rahmen der Detailuntersuchung inklusive einer Expositionsabschätzung notwendig.

Im vorliegenden Fall sind im Rahmen der Detailuntersuchung folgende Szenarien und Wirkungspfade zu berücksichtigen:

Tabelle A4: Auswahl der am Standort relevanten Nutzungsszenarien und Wirkungspfade (vgl. Arbeitshilfe Tabelle 1)

Nutzungsszenarien	Wirkungspfade			
	Boden-Mensch/ Direktkontakt	Boden-Bodenluft- Mensch	Boden-Nutz- pflanze-Mensch	Boden-(Futterpflanze-) Nutztier-Mensch
Kinderspielflächen	X	X		
Haus- und Kleingärten	-	X	-	- *

dunkelgrau: Wirkungspfad für Nutzungsszenario nicht relevant
X Wirkungspfad am Standort relevant
- Wirkungspfad am Standort nicht relevant
* Der Wirkungspfad Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch wird im vorliegenden Praxisbeispiel nicht weiter ausgeführt, da geeignete Beurteilungsmaßstäbe bisher fehlen bzw. nur hilfsweise herangezogen werden können (vgl. *Arbeitshilfe Kapitel 8*)

Das Schadstoffpotenzial lässt folgende Wirkungspfade und Aufnahmepfade relevant werden:

Tabelle A5: Beurteilungsbestimmende Aufnahmepfade für die relevanten Schadstoffe (vgl. Arbeitshilfe Tabelle 2)

Wirkungspfade	Aufnahmepfade			
	oral	inhalativ (Staub)	inhalativ (Gas)	dermal
Boden-Mensch/Direktkontakt	Arsen Blei	-		-
Boden-Bodenluft-Mensch			(LCKW) PER	
Boden-Nutzpflanze-Mensch	-			
Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch*	-			

dunkelgrau: Aufnahmepfad für Wirkungspfad nicht relevant
- Aufnahmepfad am Standort nicht relevant
* Der Wirkungspfad Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch wird im vorliegenden Praxisbeispiel nicht weiter ausgeführt, da geeignete Beurteilungsmaßstäbe bisher fehlen bzw. nur hilfsweise herangezogen werden können (vgl. *Arbeitshilfe Kapitel 8*)

3.2. Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt

3.2.1. Festlegung des Prüfbedarfs

Auf dem KiTa-Gelände ist der Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt für die relevanten Parameter Arsen und Blei für den oralen Aufnahmepfad zu prüfen.

3.2.2. Prüfung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen

Zur Überprüfung der **bodenabhängigen Expositionsbedingungen** für oral wirksame Schadstoffe wie Arsen und Blei kann die Untersuchung der Resorptionsverfügbarkeit nach DIN

19738 die Wirksamkeit der Schadstoffe nach Aufnahme über den Boden konkretisieren. Dies gilt für alle Szenarien, in denen Kinderspiel die bewertungsrelevante Nutzung darstellt.

Tabelle A6: Ergebnisse der Resorptionsverfügbarkeitsuntersuchungen nach DIN 19738 (< 2 mm) (in mg/kg TM)

KiTa	Teilfläche I	KiTa	Teilfläche I
Tiefe (in m)	0,0-0,1	Tiefe (in m)	0,0-0,1
Arsen (gesamt)	28	Blei (gesamt)	220
Arsen (gesamt) Wdh.	31	Blei (gesamt) Wdh.	210
Arsen RV Messung 1	12	Blei RV Messung 1	50
Arsen RV Messung 2	11	Blei RV Messung 2	60
Arsen RV Mittelwert	11,5	Blei RV Mittelwert	55
Resorptionsverfügbarkeit	37 %	Resorptionsverfügbarkeit	26,2 %
Abweichung vom Mittelwert	4,35 %	Abweichung	9,09 %
Arsen Sediment Messung 1	18	Blei Sediment Messung 1	170
Arsen Sediment Messung 2	19	Blei Sediment Messung 2	160
Arsen Sediment Mittelwert	18,5	Blei Sediment Mittelwert	165
Wiederfindung	96,77 %	Wiederfindung	104,76 %
Orange: Überschreitung des Prüfwerts im Bodenfeststoff (bezogen auf gemessene Gesamtgehalte) bzw. des Beurteilungswertes BW_{SRV} (bezogen auf gemessene resorptionsverfügbare Gehalte als Mittelwert)		Orange: Überschreitung des Prüfwerts im Bodenfeststoff (bezogen auf gemessene Gesamtgehalte) bzw. des Beurteilungswertes BW_{SRV} (bezogen auf gemessene resorptionsverfügbare Gehalte als Mittelwert)	

Resorptionsverfügbarkeit – Beurteilungswerte BW_{SRV} :

Grundlage für die Beurteilungswerte für gemessene, resorptionsverfügbare Gehalte nach DIN 19738 (< 2 mm) bilden in der Regel die Prüfwerte der BBodSchV (vgl. *Arbeitshilfe Gleichung 1*). Abweichungen vom standardisierten Verfahren (vgl. UBA 1999ff) sind in der *Arbeitshilfe Kapitel 5.2.4* beschrieben.

Tabelle A7: Beurteilungswerte für die Resorptionsverfügbarkeit (in mg/kg TM)

	BW_{SRV} Kinderspielflächen
Arsen	25
Blei	70

Die Beurteilungswerte werden für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung als ‚Kinderspielflächen‘ von den untersuchten Parametern unterschritten.

