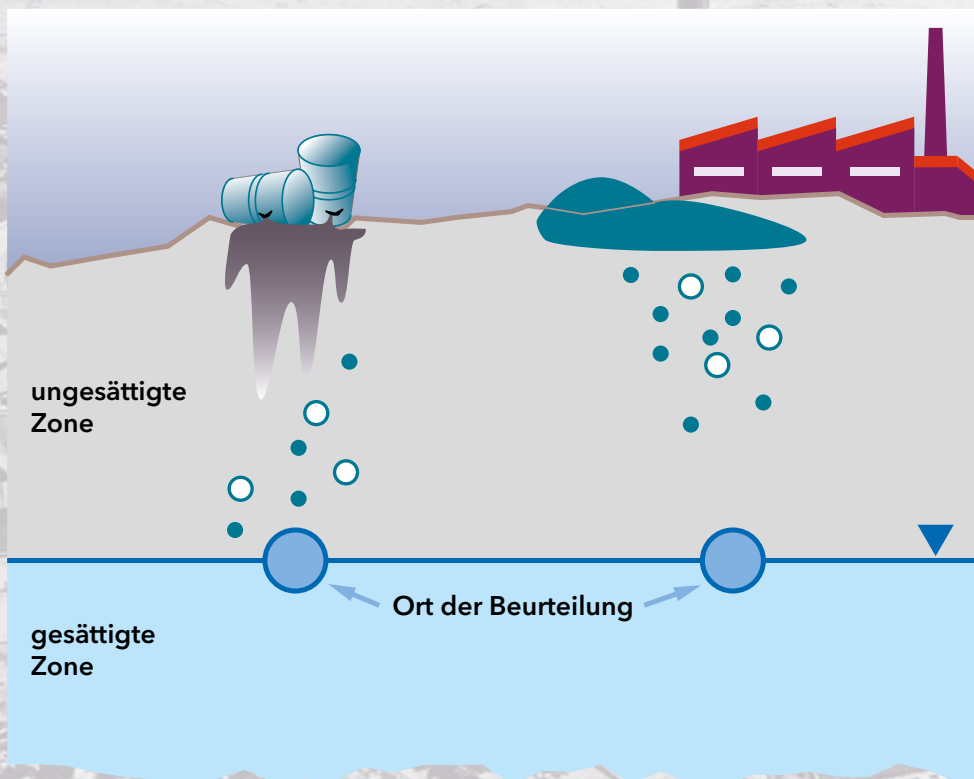


Handbuch Altlasten

Sickerwasserprognose

Band 3, Teil 3

3., vollständig überarbeitete Auflage



Handbuch Altlasten, Band 3, Teil 3

1. Auflage 2001

2. überarbeitete Auflage 2002

3. vollständig überarbeitete Auflage 2025

Sickerwasserprognose

Wiesbaden 2025

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Impressum

Handbuch Altlasten, Band 3, Teil 3
3., vollständig überarbeitete Auflage 2025

ISBN 978-3-89026-824-8

Die Erarbeitung der 1. und 2. Auflage dieses Handbuchs wurde von einer Arbeitsgruppe begleitet, der folgende Mitglieder angehörten:

Dr. Jörg Becht	Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten
Friedrich Frankenau	Regierungspräsidium Gießen, Staatliches Umweltamt Marburg
Pia Frenken	Regierungspräsidium Gießen, Staatliches Umweltamt Wetzlar
Sigrid Gietl	Regierungspräsidium Darmstadt, Staatliches Umweltamt Hanau
Joerg Hartmann	Regierungspräsidium Kassel, Staatliches Umweltamt Bad Hersfeld
Barbara Jungmann	Untere Wasserbehörde der Stadt Frankfurt
Simone Mankel	Untere Wasserbehörde des Landkreises Marburg-Biedenkopf
Berthold Meise	Regierungspräsidium Darmstadt, Staatliches Umweltamt Hanau
Dr. Sven Rumohr	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Hans-Joachim Schmal	Regierungspräsidium Darmstadt, Staatliches Umweltamt Darmstadt
Dr. Thomas Schmid	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Dr. Günther Siegert	Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten
Karin Teichmann	Regierungspräsidium Darmstadt, Staatliches Umweltamt Frankfurt
Theresia Trampe	Regierungspräsidium Darmstadt, Staatliches Umweltamt Darmstadt
Susanne Weber	Untere Wasserbehörde des Landkreises Offenbach
Michael Wolf	Regierungspräsidium Darmstadt, Staatliches Umweltamt Wiesbaden
Volker Zeisberger	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Die Erarbeitung dieser 3., überarbeiteten Auflage wurde von einer Arbeitsgruppe begleitet, der folgende Mitglieder angehörten:

Dieter Binder	Regierungspräsidium Darmstadt
Tobias Diehl	Regierungspräsidium Darmstadt
Jan Tomasek	Regierungspräsidium Kassel
Michael Wolf	Regierungspräsidium Darmstadt
Volker Zeisberger	Hess. Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (Obmann)

Hintergrundbild:	Hedderheimer Kupferwerk und Süddeutsche Kabelwerke AG
	Bildnachweis: Denkmalamt Stadt Frankfurt am Main
Grafik:	Studio Zerzawy AGD, Hohenstein Ts. (Umschlag)

Herausgeber, © und Vertrieb:
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Rheingaustraße 186, 65203 Wiesbaden

Telefax: 0611 6939113
E-Mail: vertrieb@hlnug.hessen.de
Internet: www.hlnug.de

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

Inhalt

1	Einleitung	5
2	Wesentliche Inhalte der LABO-Arbeitshilfe „Sickerwasserprognose“	6
2.1	Vorbemerkungen	6
2.2	Grundlagen und Vorgehensweise bei der Beurteilung des Wirkungspfad des Boden→Grundwasser	6
2.3	Sickerwasserprognose bei orientierenden Untersuchungen	9
2.3.1	Allgemeines	9
2.3.2	Materialuntersuchungen bei orientierenden Untersuchungen	11
2.3.3	Grundwasseruntersuchungen bei orientierenden Untersuchungen	13
2.4	Sickerwasserprognose bei Detailuntersuchungen	15
2.4.1	Allgemeines	15
2.4.2	Materialuntersuchungen bei Detailuntersuchungen	16
2.4.3	Grundwasseruntersuchungen Detailuntersuchungen	19
2.4.4	In-Situ-Untersuchungen bei Detailuntersuchungen	21
2.5	Hinweise zu den Prüfwerten der BBodSchV	22
3	Ergänzungen für den Vollzug in Hessen	23
3.1	Allgemeines	23
3.2	Berechnung des Verhältnisses „eluierbarer Anteil“ zum „Gesamtgehalt“	24
3.3	Szenarien für die Abschätzung der Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone bei orientierenden Untersuchungen	24
3.4	Abschätzung der Grundwassergefährdung aufgrund von Bodenuntersuchungen bei orientierenden Untersuchungen	27
3.5	Berechnungsbeispiel für die Schadstofffracht und Dauer des Schadstoffaustrags	31
	Anhang: Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden→Grundwasser	34
	Literatur	37
	Abkürzungsverzeichnis	38

1 Einleitung

Gefährdungen für das Grundwasser

Der unsachgemäße Umgang mit wassergefährdenden Stoffen führte in der Vergangenheit häufig zu Bodenverunreinigungen, hinzu kommen Bodenverunreinigungen als Folge von Unfällen. Diese Bodenverunreinigungen können über den Wirkungspfad Boden→Grundwasser eine Grundwassergefährdung darstellen bzw. eine schädliche Grundwasserverunreinigung verursachen. Zum einen kann die Gefahr eines zukünftigen Schadstoffeintrags bestehen, zum anderen können Schadstoffe bereits in das Grundwasser gelangt sein.

Bodenschutzrecht

Zum Schutz des Grundwassers vor Schadstoffeinträgen und zur Gefahrenabwehr gelten die Vorgaben des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) und der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). Zur Bewertung des Wirkungspfad Boden→Grundwasser sah bereits die BBodSchV a.F. von 1999 die Durchführung einer Sickerwasserprognose vor. Die methodische Vorgehensweise und die Bewertungsmaßstäbe wurden mit der novellierten BBodSchV von 2021 angepasst, die als Teil der Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und Gewerbeabfallverordnung (Mantelverordnung) 2023 in Kraft getreten ist [1].

Neufassung der BBodSchV

Die Neufassung der BBodSchV beinhaltet Ergänzungen (u. a. Prüfwerte für den Ort der Probennahme, Einmischungsprognose) und Konkretisierungen (u. a. zu Elutionsverfahren) zum Wirkungspfad Boden→Grundwasser.

LABO-Arbeitshilfe zur Sickerwasserprognose

Mit der Novellierung der BBodSchV und Veröffentlichung der LABO-Arbeitshilfe „Sickerwasserprognose“ [2] wurde eine Überarbeitung des hessischen Handbuchs Altlasten „Untersuchung und Beurteilung des Wirkungspfad Boden→Grundwasser – Sickerwasserprognose (2. Auflage 2002)“ als notwendig erachtet. Für die vorliegende vollständig überarbeitete 3. Auflage des Handbuchs Altlasten gilt: Vorrangig ist die bundesweit abgestimmte LABO-Arbeitshilfe anzuwenden. Das hessische Handbuch Altlasten, das sich seit mehr als 20 Jahren im Vollzug bewährt hat, soll daher in der aktuellen Fassung vor allem ergänzend, insbesondere für orientierende Untersuchungen (OU) nach § 12 Abs. 1 BBodSchV, angewendet werden¹.

Ergänzende Bewertungsansätze

Die vorliegende Neuauflage des Handbuchs Altlasten fasst die wesentlichen Inhalte der LABO-Arbeitshilfe kurz zusammen (Kapitel 2). Im Kapitel 3 werden Bewertungsansätze, die sich im hessischen Vollzug bewährt haben und bereits in der 2. Auflage beschrieben sind, erläutert. Diese Bewertungsansätze sind:

- Abschätzung der Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone bei OU (Szenarien)
- Abschätzung der Grundwassergefährdung aufgrund von Bodenuntersuchungen bei OU (Bewertungsmatrix)
- Berechnung des Verhältnisses „eluierbarer Anteil“ zum „Gesamtgehalt“.

Darüber hinaus enthält das Handbuch ein Berechnungsbeispiel für die Schadstofffracht und die Dauer des Schadstoffaustrags.

Zielgruppe und Anwendungsbereich

Das vorliegende Handbuch richtet sich an fachkundige Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus Behörden und Ingenieurbüros. Das Handbuch findet Anwendung bei altlastverdächtigen Altstandorten und Altablagerungen, bei gewerblich genutzten Flächen sowie bei Unfällen mit wassergefährdenden Stoffen (Verdachtsflächen nach § 2 Abs. 4 BBodSchG). Für Fragestellungen im Zusammenhang mit der Ersatzbaustoffverordnung ist das vorliegende Handbuch nicht anwendbar.

¹ In der LABO-Arbeitshilfe wird in Kapitel 5.3.1 der Hinweis gegeben: „In einigen Bundesländern werden zur Beurteilung des Schadstoffeintrags in das Grundwasser formalisierte Verfahren zur verbal-argumentativen Abschätzung angewendet.“

2 Wesentliche Inhalte der LABO-Arbeitshilfe „Sickerwasserprognose“

2.1 Vorbemerkungen

LABO-Arbeitshilfe „Sickerwasserprognose“

Um die Vorgaben der aktualisierten BBodSchV praxisnah und bundesweit einheitlich umsetzen zu können, initiierte die Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) die Erstellung einer weiterentwickelten Arbeitshilfe. Unter Mitarbeit des HLNUG wurde 2024 die LABO-Arbeitshilfe „Sickerwasserprognose“ veröffentlicht [2]. Hierbei wurden die bisherigen LABO-Arbeitshilfen „Sickerwasserprognose bei orientierenden Untersuchungen (2003)“ und „Sickerwasserprognose bei Detailuntersuchungen (2008)“ zusammengeführt, aktualisiert und ergänzt.

Zusammenfassung der LABO-Arbeitshilfe

Die nachfolgenden Ausführungen fassen die wesentlichen Inhalte der LABO-Arbeitshilfe zusammen. Dabei wird auf die betreffenden Kapitel und Anhänge der LABO-Arbeitshilfe verwiesen, in denen die Sachverhalte ausführlich beschrieben sind. Ergänzende Aspekte, die sich im hessischen Vollzug bewährt haben, werden in Kapitel 3 dargestellt.

