



## Merkblatt Nr. 3.8/1

Stand: 31.10.01

alte Nummer: 3.8-10

Ansprechpartner: Referat 27

Hausanschrift: Lazarettstraße 67  
80636 München

Telefon: (089) 92 14-01  
Telefax: (089) 92 14-14 35  
Internet: <http://www.bayern.de/lfw>  
E-Mail: [poststelle@lfw.bayern.de](mailto:poststelle@lfw.bayern.de)

### Untersuchung und Bewertung von Altlasten, schädlichen Boden- veränderungen und Gewässerverunreinigungen – Wirkungspfad Boden-Gewässer –

1	Allgemeine Hinweise	3
1.1	Anwendungsbereich	3
1.2	Begriffsbestimmungen	3
2	Untersuchung und Bewertung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen	7
2.1	Orientierende Untersuchung	7
2.1.1	Umfang der orientierenden Untersuchung	7
2.1.2	Sickerwasserprognose	8
2.1.2.1	Untersuchungsverfahren	8
2.1.2.1.1	Grundwasseruntersuchungen	9
2.1.2.1.2	In-situ-Untersuchungen	10
2.1.2.1.3	Materialuntersuchungen	11
2.1.2.2	Transportprognose	12
2.1.3	Bewertung der orientierenden Untersuchung	14
2.2	Detailuntersuchung	14
2.2.1	Umfang der Detailuntersuchung	14
2.2.2	Sickerwasserprognose	15
2.2.2.1	Untersuchungsverfahren	15
2.2.2.2	Transportprognose	16
2.2.3	Bewertung der Detailuntersuchung	16





3	Untersuchung und Bewertung von Grundwasserverunreinigungen	18
3.1	Orientierende Untersuchung	18
3.1.1	Umfang der orientierenden Untersuchung	19
3.1.2	Bewertung der orientierenden Untersuchung	20
3.2	Detailuntersuchung	20
3.2.1	Umfang der Detailuntersuchung	21
3.2.2	Bewertung der Detailuntersuchung	22
4	Sanierungsziele	23
4.1	Allgemeine Vorgaben	23
4.2	Boden	24
4.3	Gewässer	25
5	Literatur	26
Anhang 1: Hinweise zu Untersuchungsverfahren für die Sickerwasserprognose		30
Anhang 2: Hinweise zu Stoffeigenschaften		35
Anhang 3: Wertetabellen und Erläuterungen		47

Dieses Merkblatt ersetzt das Merkblatt Nr. 3.8-10 vom 15. Juli 1998



# 1 Allgemeine Hinweise

## 1.1 Anwendungsbereich

Dieses Merkblatt gibt Hinweise für die Untersuchung und Bewertung des Wirkungspfades Boden-Gewässer bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen nach Bodenschutzrecht sowie für die Untersuchung und Bewertung von Gewässerverunreinigungen nach Wasserrecht. Damit werden in fachlicher Hinsicht die Vorgaben des BBodSchG, der BBodSchV, des BayBodSchG und der BayBodSchVwV für den Wirkungspfad Boden-Gewässer sowie die Regelungen des Art. 68a BayWG für Gewässerverunreinigungen konkretisiert. Die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Pflanze sind nicht Gegenstand dieses Merkblatts.

Die folgenden Hinweise beziehen sich auf die Bearbeitungsphasen orientierende Untersuchung und Detailuntersuchung und sind nach den Rechtsgebieten Bodenschutzrecht und Wasserrecht gegliedert.

Aus dem Bodenschutzrecht ergibt sich in Bezug auf den Wirkungspfad Boden-Gewässer Folgendes:

1. Grundlage für Maßnahmen bei schädlichen Bodenveränderungen oder Altlasten ist grundsätzlich das Bodenschutzrecht. Die materiellen Anforderungen für die Untersuchung, Bewertung und Sanierung ergeben sich einheitlich aus dem Bodenschutzrecht. Die Ermächtigungsnormen für Untersuchungs- und Sanierungsanordnungen ergeben sich in diesen Fällen einheitlich aus dem BBodSchG (vgl. § 9 Abs. 2, § 10 Abs. 1 i. V. m. § 4 Abs. 3, § 13 BBodSchG).
2. Grundlage für Maßnahmen bei Gewässerverunreinigungen, die von schädlichen Bodenveränderungen oder Altlasten hervorgerufen worden sind, ist ebenfalls das Bodenschutzrecht. Die materiellen Anforderungen an die Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Gewässern richten sich nach dem Wasserrecht (vgl. § 4 Abs. 4 Satz 3 BBodSchG).
3. Gewässerverunreinigungen, die nicht durch schädliche Bodenveränderungen oder Altlasten entstanden sind (insbesondere Direkteinträge ohne Bodenpassage), und Gewässerverunreinigungen, die (bisher) keinem verursachenden Grundstück zugeordnet werden können, unterfallen weiterhin dem Wasserrecht (insbes. Art. 68a und Art. 68 Abs. 3 BayWG).

## 1.2 Begriffsbestimmungen<sup>1</sup>

### **Altlasten**

Der Altlastenbegriff ergibt sich aus § 2 Abs. 5 BBodSchG.

### **Boden**

Der Begriff Boden ist in § 2 Abs. 1 BBodSchG definiert.

---

<sup>1</sup> Für die aus dem Bodenschutzrecht stammenden Begriffe wird auf die Begriffsdefinitionen im BBodSchG bzw. in der BBodSchV verwiesen.



### **Erhebliche Grundwasserverunreinigung**

Bei Überschreitung der Geringfügigkeitsschwelle liegt eine erhebliche Grundwasserverunreinigung vor. Es ist also insoweit bereits eine Störung eines Rechtsguts der Allgemeinheit im polizeirechtlichen Sinne eingetreten.

### **Gefahr**

Eine Gefahr für das Schutzgut Grundwasser im Sinne dieses Merkblatts liegt vor, wenn bei ungehindertem Geschehensablauf mit hinreichender Wahrscheinlichkeit in überschaubarer Zukunft eine erhebliche Grundwasserverunreinigung eintritt. Rechtlich maßgeblich ist in diesem Fall die festgestellte oder prognostizierte Stoffkonzentration im Sickerwasser an der Eintrittsstelle ins Grundwasser. Die Feststellung einer Gefahr ist unabhängig von der Bedeutung des betroffenen Grundwassers oder einer vorhandenen bzw. möglichen Grundwassernutzung. Diese Umstände spielen jedoch eine wesentliche Rolle bei der Entscheidung über Art und Umfang der erforderlichen Maßnahmen zur Gefahrenabwehr.

### **Geringfügigkeitsschwelle**

Die Geringfügigkeitsschwelle zeigt die Stoffkonzentration im Grundwasser an, bei deren Unterschreitung allenfalls eine unerhebliche (= geringfügige) Grundwasserverunreinigung vorliegt. Bei ihrer Überschreitung liegt eine erhebliche Grundwasserverunreinigung vor. Die Stufe-1-Werte in Tab. 2 und 4 Anhang 3 entsprechen den Geringfügigkeitsschwellen für Grundwasser und haben den gleichen Zahlenwert wie die Prüfwerte für Sickerwasser in Tab. 3 Anhang 3. Ihre Überschreitung löst weitere Untersuchungs- oder Bewertungsschritte aus.

### **Gewässer**

Unter den Begriff Gewässer fallen gemäß § 1 Abs. 1 WHG oberirdische Gewässer, Küstengewässer und Grundwasser. Die Ausführungen dieses Merkblatts beziehen sich i. d. R. auf das Medium Grundwasser. Inwieweit diese Vorgaben ggf. auf andere Gewässer übertragbar sind, ist im Einzelfall zu prüfen.

### **Grundwasser**

Nach DIN 4049, Teil 1, Hydrologie, ist Grundwasser unterirdisches Wasser, das die Hohlräume der Erdrinde zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegung ausschließlich oder nahezu ausschließlich von der Schwerkraft und den durch die Bewegung selbst ausgelösten Reibungskräften bestimmt wird. Nach der EG-Wasserrahmenrichtlinie ist Grundwasser alles unterirdische Wasser in der Sättigungszone (= wassergesättigte Bodenzone), das in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund steht.

### **Grundwasserverunreinigung**

Eine Grundwasserverunreinigung liegt vor, wenn die Beschaffenheit des Grundwassers durch anthropogene, nachteilige Einträge verändert ist. Eine erhebliche Grundwasserverunreinigung liegt vor, wenn dabei die Stoffkonzentrationen über der Geringfügigkeitsschwelle (= Stufe-1-Wert) liegen. Sie ist geringfügig (= unerheblich), wenn die Stoffkonzentrationen unter der Geringfügigkeitsschwelle liegen.

### **Hilfswerte (Hilfswerte 1 und Hilfswerte 2)**

Für die Bewertung analytisch-chemischer Befunde von Boden- und Bodenluftuntersuchungen bildet ein zweistufiges Wertesystem die Grundlage (Tab. 1 Anhang 3). Die Hilfswerte für Boden und Bodenluft dienen zur Emissionsabschätzung und damit zur Sickerwasserprognose. Sie wer-



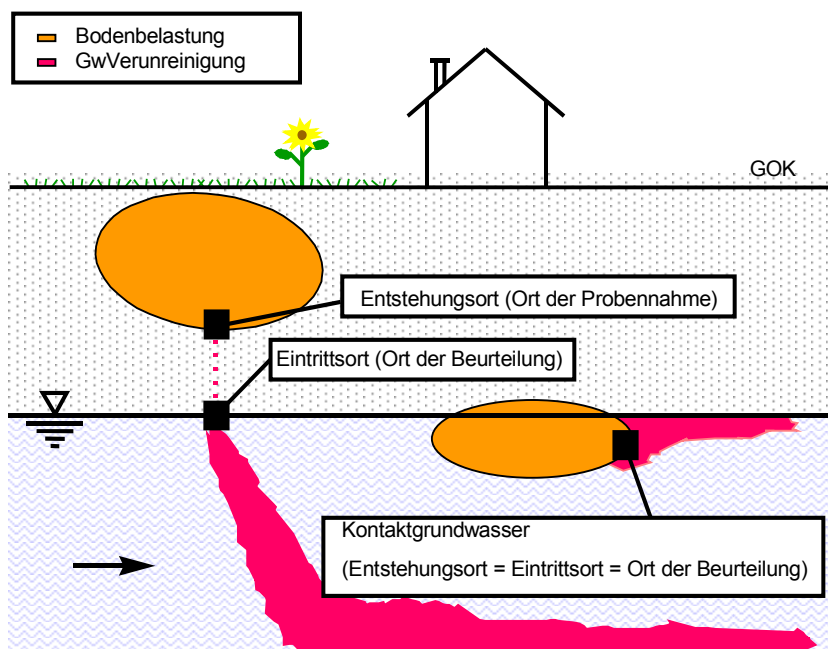
den als Entscheidungshilfe für die Gefährdungsabschätzung herangezogen. Bei einigen anorganischen Stoffen haben die Hilfwerte 2 vor allem eine analysensteuernde Funktion für weitergehende Untersuchungen. Anders als bei den Prüf- und Stufenwerten kann die Überschreitung von Hilfwerten keine unmittelbare Grundlage für die Anordnung von Untersuchungen oder Maßnahmen sein.

### Ort der Beurteilung

Der nach Bodenschutzrecht maßgebliche Ort für die Beurteilung einer Grundwasserverunreinigung oder einer Gefahr für das Grundwasser ist der Bereich im Untergrund, an dem die Stoffe im Sickerwasser noch in unveränderter Konzentration vorliegen. Für diesen Ort der Beurteilung ergeben sich zwei Fallgestaltungen (s. Abbildung 1):

- Die schädliche Bodenveränderung/Altlast liegt **oberhalb der Grundwasseroberfläche**: Ort der Beurteilung ist der Übergangsbereich von der ungesättigten in die gesättigte Zone (§ 4 Abs. 3 Satz 3 BBodSchV). Findet der Stoffeintrag über das Sickerwasser statt, ist dies der Bereich, an dem das Sickerwasser Teil der gesättigten Zone, also Grundwasser wird.
- Die schädliche Bodenveränderung/Altlast **liegt im Grundwasser**: Ort der Beurteilung ist der Kontaktbereich zwischen dem verunreinigten Boden/Altlastenmaterial und dem durch- bzw. umströmenden Grundwasser (Kontaktgrundwasser).

Der Ort der Beurteilung stimmt meist nicht mit dem Ort der Probennahme überein.



**Abbildung 1:** Ort der Probennahme und Ort der Beurteilung

### **Prüfwert**

Prüfwert ist der in § 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 BBodSchG definierte Stoffkonzentrationswert. Er dient unmittelbar als Beurteilungsmaßstab für Sickerwasser am Ort der Beurteilung und kann ferner zur Bewertung von Eluat- und sonstigen Sickerwasserbefunden herangezogen werden. In Tab. 3 Anhang 3 sind die Prüfwerte aus Anhang 2 Nr. 3 BBodSchV aufgeführt. Für Parameter, die in der BBodSchV nicht enthalten sind, wurden die abgeleiteten Geringfügigkeitsschwellen [v. d. TRENCK, 1999] als vorläufige Prüfwerte in die Tab. 3 Anhang 3 übernommen. [Anmerkung: Im Folgenden wird der „Prüfwert zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser“ nach Anhang 2 Nr. 3.1 BBodSchV immer mit dem Begriff **Prüfwert** bezeichnet.]

### **Sanierungsziel**

Als Sanierungsziel ist die tolerierbare Stoffkonzentration zu verstehen, die nach Abschluss einer Sanierungsmaßnahme im Grundwasser und im Boden verbleiben kann.

### **Schädliche Bodenveränderungen**

Schädliche Bodenveränderungen sind in § 2 Abs. 3 BBodSchG definiert.

[Anmerkung: Im Folgenden wird der Begriff „schädliche Bodenveränderungen“ aus Gründen der Vereinfachung immer für „stoffliche schädliche Bodenveränderungen“ verwendet.]

### **Sickerwasserprognose**

In § 2 Nr. 5 i. V. m. Anhang 1 Nr. 3.3 BBodSchV definierte Abschätzung des Schadstoffeintrags am Ort der Beurteilung.

### **Stufenwerte (Stufe-1- und Stufe-2-Werte)**

Für die Bewertung analytisch-chemischer Befunde von Grundwasseruntersuchungen bildet ein zweistufiges Wertesystem die Grundlage (Tab. 4 Anhang 3). Die Stufe-1-Werte für Grundwasser entsprechen den Geringfügigkeitsschwellenwerten und haben den gleichen Zahlenwert wie die Prüfwerte und vorläufigen Prüfwerte. Die Stufe-2-Werte dienen unmittelbar als Beurteilungsmaßstab für das Grundwasser und für Sickerwasser am Ort der Beurteilung. Sie sind somit Entscheidungsgrundlage für die Gefährdungsabschätzung und für die Erfordernis von Sanierungsmaßnahmen. Daneben können die Stufe-2-Werte zur Bewertung von Eluat- und sonstigen Sickerwasserbefunden herangezogen werden.

### **Verdachtsflächen/altlastverdächtige Flächen**

Verdachtsflächen und altlastverdächtige Flächen sind in § 2 Abs. 4 und Abs. 6 BBodSchG definiert.

[Anmerkung: Im Folgenden werden beide Flächentypen aus Gründen der Vereinfachung immer mit dem Begriff **Altlastverdachtsflächen** bezeichnet.]

### **Wassergesättigte Bodenzone**

In Anlehnung an DIN 4049, Teil 1, Hydrologie ist die wassergesättigte Bodenzone der Gesteinskörper, der zum Betrachtungszeitpunkt mit Grundwasser gefüllt ist.



## 2 Untersuchung und Bewertung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen

Bestehen Anhaltspunkte für das Vorliegen einer Altlast oder schädlichen Bodenveränderung, so ist von der Kreisverwaltungsbehörde zunächst die Erhebung vorzunehmen und die katastermäßige Erfassung der Altlastverdachtsfläche beim LfU zu veranlassen. Anschließend prüft die Kreisverwaltungsbehörde im Rahmen der historischen Erkundung, ob tatsächlich ein Anfangsverdacht besteht. Auf der Grundlage der fachlich geprüften Ergebnisse der historischen Erkundung führt das Wasserwirtschaftsamt eine orientierende Untersuchung (§ 2 Nr. 3 BBodSchV) durch (vgl. Nr. 4.1.1 BayBodSchVwV).

Die Untersuchung und Bewertung von Grundwasserverunreinigungen, die durch Altlasten bzw. schädliche Bodenveränderungen verursacht werden, ist gemäß den Vorgaben in Kap. 3 durchzuführen.

### 2.1 Orientierende Untersuchung

Die orientierende Untersuchung dient nach § 2 Nr. 3 BBodSchV dazu festzustellen, ob der Verdacht einer schädlichen Bodenveränderung bzw. Altlast ausgeräumt ist oder ein hinreichender Verdacht im Sinne des § 9 Abs. 2 Satz 1 BBodSchG besteht (vgl. BayBodSchVwV Nr. 4.1.1.4). Die orientierende Untersuchung ist nach dieser Zielsetzung auszurichten. Die unten aufgeführten Untersuchungen sind nicht zwingend alle durchzuführen, sondern nur soweit bis das o. g. Ziel erreicht ist.

#### 2.1.1 Umfang der orientierenden Untersuchung

Die orientierende Untersuchung umfasst folgende wesentliche Schritte:

- Durchführen einer gemeinsamen Ortseinsicht (Kreisverwaltungsbehörde, Wasserwirtschaftsamt, ggf. weitere Fachbehörden, ggf. beauftragter Sachverständiger)
- Planen von Untersuchungen auf der Grundlage der historischen Erkundung (z. B. Festlegen der Untersuchungsmethodik, der Probennahmepunkte und des Analysenumfangs bei chemischen Untersuchungen)
- Durchführen von Untersuchungen (z. B. organoleptische Prüfungen, Baggerschürfe, geophysikalische Messungen, Entnahme von Wasser-, Bodenluft- und Bodenproben sowie chemische Analysen)
- Darstellen und Bewerten der Untersuchungsergebnisse und der weiteren für die Sickerwasserprognose notwendigen Erkenntnisse
- Erstellen einer Sickerwasserprognose
- Treffen einer Aussage unter Zugrundelegung der Sickerwasserprognose, ob der hinreichende Verdacht erhärtet oder ausgeräumt ist.



Die Sickerwasserprognose basiert auf den Untersuchungsergebnissen und der gutachterlichen Bewertung. In Anhang 1 Nr. 3.3 BBodSchV ist kein bestimmtes Verfahren zur Durchführung der Sickerwasserprognose vorgeschrieben. Es wird lediglich darauf hingewiesen, dass praxiserprobte Verfahren bevorzugt anzuwenden sind.

Im Rahmen der orientierenden Untersuchung sind hierfür Untersuchungen vor Ort durchzuführen. In aller Regel ist der Ort der Beurteilung einer Probennahme nicht zugänglich. Somit kann die dort vorliegende bzw. zu erwartende Stoffkonzentration auch nicht direkt gemessen werden. Die Sickerwasserbeschaffenheit am Ort der Beurteilung muss also auf der Grundlage der Untersuchung von Material-, Bodenluft-, Sicker- oder Grundwasserproben, die außerhalb des Ortes der Beurteilung entnommen wurden, in einer fachlichen Beurteilung abgeschätzt werden.

In begründeten Ausnahmefällen kann die Sickerwasserprognose in dieser Bearbeitungsphase auch ohne Messungen anhand der historischen Erkundung, Ortseinsicht, organoleptischen Beurteilung von Schürfen, von Erfahrungswerten aus Vergleichsfällen und gutachterlichen Feststellungen erfolgen, wenn sich hieraus ein hinreichender Verdacht für das Vorliegen einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast gemäß § 9 Abs. 2 BBodSchG ergibt. Dies kann z. B. in folgenden Fällen gegeben sein:

- offensichtlicher Eintrag von wassergefährdenden Stoffen in den Boden (z. B. Stoffaustritte bei Transportunfällen)
- offensichtliche Verunreinigungen von Grundwasser (z. B. Ölfilm, Lösungsmittelgeruch)
- offensichtliche Mängel an Anlagen zum Lagern, Abfüllen, Umschlagen, Herstellen, Behandeln und Verwenden wassergefährdender Stoffe (LAU- und HBV-Anlagen)
- bereits vorliegende Nachweise von Prüfwertüberschreitungen aufgrund von sonstigen Untersuchungen (z. B. durch Dritte)
- Schürfe mit offensichtlichen Verunreinigungen durch wassergefährdende Stoffen (z. B. Schlacken, Stoffe in Phase erkennbar).

Um den Umfang der orientierenden Untersuchung auf das notwendige Maß zu beschränken, ist ein schrittweises Vorgehen sinnvoll. Ist der hinreichende Verdacht erhärtet, kann die orientierende Untersuchung beendet werden. Es ist zu beachten, dass häufig ein erhöhter Untersuchungsaufwand betrieben werden muss, um einen Gefahrenverdacht auszuräumen. Insbesondere wenn nach der (fundierten) historischen Erkundung keine Hinweise auf Belastungsschwerpunkte vorliegen, ist für eine repräsentative Erkundung der Altlastverdachtsfläche eine Rasterbeprobung erforderlich. Des Weiteren können ergänzende Materialuntersuchungen oder Grundwasseruntersuchungen erforderlich sein.