3.2.3. Prüfung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen

Zur Überprüfung der **nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen** wurden begleitend zur Probennahme für die Fläche eine Fotodokumentation sowie eine Nutzungskartierung erstellt.



Zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Mensch/Direktkontakt für die Fläche der KiTa Sonnenschein wurden keine weiteren Schritte zur Expositionsabschätzung erforderlich. Als aktuelle wie auch als sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung wurde das Szenario ‚Kinderspielflächen‘ zugrunde gelegt.

Die Prüfung des Wirkungspfades Boden-Bodenluft-Mensch hinsichtlich der leichtflüchtigen Schadstoffe (LCKW) wird weiter unten beschrieben.

3.2.4. Abschließende Gefährdungsabschätzung des Wirkungspfades Boden-Mensch/Direktkontakt

Durch Prüfung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen konnte der Gefahrenverdacht für die Fläche der KiTa Sonnenschein sowohl für die sensibelste planungsrechtlich zulässige als auch die aktuelle Nutzung (‚Kinderspielflächen‘) für den Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt insoweit ausgeräumt werden.

3.3. Expositionsabschätzung für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch

3.3.1. Festlegung des Prüfbedarfs

Für den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch besteht bezüglich der inhalativen Aufnahme von Tetrachlorethen über die Innenraumluft sowohl für die Reihenhausbebauung als auch (vorsorglich) für das KiTa-Gebäude und die Gartenhütte Prüfbedarf.

3.3.2. Prüfung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen

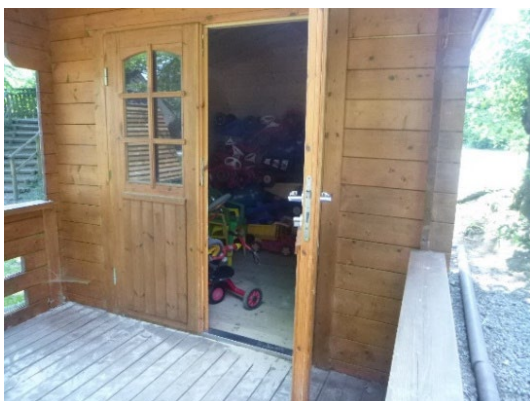
Der Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch ist aufgrund des Vorkommens leichtflüchtiger Schadstoffe dann relevant, wenn auf der Untersuchungsfläche Gebäude vorhanden sind, in denen sich Menschen aufhalten.



Im vorliegenden Fall betrifft dies zum einen den Bereich der **Reihenhausbebauung**,

zum
ande-
ren das
Ge-

bäude der KiTa, in dem sich während der Betreuungszeiten Kinder und Erwachsene (Betreuende) aufhalten.



In der auf dem KiTa-Gelände befindlichen **Gartenhütte** werden Spielgeräte aufbewahrt – sie wird offensichtlich nicht regelmäßig für den Aufenthalt von Kindern genutzt. Trotzdem sollte vorsorglich eine Gefährdungsabschätzung stattfinden.

Zur Überprüfung der **bodenabhängigen Expositionsbedingungen** wurden bereits im Rahmen der orientierenden Untersuchung Bodenluftuntersuchungen durchgeführt. Hieraus wurde erkennbar, dass im Bereich der Reihenhausbebauung die höchsten Bodenluftgehalte in

1 bis 3 m Tiefe gemessen wurden. Alle Messstellen in dem Bereich zeigten deutliche (teilweise 100-fache und mehr) Überschreitungen der orientierenden Hinweise für Tetrachlorethen in der Bodenluft.

Auf der Fläche der KiTa waren an der Messstelle 9 (in der Nähe der Gartenhütte) sowie an der Messstelle 10 ebenfalls Überschreitungen der orientierenden Hinweise für Tetrachlorethen in der Bodenluft festzustellen. Lediglich an der Messstelle 11 (in der Nähe des KiTa-Gebäudes) wurden die orientierenden Hinweise für Tetrachlorethen in der Bodenluft deutlich unterschritten.

In der Konsequenz wurde es erforderlich, **Innenraumlufuntersuchungen** sowohl in den Reihenhäusern (vornehmlich zunächst in den Kellerräumen) als auch vorsorglich in der Gartenhütte und im Gebäude der KiTa (Keller) durchzuführen sowie zur Überprüfung der **nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen** parallel die Nutzung und den Zustand der Gebäude zu erheben. Die jeweiligen Zuständigkeiten wurden dabei beachtet.

3.3.3. Prüfung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen

Bereich der Reihenhausbauung:

Aus Bauunterlagen sowie Befragungen der Bewohner geht hervor, dass alle Häuser im Untersuchungsbereich zwischen 1977 und 1979 errichtet wurden.

Die Gebäude wurden in Kooperation mit der Gesundheitsbehörde begangen sowie deren Nutzung und Zustand dokumentiert. Die Gebäudeaufteilung der Häuser erwies sich als identisch. Alle Gebäude sind unterkellert. Die Kellerräume weisen sehr hohe Deckenhöhen auf und sind über eine Wendeltreppe mit den Räumen im Erdgeschoss verbunden. Eine Tür zum Verschließen der Kellerräume gegen das Erdgeschoss fehlt. Von allen Kellern ist der rückwärtige Garten über eine Außentreppe erreichbar.



Die Nutzung der Kellerräume ist unterschiedlich und reicht von Hobbyräumen über Büroräume bis hin zu Nasszellen, Kellerbar und Lagerräumen.