2.2 Grundlagen und Vorgehensweise bei der Beurteilung des Wirkungspfades Boden→Grundwasser

Wirkungspfad Boden→Grundwasser

Von altlastverdächtigen Flächen und Verdachtsflächen kann eine Gefahr für das Schutzgut Grundwasser ausgehen, wenn Schadstoffe mobilisiert werden und über den Wirkungspfad Boden→Grundwasser in das Grundwasser gelangen können. Zur Abschätzung, ob eine Grundwassergefährdung besteht und in welchem Umfang Schadstoffe mit dem Sickerwasser ins Grundwasser gelangen, ist das Instrument der Sickerwasserprognose anzuwenden (§ 12 Abs. 3 und § 13 Abs. 5 BBodSchV).

Definition Sickerwasserprognose

Die **Sickerwasserprognose** ist in § 2 Nr. 15 BBodSchV definiert: „Abschätzung der von einer Verdachtsfläche, altlastverdächtigen Fläche, schädlichen Bodenveränderung oder Altlast ausgehenden oder zu erwartenden Schadstoffeinträge über das Sickerwasser in das Grundwasser, unter Berücksichtigung von Konzentrationen und Frachten und bezogen auf den Ort der Beurteilung“.

Ort der Beurteilung

Der **Ort der Beurteilung** ist in § 2 Nr. 16 BBodSchV als Übergangsbereich von der wasserungesättigten zur wassergesättigten Zone definiert (Abb. 1). In dieser Arbeitshilfe wird der Ort der Beurteilung mit dem mittleren Grundwasserhöchststand² gleichgesetzt, um eine praxistaugliche Vorgehensweise zu ermöglichen. Neben dem Ort der Beurteilung ist bei der Sickerwasserprognose der **Ort der Probennahme** von Relevanz (siehe im vorliegenden Kapitel unter „Prüfwerte“ und „Materialuntersuchungen“).

Ort der Probennahme

² Der Grundwasserstand ist gewöhnlich jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Um den Ort der Beurteilung zu ermitteln, ist ein mittlerer Grundwasserhöchststand für den jeweiligen Standort abzuschätzen.

Prüfwerte der BBodSchV

Die für den Abgleich mit den ermittelten bzw. abgeschätzten Stoffkonzentrationen (sowohl am Ort der Probennahme als auch am Ort der Beurteilung) heranzuziehenden **Prüfwerte** für den Wirkungspfad Boden→Grundwasser sind in Anlage 2 in den Tabellen 1 bis 3 BBodSchV aufgeführt (siehe Anhang). Prüfwerte³ sind wie folgt definiert (§ 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 BBodSchG): „Werte, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der Bodennutzung eine einzelfallbezogene Prüfung durchzuführen und festzustellen ist, ob eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast vorliegt“.

Verfahrensweisen der Sickerwasserprognose

Eine Sickerwasserprognose kann nach § 14 Abs. 1 BBodSchV auf Grundlage der nachfolgend genannten drei **Verfahrensweisen** durchgeführt werden:

- Materialuntersuchungen
- Grundwasseruntersuchungen
- In-Situ-Untersuchungen.

Die o. g. Verfahrensweisen sind in der LABO-Arbeitshilfe zusammen mit methodischen Hinweisen beschrieben ([2] dort Anhänge 1 bis 4). Nachfolgend werden wichtige Aspekte kurz zusammengefasst.

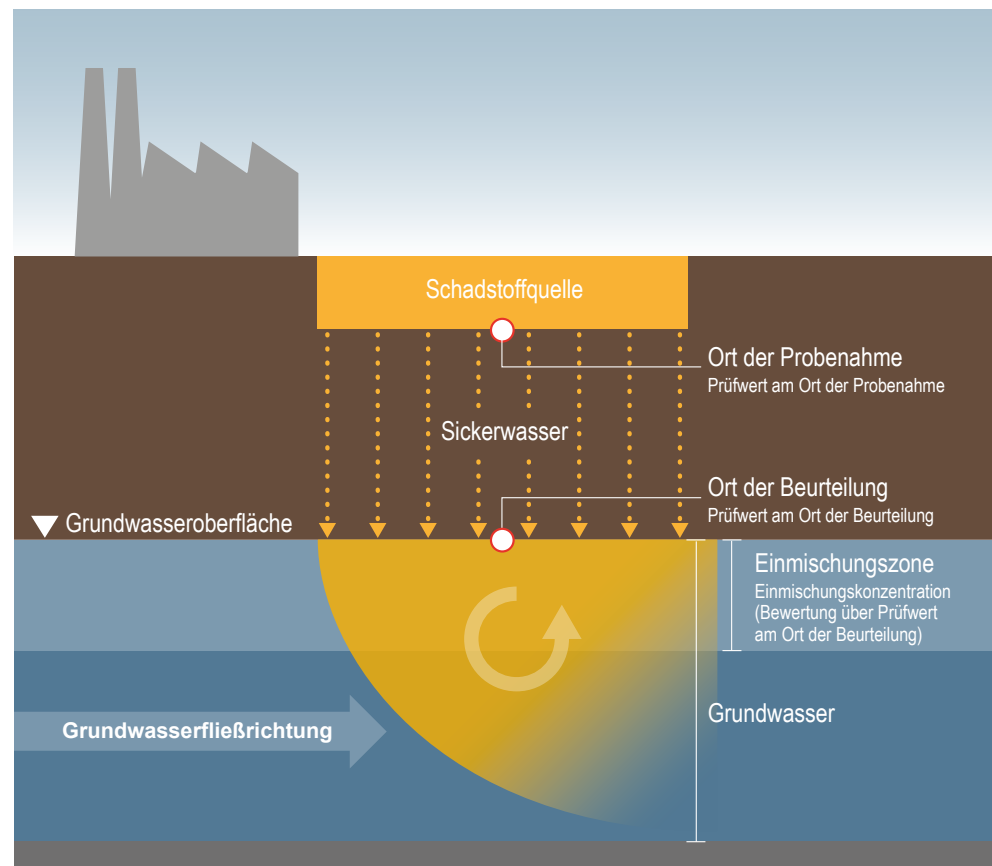


Abb. 1: Wichtige Begriffe bei der Untersuchung und Bewertung von altlastverdächtigen Flächen für den Wirkungspfad Boden→Grundwasser [2].

³ Am Ort der Probennahme und am Ort der Beurteilung gelten die Prüfwerte der BBodSchV. Auch bei der Einmischungsprognose (Kap. 2.2, 2.3.2 und 2.4.2) sind die Prüfwerte anzuwenden. Dagegen sind bei der Bewertung einer vorhandenen Schadstofffahne im Grundwasser die Geringfügigkeitsschwellen der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) [5] anzuwenden (siehe Handbuch Altlasten Band 3 Teil 7 „Arbeitshilfe zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen“.)

Material- untersuchungen

Materialuntersuchungen sind häufig die Grundlage für Sickerwasserprognosen. Hierbei wird im ersten Schritt die Schadstoffquelle⁴ beprobt. Die so gewonnenen Bodenproben oder Proben von Bodenmaterialien bzw. Auffüllungen werden im Labor untersucht. Die Auswahl der zu untersuchenden Materialproben hängt von der Aufgabenstellung ab (s. Kap. 2.3 Orientierende Untersuchung und Kap. 2.4 Detailuntersuchung).

Elutionsverfahren

Im Regelfall werden Materialproben mittels **Elutionsverfahren**⁵ untersucht, damit die Schadstoffkonzentrationen im Eluat mit den Prüfwerten der BBodSchV für den Ort der Probennahme⁶ verglichen werden können (s. Kap. 2.5). Für die Abschätzung des Freisetzungsverhaltens von anorganischen und organischen Schadstoffen sind in der BBodSchV folgende Elutionsverfahren aufgeführt:

- Säulenverfahren nach DIN 19528
- Schüttelverfahren nach DIN 19529.

Für beide Verfahren ist ein Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2:1 anzuwenden. Die beiden Verfahren sind als gleichwertig anzusehen.

Transportprognose

Um überprüfen zu können, ob am Ort der Beurteilung eine Prüfwertüberschreitung⁷ anzunehmen ist, muss im zweiten Schritt eine **Transportprognose** erfolgen, damit Abbau- und Rückhalteprozesse berücksichtigt werden können.

Untersuchungen im Grundwasser

Grundwasseruntersuchungen ermöglichen eine Aussage, ob eine schädliche Gewässeränderung bereits eingetreten ist. Hierzu ist die Grundwasserbeprobung sowohl im Anstrom als auch im nahen Abstrom der Verdachtsfläche notwendig. Durch Vergleich der Schadstoffkonzentrationen können Rückschlüsse (bei orientierenden Untersuchungen, OU) oder Rückrechnungen (bei Detailuntersuchungen, DU) durchgeführt werden mit den Zielen, (i) die Schadstoffkonzentration am Ort der Beurteilung abzuschätzen und (ii) zu ermitteln, ob eine vorliegende Prüfwertüberschreitung durch die altlastenverdächtige Fläche oder durch eine anstromige (möglicherweise bisher unbekannte) Schadstoffquelle verursacht wird ([2], dort Kapitel 5.3.2 und 6.4).

Verdachtsausschluss

Grundwasseruntersuchungen sind nicht geeignet, um zukünftige Schadstoffeinträge in das Grundwasser abschätzen zu können. Um einen Gefahrenverdacht mittels Grundwasseruntersuchungen ausschließen zu können, ist hinreichend sicher festzustellen, dass auch sonst keine Erkenntnisse vorliegen, die auf eine Überschreitung der Prüfwerte am Ort der Beurteilung (derzeit und künftig) hinweisen bzw. schließen lassen. Hierzu sind i. d. R. zusätzliche Materialuntersuchungen und/oder im Einzelfall auch In-Situ-Untersuchungen durchzuführen.

⁴ Bereiche in der ungesättigten Bodenzone, die hohe Gehalte mobiler bzw. mobilisierbarer Schadstoffe aufweisen, so dass die Schadstoffe über Sickerwasser oder Bodenluft freigesetzt werden (können).

⁵ Für flüchtige Schadstoffe stehen keine validierten und verifizierten Elutionsverfahren zur Verfügung. Zur Ermittlung des Freisetzungsverhaltens flüchtiger Schadstoffe stehen Feststoffuntersuchungen und Bodenluftuntersuchungen unter Berücksichtigung der chemisch-physikalischen Stoffeigenschaften ([2] dort Anhang 6) zur Verfügung.

⁶ Siehe Anlage 2 Tabellen 1 und 3 BBodSchV sowie der Anhang dieses Handbuchs

⁷ Siehe Anlage 2 Tabellen 2 und 3 BBodSchV sowie der Anhang dieses Handbuchs

In-Situ-Untersuchungen

In-Situ-Untersuchungen können ergänzend zu Material- und Grundwasseruntersuchungen sinnvoll sein. In der LABO-Arbeitshilfe wird auf folgende Verfahren eingegangen:

- Saugkerzen
- Grundwassersondierungen
- Grundwassermessstellen
- Sensorbasierte Untersuchungen
- Bodenluftuntersuchungen.

In-Situ-Untersuchungen finden i. d. R. in der wasserungesättigten Zone unterhalb der Schadstoffquelle statt. Mittels In-Situ-Untersuchungen wird entweder Sickerwasser gewonnen (z. B. mittels Saugkerzen) und auf Schadstoffe analysiert oder es werden die Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser mittels anderer Messungen abgeleitet (Bodenluftuntersuchungen und sensorbasierte Untersuchungen).

Einmischungsprognose

Als optionale Ergänzung zur Sickerwasserprognose kann nach § 12 Abs. 3 (OU) und § 13 Abs. 5 BBodSchV (DU) die Einmischung des Sickerwassers in das Grundwasser mittels einer **Einmischungsprognose** berücksichtigt werden. Bewertungsrelevant ist dann nicht allein die Sickerwasserkonzentration am Ort der Beurteilung, sondern auch die Einmischungskonzentration im obersten Meter des Grundwassers. Diese Vor gehenweise wurde zwischen den beiden Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaften Bodenschutz und Wasser abgestimmt. Die Einmischungsprognose wird in der LABO-Arbeitshilfe in den Kapiteln 5.4 und 6.3.3 beschrieben [2].

orientierende Untersuchung

Detailuntersuchung

In der BBodSchV wird zwischen **orientierenden Untersuchungen** (OU) und **Detailuntersuchungen** (DU) unterschieden. Die Sickerwasserprognose ermöglicht in der OU die Bewertung hinsichtlich des Ausschlusses oder des Vorliegens eines hinreichenden Verdachts einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast und wird i. d. R. verbal-argumentativ durchgeführt (s. Kap. 2.3). Bei der DU kann der Schadstoffeintrag in das Grundwasser i. d. R. rechnerisch bzw. unter Anwendung von Stofftransportmodellen wie ALTEX-1D ermittelt werden (s. Kap. 2.4).