## 2.1.2 Sickerwasserprognose

### 2.1.2.1 Untersuchungsverfahren

Im Rahmen der orientierenden Untersuchung ist mittels einer Sickerwasserprognose abzuschätzen, ob im Sickerwasser am Ort der Beurteilung eine Überschreitung des Prüfwertes vorliegt oder





in überschaubarer Zukunft zu erwarten ist. Die Sickerwasserprognose kann nach Anhang 1 Nr. 3.3 BBodSchV auf der Grundlage von

- Grundwasseruntersuchungen
- in-situ-Untersuchungen
- und/oder Materialuntersuchungen

auch unter Anwendung von Stofftransportmodellen erfolgen. Allerdings ist im Rahmen der orientierenden Untersuchung der Einsatz von Stofftransportmodellen nicht zielführend.

Die derzeitige oder künftige Sickerwasserkonzentration am Ort der Beurteilung kann nur annäherungsweise abgeschätzt werden (Anhang 1 Nr. 3.3 BBodSchV). Genaue Konzentrationsangaben sind daher insbesondere im Rahmen der orientierenden Untersuchung weder sinnvoll noch möglich. Die Abschätzung, ob eine Prüfwertüberschreitung zu erwarten ist oder nicht (Prognose), ist ausreichend.

#### 2.1.2.1.1 Grundwasseruntersuchungen

Wird die Sickerwasserprognose auf Grundwasseruntersuchungen gestützt, ist auf die Stoffkonzentrationen im Sickerwasser am Ort der Beurteilung rückzuschließen.

Bei der Abschätzung, ob am Ort der Beurteilung der Prüfwert überschritten wird, sind die Stoffkonzentration im Grundwasseranstrom, die Verdünnung und Dispersion, die Repräsentativität der Abstromerfassung sowie das Schadstoffverhalten und -inventar im Boden zu berücksichtigen.

Dabei ist zu beachten, dass selbst bei der Probengewinnung aus dem Schadenszentrum i.d.R. eine Durchmischung und damit Verdünnung des kontaminierten Grundwassers mit unbelastetem Grundwasser unvermeidbar ist. Die ermittelte Grundwasserkonzentration kann somit nicht der Konzentration des Sickerwassers am Ort der Beurteilung gleichgesetzt werden.

Es sind folgende Fallgestaltungen möglich:

- Wird eine Überschreitung des Stufe-1-Wertes der Tab. 4 Anhang 3 im Grundwasser im Schadenszentrum oder im Grundwasserabstrom einer Verdachtsfläche festgestellt, ist eine erhebliche Gewässerverunreinigung nachgewiesen. In solchen Fällen ist stets der Verdacht einer Altlast oder schädlichen Bodenveränderung bestätigt. Die abgeleitete Prüfwertüberschreitung im Sickerwasser am Ort der Beurteilung ist unter Berücksichtigung der o.g. Kriterien kurz darzulegen und zu begründen.
- Liegt die Stoffkonzentration im Grundwasser an der Probennahmestelle unterhalb des Stufe-1-Wertes der Tab. 4 Anhang 3, aber oberhalb des geogenen Hintergrundwertes und oberhalb der Zustromkonzentration, muss im Einzelfall abgeschätzt werden, ob der Prüfwert am Ort der Beurteilung überschritten ist oder in überschaubarer Zeit überschritten wird. Neben den Stoffkonzentrationen im Grundwasser fließen die o.g. Kriterien sowie die in Kap. 2.1.2.2 (Transportprognose) genannten hydrogeologischen Kenndaten in diese Abschätzung ein. Weiterhin ist zu prüfen, ob sich bereits ein quasi-stationärer Zustand eingestellt hat. D. h. es ist zu berücksichtigen, dass die Ausbreitung der Stoffe verzögert und die Belastung im Be-



reich der Messstelle noch nicht oder erst teilweise angekommen sein kann. Im Einzelfall kann also der Verdacht einer Altlast oder schädlichen Bodenveränderung auch bei unauffälligen Untersuchungsergebnissen im Grundwasser bestehen.

Wird aufgrund der Grundwasseruntersuchung der Verdacht hinreichend bestätigt, so kann die orientierende Untersuchung abgeschlossen werden. Es ist dann in jedem Fall eine anschließende Detailuntersuchung erforderlich. Um einen Verdacht auszuräumen, sind i. d. R. neben Grundwasseruntersuchungen auch in-situ- und/oder Materialuntersuchungen einzubeziehen.

Hinweise zu Stoffeigenschaften und Untersuchungsverfahren sind im Anhang 1 und 2 aufgeführt. Weitere Hinweise zu Grundwasseruntersuchungen enthält Kap. 3.1.

Die Bewertung der Untersuchungsergebnisse erfolgt nach Abbildung 2 in Kap. 2.1.3.

#### 2.1.2.1.2 In-situ-Untersuchungen

##### Bodenluftuntersuchungen

Bodenluftuntersuchungen sind geeignet, wenn Emissionen von leichtflüchtigen organischen Kontaminanten (z. B. LHKW, BTEX, Vergaserkraftstoffe) zu erwarten sind. Bei diesen Stoffgruppen erfolgt die Abschätzung der Sickerwasserbeschaffenheit über Bodenluftuntersuchungen, da Elutionsverfahren nicht und Bodenuntersuchungen nur mit Einschränkung geeignet sind. Die sich einstellende Konzentration eines Stoffes in der Bodenluft ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) ist außer vom Stoffgehalt im Boden auch von Temperatur und Druck (Dampfdruck), vom Bodentyp und von den hydrogeologischen Randbedingungen abhängig. Vielfältige Erfahrungen in konkreten Fällen zeigen, dass ein hinreichend sicherer Zusammenhang zwischen Bodenluftkonzentrationen und der Gefahr für das Grundwasser besteht. Deshalb können nach jetzigem Kenntnisstand die Hilfwerte in Tab.1 Anhang 3 für Bodenluftkonzentrationen für die Abschätzung der Sickerwasserbeschaffenheit am Ort der Probenahme herangezogen werden.

Die Gefahr einer erheblichen Grundwasserverunreinigung besteht grundsätzlich nicht, wenn die untersuchten Bodenluftkonzentrationen in repräsentativen Proben unter dem Hilfwert 1 der Tab. 1 Anhang 3 liegen - vorausgesetzt, es sind keine anderen Verdachtsmomente (z. B. geophysikalische Messungen, historische Erkundungsdaten, Eluatuntersuchungen, tatsächliche Grundwasserverunreinigungen) bekannt. Eine Transportprognose oder weitere Untersuchungen (z. B. Elutionen) sind dann nicht erforderlich, der Gefahrenverdacht ist ausgeräumt.

Werden bei Bodenluftkonzentrationen für LCKW und BTEX im belasteten Boden Werte über dem Hilfwert 1 der Tab. 1 Anhang 3 nachgewiesen, so ist nach den Erfahrungen der Wasserwirtschaftsverwaltung von einer Prüfwertüberschreitung im Sickerwasser am Ort der Probenahme auszugehen. Bei der Bewertung von erhöhten Bodenluftkonzentrationen für FKW und FCKW sind die Hinweise in Kap. 2 Anhang 1 zu beachten.

Im Hinblick auf die Sickerwasserprognose für den Ort der Beurteilung ist dann noch eine Transportprognose (Kap. 2.1.2.2) durchzuführen. Weitere Hinweise zu den Untersuchungsverfahren enthält Anhang 1.



### In-situ-Sickerwasseruntersuchungen

In-situ-Sickerwasseruntersuchungen können mit Hilfe von Saugkerzen, -platten, Lysimetern etc. durchgeführt werden. Die Auswahl des jeweiligen Systems muss fallbezogen erfolgen. Generell sind diese Art von Untersuchungen zeitlich und finanziell aufwändig, so dass solche Untersuchungen nur in Einzelfällen eingesetzt werden sollten, auch wenn sie den Vorteil einer relativ genauen Erfassung der Sickerwasserqualität bieten können. Werden in-situ-Sickerwasseruntersuchungen eingesetzt, so ist auch hier unter Berücksichtigung der Einbautiefe und Untergrundverhältnisse (vgl. Kap. 2.1.2.2) die derzeitige und künftige Sickerwasserbeschaffenheit am Ort der Beurteilung abzuschätzen.

Die Untersuchung von ggf. zutage tretendem Sickerwasser, das z. B. aus einem Hang bzw. Deponiefuß austritt, bietet eine gute Möglichkeit, direkte Hinweise auf Emissionen zu erhalten.

#### 2.1.2.1.3 Materialuntersuchungen

Mittels einer Emissionsabschätzung sind Beschaffenheit und Ausmaß von derzeitigen und künftigen Emissionen für den Ort der Probennahme zu bestimmen. Das soll nach Möglichkeit die Stelle sein, an der eine Emission entsteht, an der also die höchsten Stoffkonzentrationen vorliegen.

- Die Gefahr einer erheblichen Grundwasserverunreinigung besteht grundsätzlich nicht, wenn die untersuchten Gesamtstoffgehalte in repräsentativen Proben unter den Hilfwerten 1 der Tab. 1 Anhang 3 liegen - vorausgesetzt, es sind keine anderen Verdachtsmomente (z. B. geophysikalische Messungen, historische Erkundungsdaten, Eluatuntersuchungen, tatsächliche Grundwasserverunreinigungen) bekannt. Der Gefahrenverdacht gilt dann als ausgeräumt. Eine Transportprognose bzw. weitere Untersuchungen (z. B. Elutionen) sind i. d. R. nicht erforderlich. Abweichend hiervon ist für Arsen, Antimon, Chrom, Cyanid und Phenole sowie bei Vorliegen von Komplexbildnern auch bei Gesamtstoffgehalten unter dem Hilfwert 1, aber über geogenen Hintergrundgehalten [GLA, 1998] eine Elution nach DIN 38414-4 (kurz: S4-Elution) vorzunehmen.
- Werden bei Gesamtstoffgehalten im belasteten Boden Konzentrationen über dem Hilfwert 1 der Tab. 1 Anhang 3 nachgewiesen:
  - so kann bei den lipophilen org.-chem. Stoffgruppen (Mineralölkohlenwasserstoffe, PCB, PBT, Chlorphenole und Chlorbenzole) nach den Erfahrungen der Wasserwirtschaftsverwaltung von einer Prüfwertüberschreitung im Sickerwasser am Ort der Probennahme ausgegangen werden. Bei PAK sind zusätzlich Säulenversuche nach dem Merkblatt Nr. 20 des Landesumweltamts Nordrhein-Westfalen [LUA NRW, 2000] durchzuführen und deren Ergebnisse bei der Emissionsabschätzung heranzuziehen (vgl. Anhang 1);
  - so sind bei anorganischen und organischen hydrophilen Stoffen (z. B. Phenole) S4-Eluatanalysen durchzuführen und deren Ergebnisse zur Emissionsabschätzung heranzuziehen. Werden im untersuchten Eluat die Prüfwerte der Tab. 3 Anhang 3 überschritten, ist gleichfalls von einer Prüfwertüberschreitung im Sickerwasser am Ort der Probennahme auszugehen. Bei schwer löslichen anorganischen Stoffen sind bei Unterschreitung der



Prüfwerte im S4-Eluat ggf. pH<sub>stat</sub>-Elutionen durchzuführen. Die Hinweise in Anhang 1 sind zu beachten.

Erfolgt die Sickerwasserprognose auf der Grundlage von Materialuntersuchungen, so ist bei Prüfwertüberschreitung am Ort der Probennahme (Emissionsabschätzung) stets eine Transportprognose (Kap. 2.1.2.2) durchzuführen.

Weitere Hinweise zu Untersuchungsverfahren und zur Emissionsabschätzung für die einzelnen Stoffgruppen enthält Anhang 1.

### 2.1.2.2 Transportprognose

Wird im Rahmen der Emissionsabschätzung eine Überschreitung des Prüfwertes im Sickerwasser am Ort der Probennahme festgestellt, so liegen konkrete Anhaltspunkte für eine Grundwassergefährdung vor, es sei denn aufgrund der Untergrundbeschaffenheit kann fachlich plausibel begründet werden, dass der Prüfwert am Ort der Beurteilung derzeit und künftig nicht überschritten wird. Es ist also zu prüfen, ob durch die Abbau- und Rückhaltewirkung der ungesättigten Zone eine Verminderung der Stoffkonzentrationen erfolgt (Transportprognose). Eine Sickerwasserprognose unter unmittelbarer Anwendung der Prüfwerte auf Sickerwasser, das am Ort der Probennahme entsteht, ist somit auf den ungünstigsten Fall abgestellt, dass die ungesättigte Bodenzone nicht zu einer Verminderung der Stoffkonzentrationen beiträgt.

Die Transportprognose umfasst eine stark vereinfachte Abschätzung der Rückhaltewirkung (Sorption, Filterwirkung) der ungesättigten Zone sowie der mikrobiologischen Abbauprozesse. Maßgeblich bei dieser Abschätzung sind:

- Mächtigkeit der unbelasteten Grundwasserüberdeckung:  
Unter der unbelasteten Grundwasserüberdeckung wird der Bereich zwischen Unterkante des verunreinigten Bodenbereichs und der Grundwasseroberfläche bei Grundwasserhöchststand verstanden. Die Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung ist gering, wenn sie höchstens 2 m beträgt. 2 m bis 10 m gelten als mittlere, über 10 m als große Mächtigkeit.
- Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ -Wert) und Bodenart:  
Durchlässigkeitsbeiwert und Bodenart sind eng miteinander korreliert. Durchlässige und stark durchlässige Grundwasserüberdeckungen haben bei hoher Abstandsgeschwindigkeiten des Sickerwassers eine geringe Rückhalte- und Abbauwirkung. Bei geringer lateraler Ausdehnung schwachdurchlässiger Schichten oder bei zu Trockenrissen neigenden tonigen Bodenschichten ist die Rückhalte- und Abbauwirkung ebenfalls als gering einzustufen. Die mechanische Filterwirkung ist wegen Größe und Verteilung der Poren in groben, gut sortierten Substraten besonders gering. Dagegen hat eine bei hohem Feinkornanteil große innere Oberfläche wegen der erhöhten Ionenaustauschkapazität eine hohe Rückhaltewirkung.

sehr stark durchlässig	$> 10^{-2}$ m/s
stark durchlässig	$10^{-2}$ bis $10^{-4}$ m/s
durchlässig	$10^{-4}$ bis $10^{-6}$ m/s
schwach durchlässig	$10^{-6}$ bis $10^{-8}$ m/s
sehr schwach durchlässig	$< 10^{-8}$ m/s



- Grundwasserneubildung bzw. Versiegelung:  
In den Untergrund infiltriertes und in das Grundwasser gelangendes Wasser (Grundwasserneubildung) befördert gelöste oder partikulär gebundene Stoffe. Bei hoher Grundwasserneubildung geschieht dies schnell und in großer Menge. Rückhalte- und Abbauvorgänge können wegen geringer Verweilzeiten nicht voll wirksam werden. Bei versiegelten Böden wird die Grundwasserneubildung und damit der Transport von wassergelösten Stoffen verringert oder ganz verhindert. Dabei ist die Qualität und die Dauerhaftigkeit der Versiegelung zu beachten. Leichtflüchtige Stoffe (z. B. LHKW, BTEX) können sich über die Bodenluft auch unter versiegelten Flächen bis ins Grundwasser ausbreiten.
- Mikrobiologische Abbauprozesse:  
Einige organische Schadstoffe, z. B. MKW, sind biologisch abbaubar. Beim mikrobiologischen Abbau spielt wegen vergleichsweise geringer Abbaugeschwindigkeiten die Verweilzeit des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung eine große Rolle.
- Weitere Einflussfaktoren:  
Weitere Einflussfaktoren auf Rückhaltewirkung und Abbauprozesse in der wasserungesättigten Zone - wie Humus-, Wasser- und Sauerstoffgehalt, pH-Wert, Pufferungsvermögen - und stoffspezifische Eigenschaften - wie Löslichkeit oder Wechselwirkungen zwischen gelöster und fester Phase (Verteilungskoeffizient) - sowie geohydraulische Eigenschaften der wasserungesättigten Zone sind soweit bekannt zu berücksichtigen.

Liegen zu den oben genannten Faktoren keine ausreichenden Informationen vor, so kann die Transportprognose im Rahmen der orientierenden Untersuchung auch anhand folgender Grundlagen grob abgeschätzt werden:

- Ergebnisse von Bodenuntersuchungen und Untergrundansprache
- Grundlegende wissenschaftliche Erkenntnisse zum Schadstofftransport im Boden
- Regionale Kenntnisse zur Untergrundbeschaffenheit (Hydrogeologie) und zum Wassertransport
- Regionale Erfahrungen zur Schadstoffausbreitung aus Vergleichsfällen

Nach Maßgabe von Anhang 1 Nr. 3.3 BBodSchV sind bei der Transportprognose allgemein vorliegende wissenschaftliche Erkenntnisse und Erfahrungen für den jeweiligen Standort heranzuziehen. Die Einflussgrößen sind aufgrund allgemein vorliegender wissenschaftlicher Erkenntnisse [GRATWOHL, 2000] [MATHEWS, 2000] abzuschätzen und zu bewerten. Die Kenntnisse zur lokalen Untergrundbeschaffenheit und Schadstoffausbreitung werden ebenfalls zur Transportprognose herangezogen. Es sind also nicht für jeden Einzelfall umfangreiche Messungen oder bodenkundliche Untersuchungen für die Transportprognose notwendig. Eine näherungsweise Abschätzung der evtl. Stoffverlagerung bis zum Ort der Beurteilung ist für die Transportprognose im Rahmen der orientierenden Untersuchung ausreichend. Wegen kleinräumig variierender Untergrundverhältnisse ist nach derzeitigem Kenntnisstand eine quantitative Prognose nicht möglich. Hinweise zur Bewertung der Rückhaltewirkung des Untergrunds können auch dem Bewertungsschema in Anhang 2 Teil 2 der BayBodSchVwV, Bewertung des Transmissionspotentials, entnommen werden.



### 2.1.3 Bewertung der orientierenden Untersuchung

Die Bewertung der prognostizierten Stoffkonzentrationen am Ort der Beurteilung ist gemäß Abbildung 2 durchzuführen. Ergibt die Sickerwasserprognose mindestens für einem Messwert eine Prüfwertüberschreitung am Ort der Beurteilung und kann der Messwert auf Grund der aktuellen Erkenntnisse (z. B. historische Erkundung) als plausibel betrachtet werden, so ist der Gefahrenverdacht hinreichend erhärtet. Wird bei der orientierenden Untersuchung auf der Grundlage einer aussagefähigen historischen Erkundung oder mittels Rasterbeprobung eine Unterschreitung des Prüfwerts am Ort der Beurteilung für die gesamte Altlastverdachtsfläche prognostiziert, ist der Gefahrenverdacht ausgeräumt.

<b>Stoffkonzentration am Ort der Beurteilung</b>	<b>Bewertung (orientierende Untersuchung)</b>
< <b>Prüfwert</b> (Tab. 3 Anhang 3)	– Gefahrenverdacht ausgeräumt
> <b>Prüfwert</b> (Tab. 3 Anhang 3)	– hinreichender Gefahrenverdacht erhärtet – Detailuntersuchung erforderlich

**Abbildung 2:** Bewertung der Ergebnisse nach der orientierenden Untersuchung

Die Ergebnisse der orientierenden Untersuchung sind in einem Gutachten darzulegen.

## 2.2 Detailuntersuchung

Im Rahmen der Detailuntersuchung, die die Kreisverwaltungsbehörde gegenüber dem Verpflichteten nach § 9 Abs. 2 Satz 1 BBodSchG anordnet, sind nach § 2 Nr. 4 BBodSchV die notwendigen Untersuchungen zur abschließenden Gefährdungsabschätzung durchzuführen (vgl. Nr. 4.1.2.2 BayBodSchVwV). Des Weiteren ist im Rahmen der Detailuntersuchung nach § 4 Abs. 4 BBodSchV auch abschließend festzustellen, ob Sanierungsmaßnahmen nach § 2 Abs. 7 BBodSchG oder Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen nach § 2 Abs. 8 BBodSchG zur Gefahrenabwehr erforderlich sind. Vor der Durchführung der Detailuntersuchung ist vom Verpflichteten ein zielführendes Untersuchungsprogramm vorzulegen. Bei großflächigen und/oder komplexen Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen ist es sinnvoll, die Detailuntersuchung iterativ und damit mehrstufig zu gestalten.

### 2.2.1 Umfang der Detailuntersuchung

Die Detailuntersuchung umfasst folgende wesentliche Schritte:

- Erstellen eines zielführenden Untersuchungsprogramms
- Vertieftes Erkunden der hydrogeologischen und geologischen Standortbedingungen zur Beurteilung des Stofftransports im Untergrund
- Lokalisieren der Belastungszentren sowie horizontales und vertikales Abgrenzen der kontaminierten Bereiche in gesättigter und ungesättigter Zone (Rasterbeprobung)



- Erfassen des Schadstoffinventars nach Art, Menge und räumlicher Verteilung
- Ermitteln der mobilen oder mobilisierbaren Anteile
- Abschätzen der zeitlichen Entwicklung des Schadstoffinventars unter Berücksichtigung von Milieuänderungen (z. B. pH, Redoxpotenzial)
- Ggf. Anwenden geeigneter Stofftransportmodelle
- Durchführen von Grundwasseruntersuchungen
- Erstellen einer Sickerwasserprognose zur abschließenden Gefährdungsabschätzung
- Beurteilen inwieweit für den Wirkungspfad Boden-Gewässer Maßnahmen (Sanierungsmaßnahmen oder Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen) erforderlich sind
- Falls Maßnahmen erforderlich sind, beurteilen ob Sanierungsuntersuchungen im Sinne von § 13 BBodSchG notwendig sind oder ob die Vorlage eines Sanierungskonzepts auf der Grundlage von § 10 Abs. 1 BBodSchG ausreicht.