KiTa Sonnenschein – Hauptgebäude:

Die KiTa wurde erst 2004 errichtet und das Gebäude ist in einem guten Zustand. Im Zuge einer Begehung wurde ein Begehungsprotokoll angefertigt, das alle wichtigen Informationen zur Nutzung enthält.

Das Gebäude ist eingeschossig und unterkellert. Im Keller befinden sich Lagerräume sowie ein Bastelraum. Der Keller ist durch eine Treppe zu erreichen und durch eine Tür vom Erdgeschoss getrennt.



Der Bastelraum wird regelmäßig (1–2 mal pro Woche) für ca. 3–4 Stunden am Tag genutzt (im Winter häufiger als im Sommer). Die Kinder in der KiTa sind im Alter von 3 bis 6 Jahren. Die KiTa hat 2 Wochen im Jahr geschlossen, ansonsten werden die Kinder 5 Tage die Woche bis zu 8 Stunden pro Tag in der Einrichtung betreut.

KiTa Sonnenschein – Gartenhütte:

Die Gartenhütte hat einen Holzboden und ist rundum geschlossen. Die Hütte wird geöffnet, wenn Spielgeräte entnommen werden. Kinder halten sich üblicherweise nicht in der Hütte auf – und sind somit auch nicht längerfristig exponiert. Eine Untersuchung wurde zur Beweissicherung vorgenommen.



3.3.4. Innenraumluftmessungen

In allen Kellerräumen wurden **Innenraumluftmessungen** durchgeführt. Nach der ersten Messung empfahl die zuständige Behörde eine verstärkte Lüftung bei den Reihenhäusern 1 bis 5 (7b bis 7f) durch den Einbau von Lüftungsschlitzen in den Kellertüren zum Treppenhaus. In Wiederholungsmessungen wurden in den Fällen, in denen im Keller erhöhte Konzentrationen Tetrachlorethen $> 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nachgewiesen wurden, ergänzend auch Räume im Erdgeschoss untersucht, jedoch ohne Befund.

Tabelle A8: Ergebnisse der Innenraumluftmessungen – Passivsammler, 7 Tage (in µg/m³)

Gebäude	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	KiTa	Gartenhütte
Lage	Keller															EG
Erstmessung																
PER	510	400	140	420	450	77	56									
Σ LCKW	515	400	140	425	455	81	57									
1. Wiederholungsmessung 1 Monat nach Einbau von Lüftungsschlitzen																
PER	330	300	79	220	230	46	86	< 10	< 10	< 10	83	< 10	36	< 10	< 10	76
Σ LCKW	344	302	79	221	232	46	87	< 10	< 10	< 10	89	< 10	37	< 10	< 10	77
2. Wiederholungsmessung 1,5 Monate nach Einbau von Lüftungsschlitzen																
PER	980	390	210	160	390						12				< 10	70
Σ LCKW	995	405	210	160	394						13				< 10	71
Orange: Überschreitung des Richtwerts RW I in der Innenraumluft (vgl. <i>Tabelle A9</i>)																

Innenraumluft – Beurteilungswerte RW I und II:

Die gemessene Hauptkomponente der LCKW war in allen Fällen Tetrachlorethen (PER). Für Tetrachlorethen wurden 2017 vom AIR (Ausschuss für Innenraumrichtwerte) des UBA Richtwerte I und II abgeleitet.

Der Richtwert I (RW I) wird definiert als die Konzentration eines Stoffes in der Innenraumluft, bei der im Rahmen einer Einzelstoffbetrachtung nach gegenwärtigem Erkenntnisstand auch bei lebenslanger Exposition keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen zu erwarten sind. Eine Überschreitung ist mit einer über das übliche Maß hinausgehenden, hygienisch unerwünschten Belastung verbunden. Bei Überschreiten des Richtwertes II (RW II) ist unverzüglich zu handeln. Beim Überschreiten dieser Konzentration sind Schäden für die menschliche Gesundheit mit hinreichender Wahrscheinlichkeit anzunehmen.

Tabelle A9: Innenraumluft-Richtwerte vom AIR 2017 (in µg/m³)

	Richtwert I	Richtwert II
Tetrachlorethen (PER)	100	1.000

Im vorliegenden Fall wird der Richtwert I in fünf der untersuchten Gebäude wiederholt überschritten. Der Richtwert II wird hingegen bei allen Messungen unterschritten.

3.3.5. Abschließende Gefährdungsabschätzung des Wirkungspfades Boden-Bodenluft-Mensch

Bereich der Reihenhausbebauung:

Innenraumlufthuntersuchungen haben den bestehenden Gefahrenverdacht hinsichtlich Tetrachlorethen in einem Teil der untersuchten Reihenhäuser nicht ausräumen können. Für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung (Wohnbebauung) bestand aus bodenschutzrechtlicher Sicht im Bereich der Häuser 1 bis 5 der Gefahrenverdacht zunächst weiter. Dies gilt auch für die aktuelle Nutzung, da in allen untersuchten Kellerräumen eine wohnähnliche Nutzung vorliegt. Gemäß IRK-UBA (2012) sind Maßnahmen zur Reduktion der Innenraumluftbelastung erforderlich.