2.3 Sickerwasserprognose bei orientierenden Untersuchungen

2.3.1 Allgemeines

Hinreichender Verdacht

Mit orientierenden Untersuchungen (OU) ist gemäß § 9 Abs. 1 BBodSchG und § 12 Abs. 1 BBodSchV zu prüfen, ob der **hinreichende Verdacht** für das Vorliegen einer Altlast besteht. Ist dies der Fall, schließt sich eine Detailuntersuchung an (s. Kap. 2.4). Die Sickerwasserprognose in der OU wird i. d. R. verbal-argumentativ durchgeführt. Der prinzipielle Ablauf der Sickerwasserprognose bei der OU ist in Abbildung 2 dargestellt.

Standortcharakterisierung, Untersuchungskonzept

Vor der Durchführung von Untersuchungen zur Sickerwasserprognose werden zuerst alle zum Standort verfügbaren Daten und Erkenntnisse zusammengestellt und ausgewertet. Auf dieser Grundlage ist eine **Standortcharakterisierung** zu erstellen und eine erste Einschätzung über den potenziellen Schadstoffaustrag aus der vermuteten Schadstoffquelle, den möglichen Schadstoffeintrag in das Grundwasser und das Schadstoffverhalten in der wasserungesättigten Zone am Standort zu treffen. Auf dieser Basis ist ein standortspezifisches, gestuftes **Untersuchungskonzept** zu erstellen.

Material- und Grundwasseruntersuchungen

Der Stoffeintrag in das Grundwasser kann in der OU auf Grundlage von

- Materialuntersuchungen inklusive Transportbetrachtung (Kap. 2.2 und 2.3.2), und / oder
- Grundwasseruntersuchungen (Kap. 2.2 und 2.3.3), evtl. ergänzt durch
- In-Situ-Untersuchungen (bei OU i. d. R. nicht sinnvoll), abgeschätzt werden.

Altstandorte

Altablagerungen

Bei **Altstandorten** bietet es sich in der OU an, die Sickerwasserprognose mit Materialuntersuchungen im Bereich der potenziellen Schadstoffeinträge (Schadstoffquelle) zu beginnen. Bei **Altablagerungen** ist die Beurteilung des Wirkungspfades Boden → Grundwasser in der OU i. d. R. nur durch einen Rückschluss aus Grundwasseruntersuchungen sinnvoll (Kap. 2.2 und 2.3.3). Materialuntersuchungen sind wegen der zu erwartenden großen Heterogenität des Ablagerungskörpers i. d. R. nicht sinnvoll.

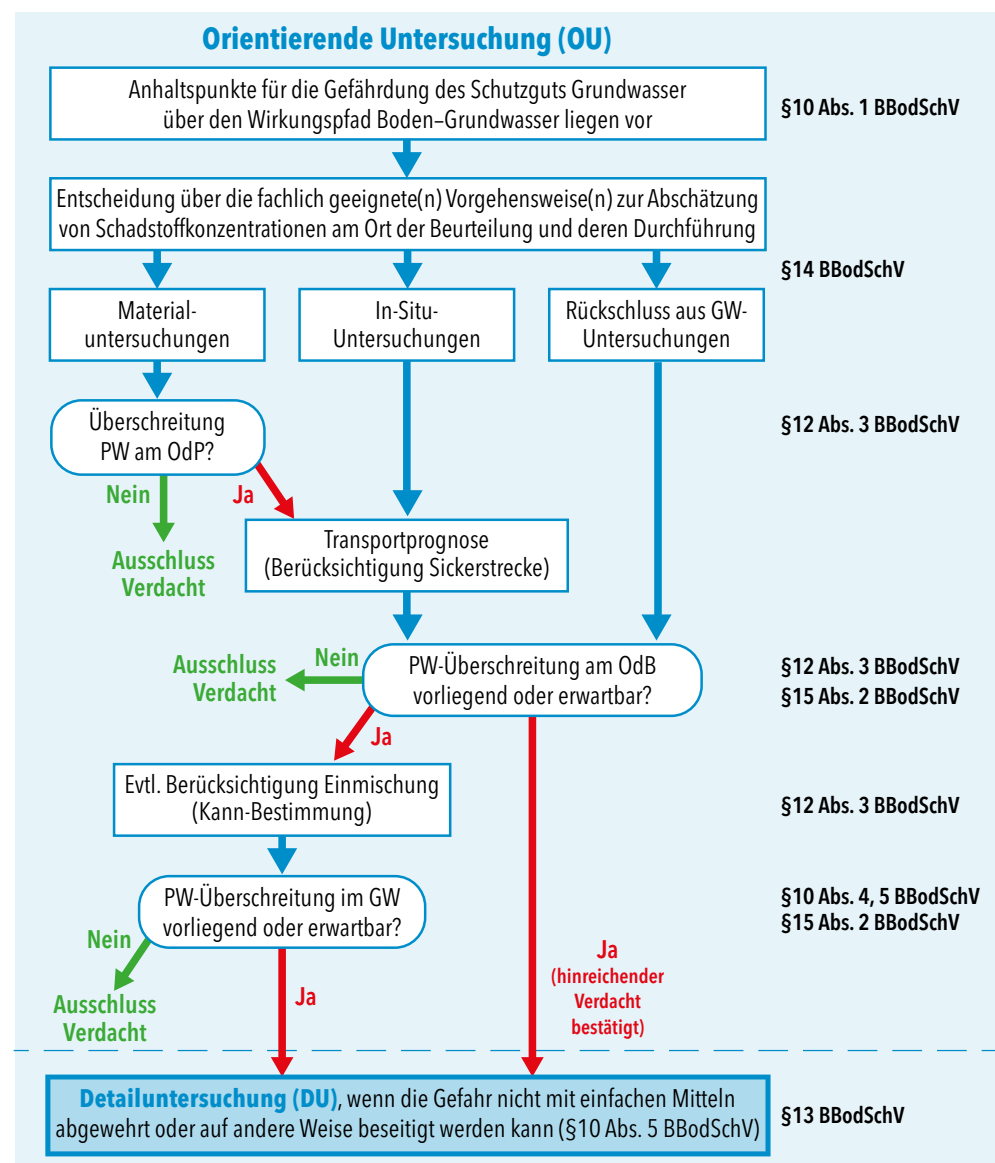


Abb. 2: Grundsätzlicher Ablauf der Sickerwasserprognose in der orientierenden Untersuchung [2], leicht verändert. OdB = Ort der Beurteilung OdP = Ort der Probenahme PW = Prüfwert GW = Grundwasser

2.3.2 Materialuntersuchungen bei orientierenden Untersuchungen

Material- untersuchungen

Bei OU werden Materialuntersuchungen am häufigsten für die Sickerwasserprognose angewendet. In-Situ-Untersuchungen sind bei OU i. d. R. (u. a. aus Kostengründen) nicht angemessen; Rückschlüsse aus Grundwasseruntersuchungen sind i. d. R. nur bei Altablagerungen sowie bei Altstandorten mit bereits vorhandenen Grundwassermessstellen anwendbar. Eine Sickerwasserprognose auf Grundlage von Materialuntersuchungen besteht aus den Teilschritten Schadstofffreisetzung und Transportprognose.

Schadstoff- freisetzung

Zur Abschätzung der **Schadstofffreisetzung** werden Boden-/Materialproben aus den vermutlich am höchsten belasteten Bodenbereichen (vermutete Schadstoffquelle) entnommen und mittels **2:1-Elutionsverfahren**⁹ (DIN 19528 oder 19529) untersucht. Unterschreiten die Schadstoffkonzentrationen im Eluat die Prüfwerte der BBodSchV für den **Ort der Probennahme**, liegen für diese Schadstoffe i. d. R. keine Anhaltspunkte für eine Grundwassergefährdung vor. Der ursprüngliche Verdacht hat sich dann also nicht bestätigt, die Weiterführung der Sickerwasserprognose mittels Transportprognose ist in diesem Fall nicht notwendig.

Entkräftung des Ver- dachts einer Grund- wassergefährdung

Anwendung von Feststoff- untersuchungen

Feststoffuntersuchungen zur Ermittlung der Schadstoff-Gesamtgehalte sind insbesondere bei leichtflüchtigen Schadstoffen durchzuführen. Auch bei anderen Schadstoffen sind Feststoffuntersuchungen im Regelfall sinnvoll. Sie können im Vorfeld von Eluatuntersuchungen zur Priorisierung eingesetzt werden. Beispielsweise könnten diejenigen Materialproben mit den höchsten Gesamtgehalten mittels Eluatuntersuchungen analysiert werden. Feststoffuntersuchungen sind auch dann durchzuführen, wenn die in Kapitel 3.4 dieses Handbuchs beschriebene Bewertungsmatrix angewendet und das Verhältnis „eluierbarer Anteil“ zum „Gesamtgehalt“ ermittelt werden soll (s. Kap. 3.2).

Transportprognose

Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone

Falls die Prüfwerte für den Ort der Probennahme überschritten werden, ist eine Sickerwasserprognose inklusive **Transportprognose** durchzuführen. Hierbei wird eine mögliche Schadstoffminderung durch Rückhalte- und Abbauprozesse abgeschätzt. Bei der OU wird die Transportprognose über die **Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone** (Bodenbereich zwischen Unterkante der Schadstoffquelle und Ort der Beurteilung) beschrieben. Kriterien sind:

- Mächtigkeit der unbelasteten Grundwasserüberdeckung
- Versiegelung/Sickerwasserrate
- Durchlässigkeit/Sorptionsvermögen des Bodens
- Biologische Abbaubarkeit der Schadstoffe.

In Kapitel 3 dieses Handbuchs werden hierzu **Szenarien** mittels einer Bewertungsmatrix vorgestellt.

verbal-argumentative Sickerwasser- prognose

Im Rahmen der OU kann die Prognose der Stoffkonzentrationen am Ort der Beurteilung mittels Elutionsverfahren und Transportbetrachtung i. d. R. nur verbal-argumentativ durchgeführt werden. Die **verbal-argumentative** Abschätzung beruht auf qualitativen oder halbquantitativen Betrachtungen zur Wahrscheinlichkeit eines Überschreitens von Prüfwerten am Ort der Beurteilung. Sie erfolgt unter Einbeziehung der ermittelten Untersuchungsergebnisse sowie aller verfügbaren Kenntnisse über die

⁹ Bei leichtflüchtigen Schadstoffen sind Elutionsuntersuchungen nicht anwendbar. Daher sind zur Abschätzung der Schadstoffkonzentration im Sickerwasser insbesondere die Schadstoff-Gesamtgehalte und die physikalisch-chemischen Stoffeigenschaften heranzuziehen.

vorliegenden örtlichen Sachverhalte (Konzeptionelles Modell) nach dem jeweils aktuellen Stand des Wissens. Für die verbal-argumentative Sickerwasserprognose werden in Kapitel 3 des vorliegenden Handbuchs Bewertungsansätze beschrieben, die nicht in der LABO-Arbeitshilfe enthalten sind, sich im hessischen Vollzug jedoch bewährt haben.

hinreichender Verdacht

Ist eine **Überschreitung der Prüfwerte** für den Ort der Beurteilung derzeit oder zukünftig wahrscheinlich, hat sich der Anfangsverdacht bestätigt, so dass nun der **hinreichende Verdacht** auf eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast vorliegt. I. d. R. wird die Behörde dann eine DU als erforderlich ansehen.