### 2.2.2 Sickerwasserprognose

Die Sickerwasserprognose erfolgt grundsätzlich nach der im Kapitel 2.1.2 dargestellten Vorgehensweise. Einzelne Abweichungen bzw. Ergänzungen, die sich aus der umfassenderen Zielsetzung der Detailuntersuchung ergeben, sind im Folgenden beschrieben.

Bei der Sickerwasserprognose im Rahmen der Detailuntersuchung müssen neben den Stoffkonzentrationen stets auch die räumliche Ausdehnung, das Schadstoffinventar und die Stofffrachten abgeschätzt werden.

#### 2.2.2.1 Untersuchungsverfahren

Hinsichtlich der anzuwendenden Untersuchungsverfahren und deren Interpretation für die Sickerwasserprognose ist gemäß Kap. 2.1.2.1 und Anhang 1 vorzugehen. Für die abschließende Gefährdungsabschätzung hinsichtlich des Wirkungspfades Boden-Gewässer sind in der Detailuntersuchung stets auch Grundwasseruntersuchungen durchzuführen. Diese können im Einzelfall auch iterativ erfolgen.

Bei Grundwasseruntersuchungen ist ergänzend zu Kap. 2.1.2.1.1 zu beachten:

- Bei Überschreitung des Stufe-1-Wertes der Tab. 4 Anhang 3 im Schadenszentrum oder unmittelbaren Abstrom ist im Einzelfall in Anlehnung an Kap. 2.1.2.1.1 abzuschätzen, ob der Prüfwert der Tab. 3 Anhang 3 oder der Stufe-2-Wert der Tab. 4 Anhang 3 am Ort der Beurteilung überschritten wird.
- Bei Überschreitung des Stufe-2-Wertes der Tab. 4 Anhang 3 im Schadenszentrum oder unmittelbaren Grundwasserabstrom einer Altlast oder schädlichen Bodenveränderung ist i. d. R. von einer Überschreitung des Stufe-2-Wertes der Tab. 4 Anhang 3 am Ort der Beurteilung auszugehen. Dies ist kurz zu belegen.



Bei in-situ-Untersuchungen ist ergänzend zu Kap. 2.1.2.1.2 zu beachten, dass erfahrungsgemäß von einer Überschreitung des Stufe-2-Wertes der Tab. 4 Anhang 3 im Sickerwasser am Ort der Probennahme ausgegangen werden kann, wenn

- bei leichtflüchtigen organischen Stoffen (LCKW, BTEX,) der Hilfwert 2 in der Bodenluft der Tab. 1 Anhang 3 überschritten wird.

Bei Materialuntersuchungen ist ergänzend zu Kap. 2.1.2.1.3 zu beachten, dass erfahrungsgemäß von einer Überschreitung des Stufe-2-Wertes der Tab. 4 Anhang 3 im Sickerwasser am Ort der Probennahme ausgegangen werden kann, wenn

- bei den lipophilen organischen Stoffgruppen Mineralölkohlenwasserstoffe, PCB, Chlorphenolen und Chlorbenzolen der Hilfwert 2 im Gesamtstoffgehalt der Tab. 1 Anhang 3 überschritten wird
- bei PAK im untersuchten Säuleneluat der Stufe-2-Wert der Tab. 4 Anhang 3 überschritten wird
- bei anorganischen und organischen hydrophilen Stoffen im untersuchten S4-Eluat der Stufe-2-Wert der Tab. 4 Anhang 3 überschritten wird. Bei schwer löslichen anorganischen Stoffen sind bei Unterschreitung der Prüfwerte im S4-Eluat die Hinweise in Anhang 1 zu beachten.

#### 2.2.2.2 Transportprognose

Die Transportprognose ist gegenüber der groben Abschätzung im Rahmen der orientierenden Untersuchung zu präzisieren. Dabei sind die im Kap. 2.1.2.2 aufgeführten maßgeblichen Einflussfaktoren

- Mächtigkeit der unbelasteten Grundwasserüberdeckung,
- Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ -Wert) und Bodenart,
- Grundwasserneubildung bzw. Versiegelung,
- mikrobiologische Abbauprozesse und
- weitere Einflussfaktoren

zu ermitteln. Die Stoffrückhaltung sowie die mikrobiologischen Abbauprozesse in der ungesättigten Zone sind ggf. durch Untersuchungen zu quantifizieren. Auch der Einsatz von validierten Stofftransportmodellen kann im Einzelfall zweckmäßig sein.

#### 2.2.3 Bewertung der Detailuntersuchung

In dem zusammenfassenden Gutachten für den Wirkungspfad Boden-Gewässer sind die Analysergebnisse der Stoffkonzentrationen in den verschiedenen untersuchten Medien (Boden/Eluat, Bodenluft, Sickerwasser, Kontaktgrundwasser), die Ergebnisse der Erkundung von hydrogeologischen und geologischen Standortbedingungen, Angaben zur räumlichen Ausdehnung der Belastungen und die Ergebnisse der beprobungslosen Recherchen (Ortseinsicht, historische Recher-





chen, Organoleptik, geophysikalische Messungen usw.) darzustellen und zu einer abschließenden Gefährdungsabschätzung zusammenzuführen.

Hinweise zur Bewertung der gemessenen Stoffkonzentrationen enthält Abbildung 3.

- Ergeben sich aus der Sickerwasserprognose Überschreitungen des Prüfwertes am Ort der Beurteilung und wird z. B. der Stufe-2-Wert der Tab. 4 Anhang 3 im Sickerwasser am Ort der Probennahme für ein räumlich abgegrenztes Volumen (d. h. an mehr als einem Messpunkt) bzw. der Stufe-1-Wert der Tab. 4 Anhang 3 im Grundwasser überschritten, so ist bei der abschließenden Gefährdungsabschätzung hinsichtlich der Ausdehnung der Schadstoffquelle und der Frachten davon auszugehen, dass im Sinne des § 4 Abs. 7 BBodSchV nicht nur geringe Schadstofffrachten und nicht nur lokal begrenzt erhöhte Schadstoffkonzentrationen im Gewässer zu erwarten sind bzw. vorliegen. Maßnahmen zur Gefahrenabwehr sind dann grundsätzlich erforderlich (§ 4 Abs. 2 BBodSchV).
- Ergibt die Sickerwasserprognose Überschreitungen des Stufe-2-Wertes der Tab. 4 Anhang 3 im Sickerwasser am Ort der Beurteilung, so sind Sanierungsmaßnahmen i. d. R. erforderlich. Da in diesem Fall der Prüfwert um ein Vielfaches überschritten ist, handelt es sich hier nicht nur um geringe Schadstofffrachten und lokal begrenzte Schadstoffkonzentrationen.

Stoffkonzentration am Ort der Beurteilung	Bewertung (Detailuntersuchung)	
	Gefährdungsabschätzung	Maßnahmen
< <b>Prüfwert</b> (Tab. 3 Anhang 3)	– Gefahrenverdacht ausgeräumt	– Maßnahmen nicht erforderlich
> <b>Prüfwert</b> (Tab. 3 Anhang 3)	– abschließende Gefährdungsabschätzung unter Berücksichtigung der Frachten und der Ausdehnung	– Erfordernis von Maßnahmen prüfen (§ 4 Abs. 2 BBodSchV): Sanierungs-, Schutz- und Beschränkungs- oder Eigenkontrollmaßnahmen
> <b>Stufe-2-Wert</b> (Tab. 4 Anhang 3)	– Gefahrenverdacht abschließend bestätigt – Ausmaß der Gefährdung abschätzen	– Sanierungsmaßnahmen i. d. R. erforderlich (§ 4 Abs. 3 BBodSchG) – Verhältnismäßigkeit von Sanierungsmaßnahmen prüfen (§ 4 Abs. 7 BBodSchV)

**Abbildung 3:** Hinweise zur Bewertung der Detailuntersuchung

Im Rahmen der abschließenden Gefährdungsabschätzung ist zu entscheiden, ob Maßnahmen erforderlich sind. Bei Vorliegen einer Altlast oder schädlichen Bodenveränderung sind gemäß § 4 Abs. 3 Satz 1 und 2 BBodSchG Sanierungsmaßnahmen zur Gefahrenabwehr durchzuführen. Sanierungsmaßnahmen sind nach § 2 Abs. 7 BBodSchG Dekontaminationsmaßnahmen und Sicherungsmaßnahmen. Bei der Prüfung der Verhältnismäßigkeit und Dringlichkeit der zu ergreifenden Sanierungsmaßnahmen sind neben der Stoffkonzentration, der Ausdehnung der Schad-



stoffe und der resultierenden Stofffracht weitere Kriterien maßgeblich. Dies können z. B. die Art der Gewässerbelastung, die Gefahr der Ausbreitung der Grundwasserverunreinigung, die derzeitige und künftige Nutzung des Gewässers und die sonstigen Belastungen im Einzugsgebiet des Gewässers sein.

Sind Dekontaminations- oder Sicherungsmaßnahmen nicht möglich oder unzumutbar, kommen nach § 4 Abs. 3 Satz 3 BBodSchG im Einzelfall sonstige Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen (§ 2 Abs. 8 BBodSchG) zur Gefahrenabwehr in Betracht. Im übrigen können unter günstigen Umständen (z. B. geringeres Gefährdungspotenzial, geringe Frachten, kein weiträumiger Transport der Schadstoffe) auch Eigenkontrollmaßnahmen (§ 15 BBodSchG) ausreichen. Häufigkeit, Parameterauswahl, Anzahl und Lage der Probennahmestellen sowie Berichtspflichten sind im Einzelfall festzulegen.

Die abschließende Gefährdungsabschätzung und die Festlegung der Erfordernis von Sanierungsmaßnahmen ist stets mit der Bewertung der Grundwasserverunreinigung und der daraus abzuleitenden Maßnahmen nach Kap. 3.2.2 abzugleichen, so dass eine zusammenfassende Bewertung hinsichtlich Bodenschutz und Grundwasserschutz resultiert.

Schließlich ist fachlich zu begründen und vorzuschlagen, ob Sanierungsuntersuchungen und Sanierungsplanung nach § 13 BBodSchG erforderlich sind oder ob die Erstellung eines Sanierungskonzepts im Rahmen der nach § 10 Abs. 1 BBodSchG anzuordnenden Maßnahmen ausreicht.

Die Ergebnisse der Detailuntersuchung sind in einem Gutachten darzulegen.

### 3 Untersuchung und Bewertung von Grundwasserverunreinigungen

Die folgenden Hinweise zur Untersuchung und Bewertung von Grundwasserverunreinigungen gelten sowohl für Altlasten oder schädlichen Bodenveränderungen, die nach BBodSchG als auch für Fälle, die nach Art. 68a BayWG zu bearbeiten sind. Letztere sind insbesondere Direkteinträge ohne Bodenpassage sowie Grundwasserverunreinigungen und Fälle, die (bisher) keinem verursachenden Grundstück zugeordnet werden können.

Zweckmäßigerweise ist bei diesen Grundwasserverunreinigungen ebenfalls stufenweise vorzugehen. Im Rahmen der orientierenden Untersuchung ist abzuklären, ob eine erhebliche Grundwasserverunreinigung vorliegt. Bei der nachfolgenden Detailuntersuchung des Grundwassers sind der Verunreinigungsbereich abzugrenzen und abschließend festzustellen, ob eine erhebliche Grundwasserverunreinigung vorliegt. Ferner sollen Entscheidungsgrundlagen für die Notwendigkeit und den Umfang von Grundwassersanierungsmaßnahmen erarbeitet werden.

Werden Grundwasseruntersuchungen für die Sickerwasserprognose herangezogen, sind primär repräsentative Messstellen im Bereich der Schadstoffquelle und in ihrem unmittelbaren Abstrom heranzuziehen. Genaue Hinweise enthalten Kap. 2.1.2.1.1 und Kap. 2.2.2.

#### 3.1 Orientierende Untersuchung

Grundwasseruntersuchungen haben den Vorteil, ggf. vorhandene Verunreinigungen integrativ zu erfassen. Sie sollen daher in jedem Fall durchgeführt werden, wenn bereits repräsentative Mess-



stellen vorhanden sind. Sind keine bzw. keine repräsentativen Messstellen vorhanden, ist im Einzelfall zu entscheiden, ob die Errichtung neuer Messstellen im Rahmen der orientierenden Untersuchung sinnvoll ist. Bereits vorhandene Grundwasseruntersuchungen sind bei der Bewertung zu berücksichtigen. Art, Anzahl und Lage der Messstellen sind auf der Basis der örtlichen Gegebenheiten festzulegen. Die Errichtung neuer Messstellen ist insbesondere für die Sickerwasserprognose bei Alttablagerungen und Deponien sowie bei geringen Flurabständen sinnvoll. Die Ergebnisse der historischen Erkundung sind zu berücksichtigen.

### 3.1.1 Umfang der orientierenden Untersuchung

#### Grundwassermessstellen

Bevor Grundwassermessstellen errichtet und chemisch-physikalische Untersuchungen durchgeführt werden, müssen die hydrogeologischen Standortbedingungen erfasst werden. Geeignet sind Grundwassermessstellen im Schadenszentrum bzw. im unmittelbaren Abstrom der erwarteten Kontaminationsschwerpunkte [LfW-Merkblatt Nr. 3.8/6].

Dabei ist zu prüfen, ob die Messstellen für die jeweilige Fragestellung repräsentative Ergebnisse liefern können. Zu beachten ist insbesondere, inwieweit der tatsächliche Zustrom und Verunreinigungsschwerpunkt bzw. dessen unmittelbare Abstromfahne erfasst wurden.

#### Analysenumfang

Soweit Ergebnisse früherer Untersuchungen und andere Informationen vorliegen, sind diese zu berücksichtigen.

Die chemische Erstuntersuchung des Grundwassers an fachgerecht entnommenen Proben erstreckt sich hauptsächlich auf Analysen der Basisparameter nach Tab. 2 Anhang 3 (Vollanalyse). Eine Analyse dieses Umfangs (i. d. R. ohne Biotest) ist zumindest einmal an jeder Messstelle durchzuführen. Damit können der geogene Grundwassertyp charakterisiert und eine anthropogene Beeinträchtigung erkannt werden. Bei entsprechenden Hinweisen ist auch auf branchenspezifische Leitparameter (siehe Tab. 4 Anhang 3) zu untersuchen. Es sind möglichst klare Wasserproben zu entnehmen. Treten in trüben Proben erhöhte Konzentrationen anorganischer Stoffe (> Stufe 1) auf, so müssen die Probennahme wiederholt und die Proben über Membranfilter (0,45 µm) druckfiltriert werden. Hinweise zur Entnahme und Analyse der Proben enthält [LfW-Merkblatt Nr. 3.8/6].

Bei nachfolgenden Untersuchungen kann der Analysenumfang auf die in Tab. 2 Anhang 3 mit "+" gekennzeichneten Parameter (Kurzuntersuchung) ggf. zuzüglich einzelfallspezifischer Leitparameter reduziert werden. Bei Untersuchungsreihen, z. B. zur Beobachtung des räumlichen und zeitlichen Verhaltens einer Verunreinigung, kann der Analysenumfang der Basisparameter weiter vermindert werden; die Erfassung der Vor-Ort-Parameter stellt den Mindestumfang dar.

Bei Vollanalysen sind Plausibilitätskontrollen durchzuführen [LfW-Merkblatt Nr. 1.5/1].



### 3.1.2 Bewertung der orientierenden Untersuchung

Die Bewertung der Analysenergebnisse von Wasserproben erfolgt anhand der Stufenwerte in Tab. 2 und Tab. 4 Anhang 3. Dabei muss geklärt werden, ob Grundwasserverunreinigungen vorliegen und inwieweit diese geringfügig oder erheblich sind. Die Ergebnisse der orientierenden Untersuchung sind in einem Gutachten darzustellen.

Die Bewertung der Untersuchungsergebnisse mit Hilfe der Stufe-1-Werte in Tab. 2 (Differenzwerte) und Tab. 4 Anhang 3 ist in Abbildung 4 zusammengestellt. Bei der Bewertung der Ergebnisse der Grundwasseranalysen mit Hilfe der Differenzwerte ist auf standortspezifische, geogen und anthropogen bedingte Erhöhungen der Hintergrundwerte zu achten.

Liegen die Stoffkonzentrationen oberhalb des geogenen Hintergrundwertes, aber unterhalb der Stufe-1-Werte, ist die Grundwasserverunreinigung als geringfügig zu bewerten. Wird der Stufe-1-Wert überschritten, so ist die Grundwasserverunreinigung als erheblich einzustufen. Die Bewertung der Verunreinigung als geringfügig oder erheblich ist im Gutachten plausibel zu begründen.

Bei einer erheblichen Grundwasserverunreinigung ist eine anschließende Detailuntersuchung erforderlich, auch wenn Emissions- oder Transmissionspotenzial (noch) nicht bekannt sind. Die Bewertung der Stoffkonzentrationen im Grundwasser im Hinblick auf die Sickerwasserprognose ist in Kap. 2.1.2.1.1 beschrieben.

<b>Stoffkonzentration im Schadenszentrum bzw. im unmittelbaren Abstrom</b>	<b>Bewertung</b> (orientierende Untersuchung)
< Stufe-1-Wert (Tab. 2 bzw. 4 Anh. 3)	– keine bzw. geringfügige Grundwasserverunreinigung – Detailuntersuchung nicht erforderlich
> Stufe-1-Wert (Tab. 2 bzw. 4 Anh. 3)	– erhebliche Grundwasserverunreinigung – Detailuntersuchung erforderlich

**Abbildung 4:** Bewertung der orientierenden Untersuchung des Grundwassers

### 3.2 Detailuntersuchung

Wurden im Rahmen der orientierenden Untersuchung noch keine Grundwasser- bzw. hydrogeologischen Untersuchungen durchgeführt, sind diese im Rahmen der Detailuntersuchung vom Pflichtigen vorzunehmen. Dabei ist ein schrittweises Vorgehen zweckmäßig. Die Detailuntersuchung des Grundwassers dient dazu, Art und Umfang der Verunreinigung näher zu charakterisieren, sowie deren räumliche Ausdehnung im belasteten Grundwasserkörpers einschließlich der Abstrombreite bzw. -fahne abzugrenzen. Bzgl. schädlicher Bodenveränderungen oder Altlasten ist auf der Grundlage der Ergebnisse der Detailuntersuchung eine abschließende Gefährdungsabschätzung durchzuführen und zu entscheiden, ob Maßnahmen erforderlich sind. Weitere Hinweise zu Zielsetzung und Umfang der Detailuntersuchung enthält auch Kap. 2.2.



### 3.2.1 Umfang der Detailuntersuchung

Vor der Auswahl oder dem Bau von Grundwassermessstellen und dem Einstieg in chemisch-physikalische Untersuchungen ist ein hydrogeologisches Arbeitsprogramm aufzustellen. Die bisher vorliegenden Kenntnisse aus der beprobungslosen Recherche (geologische Detailkarten, vorhandene Aufzeichnungen von Bohrprofilen etc.) und die ggf. im Rahmen der orientierenden Untersuchung gewonnenen Ergebnisse sind zu berücksichtigen. Das Arbeitsprogramm soll aufzeigen, wie ein repräsentatives Bild (mit Bohrungen, Aufschlüssen, usw.) der betroffenen Grundwasserbereiche im Zustrom, Verunreinigungszentrum und Abstrom erarbeitet werden kann.

Es ist abzuschätzen, auf welcher Abstrombreite das Grundwasser kontaminiert oder gefährdet ist. Die Entnahmebedingungen (Pumpdauer, Volumenstrom) müssen begründet werden. Grundwassermessstellen sind so zu errichten und zu platzieren, dass Verunreinigungszentren bzw. deren unmittelbarer Abstrombereich sowie die relevante Abstrombreite und die horizontale Ausdehnung der Abstromfahne hinreichend erfasst werden können.

Im Einzelnen sind folgende hydrogeologische Kenndaten zu ermitteln:

- Schichtaufbau, Tektonik (Schichtfugen, Klüfte, Schieferung, Störungen)
- Anzahl und Gliederung der Grundwasserstockwerke, Lage der Grundwasserstauer
- Grundwasserflurabstand, -mächtigkeit und -neubildungsrate; Relief des Stauers, Geometrie des Aquifers
- Grundwassertyp (z. B. Quartär-, Tertiär-, Gipskeuperwasser)
- Mächtigkeit und Durchlässigkeit der ungesättigten Bodenzone (Charakterisierung der Deckschichten)
- Hangwasserzutritte, aufsteigende Grundwasserströmung in Vorflutnähe
- Vorflutverhältnisse bzw. Lage der Fläche zum Vorfluter
- Art und Eigenschaften des Aquifers
- Homo-/Heterogenität; freies/gespanntes Grundwasser; Poren-, Kluft- oder Karst-Grundwasserleiter
- Transmissivität,  $k_f$ -Wert, durchflusswirksamer Hohlraumanteil, Speicherkoeffizient, Dispersivität
- Grundwasserfließrichtung und Abstandsgeschwindigkeit

Zur Vorbereitung von Sanierungsmaßnahmen kann bei komplexeren Grundwasserverunreinigungen im Einzelfall auch die Erstellung eines numerischen Grundwassermodells zweckmäßig sein.