Unter dem Gesichtspunkt der Verhältnismäßigkeit sind demnach im Konzentrationsbereich zwischen **RW I und RW II in der Innenraumluft** zunächst keine baulichen oder sonstigen quellenbezogenen Veränderungen vorzunehmen, sondern es ist vor allem verstärkt zu lüften und einzelfallbezogen verstärkt zu reinigen. Wenn jedoch trotz nachweisbar intensiveren Lüftens (hier: Erhöhung der Luftwechselzahl in den Kellerräumen durch Lüftungsschlitze) eine Kontrollmessung nach einer gewissen Zeit (in der Regel nach einem Monat) keine erkennbare Verbesserung der Luftqualität anzeigt und der RW I nach wie vor überschritten wird, sind in einem zweiten Schritt auch für Konzentrationen im Bereich zwischen RW I und RW II weitergehende, gegebenenfalls auch bauliche Maßnahmen zu empfehlen, da eine über einen längeren Zeitraum (> 12 Monate) **erhöhte Belastung aus Gründen der Vorsorge nicht akzeptabel** ist.

Im Bereich der Gebäude 1 bis 5 sind auffällige Innenraumluftkonzentrationen gemessen worden, die trotz einer ersten Erhöhung der Luftwechselzahlen zu keiner deutlichen Reduzierung der Schadstoffkonzentrationen in den Innenräumen geführt haben.

Im Gegenteil wurden durch die Nachmessung teils höhere Werte als bei der Erstmessung sowie im Keller des Gebäudes 1 (Brunnenstraße 7b) eine Tetrachlorethenkonzentration im Bereich des RW II-Wertes festgestellt. Der Keller des Gebäudes 1 liegt der Bodenluftmessstelle BL2 mit der höchsten gemessenen Konzentration von PER in der Bodenluft von 19.000 mg/m³ am nächsten. Offensichtlich migrieren je nach Jahreszeit und/oder Witterung Schadstoffe des bei BL2 lokalisierten Schadstoffbereichs zu den Kellern der Reihenhausreihe, so dass höhere Konzentrationen nicht auszuschließen sind.

Aus diesem Grund sind für alle genannten Gebäude Maßnahmen aus Gefahrenabwehrgründen hinsichtlich des Nutzungsverhaltens sowie zur Minderung der potenziellen Schadstoffkonzentration geboten – hier beispielsweise Zwangsbelüftung durch den Einbau von Kleinlüftern.

KiTa Sonnenschein – Hauptgebäude:

Die Innenraumlufthuntersuchungen haben keine Auffälligkeiten hinsichtlich der Tetrachlorethenkonzentrationen in den Kellerräumen des KiTa-Gebäudes erkennen lassen. Hier wurde der Gefahrenverdacht im Hinblick auf den Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch für die sensibelste planungsrechtlich zulässige Nutzung (und die aktuelle Nutzung) ausgeräumt.

KiTa Sonnenschein – Gartenhütte:

Die Raumlufthuntersuchungen in der Gartenhütte der KiTa haben keine Überschreitung des Richtwertes I für Tetrachlorethen ergeben. Angesichts der hohen Luftwechselrate, die für ein Gartenhaus anzunehmen ist, sind die gemessenen Tetrachlorethenkonzentrationen von 70 bis 76 µg/m³ erstaunlich und sprechen für ein höheres Potenzial des Schadstoffes in der Bodenluft, als dies aus dem Ergebnis der Bodenluftuntersuchung nahelag. Aufgrund der Nutzung der Hütte (sporadisch und nur kurz für die Entnahme von Geräten) ist grundsätzlich keine hinreichend lange Exposition anzunehmen, weshalb weitere Maßnahmen oder Messungen nicht zu empfehlen sind.

Bei Umnutzung des Gartenhauses z. B. für eine dauerhafte Gruppennutzung verbunden mit häufigerem Heizen eines nachgedämmten Raumes und damit einer Änderung des Transportverhaltens Bodenluft-Innenraumlufth (geringere Verdünnung durch verminderte Luftwechselzahl) wäre es angezeigt, das Potenzial im Untergrund durch eine Bodenluftmessstelle im direkten Umfeld der Hütte zu beschreiben um Risiken zu erfassen und/oder weitere Innenraumlufthmessungen durchzuführen.

Literaturverzeichnis

AIR (Ausschuss für Innenraumrichtwerte) (2017): Richtwerte für Tetrachlorethen in der Innenraumlufth – Mitteilung des Ausschusses für Innenraumrichtwerte. Bundesgesundheitsblatt, (60), S. 1305–1315. Online: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00103-017-2637-3.pdf>

IRK-UBA (Umweltbundesamt) (2012): Richtwerte für die Innenraumluft: erste Fortschreibung des Basisschemas. Mitteilung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Kommission Innenraumlufthygiene und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. Bundesgesundheitsblatt, (55), S. 279–290. Online: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/Basisschema_2012.pdf

LABO (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz) (2008): Bewertungsgrundlagen für Schadstoffe in Altlasten – Informationsblatt für den Vollzug. Stand: 01.09.2008 (ergänzt Juni 2009). Online: https://www.labo-deutschland.de/documents/34_Infoblatt_Altlasten_01092008_e69_34f.pdf

UBA (Umweltbundesamt) (Hrsg.) (1999ff): Berechnung von Prüfwerten zur Bewertung von Altlasten. Erich Schmidt Verlag, Loseblattsammlung 1999 mit Ergänzungen, Berlin.

**Arbeitshilfe zur Expositionsabschätzung
in der Detailuntersuchung
für den Wirkungspfad Boden-Mensch**

**Anhang 5
Mustergliederung**

Dezember 2023

Hinweis

Der folgende Gliederungsentwurf für Gutachten hat empfehlenden Charakter und muss an den konkreten Einzelfall angepasst werden (beispielsweise ist die Untersuchung der Bodenluft oder von Pflanzen nur in begründeten Fällen erforderlich).