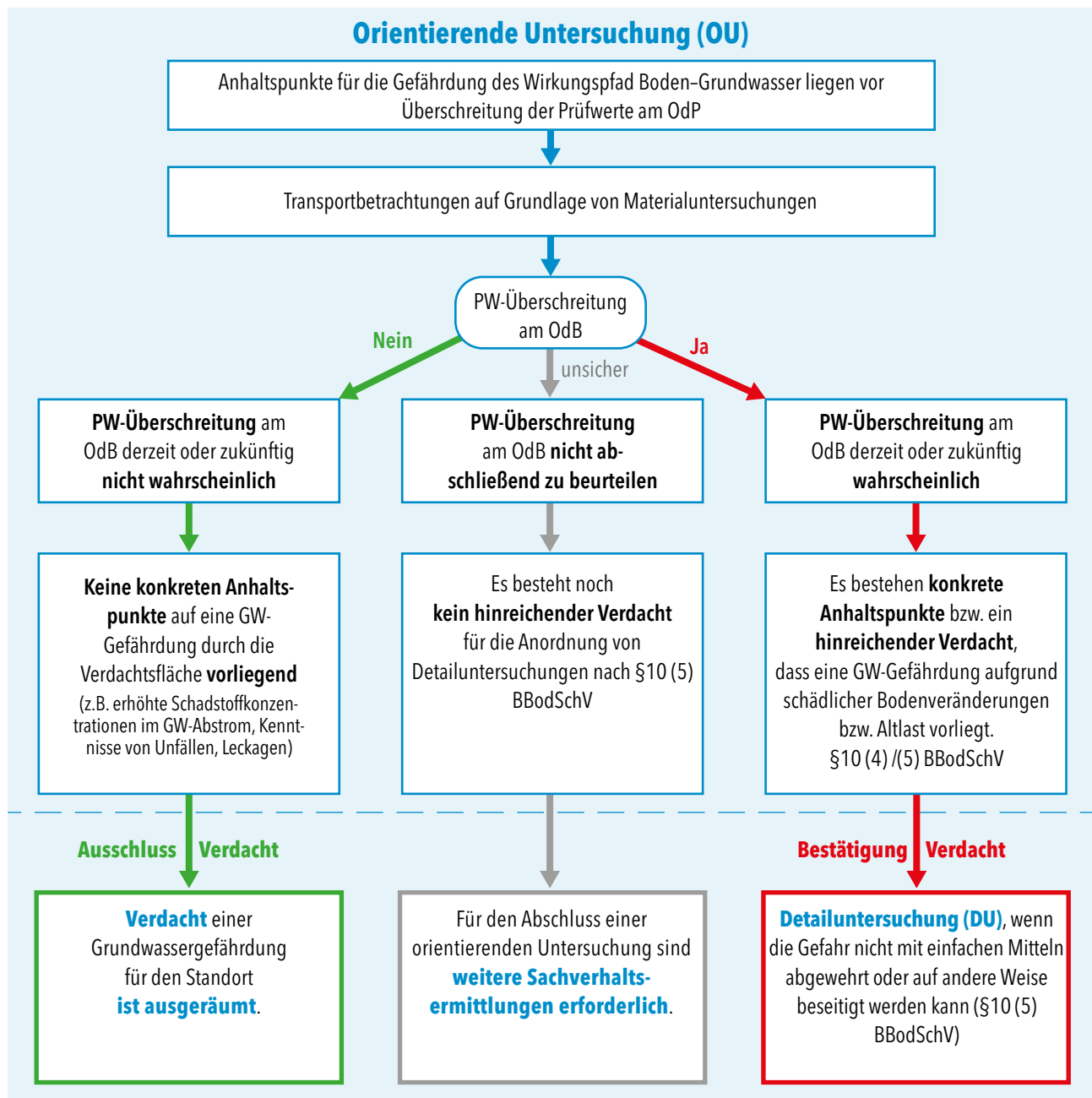


Abb. 3: Ergebnisbeurteilung und Handlungsbedarf nach Transportbetrachtungen auf Grundlage von Materialuntersuchungen [2], leicht verändert. OdB = Ort der Beurteilung OdP = Ort der Probenahme PW = Prüfwert GW = Grundwasser

Prognosemodell ALTEX-1D

Prinzipiell ist auch bei der OU die Anwendung des analytischen **Prognosemodells ALTEX-1D** [3] möglich (siehe Hinweise in Kap. 2.4.2 zu Transportmodellen). Die Entscheidung, ob eine verbal-argumentative Sickerwasserprognose oder eine Sickerwasserprognose mittels ALTEX-1D vorzuziehen ist, muss im Einzelfall getroffen werden. Bei Anwendung von ALTEX-1D werden konkrete Schadstoffkonzentrationen am Ort der Beurteilung ermittelt, so dass analog zu einer DU ein Abgleich mit den Prüfwerten der BBodSchV für den Ort der Beurteilung direkt möglich ist. Da bei einer OU die Datenlage i. d. R. große Unsicherheiten aufweist, ist das mittels ALTEX-1D erhaltene Berechnungsergebnis unter diesem Gesichtspunkt zu diskutieren.

Einmischungs- prognose bei der OU

Im Falle einer prognostizierten Prüfwertüberschreitung am Ort der Beurteilung kann nach § 12 Abs. 3 Satz 2 BBodSchV die Einmischung des Sickerwassers in das Grundwasser berücksichtigt werden. Wird eine solche **Einmischungsprognose** durchgeführt, gilt der Verdacht auf das Vorliegen einer Altlast bzw. schädlichen Bodenveränderung als ausgeräumt, wenn die errechneten Einmischungskonzentrationen aller bewertungsrelevanten Schadstoffe die Prüfwerte für den Ort der Beurteilung nach Anlage 2 BBodSchV, Tabellen 2 und 3 (siehe auch Anhang dieses Handbuchs), einhalten. Für eine Einmischungsprognose ist bei OU die Datenlage oftmals nicht ausreichend, um die Einmischungskonzentration berechnen zu können. Dies gilt insbesondere für die Fälle, bei denen die Sickerwasserprognose verbal-argumentativ durchgeführt wird. Ist die Datenlage ausreichend, um ALTEX-1D anzuwenden (siehe oben), ist im Einzelfall zu prüfen, ob eine Einmischungsprognose sinnvoll ist.

2.3.3 Grundwasseruntersuchungen bei orientierenden Untersuchungen

geeignete Grund- wassermessstellen

Bei OU ist der Neubau von Grundwassermessstellen häufig unverhältnismäßig. Sickerwasserprognosen auf Grundlage von Grundwasseruntersuchungen kommen daher i. d. R. nur bei Altablagerungen oder bei Altstandorten mit bereits vorhandenen geeigneten Grundwassermessstellen in Frage.

Rückschlüsse aus Grundwasser- untersuchungen

Da im Rahmen der OU der Kenntnisstand für eine Rückrechnung in den meisten Fällen hierzu nicht ausreicht, wird die Sickerwasserprognose i. d. R. auf der Grundlage von **Rückschlüssen aus Grundwasseruntersuchungen** durchgeführt. Ein Rückschluss soll auf Untersuchungen im vermuteten Schadstoffeintragsbereich bzw. im Grundwasserabstrom¹⁰ basieren, weiterhin sind die Stoffkonzentration im Grundwasseranstrom, die Verdünnung und das Schadstoffverhalten in der wassergesättigten Zone zu berücksichtigen (Abb. 4). In der LABO-Arbeitshilfe werden vier mögliche Fallgestaltungen beschrieben (dort in Kapitel 5.3.2):

- Abbildung 4 links: Sowohl im Anstrom als auch im Abstrom liegen niedrige Schadstoffkonzentrationen unterhalb der Prüfwerte der BBodSchV für den Ort der Beurteilung vor. Der Verdacht, dass bereits eine schädliche Gewässeränderung eingetreten sein könnte, ist entkräftet.
- Abbildung 4 Mitte links: Liegt die Stoffkonzentration im Abstrom unterhalb des Prüfwertes, aber deutlich oberhalb der Anstromkonzentration, muss im Einzelfall

¹⁰ Die „abstromige“ Grundwassermessstelle soll sich entweder im Bereich der Schadensquelle oder abstromig nahe der Schadstoffquelle befinden. Im Grundwasser stattfindende Abbau-, Rückhalte- und Verdünnungsprozesse werden bei der OU i. d. R. nicht betrachtet.

abgeschätzt werden, ob der Prüfwert am Ort der Beurteilung gegenwärtig oder erwartbar überschritten wird. I. d. R. sind weitere Sachverhaltsermittlungen notwendig.

- Abbildung 4 Mitte rechts: Wenn eine Überschreitung des Prüfwertes im Grundwasserabstrom festgestellt wird, die Höhe der Schadstoffkonzentration jedoch der Stoffkonzentration im Anstrom entspricht, besteht weiterer Aufklärungsbedarf. Dieser kann sich auf das Umfeld mit Prüfung auf weitere Verdachtsflächen beziehen (soweit solche vorliegen) oder auf die Plausibilität des konzeptionellen Standortmodells bzw. der Kontaminationshypothese.
- Abbildung 4 rechts: Wird eine Überschreitung des Prüfwertes im Grundwasserabstrom festgestellt und weist der Grundwasseranstrom geringere Konzentrationen auf, so ist eine Überschreitung des Prüfwertes am Ort der Beurteilung wahrscheinlich. Sind die Schadstoffeinträge auf die Verdachtsfläche zurückzuführen, liegt der hinreichende Verdacht einer Altlast vor.

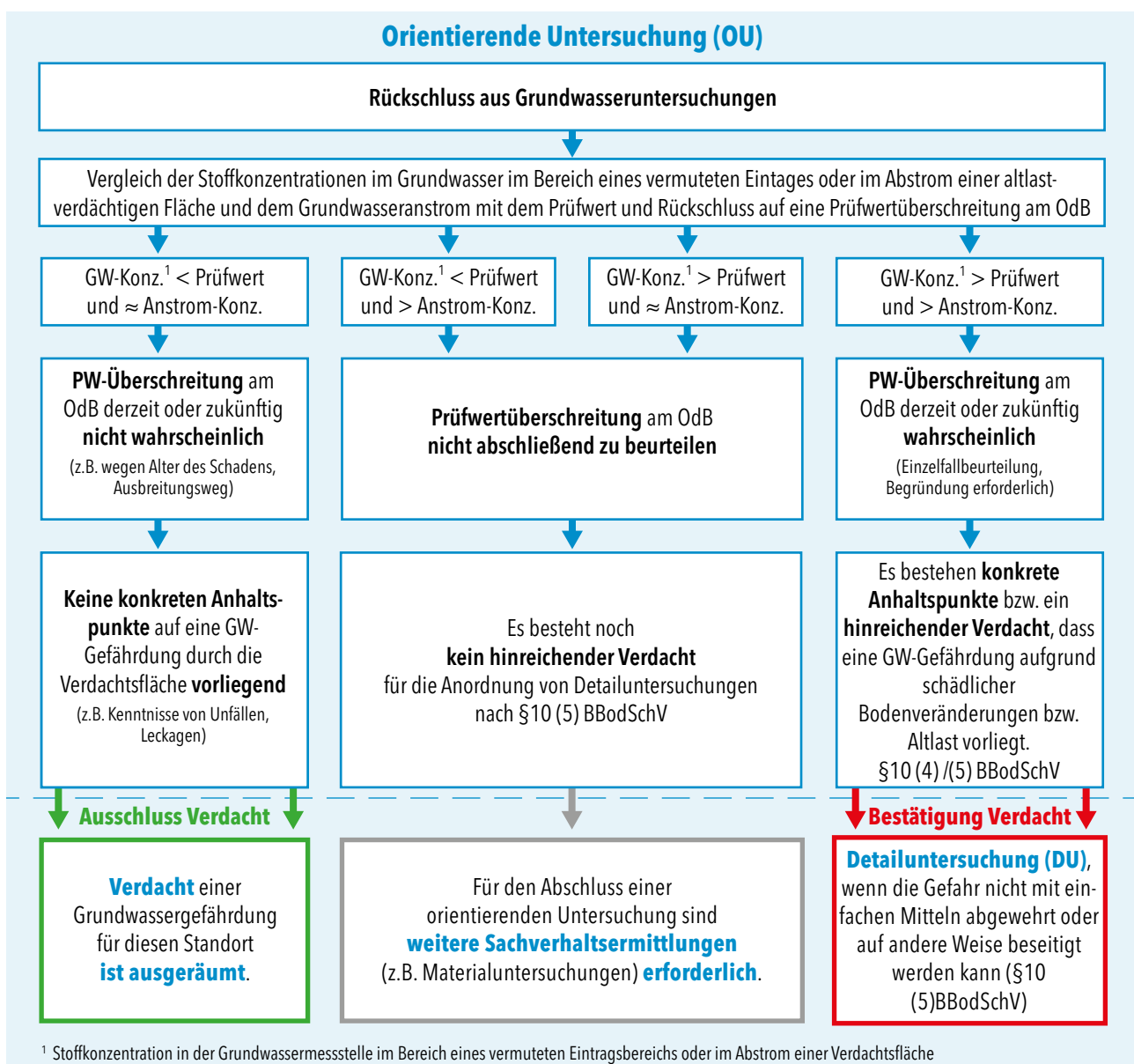


Abb. 4: Ergebnisbeurteilung und Handlungsbedarf bei der OU nach Rückschlüssen aus Grundwasseruntersuchungen [2], leicht verändert.
 OdB = Ort der Beurteilung OdP = Ort der Probenahme PW = Prüfwert GW = Grundwasser

Verdachtsausschluss Mit Grundwasseruntersuchungen kann geprüft werden, ob ein Schadstoffeintrag in das Grundwasser bereits stattgefunden hat. Um den Verdacht einer zukünftigen Grundwassergefährdung durch Schadstoffe, die noch auf dem Weg ins Grundwasser sind, ausschließen zu können, ist eine verbal-argumentative Begründung und/oder es sind zusätzliche Materialuntersuchungen notwendig.

2.4 Sickerwasserprognose bei Detailuntersuchungen

2.4.1 Allgemeines

Ziel der Detailuntersuchung Besteht auf der Grundlage der Orientierenden Untersuchungen (OU) der hinreichende Verdacht einer Grundwassergefährdung (Kap. 2.3), ist vom Pflichtigen i. d. R. eine Detailuntersuchung (DU) durchzuführen. Ziel einer DU ist gemäß § 9 Abs. 2 BBodSchG und § 13 Abs. 1 BBodSchV die **abschließende Gefährdungsabschätzung** für eine altlastverdächtige Fläche.