Bezüglich des Analysenumfanges sind die Vorgaben in Kap. 3.1.1 zu beachten. Im Rahmen der Detailuntersuchung ist für jede Messstelle mindestens eine vollständige Analyse auf die Basisparameter (Tab. 2 Anhang 3) durchzuführen. Zusätzlich sind angepasst an die vorliegende Belastung schadensfall- bzw. branchenspezifische Leitparameter (Tab. 4 Anhang 3) zu untersuchen. Ferner sind die relevanten organisch-chemischen Einzelstoffe zu identifizieren, wenn bei den



Summenparametern Oxidierbarkeit (Permanganatindex), gelöster organisch gebundener Kohlenstoff (DOC), spektraler Absorptionskoeffizient 254 nm (SpAK 254 nm) oder adsorbierbare organisch gebundene Halogene (AOX) größere Differenzwerte als die in Tab. 2 Anhang 3 genannten auftreten.

Zur Detailuntersuchung gehören auch Fehlerbetrachtungen, aufgeschlüsselt nach Probennahme- und Analysefehlern, und Plausibilitätskontrollen (LfW-Merkblatt Nr. 1.5/1), die im Gutachten in nachvollziehbarer Form dargestellt sein müssen.

### 3.2.2 Bewertung der Detailuntersuchung

Die Analysenergebnisse der Grundwasseruntersuchung und deren fachliche Bewertung werden im Gutachten dargelegt. Als Bewertungsgrundlage dienen die im Anhang 3 enthaltenen Stufenwerte der Tabellen 2 und 4. Abbildung 5 stellt die Bewertung der Stoffkonzentrationen im Hinblick auf Maßnahmen für das Grundwasser dar; hierbei gilt:

- Bei Stoffkonzentrationen des Grundwassers im Schadenszentrum bzw. im unmittelbaren Abstrom unter dem Stufe-1-Wert liegt allenfalls eine geringfügige Grundwasserverunreinigung vor. Maßnahmen bezüglich des Grundwassers sind i. d. R. nicht erforderlich.
- Konzentrationen über dem Stufe-1-Wert zeigen eine erhebliche Grundwasserverunreinigung an. Handelt es sich um Überschreitungen der Leitparameter in Tab. 4 Anhang 3, so sind Maßnahmen i. d. R. erforderlich. Im Hinblick auf das Grundwasser reicht häufig eine Grundwasserüberwachung aus.
- Bei Konzentrationen über dem Stufe-2-Wert der Tab. 4 Anhang 3 ist grundsätzlich eine Grundwassersanierung erforderlich.
- Maßnahmen können auch bei besonders gravierenden Änderungen der Basisparameter nach Tab. 2 Anhang 3 erforderlich sein.

<b>Stoffkonzentration im Schadenszentrum bzw. im unmittelbaren Abstrom</b>	<b>Bewertung (Detailuntersuchung)</b>	<b>Maßnahmen (bezüglich des Grundwassers)</b>
< Stufe-1-Wert (Tab. 2 bzw. 4 Anhang 3)	– keine bzw. geringfügige Grundwasserverunreinigung	– keine Grundwasserüberwachung oder -sanierung erforderlich, soweit diese nicht im Rahmen anderer Maßnahmen erforderlich sind
> Stufe-1-Wert < Stufe-2-Wert (Tab. 4 Anhang 3)	– erhebliche Grundwasserverunreinigung	– i. d. R. Maßnahmen erforderlich
> Stufe-2-Wert (Tab. 4 Anhang 3)	– erhebliche Grundwasserverunreinigung	– i. d. R. Grundwassersanierung erforderlich

**Abbildung 5:** Bewertung der Detailuntersuchung des Grundwassers im Hinblick auf Maßnahmen für das Grundwasser



Wird der Stufe-1-Wert im Grundwasser überschritten, so hat sich der Verdacht für das Vorliegen einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast abschließend bestätigt und es müssen auch **quellenorientierte Maßnahmen** durchgeführt werden. Dringlichkeit und Ausmaß dieser Maßnahmen hängen vom Ergebnis der zusammenfassenden Bewertung für die schädliche Bodenveränderung oder Altlast (Kap. 2.2.3) und für das Grundwasser ab.

Für die Feststellung einer Grundwasserverunreinigung ist es grundsätzlich ohne Belang, ob das Grundwasser genutzt wird oder nicht. Bei der Festlegung der Notwendigkeit, Dringlichkeit, Art und des Umfangs von technischen Maßnahmen (quellenorientierte Sanierungsmaßnahmen oder Grundwassersanierung) ist im Einzelfall jedoch die Nutzungssituation im Verunreinigungszentrum und Abstrom (Trink-/Brauchwassergewinnung, besonders schützenswertes Grundwasservorkommen usw.) von wesentlicher Bedeutung.

Im Einzugsgebiet von **Trinkwassergewinnungen** können technische Sanierungsmaßnahmen des Grundwassers zur Sicherstellung der Wasserversorgung auch schon bei Überschreitung der Stufe-1-Werte von Leitparametern nach Tab. 4 Anhang 3 oder von Basisparametern nach Tab. 2 Anhang 3 notwendig sein. Bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen im Zustrombereich von Trinkwassergewinnungen ist zu berücksichtigen, ob im geförderten Grundwasser die Konzentration wassergefährdender Stoffe gegenüber den geogenen Gehalten bereits merklich erhöht ist. Insbesondere die Notwendigkeit von Sofortmaßnahmen zur Abwehr erheblicher Trinkwasserverunreinigungen bzw. zum Schutz der menschlichen Gesundheit wird davon maßgeblich bestimmt. Des Weiteren wird darauf hingewiesen, dass Trinkwasserschutzgebiete häufig das Grundwassereinzugsgebiet einer Gewinnungsanlage nicht vollständig abdecken. Vorfeldmessstellen der Trinkwasserbrunnen sind vorrangig in das Grundwassermessprogramm der Detailuntersuchung auf Immissionen einzubeziehen.

## 4 Sanierungsziele

Ziel einer Sanierung nach Bodenschutzrecht ist die Gefahrenabwehr. Ziel einer Sanierung nach Wasserrecht ist grundsätzlich die Unterschreitung der Geringfügigkeitsschwelle im Grundwasser. Für die Sanierung von Böden gelten stets die materiellen Anforderungen des Bodenschutzrechts. Für die Sanierung von Gewässern gelten stets die materiellen Anforderungen des Wasserrechts.

### 4.1 Allgemeine Vorgaben

Wird bei der Bewertung der Detailuntersuchung festgestellt, dass Maßnahmen zur Gefahrenabwehr erforderlich sind, so sind bei der Durchführung von Sanierungsmaßnahmen nach § 2 Abs. 7 BBodSchG geeignete Sanierungsziele zu benennen, die Konzentrationen und/oder Frachten für einzelne Schadstoffe für die einzelnen Medien an definierten Messpunkten vorgeben. Zur Sanierung sind grundsätzlich die am besten geeigneten und verfügbaren Verfahren im Sinne von § 5 Abs.1, 3 und 4 BBodSchV einzusetzen. Für Eigenkontrollmaßnahmen sind ebenfalls die Randbedingungen zu benennen. Diese Zielvorgaben werden auf der Grundlage der Schadstoffart, der Konzentration und Fracht der vorliegenden oder in überschaubarer Zukunft zu erwartenden Schadstoffe sowie dem Ausbreitungsverhalten in der gesättigten und ungesättigten Zone entwickelt. Neben den Vorgaben des allgemeinen Boden- und Grundwasserschutzes sind auch beste-



hende Nutzungen (z. B. Trinkwasser- oder Brauchwasserbrunnen), die Kostenwirksamkeit und der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit zu berücksichtigen.

## 4.2 Boden

Ziel der Sanierung einer Altlast oder schädlichen Bodenveränderung hinsichtlich des Wirkungspfad Boden-Gewässer ist es, erhebliche Emissionen abzuwehren und so zu sanieren, dass dauerhaft keine Gefahren für das Grundwasser entstehen (vgl. § 4 Abs. 3 Satz 1 BBodSchG). Hierzu sind i. d. R. geeignete Dekontaminations- und Sicherungsverfahren einzusetzen, wobei § 5 Abs. 1 und 3 BBodSchV zu beachten sind. In besonders schwierigen Fällen (z. B. im Vergleich zum Nutzen unverhältnismäßig hohe Kosten, mangelnde technische Machbarkeit) ist bei der Abwägung über Umfang, Dringlichkeit und Abschluss von Maßnahmen zumindest sicher zu stellen, dass die Emissionen nur lokal und zeitlich begrenzt auf das Grundwasser einwirken.

Bei einer **Dekontaminationsmaßnahme** (quellenorientierte Sanierung) von schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten gilt das Sanierungsziel für den Wirkungspfad Boden-Gewässer grundsätzlich als erreicht, wenn die gemessene oder prognostizierte Stoffkonzentration im Sickerwasser am Ort der Beurteilung dauerhaft den Prüfwert unterschreitet. Das Sanierungsziel ist in jedem Fall erreicht, wenn im Sickerwasser am Ort der Probennahme Stoffkonzentrationen unterhalb des Prüfwertes der Tab. 3 Anhang 3 vorliegen. Dabei sind die Ausführungen in Kap. 2.1.2.1.2, 2.1.2.1.3 und 2.2.2.1 bezüglich des Zusammenhangs zwischen Sickerwasserkonzentration am Ort der Probenahme und Gesamtstoffgehalten, Bodenluftkonzentrationen sowie Eluat anzuwenden. Eine Sanierung kann auch bei höheren Konzentrationen am Ort der Probennahme beendet werden, wenn aufgrund günstiger Untergrundverhältnisse nachgewiesen werden kann, dass der Prüfwert am Ort der Beurteilung dauerhaft unterschritten wird oder nur geringe Frachten und nur lokal begrenzt erhöhte Stoffkonzentrationen zu erwarten sind.

Des Weiteren kann es angezeigt sein, dass eine Boden- oder Bodenluftsanierung auch bei erhöhten Stoffkonzentrationen beendet und durch Eigenkontrollmaßnahmen abgelöst wird, wenn nur noch geringe Stoffmengen gefördert bzw. eliminiert werden können und die im Hinblick auf den Pfad Boden-Gewässer emittierten Frachten gering sind. Davon ist z. B. bei LHKW dann auszugehen, wenn bei einer Bodenluftabsaugung - trotz Verfahrensoptimierung - die jährlich entnommenen Frachten nur noch in der Größenordnung unter 1 kg/a liegen.

Bei einer **Sicherungsmaßnahme** (wirkungsorientierten Sanierung) wird das Sanierungsziel dann erreicht, wenn die aus dem kontaminierten Bereich austretenden Stofffrachten dauerhaft keine Gefahr für das Grundwasser darstellen, d. h. keine erheblichen Grundwasserverunreinigungen hervorrufen können. Die Wirksamkeit ist durch Eigenkontrollmaßnahmen dauerhaft zu überwachen und gegenüber der zuständigen Behörde zu belegen (§ 5 Abs. 3 BBodSchV). Häufigkeit, Parameterauswahl, Anzahl und Lage der Probennahmestellen sowie Berichtspflichten sind im Einzelfall festzulegen. Die Festlegung von Konzentrationszielwerten für Material im gesicherten Bereich, z. B. für Sickerwasser, sind bei diesen Verfahren nicht sinnvoll. Nach Nr. 4.1.4 BayBodSchVwV legt die Kreisverwaltungsbehörde bei Sicherungsmaßnahmen i. d. R. eine Sicherheitsleistung für die Aufrechterhaltung der Sicherungs- und Überwachungsmaßnahmen fest.





### 4.3 Gewässer

Als Zielwert für Maßnahmen zur Sanierung (z. B. hydraulische Maßnahmen, Reaktive Wand) erheblich verunreinigten Grundwassers ist die Unterschreitung der Geringfügigkeitsschwelle, also des Stufe-1-Wertes nach Tab. 4 Anhang 3, im unmittelbar betroffenen Grundwasser anzustreben. Bei geringen Frachten, lokal begrenzter Ausbreitung und unverhältnismäßig hohem Aufwand (z. B. Kosten) kann das Sanierungsziel auch bei einer höheren Konzentration erreicht sein, z. B. bei sicherer und dauerhafter Unterschreitung des Stufe-2-Wertes nach Tab. 4 Anhang 3. Es müssen im erheblich verunreinigten Grundwasserbereich zumindest wieder Verhältnisse geschaffen werden, die im Anschluss an die Sanierungsmaßnahme einen zügigen weiteren natürlichen Stoffabbau in überschaubarer Zeit erwarten lassen. Langfristiges Ziel von Dekontaminationsmaßnahmen ist das Wiederherstellen des natürlichen Zustandes, also der Hintergrundwert, der mit Hilfe natürlicher Selbstreinigungsprozesse erreicht werden soll.



## 5 Literatur

Bei den hier aufgeführten Gesetzen und Regelwerken gilt grundsätzlich die aktuelle Fassung. Die aktuellen LfW-Merkblätter können im Internet unter <http://www.bayern.de/lfw> heruntergeladen werden.

[BBodSchG, 1998]

Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz -BBodSchG) vom 17. März 1998, in Kraft seit 1. März 1999 (BGBl I S. 502)

[BBodSchV, 1999]

Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999, in Kraft seit 17. Juli 1999 (BGBl I S. 1554)

[BayBodSchG, 1999]

Bayerisches Gesetz zur Ausführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes (Bayerisches Bodenschutzgesetz - BayBodSchG) vom 23. Februar 1999, in Kraft seit 1. März 1999 (GVBl S. 36)

[BayBodSchVwV, 2000]

Verwaltungsvorschrift zum Vollzug des Bodenschutz- und Altlastenrechts in Bayern (BayBodSchVwV) vom 11. Juli 2000, veröffentlicht am 31. Juli 2000 (AllMBl S. 473)

[BMU, 1990]

Beirat beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zu Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe: Beurteilung und Behandlung von Mineralölschadensfällen im Hinblick auf den Grundwasserschutz, Leitfaden LTwS-Nr. 24, herausgegeben vom Umweltbundesamt Berlin (Juni 1990)

[BMU, 1997]

BMU, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 80/68/EWG (Grundwasserverordnung), BGBl 1997 Teil I Nr. 18, Bonn (1997)

[BMU, 2000]

Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen (VwVwS), GmBl, 2000; Katalog wassergefährdender Stoffe: <http://www.umweltbundesamt.de/wgs/wgs-index.htm>

[DIN, 2000]

DIN Normenausschuss Wasserwesen NAW I 2/UA 5, 35-2000, Boden- und Abfalluntersuchung, Eluierungsverfahren. Positionspapier zur DIN V 19735, Berlin 8.5.2000

[EG, 1979]

Europäische Gemeinschaften: Richtlinie des Rates der Europäischen Gemeinschaften vom 17.12.1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe (80/68/EWG), Brüssel (1979)



[FHH, 1999]

Freie und Hansestadt Hamburg, Umweltbehörde: Ringversuch Bodensättigungsextrakt 1999, unveröffentlichtes Manuskript (1999)

[GÄBLER, 2000]

GÄBLER, H.-E., UTERMANN, J., HINDEL, R., KUES, J., MEDERER, J., PLUQUET, E.: Schwermetallgehalte im Bodenwasser - Ein Vergleich von drei Extraktionsverfahren; BEW Fachgespräch Feststoffuntersuchung 2000, Essen (2000)

[GBG, 1998]

Gemeinsame Arbeitsgruppe der Länderarbeitsgemeinschaften Wasser (LAWA), Boden (LABO) und Abfall (LAGA): Gefahrenbeurteilung von Bodenverunreinigungen / Altlasten als Gefahrenquelle für das Grundwasser, 17. Juni 1998

[GLA, 1998]

SUTTNER, T., AUßENDORF, T., MARTIN, W.: Hintergrundwerte anorganischer Problemstoffe in Böden Bayerns, GLA-Fachbericht, Band 16 (1998)

[GRATHWOHL, 2000]

GRATHWOHL, P.: Elemente der Sickerwasserprognose zur Gefahrenbeurteilung „Grundwasser“ bei kontaminierten Böden/Materialien/Altlasten.- BoS 31. Lfg. V/00 S. 1 - 40

[HLUG, 2001]

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie: Handbuch Altlasten Bd. 3 Teil 3 Untersuchung und Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser / Sickerwasserprognose. Wiesbaden (2001)

[LABO, LAWA 2000]

LABO/LAWA Rechtsausschüsse der Länderarbeitsgemeinschaften Bodenschutz und Wasser „Grundsatzpapier zur Abgrenzung zwischen Bodenschutzgesetz und Wasserrecht“, 29./30.6.2000

[LAGA, 1994]

Länderarbeitsgemeinschaft Abfall: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen, Technische Regeln II.1 Mineralische Reststoffe und Abfälle aus dem Baubereich, Altlasten und Schadensfällen (1994) und Fortschreibung

[LAWA, 1994]

Länderarbeitsgemeinschaft Wasser: Empfehlungen für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden, Stuttgart (Januar 1994)

[LfU/LfW, 2001]

Bayer. Landesämter für Umweltschutz und Wasserwirtschaft: Qualitätssicherung bei der Entnahme von Boden- und Bodenluftproben im Rahmen der Untersuchung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen (Entwurf 2001)

[LfW-Merkblatt Nr. 1.5/1]

Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft: Umfang einer chemisch-technischen Wasseranalyse für die Bearbeitung grund- und trinkwasserchemischer Belange, Slg LfW, Teil 1, Nr. 1.5/1, München (2000)



[LfW-Merkblatt Nr. 3.8/5]

Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft: Gemeinsames LfU-LfW-Merkblatt, Aufbereitung und Untersuchung von Bodenproben und Eluatn bei schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Gewässer, Slg LfW, Nr. 3.8/5, München (Entwurf 2001)

[LfW-Merkblatt Nr. 3.8/6]

Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft: Entnahme und Untersuchung von Wasserproben bei Gewässerverunreinigung, schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten, Slg LfW, Nr. 3.8/6, Teile I, II u. III, München (Entwurf 2001)

[LfW-Merkblatt Nr. 4.5/15]

Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft: Einleitung kontaminierter Wässer in Oberflächengewässer und öffentliche Abwasseranlagen, Slg LfW, Nr. 4.5/15, München (Entwurf 2001)

[LICHTFUSS, 2000]

LICHTFUSS, R.: Verfahren zur Abschätzung von anorganischen Stoffkonzentrationen im Sickerwasser nach der BBodSchV; Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 2000, Band 92, S. 43 - 46

[LIEBE, 1997]

LIEBE, F., WELP, G. u. BRÜMMER, G.W. (1997): Mobilität anorganischer Schadstoffe in Böden Nordrhein-Westfalens; Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, Band 2, Essen (1997)

[LUA NRW, 2000]

Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen: Empfehlungen für die Durchführung und Auswertung von Säulenversuchen gemäß Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV), Merkblatt 20, Essen (2000)

[LUA NRW, 2001]

Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen: Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz; Vergleich und Bewertung von Untersuchungsmethoden zur Beurteilung der mobilen und mobilisierbaren Anteile von Gehalten ausgewählter organischer Schadstoffe (PAK) in der ungesättigten Bodenzone - Methodenvergleich, Essen (2001)

[MATHEWS, 2000]

MATHEWS, T.: Hinweise zur Anwendung der Prüfwerte nach Bundes-Bodenschutzverordnung für den Pfad Boden-Grundwasser. Altlasten Spektrum 3, S. 167-176 (2000)

[v. d. TRENCK, 1999]

v. d. TRENCK, K.T., MARKARD, C., KÜHL, C., SLAMA, H., u. RÖDER, R. (1999): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellen zur Beurteilung von lokal begrenzten Grundwasserverunreinigungen; Handbuch Bodenschutz; Rosenkranz/Einsele/Harreb; Erich Schmidt Verlag



[VDI, 3865]

VDI Richtlinie 3865 : Messen organischer Bodenverunreinigungen

- Blatt 1: Messen leichtflüchtiger halogener Kohlenwasserstoffe, Messplanung für Bodenluft-Untersuchungsverfahren, Oktober 1992.
- Blatt 2: Techniken für die aktive Entnahme von Bodenluftproben, Januar 1998.
- Blatt 3: Gaschromatographische Bestimmung von niedrigsiedenden organischen Verbindungen in Bodenluft nach Anreicherung an Aktivkohle oder XAD-4 und Desorption mit organischen Lösungsmitteln, Entwurf November 1996.
- Blatt 4: Gaschromatographische Bestimmung von niedrigsiedenden organischen Verbindungen in Bodenluft durch Direktmessung, 2000.



## Anhang 1: Hinweise zu Untersuchungsverfahren für die Sickerwasserprognose

Die Sickerwasserbeschaffenheit am Ort der Beurteilung wird gemäß Anhang 1 Nr. 3.3 BBodSchV auf der Grundlage verschiedener Untersuchungsverfahren abgeschätzt, es sei denn, günstige Umstände ermöglichen eine repräsentative Beprobung von Sickerwasser am Ort der Beurteilung. Bei der Abschätzung sind praxiserprobte Verfahren bevorzugt anzuwenden, somit sind nach aktuellem Kenntnisstand die im Folgenden beschriebenen Untersuchungsverfahren einzusetzen. Weitergehende Hinweise zu den Probennahme-, Elutions- und Analysenverfahren sowie zur Probennahmestrategie und Probenaufbereitung enthalten auch die Veröffentlichungen [LfU/LfW, 2001], [LfW-Merkblatt Nr. 3.8/5 und Nr. 3.8/6].