1. Veranlassung und Aufgabenstellung

2. Standortbeschreibung und Verdachtsmomente

- 2.1. Basisdaten
(Lage, Eigentümersituation, Liegenschaftskataster usw.)
- 2.2. Standortgegebenheiten
(Geographie, Topographie, Geologie, Hydrogeologie, Hydrologie)
- 2.3. Nutzungshistorie
- 2.4. Gefahrenverdacht
- 2.5. Beschreibung der relevanten Nutzungsszenarien (planungsrechtlich zulässig / aktuell) sowie Beschreibung der relevanten Wirkungs- und Aufnahmepfade

3. Vorhandene Datengrundlagen: Bodenschutzrelevanter Kenntnisstand und Überprüfung des Gefahrenverdachts

- 3.1. Ergebnisse der Erfassung
- 3.2. Ergebnisse der Vorerkundung
- 3.3. Ergebnisse der orientierenden Untersuchung
- 3.4. Ergebnisse der Standortcharakterisierung und ggf. Flächenkartierung
- 3.5. Überprüfung des Gefahrenverdachts sowie der relevanten Wirkungs- und Aufnahmepfade

4. Methodisches Vorgehen

- 4.1. Untersuchungskonzept
 - 4.1.1. Probennahmestrategie
 - 4.1.2. Untersuchungsprogramm
 - 4.1.3. Methodik der Expositionsabschätzung
- 4.2. Geländearbeiten
 - 4.2.1. Oberbodenmischproben

- 4.2.2. Kleinrammbohrungen und Beprobung Bodenluft
 - 4.2.3. Probennahme Pflanzen
 - 4.3. Laborarbeiten
 - 4.3.1. Analytik der Bodenproben (Oberbodenmischproben und Kleinrammbohrungen)
 - 4.3.2. Analytik der Bodenluft
 - 4.3.3. Analytik von Pflanzenmaterial
 - 4.4. Bewertungsgrundlagen
5. Ergebnisdarstellung und Bewertung
- 5.1. Beschreibung der Bodenverhältnisse
 - 5.2. Detailuntersuchung
 - 5.2.1. Darstellung und Auswertung der bodenabhängigen Expositionsbedingungen
 - 5.2.2. Darstellung und Auswertung der nutzungsabhängigen Expositionsbedingungen
 - 5.2.3. Expositionsabschätzung
 - 5.2.3.1 Wirkungspfad Boden-Mensch/Direktkontakt
 - 5.2.3.2 Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch
 - 5.2.3.3 Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze-Mensch
 - 5.2.3.4 Wirkungspfad Boden-(Futterpflanze-)Nutztier-Mensch
 - 5.2.3.5 Integrative Betrachtung der Wirkungspfade Boden-Mensch/Direktkontakt und Boden-Nutzpflanze-Mensch
6. Abschließende Gefährdungsabschätzung
7. Zusammenfassendes Fazit und Empfehlungen

**Arbeitshilfe zur Expositionsabschätzung
in der Detailuntersuchung
für den Wirkungspfad Boden-Mensch**

**Anhang 6
Materialsammlung**

Dezember 2023

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Hinweis	1
1. Materialsammlung	2
1.1. Baden-Württemberg	2
1.2. Bayern	2
1.3. Berlin	3
1.4. Brandenburg	3
1.5. Bremen	3
1.6. Hamburg	3
1.7. Hessen	4
1.8. Mecklenburg-Vorpommern	4
1.9. Niedersachsen	4
1.10. Nordrhein-Westfalen	4
1.11. Rheinland-Pfalz	5
1.12. Saarland	5
1.13. Sachsen	5
1.14. Sachsen-Anhalt	6
1.15. Schleswig-Holstein	6
1.16. Thüringen	6
1.17. Bund	6
2. Materialien aus den Nachbarländern	7
2.1. Österreich	7
2.2. Schweiz	8

Hinweis

Der Anhang 6 beinhaltet die im Rahmen der im Sommer 2017 durchgeführten Recherche erfassten Materialien (Leitfäden, Arbeitshilfen u. ä.) - im Einzelnen ergänzt um aktuelle Hinweise -, die sich mit der Thematik Detailuntersuchung und Expositionsabschätzung sowie verwandten und angrenzenden Sachgebieten beschäftigen.

Neben solchen der Bundesländer sind auch bundesweit gültige Publikationen gelistet, sowie einschlägige Veröffentlichungen des angrenzenden deutschsprachigen Raums (Österreich und Schweiz).

Ein Großteil der Materialien ist (ggf. in einer aktualisierten Fassung) über das „Informationssystem zur Qualitätssicherung bei der Altlastenbearbeitung – ISQAB“ (<https://isqab.lbeg.de/>) verfügbar.

Im Zuge der Überarbeitung der Arbeitshilfe im Jahr 2023 hat keine aktualisierte Recherche zu den aufgeführten Literaturquellen stattgefunden.