Schadstoffverteilung und -verhalten Wesentlicher Bestandteil einer Sickerwasserprognose bei einer DU ist eine detaillierte Standortbeschreibung in Bezug auf die **Schadstoffverteilung** (räumliche Abgrenzung der Belastungsschwerpunkte), das **Stoffverhalten** (hier vor allem auf die Abbau- und Rückhaltewirkung in der ungesättigten Bodenzone) und das für den Standort abzuleitende **Transportverhalten** in der wasserungesättigten Zone.

3 Möglichkeiten der Sickerwasserprognose Der Stoffeintrag in das Grundwasser kann in der DU auf Grundlage von

- Materialuntersuchungen inklusive Transportbetrachtung (Kap. 2.2 und 2.4.2), und / oder
- Grundwasseruntersuchungen (Kap. 2.2 und 2.4.3) und ggf. ergänzend durch
- In-Situ-Untersuchungen (Kap. 2.2 und 2.4.4)

abgeschätzt werden. **Verfahrenskombinationen** können sinnvoll sein.

Stofftransportmodelle Die Sickerwasserprognose in der DU erfolgt i. d. R. mittels **Stofftransportmodellen** und/oder Berechnungen. Neben der Frage, ob **Schadstoffkonzentrationen** im Sickerwasser die Prüfwerte der BBodSchV überschreiten, sind zusätzlich die **Schadstofffrachten** zu berücksichtigen. Ergibt die Sickerwasserprognose Überschreitungen der Prüfwerte am Ort der Beurteilung (derzeit oder zukünftig) und sind die Schadstofffrachten mehr als gering¹¹, ist die Gefahr für den Wirkungspfad Boden→Grundwasser bestätigt (Abb. 3). Für eine abschließende Gefährdungsabschätzung sind ggf. weitere Untersuchungen zur Abgrenzung des Schadens erforderlich, um eine Entscheidung über weitere Maßnahmen treffen zu können.

Bestätigung des hinreichenden Verdachts Bestätigt sich in der abschließenden Gefährdungsabschätzung der Verdacht einer Grundwassergefährdung oder ist eine schädliche Grundwasserverunreinigung bereits eingetreten, handelt es sich bei der betrachteten Fläche um eine Altlast bzw. eine schädliche Bodenveränderung. Vom Pflichtigen sind dann i. d. R. Sanierungsuntersuchungen durchzuführen. Der prinzipielle Ablauf der Sickerwasserprognose in der DU ist in Abbildung 5 dargestellt.

¹¹ Zur Prüfung, ob Schadstofffrachten nur „gering“ sind, können die im Handbuch Altlasten Band 3 Teil 7 „Arbeitshilfe zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen“ genannten Grundwasser-Frachtwerte herangezogen werden [11].

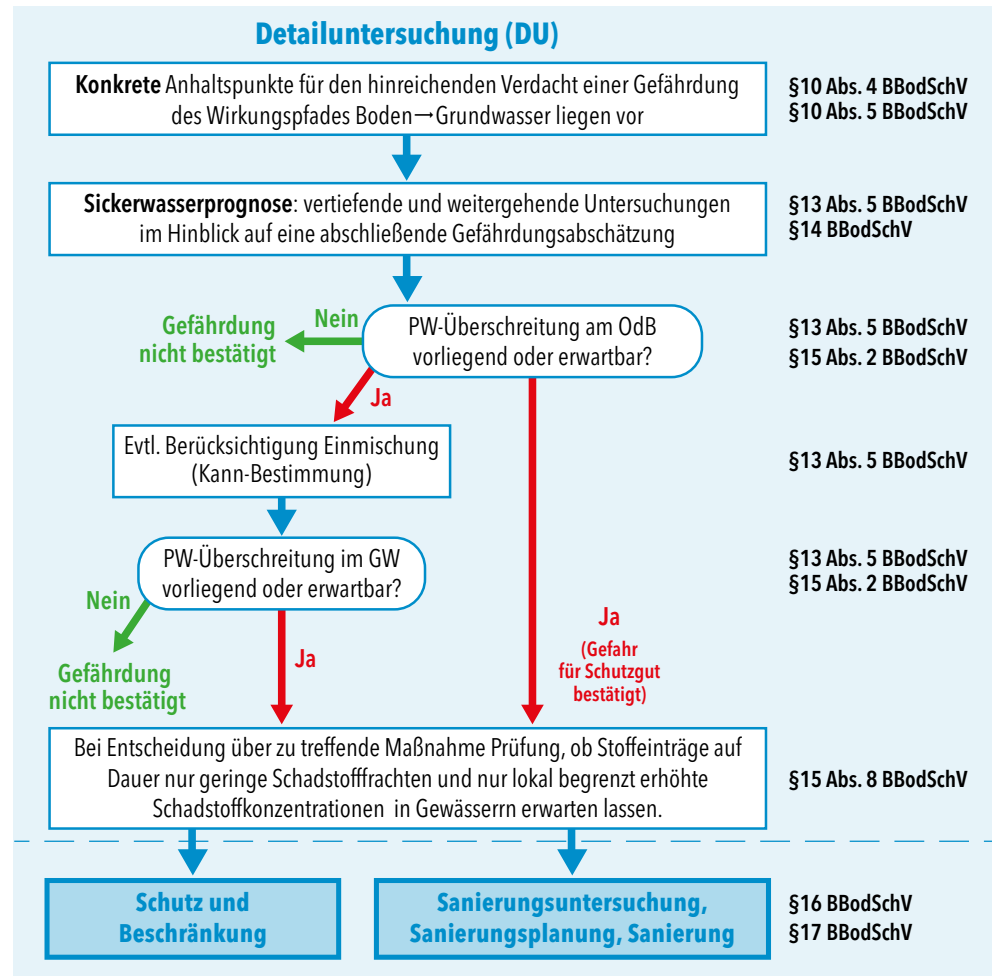


Abb. 5: Grundsätzlicher Ablauf der Sickerwasserprognose auf der Bearbeitungsstufe einer Detailuntersuchung [2], leicht verändert
 OdB = Ort der Beurteilung OdP = Ort der Probenahme PW = Prüfwert GW = Grundwasser

2.4.2 Materialuntersuchungen bei Detailuntersuchungen

Teilschritte der Sickerwasserprognose

Die Sickerwasserprognose mittels Materialuntersuchung besteht aus den Teilschritten **Schadstofffreisetzung** (aktuell und zukünftig) und **Transportprognose**. Neben Schadstoffkonzentrationen sind Schadstofffrachten relevant. Optional kann im Anschluss an die Sickerwasserprognose eine Einmischungsprognose nach § 13 Abs. 5 Satz 2 durchgeführt werden. In der LABO-Arbeitshilfe geben das dortige Kapitel 6 und die dazugehörigen Anhänge nähere Hilfestellungen.

aktuelle Schadstofffreisetzung

Bei der Ermittlung der **Schadstofffreisetzung** sind zwei Aspekte zu beschreiben. Erstens ist die **aktuelle Schadstoffkonzentration** im Sickerwasser der Schadstoffquelle zu bestimmen. Hierzu werden i. d. R. 2:1-Elutionsverfahren¹² angewendet (DIN 19528 oder DIN 19529). Aus diesen Untersuchungen und der Berücksichtigung der durchschnittlichen Schadstoffkonzentration (Quellkonzentration) und der Sickerwasserrate erhält man die Quellstärke des kontaminierten Materials, d. h. die von der

¹² Bei leichtflüchtigen Schadstoffen sind Elutionsuntersuchungen nicht anwendbar. Daher sind zur Abschätzung der Schadstoffkonzentration im Sickerwasser insbesondere die Schadstoff-Gesamtgehalte und die physikalisch-chemischen Stoffeigenschaften heranzuziehen.

jeweiligen Schadstoffquelle pro Zeit- und Flächeneinheit ausgehende Schadstoffmasse. Durch Multiplikation der Quellstärke mit der Flächengröße der Schadstoffquelle errechnet sich die aus der Quelle austretende **Schadstofffracht** ([2] dort Kap. 6.3.1 und Anhang 8).

zukünftige Schadstofffreisetzung

Der zweite Aspekt der Schadstofffreisetzung betrifft die **zukünftige Entwicklung der Schadstoffkonzentrationen** und -frachten im Sickerwasser. Zur deren Abschätzung sind die mobilisierbare Schadstoffmasse und das Zeitverhalten der Mobilisierung von Relevanz.

mobilisierbare Schadstoffmasse

Für die **mobilisierbare Schadstoffmasse** ist zunächst die Gesamtmasse der Schadstoffe mittels Feststoffuntersuchungen zu bestimmen. Im nächsten Schritt ist zu entscheiden, welcher Anteil der Schadstoffe tatsächlich mobilisierbar ist. Bei organischen Stoffen kann die mobilisierbare Schadstoffmasse im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung mit 100 % der Schadstoff-Gesamtmasse angesetzt werden. Bei Schwer- und Halbmetallen kann die mobilisierbare Schadstoffmasse mit Hilfe von weniger starken¹³ Extraktionsmitteln (z. B. Sequenzielle Extraktion [4]) abgeschätzt werden. In Kapitel 3.2 dieses Handbuchs werden weitere Hinweise zur Ermittlung der mobilisierbaren Schadstoffmasse gegeben.

konstante oder abnehmende Quell- konzentration

Weiterhin ist der **zeitliche Verlauf der Freisetzung** zu unterscheiden ([2] dort Kap. 6.3.1 und Anhang 8). Unterschieden wird zwischen einer

- quasi-konstanten Quellkonzentration und
- exponentiell abnehmenden Quellkonzentration.

Da das Freisetzungsverhalten in der Natur sehr komplex ist und die Prozesse sich gegenseitig überlagern, kann nur abgeschätzt werden, welche Art der Freisetzung dominiert. Liegen dazu keine Erkenntnisse vor, empfiehlt es sich, sowohl die quasi-konstante als auch die exponentiell abnehmende Quellkonzentration zu betrachten.

Transportprognose

Im nächsten Schritt ist eine **Transportprognose** durchzuführen. Hierbei wird abgeschätzt, wie sich die aus der Schadstoffquelle austretenden Stoffkonzentrationen und -frachten auf dem Transportweg durch die wasserungesättigte Zone zum Ort der Beurteilung verändern. Im Allgemeinen führen Rückhalte- und Abbauprozesse zu einer Minderung/Verzögerung der Schadstoffkonzentration bzw. -fracht im Sickerwasser. Die relevanten Prozesse der Transportprognose und deren Quantifizierung werden in der LABO-Arbeitshilfe im Anhang 3 beschrieben.

Transportmodell ALTEX-1D

Im Hinblick auf die Zielsetzung und unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit von Untersuchungs- und Erkundungsmaßnahmen steht dabei nicht die hoch aufgelöste räumliche und zeitliche Beschreibung der Transportprozesse im Vordergrund, sondern eine integrative summarische Betrachtung. Verschiedene Schadstofftransportmodelle können hier herangezogen werden. Für die Bodenschutzbehörden wurde u. a. für eine Plausibilisierung von der LABO das eindimensionale **analytische Transportmodell ALTEX-1D** entwickelt [3].

¹³ Im Vergleich zum Königswasserextrakt

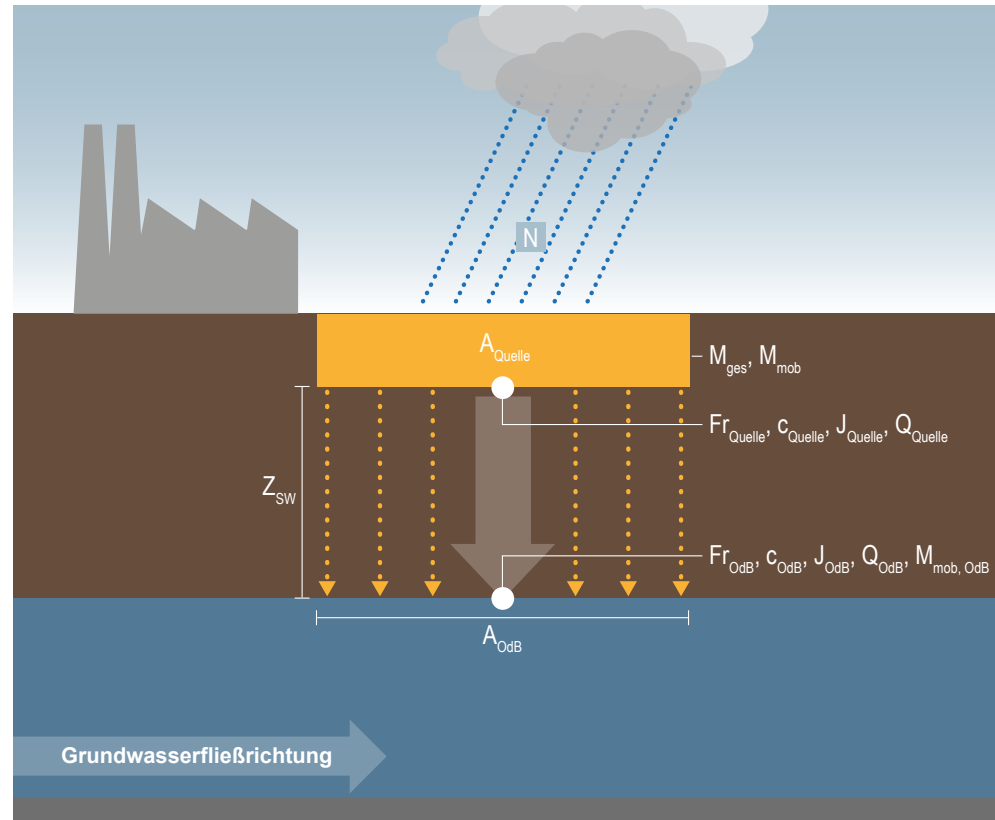


Abb. 6: Schematische Darstellung der Transportprognose.