In den Gutachten sind die Original-Analysenergebnisse und die angewandten Analysenverfahren anzugeben. Zur Darstellung der Ergebnisse gehört auch eine Plausibilitätskontrolle. Hinweise auf Stoffe bzw. Stoffgruppen, die nicht quantifiziert wurden, sind aufzunehmen.

### 1 Grundwasseruntersuchungen

Hinweise zur Errichtung von Grundwassermessstellen für die Untersuchung von schädlichen Bodenveränderungen, Altlasten und Grundwasserverunreinigungen, zur Entnahme von Wasserproben, zum Probentransport, zur Probenaufbereitung und Untersuchung von Wasserproben werden in [LfW-Merkblatt Nr. 3.8/6] gegeben. Hinweise zur Durchführung bzw. Interpretation von Grundwasseruntersuchungen bzgl. der Sickerwasserprognose enthalten Kap. 2.1.2.1.1 und 2.2.2.1.

### 2 In-situ-Untersuchungen

Für leichtflüchtige Stoffe gibt es derzeit keine praxiserprobten, aussagekräftigen Elutionsverfahren, die reproduzierbare Ergebnisse liefern und mit deren Hilfe eine hinreichend sichere Emissionsabschätzung erfolgen kann. Die Emissionsabschätzung ist daher derzeit bei den Stoffgruppen der leichtflüchtigen Halogenkohlenwasserstoffe (LHKW) und den niedrig alkylierten (bis C<sub>2</sub>) einkernigen Aromaten (BTEX) auf **Bodenluftuntersuchungen** (mg/m<sup>3</sup>) zu stützen (siehe auch Kap. 2.1.2.1.2). Diese sind geeignet, wenn Emissionen an leichtflüchtigen organischen Kontaminanten (z. B. LHKW, BTEX, Vergaserkraftstoffe) zu erwarten sind. Über Untersuchungen auf Abbauprodukte (z. B. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) können auch schwerflüchtige organische Stoffe (z. B. Teeröl, Schmieröl) oder Hausmüll erkannt werden. Beruhen erhöhte Gehalte an Mineralölkohlenwasserstoffen oder BTEX auf Verunreinigungen durch Kraftstoffe (z. B. bei Tankstellen und Raffinerien), so sind ergänzende Untersuchungen auf Methyl-tertiär-butylether (MTBE) durchzuführen. Bei der Untersuchung und Bewertung sind auch die Hinweise zu Stoffeigenschaften und Mobilität (Anhang 2) zu beachten.

Wenn zwischen Messsonde und Verunreinigungsherd diffusionshemmende Schichten (Bodenplatten, Tonschichten u. dgl.) eingelagert sind, liefern Bodenluftuntersuchungen keine brauchbaren Hinweise und es sind stattdessen die Gesamtstoffgehalte im Boden zu bestimmen. Ferner sind für die Beurteilung und Vergleichbarkeit von Bodenluftuntersuchungen Angaben über die eingesetzte Entnahmevariante, die Durchführung der Probennahme und des Probenverkehrs sowie die örtlichen Gegebenheiten zum Zeitpunkt der Probennahme erforderlich. Die in der Praxis gängi-



gen Bodenluft-Entnahmevarianten sind in der VDI-Richtlinie 3865 Blatt 2 [VDI 3865] aufgeführt. Bei der Verwendung von Gassammelgefäßen ist die Dichtigkeit und Lagerungsfähigkeit von Septumgläsern kritisch zu beurteilen [VDI 3865], Blatt 4. Weitere Hinweise zu Bodenluftuntersuchungen enthält [LfU/LfW, 2001].

Bei LCKW- und BTEX-Verunreinigungen sind zur Abschätzung der Sickerwasserbeschaffenheit am Ort der Probennahme die Bodenluftkonzentrationen heranzuziehen. Gemäß Kap. 2.1.2.1.2 und 2.2.2.1 erfolgt damit die Sickerwasserprognose und die Gefährdungsabschätzung u. a. auf der Grundlage der Hilfwerte der Tab. 1 Anhang 3.

Bei FKW und FCKW sind Bodenluftuntersuchungen zur Eingrenzung von Belastungszonen zwar geeignet, jedoch sind die in Tab. 1 Anhang 3 für LHKW genannten Hilfwerte, u. a. wegen deutlich verschiedener physikalischer Eigenschaften (Toxizität, Persistenz, Flüchtigkeit und Mobilität), bei reinen FKW/FCKW-Schadensfällen nur als Entscheidungshilfe für die Ausräumung des Gefahrenverdachts anwendbar. Die Bestätigung eines hinreichenden Verdachts einer Altlast oder schädlichen Bodenveränderung sowie die Entscheidung über Art und Umfang von Maßnahmen können nicht allein aufgrund von Materialuntersuchungen am Ort der Probennahme und Bodenluftuntersuchungen erfolgen. Sie müssen auch durch andere Angaben (z. B. Grund- oder Sickerwasseruntersuchungen, Erfahrungswerte aus ähnlichen Fällen) erbracht werden.

**In-situ-Sickerwasseruntersuchungen**, z. B. durch Saugkerzen, -platten oder Lysimeter können derzeit wegen verschiedener Probleme (vgl. Kap. 2.1.2.1.2) nicht empfohlen werden.

### 3 Materialuntersuchungen

Die Entnahme und Untersuchung von Bodenproben kommen dann in Betracht, wenn Hinweise auf Kontaminationszentren vorliegen, eine Rasterbeprobung angezeigt ist oder Material aus Schürfen anfällt. Bei den chemischen Untersuchungen kann im Rahmen der orientierenden Untersuchung der Analysenumfang auf „Übersichtsanalysen“ bzw. signifikante Leitparameter beschränkt bleiben. Es wird darauf hingewiesen, dass es zur Gesamtabstimmung des Emissionsverhaltens von Kontaminanten auf der Grundlage von Materialuntersuchungen nicht ausreicht, lediglich die Eluat- bzw. Säulenperkolatkonzentrationen zu ermitteln. Als weitere Bewertungsgrundlage zur Quantifizierung des Emissionspotentials sind immer die Gesamtstoffgehalte mit zu erheben und ggf. weitere Elutionsverfahren (z. B. pH<sub>stat</sub>-Versuch) durchzuführen. Auch Doppelt- oder Mehrfachelutionen nach dem S4-Verfahren und ggf. dem pH<sub>stat</sub>-Verfahren liefern hierzu wichtige Informationen.

Folgende Verfahren zur Materialuntersuchung sind anzuwenden:

**Gesamtstoffgehalt** (mg/kg Trockenmasse, TM; i. d. R. für die Fraktion < 2 mm)

- für anorganische Stoffe mittels Aufschluss (mit Königswasser gemäß DIN ISO 11466)
- für organische Stoffe mittels Extraktion



### **Elution mit Wasser** ( $\mu\text{g/l}$ ):

- insbesondere bei anorganischen und hydrophilen organischen Stoffen nach DIN 38414-4 (S4-Eluat), modifiziert nach BBodSchV
- bei PAK Säulenversuch gemäß Merkblatt Nr. 20 des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen [LUA NRW, 2000]; bzgl. weiterer organischer lipophiler Stoffe (Mineralölkohlenwasserstoffe, PCB, PBSM, Chlorphenolen und Chlorbenzolen) siehe nachfolgendes Kap. 3.2.

**Weitere Elutionsverfahren** wie z. B. das  $\text{pH}_{\text{stat}}$ -Verfahren, das Bodensättigungsextrakt-Verfahren (BoSE) oder Mehrfachelutionen sind im Einzelfall einzusetzen, um zusätzliche Beurteilungshilfen zu erhalten. Hinweise zur Anwendung und Durchführung der Verfahren sowie zu Vor- und Nachteilen der verschiedenen Säulen- und Elutionsverfahren sind in den folgenden Nr. 3.1 und Nr. 3.2 sowie im LfW-Merkblatt Nr. 3.8/5 enthalten.

#### 3.1 Anorganische und hydrophile organische Stoffe

Bei Hinweisen auf Altlasten und schädliche Bodenveränderungen mit anorganischen und/oder hydrophilen organischen Stoffen kommen im Hinblick auf die Sickerwasserprognose bevorzugt Elutionsuntersuchungen zur Anwendung. Bzgl. der Vorgehensweise und der Anwendung weiterer Analysenverfahren ist dabei zwischen

- **leichter löslichen** anorganischen Stoffen (z. B. Säuren, Laugen, Alkalisalzen, Chromat) und leichter löslichen, hydrophilen organischen Stoffen (z. B. Phenolen, Alkoholen, Carbonsäuren) sowie
- **schwerer löslichen** anorganischen Stoffen (z. B. Schwer- oder Halbmetallverbindungen)

zu unterscheiden.

Die Emissionsabschätzung von **leichter löslichen** Stoffen (hierzu zählen u. a. auch zahlreiche Verbindungen mit Arsen, Antimon, Chrom, Komplexbildnern sowie Cyanid und Phenole) erfolgt im Regelfall über **S4-Eluate**. Damit kann das Auftreten erheblicher Sickerwasserbelastungen meist gut abgeschätzt werden. Nach jetzigem Kenntnisstand liegen die mit der S4-Elution erhaltenen Stoffkonzentrationen i. d. R. in gleicher Größenordnung wie die Ergebnisse des BoSE. Daher können die S4-Konzentrationen auf das Sickerwasser am Ort der Probenahme näherungsweise übertragen werden. Dabei kann im Einzelfall berücksichtigt werden, dass mit dem S4-Verfahren bei den meisten Inhaltsstoffen und Matrices eher Minder- als Mehrbefunde auftreten [LIEBE, 1997] und ferner für die meisten Schwermetalle die Konzentrationen im BoSE höher sind als im S4-Eluat [GÄBLER 2000].

Bei **schwerer löslichen** anorganischen Stoffen, z. B. Schwer- und Halbmetallen, die meist in Form von Oxiden, Hydroxiden oder Carbonaten vorliegen ist zur Emissionsabschätzung zunächst auch eine S4-Elution durchzuführen, deren Ergebnis auf das Sickerwasser am Ort der Probenahme näherungsweise übertragen wird. Zur Abschätzung des Emissionsverhaltens kann zusätzlich zur S4-Elution eine  **$\text{pH}_{\text{stat}}$ -Elution** bei pH 4 erforderlich sein. Dies gilt insbesondere für Proben, die hohe Gesamtstoffgehalte an Schwer- oder Halbmetallen über dem Hilfwert 2 der Tab. 1





Anhang 3, aber im S4-Eluat (bei meist neutralem pH) keine erhöhten Werte aufweisen, sowie bei sehr großen Kubaturen. Mit dem  $\text{pH}_{\text{stat}}$ -Verfahren bei pH 4 kann das Lösungsverhalten im schwach sauren Milieu, wie es bei Sickerwässern häufig anzutreffen ist, ermittelt werden. Im Einzelfall (z. B. bei Ablagerungen aus basischen Schlacken oder Bauschuttablagerungen) kann bei amphoteren Metallen ergänzend eine  $\text{pH}_{\text{stat}}$ -Elution bei pH 11 sinnvoll sein. Zusätzlich kann mit dem  $\text{pH}_{\text{stat}}$ -Verfahren noch das Puffervermögen des Untergrunds ( $\text{SNK}_{24}$ ) ermittelt werden. Um den Untersuchungsaufwand in Grenzen zu halten, sollte die  $\text{pH}_{\text{stat}}$ -Elution bei einer Bodenbelastung, wo meist viele ähnliche Bodenproben anfallen, nur an ausgewählten repräsentativen Proben vorgenommen werden.

Die nach dem  **$\text{pH}_{\text{stat}}$ -Verfahren** bei pH 4 erhaltenen Eluatkonzentrationen dienen zur Emissionsabschätzung für die derzeitigen und insbesondere für die künftigen Sickerwasserverhältnisse am Ort der Probennahme. Sie stehen dabei in den meisten Fällen im Vergleich zur S4-Elution für den ungünstigeren Fall. Bei der Entscheidung über die Notwendigkeit, Priorität und Art von Maßnahmen ist die Sickerwasserprognose für den Ort der Beurteilung maßgeblich. Somit sind nicht nur die mit dem  $\text{pH}_{\text{stat}}$ -Verfahren erhaltenen Stoffkonzentrationen, sondern auch das zugehörige pH-Pufferungsvermögen des Untergrunds zu berücksichtigen, das über die  $\text{SNK}_{24}$  erfasst wird. Nachzeitigem Kenntnisstand ist bei einem relativ niedrigen  $\text{SNK}_{24}$ -Wert unter 200 mmol/kg (TM) davon auszugehen, dass die Pufferwirkung gegen den Protoneneintrag z. B. über den sauren Regen schon nach einigen Jahren erschöpft ist; eine Mobilisierung vorhandener Bodenbelastungen kann also in überschaubarer Zukunft eintreten. Bei der Sickerwasserprognose ist ggf. auch die  $\text{SNK}_{24}$  des unbelasteten Untergrunds zu berücksichtigen. Mobilisierungsvorgänge aufgrund von Änderungen des Redoxmilieus werden durch das  $\text{pH}_{\text{stat}}$ -Verfahren ebenso wenig erfasst wie durch das S4-Verfahren. Die Wahrscheinlichkeit derartiger Prozesse und ihrer Auswirkungen auf die Stoffkonzentrationen im Sickerwasser/Kontaktgrundwasser ist im Einzelfall zu beschreiben.

Das **Bodensättigungsextrakt-Verfahren** (BoSE) nach Anhang 1 Nr. 3.1.2 BBodSchV wurde ursprünglich für die Bestimmung der Gehalte von leichtlöslichen Salzen in Salzböden entwickelt. Das BoSE ist für die Untersuchung von verunreinigtem Material wegen fehlender Erfahrungen im Zusammenhang mit schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten sowie wegen schlechter Handhabbarkeit („anteigen“ subjektiv, ggf. schlechte Filtrierbarkeit) als Regelverfahren derzeit nicht einsetzbar. Bei groben, heterogenen Materialien ist darüber hinaus die Methode verfahrensbedingt nicht anwendbar. Sie ist lediglich dann anwendbar, wenn es sich bei dem zu untersuchendem Material um feinkörniges Material handelt. Liegt ein solches Material vor, kann das BoSE als zusätzliche Beurteilungshilfe eingesetzt werden. Die Umrechnung von Elutionsergebnissen aus S4-Eluaten nach der Vornorm DIN V-19735 in Konzentrationen im Bodensättigungsextrakt ist aufgrund hoher statistischer Unsicherheiten mit starken Fehlern behaftet und nicht sinnvoll anwendbar [GÄBLER, 2000], [LICHTFUSS, 2000], [FHH, 1999]. Im übrigen ist die in Nr. 3.3 Anh. 1 BBodSchV postulierte ansatzweise Gleichsetzung der BoSE-Konzentration mit der realen in-situ-Sickerwasserkonzentration umstritten [FHH, 1999].

Aus den o. a. Gründen ist die Emissionsabschätzung für anorganische und hydrophile organische Stoffe vor allem auf die Ermittlung der Stoffkonzentration im Eluat nach DIN 38414-4 und ggf.  $\text{pH}_{\text{stat}}$ -Verfahren (nur bei anorganischen Stoffen) bei pH 4 zu stützen.



### 3.2 Organische lipophile Stoffe

Die in der BBodSchV für die Untersuchung organischer Stoffe genannten **Säulenversuche** können derzeit nur für die Stoffgruppe der PAK zur Anwendung empfohlen werden. Hier liegen ausreichende Erfahrungen vor, so dass für diese Stoffe zur Emissionsabschätzung Säulenversuche durchgeführt werden können [LUA NRW, 2001]. Bei PAK ist zur Emissionsabschätzung das durch das Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen modifizierte Säulenverfahren gemäß Merkblatt Nr. 20: „Empfehlungen für die Durchführung und Auswertung von Säulenversuchen gemäß Bundes-Bodenschutz und Altlastenverordnung (BBodSchV)“ [LUA NRW, 2000] durchzuführen. Die Ergebnisse des Säulenverfahren können näherungsweise auf das Sickerwasser am Ort der Probennahme übertragen werden.

Für die übrigen lipophilen organischen Stoffe (schwer- und leichtflüchtige) gibt es derzeit keine praxiserprobten, aussagekräftigen Verfahren, welche repräsentative Ergebnisse liefern. Auch die Vornorm DIN V-19736 „Bodenbeschaffenheit – Ableitung von Konzentrationen organischer Stoffe im Bodenwasser“ wurde nicht in die BBodSchV als Regelverfahren übernommen. Allerdings soll das o. g. durch das Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen modifizierte Säulenverfahren für weitere Stoffgruppen validiert werden. Dementsprechend wird die in diesem Merkblatt beschriebene Vorgehensweise zu gegebener Zeit angepasst werden.

Deshalb muss sich bei allen übrigen lipophilen organischen Stoffen (schwer- und leichtflüchtige) bis zum Vorliegen neuer Erkenntnisse und Methoden die Emissionsabschätzung auf die Untersuchung von Gesamtstoffgehalten und Bodenluftkonzentrationen stützen. Weitere Bewertungsfaktoren sind phys.-chem. Verteilungskoeffizienten, Löslichkeit in Wasser, Adsorptionskoeffizienten, vertikale Stoffverteilung im Schadensschwerpunkt sowie Erfahrungswerte aus Vergleichsfällen. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, da man bei org.-chem. Kontaminationen in der Regel die Einzelstoffe analytisch ermittelt und somit deren stoffliche Eigenschaften kennt. Allgemeine Hinweise zu den entsprechenden Eigenschaften einiger Stoffgruppen wurden aus einem Leitfaden des Hessischen Landesamts für Umwelt und Geologie [HLUG, 2001] übernommen und als Anhang 2 angefügt.

Das Ergebnis ist auf den Feinanteil (< 2 mm) zu beziehen. Ist eine Auftrennung in Grob- und Feinanteil nicht sinnvoll (z. B. bei leichtflüchtigen Stoffen), ist dies zu begründen und bei der Bewertung zu berücksichtigen. Werden in Ausnahmefällen bei lipophilen organischen Stoffen ergänzende S4-Elutionsuntersuchungen durchgeführt, ist zu berücksichtigen, dass für diese Stoffe i. d. R. Minderbefunde erhalten werden. Deshalb kann eine hohe Eluatkonzentration als sicherer Hinweis dafür gewertet werden, dass die vorliegenden Stoffe eine besondere Mobilität haben und ein hohes Emissionspotential vorliegt. Über Notwendigkeit und Nutzen von ergänzenden Eluatuntersuchungen ist daher im Einzelfall zu befinden.

Derzeit werden u. a. im Rahmen eines F+E-Verbundvorhabens „Prognose des Schadstoffeintrags in das Grundwasser mit dem Sickerwasser (Sickerwasserprognose)“ des BMBF sowie beim LfW und der Universität Bayreuth verschiedene Forschungsprojekte mit dem Ziel, praxismgerechte Verfahren und Methoden für die Sickerwasserprognose zur Verfügung zu stellen, durchgeführt. Mit Ergebnissen ist ca. ab dem Jahr 2003 zu rechnen. Die in diesem Merkblatt beschriebene Vorgehensweise wird zu gegebener Zeit angepasst werden.





## Anhang 2: Hinweise zu Stoffeigenschaften

Dieser Anhang wurde aus der Veröffentlichung des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie [HLUG, 2001] „Untersuchung und Beurteilung des Wirkungspfad des Boden - Grundwasser“ mit geringfügigen Änderungen übernommen.

Er enthält Hinweise für folgende Stoffgruppen:

- LCKW - Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe
- BTEX - Aromatische Kohlenwasserstoffe
- MKW - Mineralölkohlenwasserstoffe
- PAK - Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
- PCB - Polychlorierte Biphenyle
- Cyanide
- Umweltrelevante Schwer- und Halbmetalle



## LCKW - Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe

### Chemisch-physikalische Daten:

	Vinylchlorid (VC)	Trichlormethan	1,2-cis-Dichlorethen	Trichlorethen (TRI)	Tetrachlorethen (PER)	LCKW <sup>2</sup> Bandbreite von ... bis
Wasserlöslichkeit [mg/l]	ca. 2000	ca. 8000	3500 – 5000	ca. 400	ca. 150	ca. 150 bis 20.000
Siedepunkt [°C]	-14	61	60	87	121	-14 bis 121
Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizient <sup>3</sup>	ca. 100	ca. 100	-/-	ca. 200	ca. 400	100 bis 400
Dichte bei 20 °C [g/cm <sup>3</sup> ]	0,9	1,5	1,3	1,5	1,6	0,9 bis 1,6
dyn. Viskosität [mPa*s]		0,6	0,5	0,6	0,9	0,5 bis 1,7
Adsorbierbarkeit an C <sub>org</sub> (K <sub>OC</sub> )	ca. 10	ca. 100	ca. 60	ca. 150	ca. 300	10 bis 300
Wassergefährdungsklasse	2	3	3	3	3	3 (VC: 2)

### Verhalten im Untergrund:

LCKW sind sehr mobil im Boden und Untergrund. Aufgrund des hohen Dampfdruckes können sie sich über die Bodenluft weiträumig verteilen. Aufgrund der hohen Dampfichte sinken LCKW-Dämpfe bis zum Kapillarraum ab. Liegen LCKW in Phase vor, begünstigt die hohe Dichte und geringe Viskosität die rasche Versickerung und das Vordringen in tiefere Bodenschichten. Aufgrund der guten bis mäßigen Wasserlöslichkeit können LCKW mit dem Sickerwasser und Grundwasser transportiert werden. LCKW werden nur mäßig an organischen Bodenbestandteilen adsorbiert. Sind LCKW als Phase bis in die gesättigte Zone vorgedrungen, können sie sich aufgrund ihrer hohen Dichte an der Sohle des Grundwasserkörpers anreichern.