1. Materialsammlung

1.1. Baden-Württemberg

Die aktuellen Veröffentlichungen können der Internetseite der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg entnommen werden: <https://pudi.lubw.de/>

LfU (2001): Arbeitshilfe zur Bearbeitung von Verdachtsflächen/altlastverdächtigen Flächen und schädlichen Bodenveränderungen/Altlasten nach BBodSchG. Online: <https://pd.lubw.de/56924>

LfU (2005): Berechnung orientierender Hinweise auf Prüfwerte für flüchtige Stoffe in der Bodenluft. Online: <https://pd.lubw.de/11061>

LfU (2011): Arbeitshilfe zum Umgang mit großflächig erhöhten Schadstoffgehalten im Boden. Online: <https://pd.lubw.de/20142>

LUBW (2016, Hrsg.): Altlastenbewertung – Priorisierungs- und Bewertungsverfahren Baden-Württemberg, Karlsruhe, 115 S. <https://pd.lubw.de/15638>

LUBW (2023): Mustergliederung für Gutachten zu Altlastenuntersuchungen auf der Stufe einer Orientierenden Untersuchung oder Detailuntersuchung in Baden-Württemberg. Online: <https://pd.lubw.de/85228>

LANDRATSAMT RHEIN-NECKAR-KREIS (2022): Anbau von Nahrungs- und Futterpflanzen auf arsen- und schwermetallbelasteten Böden im Rhein-Neckar-Kreis; in Zusammenarbeit mit Amt für Landwirtschaft und Naturschutz, Amt für Gewerbeaufsicht und Umweltschutz, Gesundheitsamt, Veterinäramt und Verbraucherschutz sowie Regierungspräsidium Karlsruhe Referat 34. Online: https://www.rhein-neckar-kreis.de/site/Rhein-Neckar-Kreis-2016/get/documents_E861259832/rhein-neckar-kreis/Daten/Infomaterial/Leitfaden_Anbau_schwermetallbelastete_Boeden.pdf

LANDESGESUNDHEITSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (2019): Bewertung von Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bezüglich des Wirkungspfades Boden-Mensch. Online: https://www.gesundheitsamt-bw.de/fileadmin/LGA/DocumentLibraries/SiteCollection-Documents/03_Fachinformationen/FachpublikationenInfo_Materialien/PAK-Gemische_Wirkungspfad_Boden-Mensch_LGA2019.pdf

1.2. Bayern

Die jeweils aktuellen Fassungen der Merkblätter des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) in Bezug auf Altlasten und Flächenrecycling können im Internetangebot des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) auf der Seite „Vollzugs- und Arbeitshilfen“ abgerufen werden, vgl. <https://www.stmuv.bayern.de/themen/boden/vollzug/altlasten.htm>

LfU (2023): Untersuchung und Bewertung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen – Wirkungspfad Boden-Mensch (direkter Kontakt) und Expositionsszenario Boden-Bodenluft-Innenraumluft – LfU-Merkblatt Nr. 3.8/8.

Arbeitshilfe zur Expositionsabschätzung in der Detailuntersuchung

Anhang 6: Materialsammlung

LfU (2017): Probenahme von Boden und Bodenluft bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Gewässer – LfU-Merkblatt Nr. 3.8/4.

1.3. Berlin

Keine Materialien recherchiert.

1.4. Brandenburg

Die aktuellen Veröffentlichungen können der Internetseite des Landesamtes für Umwelt Brandenburg entnommen werden: <https://lfu.brandenburg.de/lfu/de/ueber-uns/veroeffentlichungen/>

LUA (1998): Anforderungen an Untersuchungsstellen, Gutachter und Gutachten im Rahmen der Altlastenbearbeitung. Materialien zur Altlastenbearbeitung im Land Brandenburg, Band 9.

LUA (2003): Untersuchung und Bewertung von alllastverdächtigen Flächen und Verdachtsflächen – Wirkungspfad Boden-Pflanze-Tier. Fachbeiträge des Landesumweltamtes, Heft-Nr. 81, Bodenschutz und Altlastenbearbeitung 2.

LUA (2004): Sicherheits- und Gesundheitsschutz bei der Arbeit in kontaminierten Bereichen bei der Untersuchung und Sanierung von Altlasten – Leitfaden Arbeitsschutz. Materialien zur Altlastenbearbeitung im Land Brandenburg, Band 11.

LUA (2010): Leitfaden zur Detailuntersuchung, Teil Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze.

1.5. Bremen

Keine Materialien recherchiert.

1.6. Hamburg

Die aktuellen Veröffentlichungen können der Internetseite der Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft Hamburg entnommen werden: <https://www.hamburg.de/politik-und-verwaltung/behörden/bukea/themen/boden-und-geologie>

FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, BEHÖRDE FÜR UMWELT, KLIMA, ENERGIE UND AGRARWIRTSCHAFT (2022): Gärten in der Stadt – Vorsorgliche Empfehlungen bei Bodenbelastungen.

FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, BEHÖRDE FÜR UMWELT, KLIMA, ENERGIE UND AGRARWIRTSCHAFT (2022): Methan aus Weichschichten – Sicheres Bauen bei Bodenluftbelastung. Online: <https://www.hamburg.de/resource/blob/153984/29d19edeb2d5b6b9f3b32c48aa19e439/d-bodenluftbelastung-broschuere-data.pdf>

FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, BEHÖRDE FÜR UMWELT, KLIMA, ENERGIE UND AGRARWIRTSCHAFT (2023): Merkblatt Nr. 9, Entnahme von Bodenluft- und Deponiegasproben. Online: <https://www.hamburg.de/resource/blob/176136/1a8083cb756d6304d6fd0b98ca4686fa/d-merkblatt-09-data.pdf>

1.7. Hessen

Die aktuellen Veröffentlichungen können der Internetseite des Hessischen Landesamts für Naturschutz, Umwelt und Geologie entnommen werden: <https://www.hlnug.de/themen/altlasten/arbeitshilfen-des-hlnug>