N = Niederschlag, A_{Quelle} = Austrittsfläche aus der Quelle (Emissionsfläche), A_{OdB} = Eintrittsfläche in das Grundwasser (Immissionsfläche), M_{ges} = Gesamtmasse der Schadstoffquelle, M_{mob} = mobilisierbare Schadstoffmasse, Fr_{Quelle} = aus der Quelle austretende Schadstofffracht, c_{Quelle} = aus der Quelle austretende Sickerwasserkonzentration, J_{Quelle} = Massenstromdichte der Quelle (= Quellstärke), Q_{Quelle} = aus der Quelle austretender Sickerwasserstrom, Z_{SW} = Länge der Sickerstrecke, Fr_{OdB} = in das Grundwasser eintretende Schadstofffracht, c_{OdB} = in das Grundwasser eintretende Sickerwasserkonzentration, J_{OdB} = in das Grundwasser eintretende Massenstromdichte (= Emissionsstärke), Q_{OdB} = in das Grundwasser eintretender Sickerwasserstrom, $M_{\text{mob,OdB}}$ = Gesamtschadstoffmasse am Ort der Beurteilung.
Quelle Abbildung: [2]

Vorgehensweise bei Prüfwert- überschreitung

Der Abgleich mit den ermittelten oder zu erwartenden Konzentrationen ist mit den in Anlage 2 BBodSchV aufgeführten Prüfwerten vorzunehmen. Mögliche Ergebnisse des Prüfwertabgleichs am Ort der Beurteilung sind:

- Die maximale Schadstoffkonzentration (vorliegend oder erwartbar) liegt unterhalb des Prüfwertes: Auf eine weitere Frachtbetrachtung kann verzichtet werden. Der Gefahrenverdacht ist ausgeräumt.
- Die maximale Schadstoffkonzentration (vorliegend oder erwartbar) überschreitet den Prüfwert: Der Gefahrenverdacht ist bestätigt. Die Schadstofffrachten sind abzuschätzen. Im Rahmen der weiteren Detailuntersuchung (nicht im Rahmen der Sickerwasserprognose) ist die Auswirkung des Schadstoffeintrages im Hinblick auf den räumlichen und zeitlichen Umfang einer möglichen Grundwasserverunreinigung zu prüfen.

Weitere Hinweise sind in der LABO-Arbeitshilfe in Kapitel 6.3.2 enthalten.

Einmischungs- prognose

Liegt eine Überschreitung der Prüfwerte am Ort der Beurteilung vor, kann ergänzend eine Einmischungsprognose durchgeführt werden. Bewertungsrelevant ist dann nicht allein die Sickerwasserkonzentration am Ort der Beurteilung, sondern auch die errechnete Einmischungskonzentration im obersten Meter des Grundwassers. Als zusätzliches Instrument für die Gefährdungsabschätzung eröffnet somit die Einmischungsprognose, bei Einhaltung des Prüfwertes in der Einmischungszone, eine Option zur Ausräumung des Gefahrenverdachts und damit zur Beendigung weiterer Untersuchungen.

2.4.3 Grundwasseruntersuchungen bei Detailuntersuchungen

Rückrechnung auf den Ort der Beurteilung

Gemäß § 14 Abs. 1 Nr. 2 BBodSchV kann die Sickerwasserprognose auch durch **Rückrechnungen** aus Untersuchungen im **Grundwasserabstrom** unter Berücksichtigung der Stoffkonzentration im Grundwasseranstrom, der Verdünnung, des Schadstoffverhaltens in der wasserungesättigten und der wassergesättigten Zone sowie des Schadstoffinventars vorgenommen werden. Für die Rückrechnung (Berechnung der Stoffkonzentration im Sickerwasser am Ort der Beurteilung) sind die Volumenströme des Grund- und Sickerwassers als Eingangsgrößen notwendig, weiterhin die Stoffkonzentration im An- und Abstrom. Näheres kann der LABO-Arbeitshilfe in Kapitel 6.4 und Anhang 4 entnommen werden.

Altablagerungen

Bei **Altablagerungen** (z. B. sog. Bürgermeisterkippen und Auffüllungen) ist die Beurteilung des Wirkungspfades Boden→Grundwasser in der DU i. d. R. nur durch Rückrechnung aus Grundwasseruntersuchungen sinnvoll. Materialuntersuchungen sind wegen der Heterogenität des Ablagerungsmaterials i. d. R. nicht geeignet (außer bei nachgewiesenen Monodeponien). Dies gilt auch für Altstandorte mit inhomogener Schadstoffverteilung.

Altstandorte

Bei **Altstandorten** kann die Rückrechnung auch zur Plausibilitätsprüfung der im Rahmen der Materialuntersuchung/Transportbetrachtung abgeschätzten Konzentrationen und Frachten herangezogen werden. Dies ist allerdings nur für den gegenwärtigen Zustand des Grundwassers möglich.

Eignung der Grund- wassermessstellen

Soll eine Rückrechnung auf die Sickerwasserkonzentration am Ort der Beurteilung durchgeführt werden, ist zunächst zu prüfen, ob die gewählten **Grundwassermessstellen** und Probennahmen **repräsentativ** den direkten Abstrom der zu beurteilenden kontaminierten Fläche erfassen. Für die Sicherstellung der Eignung und Repräsentativität sind Anzahl, Lage und Ausbau vorhandener Messstellen zu überprüfen und bei der Neuerrichtung von Messstellen zu beachten. Durch die Positionierung der Grundwassermessstellen sollte eine eindeutige Zuordnung zur potenziellen Kontaminationsverdachtsfläche/Altablagerung möglich sein.

Bei voll verfilterten Messstellen in sehr mächtigen Grundwasserleitern oder bei sehr großen Flächen kann die Verdünnung so groß werden, dass im Abstrom nur sehr kleine Konzentrationen oder keine signifikanten Unterschiede zum Grundwasseranstrom gemessen werden. Eine Rückrechnung auf den Ort der Beurteilung ist in diesen Fällen nicht möglich.

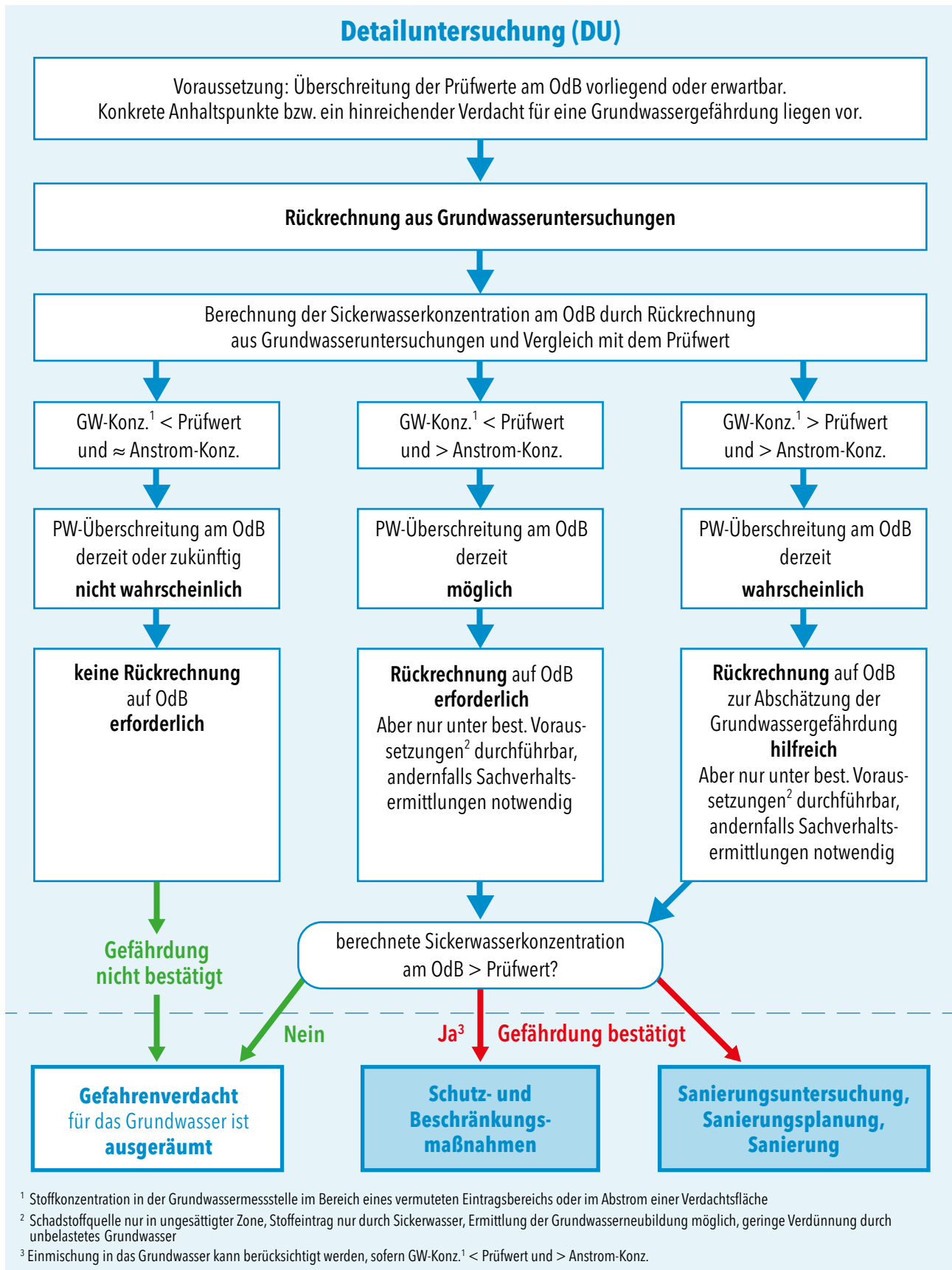


Abb. 7: Fallgestaltungen in Bezug auf das Konzentrationsniveau bei der Rückrechnung bei DU [2], leicht verändert.
 GW = Grundwasser OdB = Ort der Beurteilung OdP = Ort der Probenahme PW = Prüfwert

Beurteilung der Grundwasser-Untersuchungen

In der LABO-Arbeitshilfe werden drei Fallgestaltungen beschrieben (dort in Kap. 6.4.1), die in Abbildung 7 dargestellt sind. Unter der Voraussetzung, dass die Schadstoffkonzentrationen im An- und Abstrom bekannt sind, wird dort erläutert, in welchen Fällen Rückrechnungen sinnvoll sind:

- Abbildung 7 links: Im Abstrom liegen niedrige Schadstoffkonzentrationen unterhalb der Prüfwerte der BBodSchV für den Ort der Beurteilung vor, zudem sind die Stoffkonzentrationen im An- und Abstrom ähnlich. Eine Rückrechnung auf den Ort der Beurteilung ist verzichtbar. Der Gefahrenverdacht für das Grundwasser ist ausgeräumt.
- Abbildung 7 Mitte: Werden im Abstrom die Prüfwerte unterschritten, sind jedoch deutlich höher als im Anstrom, ist eine Rückrechnung auf den Ort der Beurteilung erforderlich, um die Stoffkonzentration am Ort der Beurteilung ermitteln zu können, und um so einen Abgleich mit den Prüfwerten der BBodSchV zu ermöglichen.
- Abbildung 7 rechts: Werden im Abstrom die Prüfwerte überschritten, ist eine Prüfwertüberschreitung am Ort der Beurteilung anzunehmen. Eine Rückrechnung auf den Ort der Beurteilung kann sinnvoll sein, um die Höhe der Prüfwertüberschreitung zu ermitteln und um Schadstofffrachten zu berechnen.