Versiegelungen, z. B. Asphaltdecken, bieten nur einen geringen Schutz. LCKW können auch in wenig durchlässige Böden eindringen.

### Abbaubarkeit:

Die mikrobielle Abbaubarkeit ist im Allgemeinen nur mäßig. Die höherchlorierten LCKW sind nur unter streng anaeroben Verhältnissen abbaubar, die niederchlorierten LCKW bevorzugt unter aeroben Verhältnissen. Die Bildung hochtoxischer Abbauprodukte ist möglich (z. B. VC). Ein weiteres Abbauprodukt ist 1,2-cis-Dichlorethen.

**Mobilität:** hohe Mobilität

<sup>2</sup> Dichlormethan, Trichlormethan, Tetrachlormethan, 1,2-Dichlorethan, 1,1,1-Trichlorethan, Vinylchlorid, 1,2-cis-Dichlorethen, Trichlorethen, Tetrachlorethen

<sup>3</sup> Zur Erläuterung des Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizienten und zur Viskosität siehe letzte Seite des Anhangs



## BTEX - Aromatische Kohlenwasserstoffe <sup>4</sup>

### Chemisch-physikalische Daten:

	Benzol	Toluol	Xylol	Ethylbenzol	Styrol
Wasserlöslichkeit [mg/l]	1700	550	175 - 198	170	250
Siedepunkt [°C]	80	111	138 - 144	136	145
Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizient <sup>5</sup>	135	490	ca. 1600	1600	1000
Dichte bei 20 °C [g/cm <sup>3</sup> ]	0,88	0,87	0,86 - 0,88	0,87	0,91
dyn. Viskosität [mPa*s]	0,7	0,6	0,6 - 0,8	0,7	0,8
Adsorbierbarkeit an C <sub>org</sub> (K <sub>OC</sub> )	ca. 80	ca. 100	ca. 210	200 - 1000	ca. 400
Wassergefährdungsklasse	3	2	2	1	2

### Verhalten im Untergrund:

Die Mobilität von aromatischen Kohlenwasserstoffen (BTEX) im Untergrund ist hoch. Aufgrund des hohen Dampfdruckes können sie sich über die Bodenluft weiträumig verteilen. Liegen BTEX in Phase vor, begünstigt die geringe Viskosität die Versickerung. Aufgrund der relativ guten Wasserlöslichkeit können BTEX mit dem Sicker- und Grundwasser transportiert werden. Die Adsorption an organischen Bodenbestandteilen und an Tonmineralien ist mäßig. Haben die BTEX die ungesättigte Bodenzone durchdrungen, können sie sich aufgrund der geringen Dichte im Kapillarraum anreichern („aufschwimmende Phase“).

Unter den BTEX weist Benzol die weitaus höchste Mobilität auf, gefolgt von Toluol. Die Mobilität der C<sub>2</sub>-Aromaten (Xylol, Ethylbenzol) und C<sub>3</sub>-Aromaten ist wesentlich geringer.

### Abbaubarkeit:

BTEX sind unter günstigen Randbedingungen relativ gut mikrobiell abbaubar. Die Abbaubarkeit ist i. d. R. besser als die der Cycloalkane und schlechter als die der Isoalkane. Unter aeroben Bedingungen erfolgt eine Transformation zu Phenolen bzw. Brenzkatechin, dann Ringöffnung, dann eine rasche Mineralisierung.

Toluol und Benzol sind leichter abbaubar als z. B. Xylol.

**Mobilität:** hohe bis mittlere Mobilität

Liegen überwiegend Benzol und Toluol vor, dann gilt die hohe Mobilität.  
Ansonsten gilt die mittlere Mobilität

<sup>4</sup> Einkernige Aromaten: Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Styrol, Xylol (o, m, p).

<sup>5</sup> Zur Erläuterung des Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizienten und zur Viskosität siehe letzte Seite des Anhangs



## MKW - Mineralölkohlenwasserstoffe

**Ottokraftstoff** (Siedebereich ca. 36° - 175° C, Kettenlänge C<sub>5</sub> - C<sub>10</sub>)<sup>6</sup>

**Diesel, Heizöl, Schmieröl** (Siedebereich ca. 170° - 525° C, Kettenlänge C<sub>10</sub> - C<sub>39</sub>)

### Chemisch-physikalische Daten:

	Ottokraftstoff C <sub>5</sub> - C <sub>10</sub>	Diesel C <sub>10</sub> - C <sub>21</sub>	Heizöl EL C <sub>9</sub> - C <sub>23</sub>	Schmieröl ca. C <sub>17</sub> - C <sub>39</sub>
Wasserlöslichkeit [mg/l]	ca. 100	5 - 20	sehr gering	sehr gering
Siedebereich [°C]	36 - 175	175 - 360	160 - 390	300 - 525
Dichte bei 20 °C [g/cm <sup>3</sup> ]	ca. 0,7	ca. 0,8	ca. 0,9	ca. 0,9
dyn. Viskosität [mPa*s] <sup>7</sup>	ca. 0,6	ca. 3	ca. 4	zähflüssig
Wassergefährdungsklasse	3 <sup>8</sup>	2	2	1 (wenn unlegiert)

### Verhalten im Untergrund:

Die Mobilität der MKW hängt stark von der Kettenlänge der Komponenten ab. Mit zunehmender Kettenlänge nehmen die Wasserlöslichkeit und Flüchtigkeit ab, die Viskosität zu.

**Ottokraftstoffe** sind Gemische aus kurzkettigen MKW (C<sub>5</sub> - C<sub>9</sub>) und aromatischen Kohlenwasserstoffen (BTEX). Beide Stoffgruppen weisen ähnliche Stoffeigenschaften auf und sind sehr mobil.

**Diesel** (C<sub>10</sub> - C<sub>21</sub>), **Kerosin** (C<sub>10</sub> - C<sub>16</sub>) und **Heizöl EL** (C<sub>9</sub> - C<sub>23</sub>) sind wenig flüchtig und sind relativ viskos. Die Wasserlöslichkeit ist relativ gering, so dass der MKW-Austrag über das Sickerwasser ebenfalls gering ist. Insgesamt ist die Mobilität im Untergrund nur mäßig. Die Ausbreitung dieser MKW im Untergrund erfolgt i. d. R. als Ölphase. Wenn der Druck der Ölphase groß genug ist, können MKW in den Grundwasserkörper eindringen. Wegen der geringen Dichte reichern sich diese MKW i. d. R. im Kapillarsaum an („aufschwimmende Phase“).

MKW mit Kettenlängen über C<sub>17</sub>, z. B. **Schmieröle** und **Heizöl S**, sind bei Raumtemperatur zähflüssig bis fest. Die Mobilität im Untergrund ist gering.

### Abbaubarkeit:

Alkane, Isoalkane und Alkene sind aerob gut bis mäßig abbaubar. Am besten abbaubar sind n-Alkane C<sub>10</sub>-C<sub>17</sub>, dann C<sub>4</sub>-C<sub>9</sub>. Bereits deutlich weniger abbaubar sind Isoalkane und Cycloalkane. Unter aeroben Bedingungen werden Alkane über Alkohole und Aldehyde bzw. Ketone zu gut abbaubaren Fettsäuren oxidiert. Alkene werden über Epoxide und Dirole zu Fettsäuren oxidiert. Die Länge von Schadstofffahnen im Grundwasser ist bei Diesel- und Heizölschäden i. d. R. kleiner als 100 m, da sich rasch ein Gleichgewicht zwischen Nachlieferung und biologischem Abbau durch Mikroorganismen einstellt.

**Mobilität:**

hohe Mobilität:	Ottokraftstoffe
mittlere Mobilität:	Diesel, Heizöl EL
geringe Mobilität:	Schmieröl, Heizöl S

<sup>6</sup> Diese Stoffgruppe wird von dem KW-Index gemäß BBodSchV bzw. gemäß DIN EN ISO 9377-2 nicht erfaßt

<sup>7</sup> Zur Erläuterung der Viskosität siehe letzte Seite des Anhangs

<sup>8</sup> WGK 3 wegen des Anteils von Benzol im Ottokraftstoff. Die Alkane haben WGK 1, außer Pentan mit WGK 0.



## PAK - Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe

### Chemisch-physikalische Daten:

	Naphthalin 2er-Ring	Anthracen 3er-Ring	Pyren 4er-Ring	Benzo(a)pyren 5er-Ring
Wasserlöslichkeit [mg/l]	32	0,07	0,14	0,001
Siedepunkt [°C]	218	314	393	496
Dichte bei 20 °C [g/cm <sup>3</sup> ]	1,15	1,24	1,27	1,3
Oktanol-Wasser- Verteilungskoeffizient <sup>9</sup>	2.300	35.000	135.000	3.200.000
dyn. Viskosität [mPa*s]	bei Raumtem- peratur fest	bei Raum- temp. fest	bei Raum- temp. fest	bei Raumtemp. fest
Adsorbierbarkeit an C <sub>org</sub> (K <sub>OC</sub> )	1.300	26.000	44.000	4.500.000
Wassergefährdungsklasse	2			3 <sup>10</sup>

Der Parameter **PAK<sub>gesamt</sub>** umfasst laut BBodSchV die Summe von **15 Einzelsubstanzen**, die in einer Liste der US-EPA aufgeführt sind (jedoch **ohne Naphthalin** und Methylnaphthaline. Diese werden gesondert angegeben!).

3er-Ringe: Acenaphthylen, Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren, Anthracen.

4er-Ringe: Fluoranthen, Pyren, Benzo(a)anthracen, Chrysen.

Sonstige: Benzo(b)fluoranthen, Benzo(k)fluoranthen, Benzo(a)pyren, o-Phenylen, Dibenzo(a,h)anthracen, Benzo(g,h,i)perylene.

### Verhalten im Untergrund:

Naphthalin nimmt unter den PAK eine Sonderstellung ein, da es wesentlich wasserlöslicher als andere PAK ist. Die Mobilität von Naphthalin ist jedoch wesentlich geringer als die von aromatischen Kohlenwasserstoffen (BTEX) und entspricht etwa der von Heizöl.

PAK weisen lipophile bzw. hydrophobe Eigenschaften auf. Sie adsorbieren leicht an Bodenpartikeln. Die Wasserlöslichkeit und Flüchtigkeit der PAK ist gering. Die Mobilität der PAK nimmt mit steigender Ringzahl ab. PAK können in das Grundwasser gelangen, wenn sie -adsorbiert an Kolloiden- mit dem Sickerwasser verfrachtet werden oder wenn Tenside bzw. Lösungsvermittler (z. B. LHKW, BTEX) im Boden vorliegen. Dann können auch 4er- und 5er-Ringe im Grundwasser nachgewiesen werden. Die Grundwassergefährdung ist jedoch i. d. R. gering.

### Abbaubarkeit:

Naphthalin ist unter aeroben Bedingungen mäßig abbaubar. 3er- und 4er-Ringe sind nur sehr eingeschränkt abbaubar. Die Abbaubarkeit der höher kondensierten Ringe kann i. d. R. vernachlässigt werden. Der PAK-Abbau erfolgt über eine Transformation zu Phenolen bzw. Brenzkatechin, dann Ringöffnung, dann Mineralisierung.

**Mobilität:**    mittlere Mobilität:    Naphthalin (*2er-Ring*),  
Acenaphthen, Acenaphthylen, Anthracen, Fluoren, Phenanthren  
(*3er-Ringe*)  
geringe Mobilität:    sonstige PAK

<sup>9</sup> Zur Erläuterung des Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizienten und zur Viskosität siehe letzte Seite des Anhangs.

<sup>10</sup> WGK 3 wegen der Kanzerogenität von Benzo(a)pyren.



## PCB - Polychlorierte Biphenyle

### Chemisch-physikalische Daten:

	2,4,4' – Trichlor- biphenyl (41 % Chlor)	2,2,4,5,5' – Penta- chlor-biphenyl (54 % Chlor)	2,2',3,4,4',5,5' - Heptachlor- biphenyl (63 % Chlor)	PCB <sup>11</sup> Bandbreite von ... bis (19 bis 71 % Cl)
Wasserlöslichkeit [mg/l]	0,14	0,01	0,004	0,001 bis 6 mg/l
Oktanol-Wasser- Verteilungskoeffizient <sup>12</sup>	740.000	2.500.000	5.000.000	ca. 20.000 bis 150.000.000
Viskosität	zähflüssig	zähflüssig	zähflüssig	
Adsorbierbarkeit an C <sub>org</sub> (K <sub>OC</sub> ) <sup>13</sup>	-/-	-/-	-/-	
Wassergefährdungs- klasse	3	3	3	3

### Allgemeines:

Technisches PCB ist ein Gemisch unterschiedlicher Kongenere <sup>14</sup>. Bei gleichem Grundgerüst (Biphenyl) unterscheiden sich die Kongenere durch Anzahl und Stellung der Chloratome. Technische PCB-Gemische sind mittel- bis hochviskose Flüssigkeiten. Sie enthalten hauptsächlich Tri-, Tetra-, Penta- und Hexachlorbiphenyle. Transformatorenöle können zur Verringerung der Viskosität 10 bis 20 % Trichlorbenzol enthalten. Handelsnamen: z. B. Arochlor 1242 (USA, Chloranteil 42 %, Siedebereich 325-366 °C), Clophen (BRD), Askarel (Mischung PCB mit Chlorbenzolen).

### Verhalten im Untergrund:

Die Mobilität der PCB im Boden ist sehr gering: PCB besitzen eine hohe Viskosität, die mehrfach chlorierten PCB sind sehr wenig wasserlöslich. An Huminsäuren und Eisenoxide werden PCB leicht sorbiert. Über die Adsorbierbarkeit an Tonpartikel liegen widersprüchliche Angaben vor. Die Flüchtigkeit ist sehr gering. Mit zunehmendem Chlorierungsgrad nimmt die Mobilität ab.

### Abbaubarkeit:

PCB sind chemisch sehr stabile Verbindungen. In der Natur werden PCB nicht biochemisch synthetisiert. Daher verläuft der Abbau im Boden extrem langsam. Mit zunehmendem Chlorierungsgrad nimmt die Abbaubarkeit ab. Aufgrund der geringen Abbaubarkeit und der lipophilen Eigenschaften können sich PCB in der Nahrungskette anreichern.

**Mobilität:** geringe Mobilität

<sup>11</sup> Monochlorbiphenyl C<sub>12</sub>H<sub>9</sub>Cl bis Decachlorbiphenyl C<sub>12</sub>Cl<sub>10</sub>.

<sup>12</sup> Zur Erläuterung des Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizienten siehe letzte Seite des Anhangs.

<sup>13</sup> Kann nach  $K_{OC} \cong 0,4 \text{ Pow}$  empirisch berechnet werden [1].

<sup>14</sup> Kongener (lat. con genus: mit gleichem Stamm): Von einem Grundkörper abgeleitete chemische Substanzklasse; insbesondere bei Dioxinen/Furanen und PCB häufig verwendeter Begriff; es gibt 209 PCB-Kongenere.





## Cyanide

### Allgemeines:

Cyanide werden insbesondere bei der elektrochemischen Oberflächenbehandlung von Metallen (Galvanotechnik) und in Härtereien sowie als Zwischenprodukte bei der Synthese von Kunststoffen, Pharmaka, Farbstoffen und Schädlingsbekämpfungsmitteln eingesetzt. Auf ehemaligen Gaswerkstandorten treten Cyanide in verbrauchten Gasreinigungsmassen auf. Sie liegen dann meist als stabile Komplexe vor, z. B. als Eisenhexacyanoferrat  $\text{Fe}_4^{\text{III}}[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]_3$  und als „unlösliches“ Berliner Blau  $\text{Fe}^{\text{III}}[\text{Fe}^{\text{III}}\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]_3$ .

Die Alkali- und Erdalkali-Cyanide, z. B. KCN und CaCN, sind wasserlöslich, reagieren infolge Hydrolyse stark alkalisch und riechen nach Blausäure (HCN). Auch die Schwermetallcyanide sind meist wasserlöslich. Bei Zugabe von Säuren bildet sich die sehr leichtflüchtige Blausäure (Siedepunkt 26 °C).

Die freien, nicht komplex gebundenen Cyanide, z. B. KCN, sind in die Wassergefährdungsklasse (WGK) 3 eingestuft. Einige der komplex gebundenen Cyanide, z. B. Rotes Blutlaugensalz, sind in die WGK 2 eingestuft.

### Toxizität:

Blausäure (HCN) ist ein starkes Atem- und Zellgift. Freie, d. h. nicht-komplex-gebundene Cyanide wirken sehr toxisch auf Warmblüter, Fische, Algen und Bakterien.

Die Toxizität steigt mit sinkendem pH-Wert: Bei mittlerem und niedrigem pH-Wert liegt überwiegend die undissoziierte Spezies HCN vor, bei hohem pH-Wert nimmt der Anteil des dissoziierten Ions  $\text{CN}^-$  zu (bei pH 7,4 ist HCN nur zu 1,6% dissoziiert). HCN kann im Gegensatz zu  $\text{CN}^-$  sehr leicht biologische Membranen passieren und so in einen Organismus gelangen.

### Verhalten im Untergrund:

Aufgrund der Wasserlöslichkeit vieler anorganischer Cyanide und der leichten Freisetzbarkeit des leichtflüchtigen HCN ist eine hohe Mobilität in den Umweltmedien zu erwarten. Bei komplex gebundenen Cyaniden hängt die Freisetzbarkeit von HCN bzw.  $\text{CN}^-$  sehr stark von der Stabilität des Cyanokomplexes ab. Bei schwerlöslichen, komplex gebundenen Cyaniden wie dem Berliner Blau ist die Mobilität dagegen gering.

### Abbaubarkeit:

Gering, da wegen der hohen Toxizität von HCN der mikrobielle Abbau behindert wird.

### Unterscheidung von Cyaniden aus analytischer Sicht (Definitionen nach E DIN ISO 11262):

**Leicht freisetzbare Cyanide:** Verbindungen, die Cyano-Gruppen enthalten und beim pH-Wert 4 und Kochtemperatur HCN bilden können: Hierzu zählen insbesondere die Cyanide der Alkali- und Erdalkalimetalle (z. B. KCN) sowie komplexe Cyanide des Zinks, Cadmiums und Kupfers

**Komplexe Cyanide:** Cyanide, die nicht leicht freisetzbar sind, jedoch bei einem pH-Wert kleiner 2 und Kochtemperatur HCN bilden können. Hierzu gehören insbesondere komplexe Cyanide des Cobalts, Nickels und Eisens (z. B. gelbes Blutlaugensalz, „unlösliches“ Berliner Blau)

**Gesamtcyanid:** Summe der leicht freisetzbaren und komplexen Cyanide.

**Mobilität:** **hohe Mobilität** (Alkali-, Erdalkalicyanide, wasserlösliche komplex-gebundene Cyanide)  
**geringe Mobilität** (unlösliche, komplex-gebundene Cyanide, z. B. Berliner Blau)



## Umweltrelevante Schwer- und Halbmetalle

(Arsen, Antimon, Blei, Cadmium, Cobalt, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Selen, Zink)

### Allgemeines:

Schwermetalle sind definiert als Metalle mit einer Dichte größer etwa 4,5. Als Halbmetalle werden solche Elemente bezeichnet, die sowohl metallische als auch nichtmetallische Eigenschaften aufweisen. Zu den Halbmetallen zählen beispielsweise Arsen, Antimon und Selen.

Die Mobilität und Verfügbarkeit von Schwer- und Halbmetallen in Böden hängt von zahlreichen Faktoren ab: chemische Bindungsform, pH-Wert, Redoxpotential, Gehalt von organischen Kohlenstoffverbindungen und Tonmineralien in Böden, Anwesenheit von Komplexbildnern usw.. Allerdings sind viele dieser Faktoren im konkreten Fall meist nicht bekannt, oder deren Einfluss ist nicht exakt vorhersehbar. Für die Einschätzung der tatsächlichen Mobilität sind daher i. d. R. Elutions- und Extraktionsuntersuchungen erforderlich (siehe Anhang 1 dieses Merkblatts).