HLUG (2000): Analysenverfahren – Fachgremium Altlastenanalytik – Teil 4 Bestimmung von BTEX/LHKW in Feststoffen aus dem Altlastenbereich. Online: <https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/altlasten/handbuch/12b7t4.pdf>

HLUG (2014): Altlastenbearbeitung in Hessen; Handbuch Altlasten, Band 1. Online: https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/altlasten/handbuch/Handbuch_Altlasten_Band_1_Auflage_2_web.pdf

HLUG (2014): Untersuchung von altlastverdächtigen Flächen und Schadensfällen; Handbuch Altlasten, Band 3, Teil 2. Online: https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/altlasten/handbuch/Handbuch_Bd3_Teil2_2te_Auflage_2014_.pdf

HLUG (2016): Altlasten Stoffinformationen „NSO-Heterozyklen (NSO-HET)“. Online: https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/altlasten/handbuch/Stoffinformationen_NSO-HET_FINAL.pdf

1.8. Mecklenburg-Vorpommern

LUNG (2006): Leitfaden zur Altlastenbearbeitung in Mecklenburg-Vorpommern; Schriftenreihe des LUNG, Heft 2. Online: https://www.lung.mv-regierung.de/dateien/a3_pub_leitfaden_altlasten.pdf

1.9. Niedersachsen

Niedersachsen Altlastenhandbuch 1997 Druckversion.

1.10. Nordrhein-Westfalen

Die aktuellen Veröffentlichungen können der Internetseite des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW entnommen werden: <https://www.lanuv.nrw.de/publikationen>. Ältere Titel des damaligen Landesumweltamtes (LUA) können auf der Seite „Archiv“ abgerufen werden: <https://www.lanuv.nrw.de/publikationen/archiv>

LANUV (2014): Weitere Sachverhaltsermittlungen bei Überschreitung von Prüfwerten nach BBodSchV für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Nutzpflanze; LANUV-Arbeitsblatt 22. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/40022.pdf

LANUV (2015): Immissionsbedingte Hintergrundbelastung von Pflanzen in NRW. Schwermetalle und organische Verbindungen; LANUV-Fachbericht 61. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30061.pdf

LANUV (2015): Probenahme von Nahrungspflanzen zur Prüfung, ob selbst angebautes Gemüse nach immissionsbedingten Einträgen verzehrt werden darf. LANUV-Arbeitsblatt 31. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/4_arbeitsblaetter/40031.pdf

1.11. Rheinland-Pfalz

Die jeweils aktuellen Fassungen der ALEX-Merkblätter und ALEX-Informationsblätter des Landesamts für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU) zur Bodenschutz- und Altlastenbearbeitung können im Internetangebot des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität (MKUEM) auf der Seite „Rundschreiben und Arbeitshilfen“ abgerufen werden: <https://mkuem.rlp.de/themen/kreislaufwirtschaft-und-bodenschutz/bodenschutz-und-altlasten/rundschreiben-und-arbeitshilfen/alex-arbeitshilfen>

LUWG: ALEX-Informationsblatt 21 (2001): Hinweise zur Beurteilung von PAK-Gemischen in kontaminierten Böden.

LUWG: ALEX-Merkblatt 14 (2002): Arbeitshilfe Qualitätssicherung.

LUWG: ALEX-Informationsblatt 08 (2011): Einsatz und Bewertung von Mischproben bei Böden.

LUWG: ALEX-Informationsblatt 16 (2009): Bewertungsgrundlage für Schadstoffe in Altlasten.

LUWG: ALEX-Informationsblatt 18 (2010): Anforderungen an die Bodenprobennahme und deren Dokumentation.

LUWG: ALEX-Informationsblatt 15 (2011): Erkundung von Altablagerungen, Hinweise zur Untersuchungsstrategie.

1.12. Saarland

Keine Materialien recherchiert.

1.13. Sachsen

Die aktuellen Veröffentlichungen des Sächsisches Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie können der Themenseite „Altlasten“ des Landes Sachsen entnommen werden: <https://www.boden.sachsen.de/altlasten-16892.html>

LfUG (1995): Handbuch zur Altlastenbehandlung Teil 4 Gefährdungsabschätzung, Pfad und Schutzgut Boden. Online: https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/boden/hza4_1.pdf

LfUG (2003): Detailuntersuchung; Handbuch zur Altlastenbehandlung Teil 7; z. T. aktualisiert 2006 und 2014. Online: https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/Handbuch_ges_Internet_Januar2014.pdf

LfUG (2012): Branchenbezogene Merkblätter zur Altlastenbehandlung. Online: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13520>

LfULG (2019): Bewertungshilfen bei der Gefahrenermittlung in der Altlastenbehandlung. Online: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13456>

1.14. Sachsen-Anhalt

LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ SACHSEN-ANHALT (1996): Leitfaden zum Altlastenprogramm des Landes Sachsen-Anhalt. BERICHTe des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt 1996 – Heft 20 Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt. Online: https://lau.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/LAU/Bodenschutz/Altlasten/Altlastenbewertung/Altlastenleitfaden/Dateien/altlastenleitfaden_1.pdf

LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ SACHSEN-ANHALT (1998): Fortschreibung: Leitfaden zum Altlastenprogramm des Landes Sachsen-Anhalt. BERICHTe des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt 1998 – Heft 28 Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt. Online: https://lau.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/LAU/Bodenschutz/Altlasten/Altlastenbewertung/Altlastenleitfaden/Dateien/altlastenleitfaden_2.pdf