Ausschluss des Gefahrenverdachts

Wie in Kapitel 2.2 erläutert, sind Grundwasseruntersuchungen allein nicht geeignet, um zukünftige Schadstoffeinträge in das Grundwasser abschätzen zu können. Um einen Gefahrenverdacht mittels Grundwasseruntersuchungen ausschließen zu können, ist hinreichend sicher festzustellen, dass auch sonst keine Erkenntnisse vorliegen, die auf eine Überschreitung der Prüfwerte am Ort der Beurteilung (derzeit und künftig) hinweisen bzw. schließen lassen. Hierzu sind i. d. R. zusätzliche Materialuntersuchungen und/oder im Einzelfall auch In-Situ-Untersuchungen durchzuführen.

2.4.4 In-Situ-Untersuchungen bei Detailuntersuchungen

In-Situ-Untersuchungen als ergänzende Maßnahme

Bei DU können In-Situ-Untersuchungen als Ergänzung zu Materialuntersuchungen sinnvoll sein, um Stoffkonzentrationen und -frachten am Ort der Beurteilung (OdB) abschätzen zu können. Die BBodSchV nennt In-Situ-Untersuchungen in § 14 Abs. 1 Nr. 3, definiert diese jedoch nicht näher. In dieser Arbeitshilfe werden folgende Verfahren unter In-Situ-Untersuchungen verstanden:

- Saugkerzen
- Sensorbasierte Untersuchungen
- Bodenluftuntersuchungen
- Grundwassersondierungen (Ausbau im oberen Bereich des Grundwassers, also nahe dem OdB)
- Grundwassermessstellen (Ausbau im oberen Bereich des Grundwassers).

Untersuchung des Sickerwassers

In-Situ-Untersuchungen finden i. d. R. in der wasserungesättigten Zone unterhalb der Schadstoffquelle statt. Mittels In-Situ-Untersuchungen wird entweder Sickerwasser gewonnen (z. B. mittels Saugkerzen) und auf Schadstoffe analysiert oder es werden die Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser mittels anderer Messungen abgeleitet (sensorbasierte Untersuchungen, Bodenluftuntersuchungen). In-Situ-Untersuchungen können die Lücke zwischen Materialuntersuchungen im Bereich der Schadstoffquelle (zur Beurteilung/Bewertung, ob aufgrund der aktuellen und zukünftigen Freisetzung von Schadstoffen eine Grundwassergefährdung besteht) und Grundwasseruntersuchungen (zur Beurteilung/Bewertung, ob bereits eine Grundwasserverunreinigung eingetreten ist) schließen.

sensorbasierte In-Situ-Methoden

Sensorbasierte Untersuchungsmethoden, bei denen Messwerte ohne Probennahme gewonnen werden (z. B. MIP-Drucksondierung), werden in der LABO-Arbeitshilfe zu den In-Situ-Untersuchungen gezählt. Die derzeit verfügbaren sensorbasierten Untersuchungen liefern lediglich relative Ergebnisse, d. h. eine exakte Bestimmung der Schadstoffgehalte ist i. d. R. nicht möglich. In Abhängigkeit von den verwendeten Methoden kann die Schadstoffverteilung kontinuierlich über die Tiefe ermittelt und oftmals ein dichteres bzw. flexibleres Raster beprobt werden.

Beprobung nahe der Grundwasser- Oberfläche

Weiterhin erwähnt die BBodSchV in § 14 Abs. 4 die direkte Beprobung und Untersuchung von Grundwasser. Die Beprobung von Grundwasser am Ort der Beurteilung (Beprobung nahe der Grundwasseroberfläche) wird ebenfalls im Anhang 2 der LABO-Arbeitshilfe beschrieben.

Interpretation der Ergebnisse

Über In-Situ-Untersuchungen können nur eingeschränkte Informationen zur Schadstoffquelle und damit zur Schadstoffmasse gewonnen werden. Damit sind Aussagen zu zukünftigen Entwicklungen (insbesondere Schadstoffkonzentration und -frachten) ebenfalls nur sehr eingeschränkt möglich. Daher sollten In-Situ-Untersuchungen im Zusammenhang mit Boden- und/oder Grundwasseruntersuchungen interpretiert werden.

2.5 Hinweise zu den Prüfwerten der BBodSchV

Ort der Proben- nahme, Ort der Beurteilung

Die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden→Grundwasser sind in der Anlage 2 der BBodSchV in den Tabellen 1 bis 3 enthalten (siehe auch Anlage Tabelle A1 bis A3 in diesem Handbuch). Zu unterscheiden ist zwischen Prüfwerten für den **Ort der Probennahme** und Prüfwerten für den **Ort der Beurteilung**. Die Tabelle A1 enthält die Prüfwerte für anorganische Stoffe bezogen auf den Ort der Probennahme, die Tabelle A2 die Prüfwerte für anorganische Stoffe bezogen auf den Ort der Beurteilung. Die Prüfwerte für organische Stoffe am Ort der Probennahme sind dort in Tabelle A3 enthalten und gelten gleichermaßen für den Ort der Beurteilung (siehe auch Anhang des vorliegenden Handbuchs).

LAWA-Geringfügig- keitsschwellen

Die Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden→Grundwasser am Ort der Beurteilung wurden im Einklang mit den Anwendungsgrundsätzen für die LAWAGeringfügigkeitsschwellen [5] neu abgeleitet. Die Ableitungssystematik der Prüfwerte am Ort der Beurteilung ist in der Begründung zur BBodSchV [6] dargestellt und ist bei der Bewertung im Einzelfall zu berücksichtigen.

keine Prüfwerte verfügbar

Falls für einen am Standort relevanten Schadstoff keine Prüfwerte der BBodSchV vorliegen, kann in Abstimmung mit der zuständigen Bodenschutzbehörde das Heranziehen alternativer Beurteilungsgrundlagen in Betracht kommen. Ggf. wird die Bodenschutzbehörde das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie einbinden.

Handlungsbedarf bei Prüfwertüberschrei- tung

Wenn am Ort der Beurteilung **keine Prüfwertüberschreitung** zu erwarten ist, dann liegt bezogen auf den Wirkungspfad Boden→Grundwasser keine schädliche Bodenveränderung oder Altlast vor. Bei einer **Prüfwertüberschreitung** am Ort der Beurteilung kann ergänzend geprüft werden, inwieweit die Schadstoffeinträge zu einer Überschreitung der Prüfwerte in der Einmischungszone führen.

Nach § 15 Abs. 3 Satz 1 BBodSchV sind zudem die Ergebnisse der Detailuntersuchung „unter Beachtung der Umstände des Einzelfalls daraufhin zu bewerten, inwieweit Sanierungs-, Schutz- oder Beschränkungsmaßnahmen im Sinne des § 2 Abs. 7 und 8 des Bundes-Bodenschutzgesetzes erforderlich sind“.

Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit

Die abschließende fachliche Beurteilung und rechtliche Bewertung der gewonnenen Informationen im Hinblick auf die mit Schadstoffeinträgen verbundenen Gefahren für das Grundwasser und ggf. notwendige Maßnahmen nach § 2 Abs. 7 und 8 BBodSchG sind nicht mehr Gegenstand der Sickerwasserprognose, sondern erfolgen in einem anschließenden Schritt auch unter Berücksichtigung von Verhältnismäßigkeitskriterien (§ 15 Abs. 8 BBodSchV). Sie ist demzufolge auch nicht Gegenstand dieser Arbeitshilfe.

3 Ergänzungen für den Vollzug in Hessen

3.1 Allgemeines

LABO-Arbeitshilfe vorrangig

Mit der LABO-Arbeitshilfe „Sickerwasserprognose“ liegt eine bundesweit abgestimmte Arbeitshilfe zur Durchführung von Sickerwasserprognosen vor [2]. Diese LABO-Arbeitshilfe ist für Sickerwasserprognosen vorrangig anzuwenden.

Ergänzende Hilfestellungen der Bundesländer bei OU

Im Regelfall werden Sickerwasserprognosen bei orientierenden Untersuchungen (OU) verbal-argumentativ durchgeführt¹⁴ (Kap. 2.3). Einige Bundesländer, darunter auch Hessen mit diesem Handbuch, geben für verbal-argumentative Sickerwasserprognosen Hilfestellungen, die über die Inhalte der LABO-Arbeitshilfe hinausgehen. Daher gibt die LABO-Arbeitshilfe in Kapitel 5.3.1 den Hinweis: „In einigen Bundesländern werden zur Beurteilung des Schadstoffeintrags in das Grundwasser formalisierte Verfahren zur verbal-argumentativen Abschätzung angewendet.“ Für Hessen betrifft dies die 2. Auflage des Handbuchs Altlasten Band 3 Teil 3 „Untersuchung und Beurteilung des Wirkungspfades Boden→Grundwasser (Sickerwasserprognose)“.

Hessische Bewertungsansätze

Im Folgenden werden Bewertungsansätze erläutert, die sich im hessischen Vollzug bewährt haben und bereits in der 2. Auflage des Handbuchs Altlasten beschrieben sind. Folgende Bewertungsansätze können bei verbal-argumentativen Sickerwasserprognosen eingesetzt werden:

- Berechnung des Verhältnisses „eluiierbarer Anteil“ zum „Gesamtgehalt“, siehe Kapitel 3.2
- Abschätzung der Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone bei OU (Szenarien), siehe Kapitel 3.3
- Abschätzung der Grundwassergefährdung aufgrund von Bodenuntersuchungen bei OU (Bewertungsmatrix), siehe Kapitel 3.4.

Darüber hinaus enthält das Handbuch ein Berechnungsbeispiel für die Schadstofffracht und die Dauer des Schadstoffaustrags, siehe Kapitel 3.5.

¹⁴ Sickerwasserprognosen, die im Rahmen von Detailuntersuchungen durchgeführt werden, werden i. d. R. mittels Transportmodellen wie z. B. das analytische Stofftransportmodell ALTEX-1D durchgeführt (Kap. 2.4). Auch bei OU kann ALTEX-1D dann eingesetzt werden, wenn die Datenlage ausreichend günstig ist.

3.2 Berechnung des Verhältnisses „eluierbarer Anteil“ zum „Gesamtgehalt“

Eluierbarer Schadstoffanteil

Für die Beurteilung der Mobilität von Schadstoffen (Kap. 3.4, Bewertungsmatrix) sind nicht nur die Konzentrationen im Eluat von Bedeutung, sondern auch die Schadstoff-Gesamtgehalte in den untersuchten Bodenproben. Aus dem Verhältnis des eluierbaren Schadstoffanteils zum Gesamtgehalt können Schlüsse auf die Mobilität von Schadstoffen im Boden gezogen werden. Weiterhin gibt das Verhältnis des eluierbaren Schadstoffanteils zum Gesamtgehalt einen Hinweis zur Abschätzung der mobilisierbaren Schadstoffmasse (Kap. 2.4.2).

Beispiel zur Berechnung des Verhältnisses „eluierbarer Anteil“ zum „Gesamtgehalt“:

Elutions-/Extraktionsverfahren: 2:1-Verfahren (DIN 19528, 19529)

Wasser-Boden-Verhältnis (WBV): 2 l/kg

Konzentration im Eluat: 120 µg/l (Messwert im Eluat)

Gesamtgehalt in der Bodenprobe: 10 000 µg/kg (Messwert in der Bodenprobe = 10 mg/kg)

Verhältnis = Konzentration im Eluat [µg/l] / Gesamtgehalt [µg/kg] * WBV [l/kg] * 100 % = $120 / 10\,000 * 2 * 100\% = 2,4\%$

Im Beispiel wurden mit dem 2:1-Verfahren 2,4 % der in der Bodenprobe vorliegenden Schadstoffe eluiert.

3.3 Szenarien für die Abschätzung der Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone bei orientierenden Untersuchungen

Transportprognose, Rückhalte- und Abbauprozesse

Bei der verbal-argumentativen Sickerwasserprognose wird die Transportprognose berücksichtigt, indem die Schutzfunktion der ungesättigten Zone beschrieben wird. Je größer die Schutzfunktion ist, desto stärker ist die Schadstoffminderung im Sickerwasser durch Rückhalte- und Abbauprozesse anzunehmen. Die ermittelte Schutzfunktion fließt in die Bewertungsmatrix (Kap. 3.4) ein.

Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone

Unter der Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone werden mehrere Aspekte zusammengefasst:

- Einfluss der ungesättigten Zone auf die Verweilzeit des Sickerwassers im Boden (Mächtigkeit und Durchlässigkeit der ungesättigten Zone, Sickerwasserrate),
- in der ungesättigten Zone wirkende Rückhalteprozesse (Sorption) und
- in der ungesättigten Zone wirkende mikrobielle Abbauprozesse.