### Spezies, chemische Formen (Beispiele):

<u>Kationisch gebunden</u>	<u>Wasserlöslichkeit</u>
Chloride:	gut wasserlöslich, außer Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , CuCl
Nitrate:	gut wasserlöslich
Sulfate:	gut wasserlöslich, außer PbSO <sub>4</sub> und BaSO <sub>4</sub>
Sulfide:	wasserunlöslich
Hydroxide:	Wasserlöslichkeit stark pH-abhängig
Oxide:	wasserunlöslich, außer ZnO
Carbonate:	wasserunlöslich, jedoch durch Säuren zersetzbar
Cyanide:	Wasserlöslichkeit von der Bindungsform abhängig
Silikate:	wasserunlöslich

<u>Anionisch gebunden, amphoter</u>	<u>Wasserlöslichkeit</u>
Antimonat (z. B. [Sb(OH) <sub>6</sub> ] <sup>-</sup> ):	z.T. gut wasserlöslich, hängt vom Kation ab
Arsenat (AsO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ):	Wasserlöslichkeit hängt vom Kation ab
Chromat (CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ):	gut wasserlöslich
Selenat (SeO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ):	gut wasserlöslich
Zinkat (z. B. [Zn(OH) <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup> ):	gut wasserlöslich

### Metallorganische Verbindungen

Quecksilber-organische Verbindungen (z. B. Methylquecksilber), cadmium-organische Verbindungen, blei-organische Verbindungen (z. B. Bleitetraethyl), zinn-organische Verbindungen (z. B. Tributylzinn, TBT).

### **Königswasserextrakt** nach DIN ISO 11466:

Als Methode für die Bestimmung des Gesamtgehaltes anorganischer Schadstoffe wird in Anhang 1 Nr. 3.1.2 der BBodSchV der Königswasserextrakt nach DIN ISO 11466 genannt. Mit dem Königswasserextrakt können allerdings nicht alle Mineralien vollständig in Lösung gebracht werden. Insbesondere Blei- und Chrommineralien werden häufig nur teilweise aufgeschlossen. Elementares und organisch gebundenes Quecksilber kann sich verflüchtigen. Mineralien, die durch die Königswasserextraktion nicht in Lösung gebracht werden können, stellen i. d. R. auch keine Umweltgefährdung dar.



## Schwer- und Halbmetalle (Fortsetzung)

### Einfluss des pH-Wertes:

Allgemein besteht bei niedrigen pH-Werten die höchste Löslichkeit (Ausnahme Selen). Amphotere Metalle wie z. B. Chrom und Zink sind bei höherem pH-Wert ebenfalls gut löslich.

#### Mobilisierbarkeit in Böden:

Cadmium	< pH 6,5
Zink	< pH 6
Nickel	< pH 5,5
Arsen, Chrom, Kupfer	< pH 4,5
Blei, Quecksilber	< pH 4

Das pH<sub>stat</sub>-Verfahren ist ein geeignetes Elutionsverfahren zur Beurteilung des Langzeitverhaltens bei bestimmten pH-Werten, z. B. pH 4 (siehe Anhang 1 dieses Merkblatts und LfW-Merkblatt Nr. 3.8/5).

### Einfluss des Redoxpotentials:

Das Redoxpotential im Wasser und Boden wirkt sich auf die Oxidationsstufe von Schwer- und Halbmetallen aus und damit auch auf deren Mobilität und Toxizität (siehe Chrom(III) und Chrom(VI)). Die Mobilität kann sich bei einem *Wechsel des Redoxpotentials* erhöhen oder erniedrigen. Daher können keine pauschalen Aussagen über die Mobilität von Schwer- und Halbmetallen bei einer Änderung des Redoxpotentials getroffen werden.

Beispiele: *Oxide* von Schwermetallen sind unter oxidierenden Bedingungen i. d. R. stabil. Bei einem Wechsel zu reduzierenden Bedingungen werden diese gelöst und die Schwermetalle daher mobiler. *Sulfate* von Schwer- und Halbmetallen werden unter reduzierenden Bedingungen zu Sulfiden reduziert. Sulfide von Schwer- und Halbmetallen sind i. d. R. schwerlöslich und daher weniger mobil.

In Grundwasser-Messstellen kann auf einfache Weise das Redoxpotential mittels einer Sonde gemessen werden. Das Redoxpotential gibt in Verbindung mit dem pH-Wert Hinweise, ob im Wasser oxidierende, reduzierende oder indifferente Bedingungen vorliegen. Ein Maß für das Redox-Vermögen eines Systems ist der sogenannte rH-Wert.

$$\text{Berechnung von rH: } rH = \frac{2 Eh}{59,16 mV} + 2 pH$$

rH: negativer dekadischer Logarithmus des Wasserstoffpartialdrucks  
Eh: gemessenes Redoxpotential der Wasserprobe [mV]  
pH: pH-Wert der Wasserprobe

rH 0 bis 17	<u>reduzierendes</u> Milieu
rH 17 bis 25	indifferent
rH 25 bis 42	<u>oxidierendes</u> Milieu

In Böden ist die Messung des Redoxpotentials aufwendiger (mittels Platin-Elektrode und Bezugselektrode, siehe E. Schlichting et al., Bodenkundliches Praktikum [8]).

In der BBodSchV ist für Böden kein Verfahren zur Bestimmung des Redoxpotentials angegeben. Falls in Böden eine *Änderung* des Redoxpotentials zu erwarten ist, sollen laut Anhang 1 Nr. 3.3 der BBodSchV weitere Extraktionsverfahren angewendet werden.



## Schwer- und Halbmetalle (Fortsetzung)

### Adsorptionsfähigkeit an Tonmineralien und Oxiden:

An Tonpartikeln findet meist eine schwache *unspezifische* Adsorption statt. An hydroxylierten Oberflächen von Eisen-, Mangan und Aluminiumoxiden findet eine starke *spezifische* Adsorption statt (Blei > Kupfer > Zink > Nickel > Cadmium).

### Einfluss von Komplexbildnern

Komplexbildner im Boden sind z. B. Huminstoffe, aber auch Anionen wie Phosphate und Chloride (z. B. Chlorokomplexe mit Cadmium). Schwermetall-Humus-Komplexe können mobil oder immobil sein, je nach der Löslichkeit der Huminstoffe. Sind die Komplexbildner selber löslich, können ausgefällte Schwermetallverbindungen wieder in Lösung gehen.

### Einzelne Schwer- und Halbmetalle:

- Antimon (Sb):** Halbmetall. Liegt im Boden meist als 3- oder 5-wertige Verbindung vor. Die Sb-Verbindungen, insbesondere Sb(III), wirken fast ebenso giftig wie die verwandten Arsen-Verbindungen. Trotzdem kommen Sb-Vergiftungen viel seltener vor, da die Sb-Salze die Magen- u. Darmwände wesentlich schwerer durchwandern als die Arsen-Salze.
- Arsen (As):** Halbmetall. Liegt im Oberboden meist als 5-wertiges Arsenat vor. Die 3-wertige Form ist toxischer und mobiler als die 5-wertige. Aufgrund des relativ leichten Übergangs der 5-wertigen in die 3-wertige Form (und umgekehrt) ist jedoch eine analytische Bestimmung der Bindungsform i. d. R. nicht sinnvoll. Methylierte Arsenverbindungen sind weniger toxisch als anorganische Verbindungen.
- Blei (Pb):** Blei liegt meist als 2-wertige Verbindung vor. Metallisches Blei wird im Boden zu Blei(hydroxy)carbonat und Bleisulfat oxidiert. Blei ist eher als die meisten anderen Spurenmetalle in der Lage, an Huminstoffe, Mangan- und Eisenoxide zu adsorbieren. Geringe Pflanzenverfügbarkeit. Die Löslichkeit von Blei(hydroxy)carbonat und Bleisulfat ist im pH-Bereich 6,5 bis 8,5 am geringsten. Erst bei pH-Werten unterhalb ca. 4 nimmt die Löslichkeit zu.
- Cadmium (Cd):** Cadmium liegt meist als 2-wertige Verbindung vor. Cadmium ist im Boden relativ mobil und biologisch leicht verfügbar. Die Löslichkeit nimmt mit sinkendem pH-Wert zu. Cd kann durch Alkali- und Erdalkaliionen von Tonpartikeln und Huminstoffen verdrängt (desorbiert) werden. Daher bewirkt das Aufbringen von Kalidünger und Streusalz eine Mobilisierung von Cd.
- Chrom (Cr):** Chrom liegt im Boden entweder in 3-wertiger, kationischer Form vor, d. h. als Chrom(III), oder es liegt als Chrom(VI) in anionischer Form vor (Chromat oder Dichromat). Unter reduzierenden Bedingungen wird Chrom(VI) zu Chrom(III) reduziert, unter oxidativen Bedingungen ist Chrom(VI) stabil. Chrom(VI) ist wesentlich besser wasserlöslich als Chrom(III) und damit im Boden deutlich mobiler. Chrom(VI) ist zudem wesentlich toxischer (kanzerogen bei inhalativer Aufnahme). Chrom ist ein essentielles Spurenelement.
- Beim Nachweis von Chromverunreinigungen im Boden oder Gewässern (Analyse auf Chrom<sub>gesamt</sub>) sind zusätzliche Analysen auf Cr(VI) notwendig.



### Schwer- und Halbmetalle (Fortsetzung)

- Cobalt (Co):** Cobalt liegt meist als 2-wertige Verbindung vor. Mit abnehmendem pH-Wert nimmt die Löslichkeit und Verfügbarkeit zu. Cobalt ist ein essentielles Spurenelement. Die Humantoxizität ist relativ gering.
- Kupfer (Cu):** Kupfer liegt im Boden meist als 2-wertiges, seltener als 1-wertiges Kupfersalz vor. Die Löslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit von Kupfer in Böden ist relativ gering, steigt jedoch bei pH-Werten kleiner 5 deutlich an. Kupfer kann stabile Komplexe bilden. Kupfer wirkt in erster Linie toxisch auf Bakterien, Pflanzen, Fische und Wiederkäuer. Für Säuglinge besteht eine erhöhte Toxizität. Aufgrund der relativ geringen Humantoxizität ist in der BBodSchV für den Pfad Boden-Mensch kein Prüfwert abgeleitet.
- Nickel (Ni):** Nickel liegt meist als 2-wertige Verbindung vor. Das in Böden eingetragene Nickel kann zum Teil an Oxiden und Tonpartikeln immobilisiert werden. Eine Nickel-Mobilisierung kann durch pH-Werte unter 5,5 sowie durch lösliche organische Komplexbildner bewirkt werden. Nickel ist im Boden relativ mobil.
- Quecksilber (Hg):** Quecksilber kann in Böden elementar auftreten. Weiterhin tritt Quecksilber in 1- und 2-wertiger ionischer Form auf sowie (in geringerem Umfang) organisch gebunden, z. B. als Methylquecksilber. Die Umwandlungsrate von ionisch gebundenem in organisch gebundenes Quecksilber ist in Böden allerdings gering.
- Die Toxizität von elementarem Quecksilber ist wesentlich geringer als die von ionisch vorliegendem Quecksilber. Quecksilberorganische Verbindungen wirken i. d. R. noch toxischer und sind sehr gut resorbierbar. Sofern Hinweise vorliegen, dass quecksilberorganische Verbindungen im Boden oder in Gewässern freigesetzt wurden, sind u. U. spezielle Analysen auf quecksilberorganische Verbindungen empfehlenswert.
- Selen (Se):** Halbmetall. In durchlüfteten Böden liegt Selen in 4-wertiger oder 6-wertiger Form vor, unter reduzierenden Bedingungen in 2-wertiger oder elementarer Form. Die Mobilität der Selenverbindungen ist stark von der Bindungsform und vom pH-Wert abhängig. Im Gegensatz zu den meisten anderen Metallen nimmt die Löslichkeit oberhalb eines pH-Wertes von 5 zu! Selen und seine Verbindungen wirken stark toxisch.
- Zink (Zn):** Zink liegt im Boden als 2-wertige Verbindung vor. Die Wasserlöslichkeit von Zink nimmt bei pH-Werten kleiner 6 zu, aufgrund des amphoteren Charakters ebenfalls bei hohen pH-Werten. Zink ist im Boden relativ mobil. Zink ist ein Spurenelement. Auf Tiere und Menschen wirkt Zink relativ wenig toxisch. In erster Linie wirkt es phytotoxisch. Daher ist in der BBodSchV für den Pfad Boden-Mensch kein Prüfwert abgeleitet.

#### Literatur zum Thema Schwer- und Halbmetalle:

- Alloway et al., Schadstoffe in der Umwelt, Spektrum Akademischer Verlag, 1996  
Holleman-Wiberg, Lehrbuch der Anorganischen Chemie, de Gruyter, 1976  
Lewandowski et al., Schadstoffe im Boden, Springer 1997  
Merian, Metalle in der Umwelt, verlag chemie 1984  
Römpp Lexikon Chemie Version 2.0, CD-ROM, Thieme  
Scheffer/Schachtschabel, Lehrbuch der Bodenkunde, 14. Auflage, Enke, 1998  
Schinner/Sonnleitner, Bodenökologie Band IV Anorganische Schadstoffe, Springer, 1997  
Schlichting et al., Bodenkundliches Praktikum, Blackwell-Wissenschafts-Verlag, 1995



## Erläuterungen

**Viskosität:** Die Viskosität ist ein Maß für die Zähigkeit eines Fluids. Die Zähigkeit einer Flüssigkeit nimmt mit steigender Temperatur ab. Die *dynamische* Viskosität wird i. d. R. mit der Einheit [mPa\*s] angegeben. Stoffe, deren Viskosität kleiner als 1 mPa\*s ist, können schneller als Wasser im Untergrund versickern sowie u. U. Versiegelungen durchdringen.

**Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizient ( $K_{OW}$ ):**

Der  $K_{OW}$  ist ein Maß für die Polarität eines Stoffes. Je höher der  $K_{OW}$  ist, desto geringer ist die Wasserlöslichkeit und desto geringer ist i. d. R. die Mobilität eines Stoffes im Boden.

Versuchsdurchführung zur Bestimmung des  $K_{OW}$ : Der zu bestimmende Stoff wird in einem Scheidetrichter geschüttelt, der die nicht-mischbaren Flüssigkeiten Wasser (polare Phase) und n-Oktanol (unpolare Phase) enthält. Nach der Phasentrennung wird die Konzentration des Stoffes in Oktanol und im Wasser bestimmt. Der  $K_{OW}$  ist das Verhältnis der Stoffkonzentration in der Oktanolphase zur Konzentration in der Wasserphase.

Unpolare, schlecht wasserlösliche Stoffe weisen einen sehr hohen  $K_{OW}$  auf, z. B. Benzo(a)pyren mit  $K_{OW}$  21.400. Daher wird häufig der dekadische Logarithmus „log  $P_{OW}$ “ gebildet.

**log  $P_{OW}$ :** Der log  $P_{OW}$  ist der dekadische Logarithmus des Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizienten  $K_{OW}$ . Beispiel: ein log  $P_{OW}$  von 5,3 entspricht einem  $K_{OW}$  von  $10^{5,3} \cong 200.000$ .

**$K_{OC}$ :** Der  $K_{OC}$  ist definiert als Adsorptionskonstante, normiert auf den Kohlenstoffgehalt eines Bodens. Der  $K_{OC}$  eines organischen Stoffes beschreibt dessen Fähigkeit zur Adsorption insbesondere an die Huminstoffe in Böden. Die Höhe des  $K_{OC}$  hängt in erster Linie von den chemisch-physikalischen Stoffeigenschaften ab, weiterhin auch vom untersuchten Boden. Ein hoher  $K_{OC}$  bedeutet, dass der untersuchte Stoff in Böden gut adsorbierbar und daher wenig mobil ist. Da er relativ schwer experimentell zu bestimmen ist, wird er häufig aus der empirischen Korrelation mit Hilfe des  $P_{OW}$  nach  $K_{OC} \cong 0,4 P_{OW}$  [1] berechnet.

Stoffe	dynamische Viskosität [mPa*s] bei 20°C	$K_{OW}$ Oktanol-Wasser- Verteilungskoeff.	$K_{OC}$
Trichlormethan	0,57	100	100
Benzol	0,65	135	80
Wasser	1,0	0	-/-
Naphthalin	bei Raumtemp. fest	2.300	1.300
Diesel	3	-	-

### Literatur:

- [1] Rippen, Umweltchemikalien, CD-ROM, Ausgabe 12/98, ecobase Media Explorer
- [2] B.J. Alloway, Schadstoffe in der Umwelt, Spektrum Akademischer Verlag, 1996
- [3] J. Lewandowski et al., Schadstoffe im Boden, Springer 1997
- [4] K. Holtzmann, Das Ausbreitungsverhalten von Mineralölkohlenwasserstoffen im Boden nach Auswertung von über 400 Gutachten, altlasten spektrum 6/99
- [5] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Materialien zur Altlastenbearbeitung Band 16, Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Hydraulische und pneumatische in-situ Verfahren
- [6] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Materialien zur Altlastenbearbeitung Band 7, Handbuch Mikrobiologische Bodenreinigung
- [7] UBA Texte 96/99, Erarbeitung von Programmen zur Überwachung von altlastenverdächtigen Flächen und Altlasten, Band 1
- [8] Schlichting et al., Bodenkundliches Praktikum, Blackwell-Wissenschafts-Verlag, 1995



## Anhang 3: Wertetabellen und Erläuterungen

Die nachstehenden 4 Tabellen enthalten Prüfwerte, Stufe-1-Werte, Stufe-2-Werte, Hilfwerte 1 und 2 für Stoffkonzentrationen sowie organoleptische und physikalisch-chemische Parameter von Basis- und Leitparametern in Grundwasser-, Sickerwasser-, Eluat-, Boden- und Bodenluftproben.

Grundlage für die Bewertung analytisch-chemischer Untersuchungsbefunde bildet das bewährte 2-stufige Wertesystem (Prüfwerte, Stufe-1 bzw. Hilfwerte 1 sowie Stufe-2- bzw. Hilfwerte 2) für Stoffkonzentrationen. Die Prüfwertliste im Anhang 2, Nr. 3.1 der BBodSchV wurde erweitert um eine Liste wichtiger Parameter, die in der BBodSchV nicht enthalten sind. Für diese Parameter wurden die abgeleiteten Geringfügigkeitsschwellen [v. d. TRENCK, 1999] als vorläufige Prüfwerte übernommen (Tab. 3). Die Stufe-1-Werte für Grundwasser in Tab. 4 entsprechen den Geringfügigkeitsschwellenwerten und haben den gleichen Zahlenwert wie die Prüfwerte und vorläufigen Prüfwerte für Sickerwasser in Tab. 3.

Die Hilfwerte in Tab. 1, die Stufe-1-Werte (Differenzwerte) in Tab. 2 sowie die Stufe-2-Werte in Tab. 4 wurden vom Bayerischem Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW) festgelegt. Die Stufe-2-Werte in Tab. 4 stellen i. d. R. das vier- bis zehnfache der jeweiligen Stufe-1-Werte dar. Die Hilfwerte 2 in Tab. 1 stellen mit Ausnahme von Chrom (gesamt) das fünf- bis zehnfache der jeweiligen Hilfwerte 1 dar.

Soweit Stoffe vorliegen, für die im vorliegenden Merkblatt keine Werte festgesetzt sind, müssen diese im Einzelfall in Abstimmung mit dem LfW bewertet werden. Die in § 4 Abs. 5 BBodSchV zitierte Veröffentlichung im Bundesanzeiger Nr. 161a vom 28. August 1999 bezieht sich im übrigen ausschließlich auf die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Pflanze und nicht auf den Pfad Boden-Gewässer.

Bei geogen erhöhten Konzentrationen können die Stufenwerte nicht angewandt werden. Die festgestellten Belastungen sind in diesem Fall im Vergleich zu den standorttypischen Hintergrundwerten zu bewerten.

### zu Tab. 1

Die Hilfwerte für Leitparameter zur Emissionsabschätzung bei Bodenluft- und Bodenbelastungen in Tab. 1 wurden z. T. aus dem Anhang 10 zum Altlastenleitfaden von 1991 übernommen. Neu festgelegt wurden auf der Basis einer Auswertung von über 5.000 Datensätzen aus Einzelfällen die Werte für Sb, As, Pb, Cd, Cr, PAK, Naphthaline und Mineralölkohlenwasserstoffe.

Bei Unterschreitung der Hilfwerte 1 besteht grundsätzlich keine Gefahr einer erheblichen Grundwasserverunreinigung (Ausnahmen siehe Kap. 2.1.2.1.3). Ihre Überschreitung löst dagegen weitere Untersuchungs- und Bewertungsschritte aus.

Die Hilfwerte 2 dienen bei anorganischen Stoffen in einigen Fällen als zusätzliches Kriterium für weitergehende Untersuchungen (z. B.  $\text{pH}_{\text{stat}}$ ). Für organische lipophile Stoffe, außer PAK, können sie als Entscheidungshilfe für die Gefährdungsabschätzung (Sickerwasserprognose) und für die Erfordernis von Sanierungsmaßnahmen herangezogen werden.



**zu Tab. 2**

Die Tab. 2 enthält Stufe-1-Werte für Basisparameter im Grundwasser. Es handelt sich dabei um Differenzwerte von Stoffkonzentrationen zwischen dem Abstrom einer Altlastverdachtsfläche und dem Zustrom bzw. geogenen Hintergrundwert (z. B. Messwert aus unbelasteter Messstelle bzw. Brunnen/Vorfeldmessstelle im selben Grundwasserleiter). Sie stellen eine Geringfügigkeits- und Erheblichkeitsschwelle für die Bewertung von Grundwasserverunreinigungen dar. Sie zeigen auf, ab welchen Veränderungen der Beschaffenheit des unmittelbaren Grundwasserabstroms im Vergleich zum -zustrom bzw. Hintergrundwert Hinweise auf erhebliche anthropogene Verunreinigungen vorliegen. Wird der Stufe-1-Wert überschritten, so liegt eine erhebliche Grundwasserverunreinigung vor.