1.15. Schleswig-Holstein

Die aktuellen Veröffentlichungen des Landesamts für Umwelt (LfU) können der Themenseite „Altlasten – Vollzugshilfen und Erlasse“ des Landes Schleswig-Holstein entnommen werden: <https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/B/boden/altlasten.html?nn=13c9d98d-d1c3-4c23-8d69-e1d78ed4e50e>

LLUR (Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein) (2016): Unerwünschtes Erbe der Industrialisierung – Erfassung von Altstandorten in Schleswig-Holstein. Online: https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/A/altlasten/Downloads/erfassungAltstandorte.pdf?__blob=publicationFile&v=1

1.16. Thüringen

TLUG (2009): Altlastenleitfaden, Teil II – Erkundung und Untersuchung von altlastverdächtigen Flächen. Online: https://umwelt.thueringen.de/fileadmin/001_TMUEN/Unsere_Themen/Boden_Wasser_Luft_Laerm/Bodenschutz/altlastenleitfaden_ii_oktober_2009.pdf

1.17. Bund

FBU (FACHBEIRAT BODENUNTERSUCHUNGEN) (2008): Angabe der Messunsicherheit bei chemischen Bodenuntersuchungen für den Vollzug der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. FBU Arbeitsgruppe „Qualitätssicherung und Ergebnisunsicherheit für Bodenuntersuchungsverfahren“. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3511.pdf>

FBU (FACHBEIRAT BODENUNTERSUCHUNGEN) (2015): Messunsicherheit für Verfahren zum Vollzug und zur Weiterentwicklung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung.

FBU (FACHBEIRAT BODENUNTERSUCHUNGEN) (2018): Position des FBU zu Grundsätzen der Bodenprobenahme im bodenschutzrechtlich geregelten Bereich. Online: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/359/dokumente/2016_12_fbu-grundsaeetze_bodenprobenahme_0.pdf

FBU (FACHBEIRAT BODENUNTERSUCHUNGEN) LAGA Forum Abfalluntersuchung (2021): Methodensammlung Feststoffuntersuchung Version 2.0, Stand 15.06.2021. Online: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/359/dokumente/20210615_methodensammlungfeststoffuntersuchung_v2_final_0.pdf

LABO (BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ) (2002): Arbeitshilfe Qualitätssicherung. Online: https://www.labo-deutschland.de/documents/lab0-arbeitshilfe-qualitaetssicherung-12-12-2002_d4c.pdf

LABO (BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ) (2008): Bewertungsgrundlagen für Schadstoffe in Altlasten – Informationsblatt für den Vollzug. Stand: 01.09.2008 (ergänzt Juni 2009). Online: https://www.labo-deutschland.de/documents/34_Infoblatt_Altlasten_01092008_e69_34f_2.pdf

LABO (BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ) (2012): Notifizierung und Kompetenznachweis von Untersuchungsstellen im bodenschutzrechtlich geregelten Umweltbereich. Fachmodul Boden und Altlasten, Stand 16. August 2012. Online: https://www.labo-deutschland.de/documents/2_Anlage_Fachmodul_Boden-Altlasten_f06.pdf

LABO (BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ) (2013): Arbeitshilfe Arsentransfer aus Böden in Nahrungs- und Futterpflanzen – Gefahrenbeurteilung und Maßnahmen. Vorhaben B 1.10. Online: <https://www.labo-deutschland.de/Veroeffentlichungen-Vorsorgender-Bodenschutz.html>

LABO (BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ) (2017): Bewertung von Mineralölkohlenwasserstoffen (MKW) bezüglich des Wirkungspfades Boden-Mensch bei einer potentiellen Belastung über Boden, Bodenluft und Innenraumluft – Eine LABO-Hilfestellung für den Vollzug. Online: https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO_MKW-Bewertung_2017_12.pdf

2. Materialien aus den Nachbarländern

2.1. Österreich

UMWELTBUNDESAMT AT (2011): Arbeitshilfe zur Expositionsabschätzung und Risikoanalyse an kontaminierten Standorten. Endbericht zum Arbeitspaket 2 des Projektes „Altlastenmanagement 2010“ (Neuausrichtung der Beurteilung und Sanierung von kontaminierten Standorten), REPORT REP-0351, Wien. Online: <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0351.pdf>

2.2. Schweiz

BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) (2004): Evaluationsbericht – Schwermetallbelastete Böden – Quantitative Modelle zur Abschätzung der Gefährdung von Mensch und Umwelt. Umweltmaterialien Nr. 176, Boden. Online: <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/boden/uw-umwelt-wissen/schwermetallbelasteteboedenquantitativemodellezurabschaetzung-der.pdf.download.pdf/schwermetallbelasteteboedenquantitativemodellezurabschaetzungder.pdf>

WBF (Eidgenössisches Departement für Wirtschaft, Bildung und Forschung) (2013): Quecksilber in Böden: Herleitung eines Sanierungswertes nach AltIV und von Prüfwerten nach VBBo, Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Online: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/altlasten/externe-studien-berichte/quecksilber_in_boedenherleitungeinessanierungswertesnachaltlvund.pdf.download.pdf/quecksilber_in_boedenherleitungeinessanierungswertesnachaltlvund.pdf

BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) (2005): Handbuch Gefährdungsabschätzung und Maßnahmen bei schadstoffbelasteten Böden. Online: <http://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/boden/publikationen-studien/publikationen/gefaehrungsabschaetzung-schadstoffbelasteten-boeden.html>