**zu Tab. 3**

Die Prüfwerte und vorläufigen Prüfwerte für Sickerwasser in Tab. 3 dienen zur Beurteilung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen. Bei prognostizierten Konzentrationen unter dem Prüfwert am Ort der Beurteilung liegt derzeit grundsätzlich keine Altlast oder schädliche Bodenveränderung vor, d. h. sie haben die Funktion einer Geringfügigkeitsschwelle.

Wird der Prüfwert am Ort der Beurteilung überschritten, so besteht der hinreichende Verdacht auf eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast. In diesem Fall hat der Prüfwert auch die Funktion einer Erheblichkeitsschwelle.

**zu Tab. 4**

Die Stufe-1-Werte für Leitparameter in Grundwasser in Tab. 4 sind identisch mit den Prüfwerten und vorläufigen Prüfwerten der Tab. 3. Die Stufe-1-Werte haben bei der Beurteilung von Grundwasserverunreinigungen sowohl die Funktion einer Geringfügigkeitsschwelle als auch einer Erheblichkeitsschwelle. Dies bedeutet grundsätzlich, dass bei Konzentrationen unter dem Stufe-1-Wert im Grundwasser eine nur geringfügige oder keine Grundwasserverunreinigung vorliegt [GBG, 1998].

Allerdings kann die Sickerwasserprognose für den Ort der Beurteilung trotz einer Unterschreitung des Stufe-1-Werts im Grundwasser eine Prüfwertüberschreitung ergeben und somit eine Gefahr für das Grundwasser nicht ausgeschlossen werden. Wird der Stufe-1-Wert überschritten, so liegt eine erhebliche Grundwasserverunreinigung vor und es besteht aus bodenschutzrechtlicher Sicht i. d. R. der hinreichende Verdacht einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast.

Die Stufe-2-Werte dienen als Entscheidungshilfe für die abschließende Gefährdungsabschätzung und für die Erfordernis von Sanierungsmaßnahmen. Sie sind auch zur Bewertung von Eluaten (am Ort der Probennahme) und damit zur Erstellung der Sickerwasserprognose heranzuziehen.





### **Definitionen und Hinweise zu den Stoffgruppen in den Tab. 1, 3 und 4**

Die nachfolgenden Definitionen wurden soweit vorhanden und fachlich korrekt aus Anhang 2 Nr. 3 BBodSchV übernommen. Für in der BBodSchV nicht enthaltene Stoffgruppen (kursiv gekennzeichnet) wurden die Definitionen größtenteils aus [v. d. TRENCK, 1999] entnommen.

#### **BTEX:**

Leichtflüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe (Benzol, Toluol, Xylol, Ethylbenzol, Styrol, Cumol)

Anmerkung: Beruhen erhöhte Gehalte bzw. Konzentrationen an BTEX auf Verunreinigungen durch Kraftstoffe (z. B. bei Tankstellen und Raffinerien), so sind ergänzende Untersuchungen auf Methyl-tertiär-butylether (MTBE) durchzuführen.

#### ***Chlorbenzole, gesamt:***

Summe aller chlorhaltigen einkernigen Benzole

Anmerkung: Wenn es sich bei dem Chlorbenzol um ein PBSM (z. B. HCB) oder dessen Abbauprodukt handelt, dann gelten die Vorgaben für PBSM.

#### ***Chlorphenole, gesamt:***

Summe aller chlorhaltigen einkernigen Phenole

Anmerkung: Wenn es sich bei dem Chlorphenol um ein PBSM (z. B. PCP) oder dessen Abbauprodukt handelt, dann gelten die Vorgaben für PBSM.

#### **LHKW:**

Leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe, d. h. Summe der halogenierten C1- und C2-Kohlenwasserstoffe

#### ***LHKW, karzinogen:***

Summe der karzinogenen/karzinogenverdächtigen LHKW Tetrachlormethan (CCl<sub>4</sub>), Chlorethen (Vinylchlorid, C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl) und 1,2-Dichlorethan (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>)

#### **Mineralölkohlenwasserstoffe (KW-Index):**

Die Definition der BBodSchV (n-Alkane [C10 - C39], Isoalkane, Cycloalkane und aromatische Kohlenwasserstoffe) ist ungenau und steht im Widerspruch zum dort genannten Analyseverfahren.

Gemäß der neuen, präzisierenden Normung (DIN EN ISO 9377-2) gehören zu der Stoffgruppe der Mineralölkohlenwasserstoffe alle Kohlenwasserstoffe, die im Gaschromatogramm zwischen C10 und C40 vom FID angezeigt und nicht an Florisil adsorbiert werden. Diese Definition ist in diesem Merkblatt heranzuziehen.

#### Anmerkungen:

Beruhen erhöhte Gehalte bzw. Konzentrationen an Mineralölkohlenwasserstoffen auf Verunreinigungen durch Kraftstoffe (z. B. bei Tankstellen und Raffinerien), so sind ergänzende Untersuchungen auf Methyl-tertiär-butylether (MTBE) durchzuführen.



Liegen Anhaltspunkte für eine Verunreinigung durch Mineralölkohlenwasserstoffe mit Kettenlängen < C10 (z.B. Ottokraftstoffe) vor, so sind diese durch Dampfraumanalyse und GC/MS zu identifizieren und im Einzelfall zu bewerten.

**PAK, gesamt:**

Summe der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe ohne Naphthalin und Methyl-naphthaline, i. d. R. Bestimmung über die Summe von 15 Einzelsubstanzen gemäß Liste der US Environmental Protection Agency (EPA) ohne Naphthalin; ggf. unter Berücksichtigung weiterer relevanter PAK (z. B. Chinoline).

**PBSM, gesamt:**

Organisch-chemische Stoffe zur Pflanzenbehandlung und Schädlingsbekämpfung einschließlich ihrer toxischen Hauptabbauprodukte.

**Phenolindex:**

Mit dem Verfahren „Phenolindex nach Wasserdampfdestillation“ (DIN 38409-H16) erfassbaren Phenole.

Anmerkung: Die in der BBodSchV genannte Methode für Bodensickerwasser (ISO/DIS 8165-2: 01.97) ist für die Bestimmung von Phenolen nicht ausreichend validiert.

**PCB, gesamt:**

Summe der polychlorierten Biphenyle; i. d. R. Bestimmung über die 6 Kongeneren nach Ballschmiter gemäß Altöl-VO (DIN 51527-1) multipliziert mit 5; ggf. z. B. bei bekanntem Stoffspektrum einfache Summenbildung aller relevanten Einzelstoffe (DIN 38407-3-2 bzw. -3-3).



**Tab. 1: Hilfwerte zur Emissionsabschätzung bei Boden- und Bodenluftbelastungen  
(Die Gesamtstoffgehalte beziehen sich i. d. R. auf die Feinbodenfraktion < 2 mm)**

Anorganische Leitparameter	Einheit	Hilfswert 1	Hilfswert 2
Antimon (Sb)	mg/kg	10	50
Arsen (As)	mg/kg	10	50
Barium (Ba)	mg/kg	400	2.000
Beryllium (Be)	mg/kg	5	25
Blei (Pb)	mg/kg	100	500
Cadmium (Cd)	mg/kg	10	50
Chrom, gesamt (Cr)	mg/kg	50	1.000
Kobalt (Co)	mg/kg	100	500
Kupfer (Cu)	mg/kg	100	500
Molybdän (Mo)	mg/kg	100	500
Nickel (Ni)	mg/kg	100	500
Quecksilber (Hg)	mg/kg	2	10
Selen (Se)	mg/kg	10	50
Thallium (Tl)	mg/kg	2	10
Vanadium (V)	mg/kg	100	500
Zink (Zn)	mg/kg	500	2.500
Zinn (Sn)	mg/kg	50	250
Cyanid, gesamt (CN <sup>-</sup> )	mg/kg	50	-
Cyanid, leicht freisetzbar (CN <sup>-</sup> )	mg/kg	5	-
Fluorid (F <sup>-</sup> )	mg/kg	500	-
Organische Leitparameter			
PAK, gesamt	mg/kg	5	25
Naphthalin <sup>1)</sup>	mg/kg	1	5
Extrahierbare organ. Halogenverbindg. (EOX) <sup>2)</sup>	mg/kg	3	-
LHKW <sup>3)</sup>	mg/kg	1	-
- LHKW, karzinogen <sup>3)</sup>	mg/kg	0,1	-
LHKW (Bodenluft)	mg/m <sup>3</sup>	5	50
- LHKW, karzinogen (Bodenluft)	mg/m <sup>3</sup>	1	5
PCB, gesamt <sup>4)</sup>	mg/kg	1	10
- PCB, Einzelstoff	mg/kg	0,1	1
PBSM, gesamt	mg/kg	5	-
- PBSM, Einzelstoff	mg/kg	1	-
Mineralölkohlenwasserstoffe	mg/kg	100	1.000
BTEX <sup>3) 5)</sup>	mg/kg	10	100 <sup>7)</sup>
- Benzol als Einzelstoff <sup>3)</sup>	mg/kg	1	-
BTEX (Bodenluft) <sup>5)</sup>	mg/m <sup>3</sup>	10 <sup>6)</sup>	100
- Benzol als Einzelstoff (Bodenluft)	mg/m <sup>3</sup>	2	10
Phenolindex nach Wasserdampfdestillation <sup>2)</sup>	mg/kg	1	-
Chlorphenole, gesamt	mg/kg	1	10
Chlorbenzole, gesamt	mg/kg	1	10

- 1) Falls weitere Naphthaline (z. B. Methylnaphthaline) auftreten, so sind sie zur Konzentration von Naphthalin zu addieren.
- 2) Bei Überschreitung des Hilfswerts 1 ist eine Bestimmung der Einzelstoffe bzw. des techn. Produkts durchzuführen.
- 3) Untersuchungen auf Gesamtstoffgehalte liefern grundsätzlich nur bei bindigem Untergrund sinnvolle Werte.
- 4) Ist die Summe der 6 PCB-Kongeneren größer als der Hilfswert 1, so ist der PCB-Typ (techn. Produkt) und die Menge nach DIN 38407-3-2 bzw. -3-3 zu bestimmen. Der Hilfswerts 2 gilt für die so ermittelten Ergebnisse.
- 5) Falls weitere Alkylbenzole (z. B. C3- bis C6-Alkylbenzole) vorhanden sind, so sind sie in die Summe der BTEX-Aromaten einzubeziehen.
- 6) Überschreitet die Summe der BTEX-Aromaten in der Bodenluft den Hilfswert 1, so sind an ausgewählten, repräsentativen Bodenproben Untersuchungen auf den Gesamtstoffgehalt an einkernigen Aromaten durchzuführen; dabei sind insbesondere die höher alkylierten Homologe (C3- bis C6-Alkylbenzole, Aromatenreiche technische Produkte, z. B. Lacklösemittel) zu erfassen.
- 7) Der Hilfswert 2 für den Gesamtstoffgehalt ist bei überwiegenden Anteilen schwerflüchtiger Alkylbenzole heranzuziehen.



**Tab. 2: Stufe-1-Werte (Differenzwerte) für Basisparameter in Grundwasser**

Basisparameter	Einheit	Stufe-1-Wert (Differenz zu Oberstrom bzw. Hintergrundwert)	Kurzunter- suchung
Färbung (visuell) <sup>1)</sup>		Verfärbung	+
Trübung (visuell) <sup>1)</sup>		Eintrübung	+
Geruch (qualitativ) <sup>1)</sup>		deutlicher Fremdgeruch	+
Temperatur (t) <sup>1)2)</sup>	°C	deutliche Änderung	+
Leitfähigkeit (bei 20 °C) <sup>1)</sup>	µS/cm	+ 200 <sup>3)</sup>	+
pH-Wert (bei t) <sup>1)</sup>		± 0,3 bis 1,0 <sup>4)</sup>	+
Sauerstoff, gelöst (O <sub>2</sub> ) <sup>1)</sup>	mg/l	- 3	+
Basekapazität bis pH 8,2 (K <sub>B 8,2</sub> )	mmol/l	± 0,5	
Säurekapazität bis pH 4,3 (K <sub>S 4,3</sub> )	mmol/l	± 1 <sup>3)</sup>	+
Calcitlösekapazität, berechnet (CaCO <sub>3</sub> )	mg/l	deutliche Änderung	
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	mg/l	+ 20 <sup>3)</sup>	+
Magnesium (Mg <sup>2+</sup> )	mg/l	+ 10 <sup>3)</sup>	+
Natrium (Na <sup>+</sup> )	mg/l	+ 20 <sup>3)</sup>	
Kalium (K <sup>+</sup> )	mg/l	+ 10 <sup>3)</sup>	
Mangan, gesamt (Mn)	mg/l	deutliche Änderung	
Eisen, gesamt (Fe)	mg/l	deutliche Änderung	
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/l	+ 0,3 <sup>5)</sup>	+
Chlorid (Cl <sup>-</sup> )	mg/l	+ 30 <sup>3)</sup>	+
Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/l	± 30 <sup>3)6)</sup>	+
Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/l	± 10	+
Nitrit (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/l	+ 0,3	
Phosphat, ortho (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/l	+ 0,2	
Kieselsäure (SiO <sub>2</sub> )	mg/l	+ 10	
Oxidierbarkeit (Permanganatindex) (O <sub>2</sub> )	mg/l	+ 3 <sup>5)</sup>	
Gel. organisch geb. Kohlenstoff (DOC)	mg/l	+ 4 <sup>5)</sup>	+
Spektr. Absorptionskoeffizient 436 nm	m <sup>-1</sup>	+ 5	
Spektr. Absorptionskoeffizient 254 nm	m <sup>-1</sup>	+ 5	
Adsorbierbare org. geb. Halogene (AOX)	µg/l	+ 80 <sup>5)</sup>	
Bor (B)	mg/l	+ 0,1	
Biotest (Daphnien-, Leuchtakterien und/oder Algentest)		Toxische Wirkung im unverdünnten Grundwasser	

- 1) Vor-Ort-Parameter; Bestimmung bei jeder Probennahme (Mindestumfang an Basisparametern).
- 2) Bei Grundwassertemperaturänderungen sind ggf. die Einflüsse von Bauwerksgründungen und Oberflächenwasserinfiltration zu berücksichtigen.
- 3) In einigen Grundwasserleitern mit hoher geogener Grundbelastung ist die natürliche Schwankungsbreite zu berücksichtigen.
- 4) pH-Änderungen sind im Zusammenhang mit dem Pufferungsvermögen des Wassers zu bewerten.
- 5) Bei höherer Vorbelastung: + 25 %.
- 6) Bewertung der Konzentrationsabnahme nur unter der Voraussetzung, dass eine Denitrifikation stattgefunden hat.

**Tab. 3: Prüfwerte und vorläufige Prüfwerte (kursiv) für Sickerwasser**

Anorganische Leitparameter	Einheit	Prüfwerte bzw. vorläufige Prüfwerte
<b>Antimon (Sb)</b>	µg/l	<b>10</b>
<b>Arsen (As)</b>	µg/l	<b>10</b>
<i>Barium (Ba)</i>	µg/l	<i>300</i>
<i>Beryllium (Be)</i>	µg/l	<i>20</i>
<b>Blei (Pb)</b>	µg/l	<b>25</b>
<b>Cadmium (Cd)</b>	µg/l	<b>5</b>
<b>Chrom, gesamt (Cr)</b>	µg/l	<b>50</b>
<b>Chromat (Cr)</b>	µg/l	<b>8</b>
<b>Kobalt (Co)</b>	µg/l	<b>50</b>
<b>Kupfer (Cu)</b>	µg/l	<b>50</b>
<b>Molybdän (Mo)</b>	µg/l	<b>50</b>
<b>Nickel (Ni)</b>	µg/l	<b>50</b>
<b>Quecksilber (Hg)</b>	µg/l	<b>1</b>
<b>Selen (Se)</b>	µg/l	<b>10</b>
<i>Thallium (Tl)</i>	µg/l	<i>1</i>
<i>Vanadium (V)</i>	µg/l	<i>20</i>
<b>Zink (Zn)</b>	µg/l	<b>500</b>
<b>Zinn (Sn)</b>	µg/l	<b>40</b>
<b>Cyanid, gesamt (CN<sup>-</sup>)</b>	µg/l	<b>50</b>
<b>Cyanid, leicht freisetzbar (CN<sup>-</sup>)</b>	µg/l	<b>10</b>
<b>Fluorid (F<sup>-</sup>)</b>	µg/l	<b>750</b>
<b>Organische Leitparameter</b>		
<b>PAK, gesamt</b>	µg/l	<b>0,2</b>
- Naphthalin <sup>1)</sup>	µg/l	<b>2</b>
- Benzo(a)pyren	µg/l	<i>0,01</i>
<b>LHKW</b>	µg/l	<b>10</b>
- LHKW, karzinogen	µg/l	<b>3</b>
- Chlorethen (Vinylchlorid) als Einzelstoff	µg/l	<i>0,5</i>
<b>PBSM, gesamt</b>	µg/l	<i>0,5</i>
- PBSM, Einzelstoff	µg/l	<i>0,1</i>
<b>PCB, gesamt <sup>2)</sup></b>	µg/l	<b>0,05</b>
- PCB, Einzelstoff	µg/l	<i>0,01</i>
<b>Mineralölkohlenwasserstoffe</b>	µg/l	<b>200</b>
<b>BTEX <sup>3)</sup></b>	µg/l	<b>20</b>
- Benzol als Einzelstoff	µg/l	<b>1</b>
<b>Phenolindex nach Wasserdampfdestillation <sup>4)</sup></b>	µg/l	<b>20</b>
<i>Chlorphenole, gesamt</i>	µg/l	<i>1</i>
<i>Chlorbenzole, gesamt</i>	µg/l	<i>1</i>

1) Falls weitere Naphthaline (z. B. Methylnaphthaline) auftreten, so sind sie im Einzelfall zu bewerten.

2) Ist die Summe der 6 PCB-Kongeneren größer als der Prüfwert, so ist der PCB-Typ (techn. Produkt) und die Menge nach DIN 38407-3-2 bzw. -3-3 zu bestimmen.

3) Falls weitere Alkylbenzole (z. B. C3- bis C6-Alkylbenzole) auftreten, so sind sie im Einzelfall zu bewerten.

4) Bei Überschreitung des Prüfwertes ist eine Bestimmung der Einzelstoffe durchzuführen.



**Tab. 4: Stufenwerte für Leitparameter in Grundwasser**

<b>Anorganische Leitparameter</b>	<b>Einheit</b>	<b>Stufe-1-Wert</b>	<b>Stufe-2-Wert</b>
Antimon (Sb)	µg/l	10	40
Arsen (As)	µg/l	10	40
Barium (Ba)	µg/l	300	1.200
Beryllium (Be)	µg/l	20	80
Blei (Pb)	µg/l	25	100
Cadmium (Cd)	µg/l	5	20
Chrom, gesamt (Cr)	µg/l	50	200
Chromat (Cr)	µg/l	8	30
Kobalt (Co)	µg/l	50	200
Kupfer (Cu)	µg/l	50	200
Molybdän (Mo)	µg/l	50	200
Nickel (Ni)	µg/l	50	200
Quecksilber (Hg)	µg/l	1	4
Selen (Se)	µg/l	10	40
Thallium (Tl)	µg/l	1	4
Vanadium (V)	µg/l	20	80
Zink (Zn)	µg/l	500	2.000
Zinn (Sn)	µg/l	40	160
Cyanid, gesamt (CN <sup>-</sup> )	µg/l	50	200
Cyanid, leicht freisetzbar (CN <sup>-</sup> )	µg/l	10	50
Fluorid (F <sup>-</sup> )	µg/l	750	3.000
<b>Organische Leitparameter</b>			
PAK, gesamt	µg/l	0,2	2
- Naphthalin <sup>1)</sup>	µg/l	2	8
- Benzo(a)pyren	µg/l	0,01	0,1
LHKW	µg/l	10	40
- LHKW, karzinogen	µg/l	3	10
- Chlorethen (Vinylchlorid) als Einzelstoff	µg/l	0,5	3
PBSM, gesamt	µg/l	0,5	2
- PBSM, Einzelstoff	µg/l	0,1	1
PCB, gesamt <sup>2)</sup>	µg/l	0,05	0,5
- PCB, Einzelstoff	µg/l	0,01	0,1
Mineralölkohlenwasserstoffe	µg/l	200	1.000
BTEX <sup>3)</sup>	µg/l	20	100
- Benzol als Einzelstoff	µg/l	1	10
Phenolindex nach Wasserdampfdestillation <sup>4)</sup>	µg/l	20	100
Chlorphenole, gesamt	µg/l	1	5
Chlorbenzole, gesamt	µg/l	1	5

- 1) Falls weitere Naphthaline (z. B. Methylnaphthaline) auftreten, so sind sie zur Konzentration von Naphthalin zu addieren.
- 2) Ist die Summe der 6 PCB-Kongeneren größer als der Stufe-1-Wert, so ist der PCB-Typ (techn. Produkt) und die Menge nach DIN 38407-3-2 bzw. -3-3 zu bestimmen. Der Stufe-2-Wert gilt für die so ermittelten Ergebnisse.
- 3) Falls weitere Alkylbenzole (z. B. C3- bis C6-Alkylbenzole) vorhanden sind, so sind sie in die Summe der BTEX-Aromaten einzubeziehen.
- 4) Bei Überschreitung des Stufe-1-Wertes ist eine Bestimmung der Einzelstoffe durchzuführen.