Bei dem hier vorgestellten Verfahren zur verbal-argumentativen Abschätzung der Schutzfunktion werden die realen Verhältnisse in der ungesättigten Bodenzone stark vereinfacht abgebildet.

Auswahl eines geeigneten Szenarios

In der Tabelle 1 werden Szenarien vorgestellt, die eine Abschätzung der Schutzfunktion der ungesättigten Zone ermöglichen. Bei der Fallbearbeitung sollte das Szenario ausgewählt werden, welches dem konkreten Fall am ähnlichsten ist.

In die Szenarien fließen folgende Parameter ein:

- Mächtigkeit der unbelasteten Grundwasserüberdeckung
- Versiegelung
- Durchlässigkeit des Bodens/Untergrunds
- Biologische Abbaubarkeit der Schadstoffe.

Die ersten drei Parameter beeinflussen die Verweildauer des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung. Je länger die Verweildauer ist, desto länger können Abbau- und Sorptionsprozesse wirksam werden und damit eine Verringerung des Eintrags von Schadstoffen ins Grundwasser bewirken [7].

Tab. 1: Szenarien für die Abschätzung der Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone bei orientierenden Untersuchungen (Erläuterung unter der Tabelle).

Szenario Nr.	Mächtigkeit der unbelasteten GW-Überdeckung	Versiegelung	Durchlässigkeit des Bodens / Untergrunds	Biologische Abbaubarkeit	Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone
1	gering	unversiegelt	(-)	(-)	gering
2	gering	Bewuchs	(-)	(-)	gering
3	gering	versiegelt	groß/mittel	(-)	gering
4	gering	versiegelt	klein	(-)	mittel
5	mittel	unversiegelt	groß	(-)	gering
6	mittel	unversiegelt	mittel	gering	gering
7	mittel	unversiegelt	mittel	gut	mittel
8	mittel	unversiegelt	klein	(-)	mittel
9	mittel	Bewuchs	groß	(-)	gering
10	mittel	Bewuchs	mittel/klein	gering	mittel
11	mittel	Bewuchs	mittel/klein	gut	hoch
12	mittel	versiegelt	groß	(-)	mittel
13	mittel	versiegelt	mittel/klein	(-)	hoch
14	groß	unversiegelt	groß	(-)	gering
15	groß	unversiegelt	mittel/klein	gering	mittel
16	groß	unversiegelt	mittel/klein	gut	hoch
17	groß	Bewuchs	groß	(-)	mittel
18	groß	Bewuchs	mittel/klein	(-)	hoch
19	groß	versiegelt	groß	(-)	mittel
20	groß	versiegelt	mittel/klein	(-)	hoch

(-) = nicht entscheidungsrelevant

Mächtigkeit der unbelasteten Grundwasserüberdeckung

Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung

Die Mächtigkeit des Lockergesteins (oder des kluftfreien Festgesteins) zwischen der Unterkante der Schadstoffquelle und der Grundwasser-Oberfläche wird berücksichtigt. Klüftige Festgesteine oder Lockergesteine mit sehr hoher Durchlässigkeit (k_f größer ca. 10^{-3} m/s, also Grobsand und Kies) gelten als nicht vorhanden.

Anhaltswerte: **gering:** < 2 m **mittel:** 2 bis 10 m **groß:** > 10 m

Beispiel: In der ungesättigten Bodenzone unterhalb der Schadstoffquelle liegt 1,5 m schluffig/feinsandiger Boden vor, darunter 2 m Grobsand. Dann gilt für die Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung die Einstufung **gering** (kleiner 2 m), da der Grobsand keine Schutzfunktion aufweist.

Sofern der verunreinigte Bodenbereich (Schadstoffquelle) zeitweise oder ständig bis ins Grundwasser reicht, wird eine mögliche Schutzfunktion der ungesättigten Zone nicht berücksichtigt.

Versiegelung

Art der Versiegelung

Die Art der Versiegelung ermöglicht die Einschätzung, ob am Standort eine hohe, mittlere oder niedrige Sickerwasserrate vorliegt. Je höher die Sickerwasserrate ist, desto eher werden Schadstoffe durch versickerndes Niederschlagswasser mobilisiert. Weiterhin ist bei hohen Sickerwasserraten die Verweildauer des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung vergleichsweise **gering**, so dass Abbau- und Rückhalteprozesse weniger wirksam sind.

Als **versiegelt** gelten Flächen, die mit Beton, Teer oder Asphalt abgedeckt sind und bei denen der Fortbestand der Versiegelung dauerhaft gesichert ist und deren Versiegelung weitgehend unbeschädigt ist. In diesem Fall kann die Sickerwasserrate als gering angenommen werden.

Versiegelungen bieten bei leichtflüchtigen Schadstoffen (LCKW, BTEX) nur einen sehr eingeschränkten Schutz für das Grundwasser, da diese Schadstoffe Beton, Asphalt und Teer durchdringen können. Sie breiten sich auch über die Bodenluft aus und damit unabhängig von der Sickerwasserrate.

Bei Flächen mit dichtem Bewuchs und Flächen mit schadhafter Versiegelung kann von einer mittleren Sickerwasserrate ausgegangen werden. Dies gilt auch für Pflasterungen. Die Wasserdurchlässigkeit von Pflasterfugen kann sich im Laufe der Zeit durch den Eintrag von Feinmaterial und Kolmation deutlich reduzieren [2].

Bei **unversiegelten** Flächen und Flächen ohne Bewuchs ist die Sickerwasserrate vergleichsweise hoch.

Durchlässigkeit des Bodens/Untergrunds

Einstufung der Durchlässigkeit

Je durchlässiger der Boden unterhalb der Schadstoffquelle ist, desto geringer ist die Verweildauer des Sickerwassers und desto geringer ist die Abbau- und Rückhaltewirkung in der unbelasteten Grundwasserüberdeckung.

Undurchlässige, bindige Böden bzw. Lockergesteine weisen einen hohen Ton- bzw. Schluffgehalt und einen großen Anteil von Feinporen auf. Weiterhin weisen solche Böden oftmals vergleichsweise hohe Anteile an organischem Kohlenstoff auf. Unter diesen Randbedingungen können Schadstoffe relativ gut adsorbieren und so den Schadstoffeintrag in das Grundwasser vermindern und/oder verzögern.

Einstufung der Durchlässigkeit:

- **groß:** überwiegend sandige, kiesige Sedimente oder klüftiges Festgestein, keine Tonschichten
- **mittel:** überwiegend schluffiges Sediment oder tonige Schichten mit geringer Ausdehnung
- **klein:** schluffig-tonige Schichten mit ausreichender Mächtigkeit und Ausdehnung.

Biologische Abbaubarkeit bei organischen Schadstoffen

Einstufung der Abbaubarkeit

Einige organische Schadstoffe sind durch Mikroorganismen abbaubar, sofern im Boden günstige Randbedingungen für den mikrobiellen Abbau vorliegen. Bei geringer Mächtigkeit der unbelasteten Grundwasserüberdeckung oder bei sehr durchlässigen Böden ist die Verweildauer des verunreinigten Sickerwassers relativ kurz, so dass in der ungesättigten Zone kein nennenswerter Schadstoffabbau zu erwarten ist. Hinweise für die Abbaubarkeit altlastentypischer Stoffgruppen werden nachfolgend gegeben (Einstufungen: **gering** oder **gut**). In der LABO-Arbeitshilfe werden in Anhang 6 weitere Informationen zur Abbaubarkeit und zur Mobilität relevanter Stoffgruppen gegeben.

MKW

- **Mineralölkohlenwasserstoffe:** Gut abbaubar sind die Hauptbestandteile von Dieselmotoren, Kerosin und Heizöl; gering abbaubar sind Schmieröle.

BTEX

- **Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol:** Gut abbaubar sind Toluol und Benzol, geringer abbaubar sind Ethylbenzol und Xylol. Je nachdem, welche BTEX-Komponenten überwiegen, erfolgt die Einstufung in gut oder gering.

LCKW

- **Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe:** Bei LCKW ist von einer geringen Abbaubarkeit auszugehen. Nur unter günstigen Bedingungen (zuerst anaerob, dann aerob) ist ein vollständiger Abbau möglich.

PAK

- **Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe:** Der 2-Ring-PAK Naphthalin ist vergleichsweise gut abbaubar, die 3- und 4-Ring-PAK sind gering abbaubar. Bei 5- und 6-Ring PAK ist die Abbaubarkeit vernachlässigbar gering.

Phenole

- **Phenole** sind i. d. R. gut abbaubar, mit Ausnahme der chlorierten Phenole.

3.4 Abschätzung der Grundwassergefährdung aufgrund von Bodenuntersuchungen bei orientierenden Untersuchungen

Bewertungsmatrix

Bei orientierenden Untersuchungen (OU) ist die Anwendung von Stofftransportmodellen wie ALTEX-1D zur Berechnung konkreter Stoffkonzentrationen am Ort der Beurteilung in vielen Fällen nicht sinnvoll oder nicht möglich (s. Kap. 2.3). Dann liegen für die Sickerwasserkonzentrationen am Ort der Beurteilung keine konkreten, nutzbaren Konzentrationswerte vor. Ein direkter Vergleich mit den Prüfwerten der BBodSchV ist nicht möglich. Als Alternative kann die Grundwassergefährdung verbal-argumentativ abgeschätzt werden. In der nachfolgenden Tabelle wird hierzu eine Bewertungsmatrix dargestellt.

Mobilität der Schadstoffe

Einstufung der Mobilität

Die Einstufung der Mobilität ist hoch, mittel oder gering. Für die Einstufung organischer Stoffe sind die chemisch-physikalischen Stoffeigenschaften relevant (s. u.). Für einige organische Stoffgruppen liegen validierte 2:1-Elutionsverfahren vor; bei diesen Stoffen kann ergänzend das Verhältnis eluierbarer Anteil zum Gesamtgehalt berücksichtigt werden (s. Kap. 3.2).

Bei anorganischen Stoffen können Informationen zur Mobilität der LABO-Arbeitshilfe entnommen werden ([2], dort Anhang 6). Weitere Hinweise kann das Verhältnis eluierbarer Anteil zum Gesamtgehalt geben.

Tab. 2: Orientierende Untersuchungen – Abschätzung der Grundwassergefährdung aufgrund von Bodenuntersuchungen

Mobilität der Schadstoffe	Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzonen	Schadstoffgehalte im Boden	Grundwassergefährdung
hoch	(–)	sehr hoch oder hoch	wahrscheinlich
		gering	zu erwarten
mittel	gering	sehr hoch oder hoch	wahrscheinlich
		gering	zu erwarten
	mittel	sehr hoch	wahrscheinlich
		hoch oder gering	zu erwarten
	hoch	sehr hoch oder hoch	zu erwarten
		gering	nicht zu erwarten
gering	gering	sehr hoch	wahrscheinlich
		hoch	zu erwarten
		gering	nicht zu erwarten
	mittel oder hoch	sehr hoch	zu erwarten
		hoch oder gering	nicht zu erwarten

Nachfolgend werden für wichtige organische Stoffgruppen Hinweise zur Mobilität gegeben:

MKW

- **Mineralölkohlenwasserstoffe:**

Hohe Mobilität: Ottokraftstoffe

Mittlere Mobilität: Diesel, Heizöl EL, Kerosin

Geringe Mobilität: Schmieröl, Heizöl S

Eine Aussage, welche Mineralölkohlenwasserstoffe vorliegen, kann durch Auswertung der Gaschromatogramme erfolgen [8]. Ergänzend können 2:1-Eluatuntersuchungen zur Bestimmung des Verhältnisses eluierbarer Anteil zum Gesamtgehalt betrachtet werden.

BTEX

- **Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol:**

Hohe Mobilität: Benzol, Toluol

Hohe bis mittlere Mobilität: Ethylbenzol, Xylol

Die Mobilität von BTEX ist i. d. R. als hoch einzustufen.

LCKW

- **Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe:**

LCKW weisen eine hohe Mobilität auf.

PAK

- **Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe:**

Mittlere Mobilität: Naphthalin (2er-Ring);

Acenaphthen, Acenaphthylen, Anthracen, Fluoren,
Phenanthren (3er-Ringe)

Geringe Mobilität: sonstige PAK

Ergänzend können 2:1-Eluatuntersuchungen zur Bestimmung des Verhältnisses eluierbarer Anteil zum Gesamtgehalt betrachtet werden.

Phenole

- **Phenole:**

Phenole und chlorierte Phenole weisen eine hohe Mobilität auf.

Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone

Schutzfunktion un- gesättigte Bodenzone

Die Einstufung der Schutzfunktion in gering, mittel oder hoch resultiert aus Tabelle 1 in Kapitel 3.3.

Bei Schadstoffen mit hoher Mobilität ist die Schutzfunktion der ungesättigten Zone i. d. R. vernachlässigbar.

Schadstoffgehalte im Boden

Schadstoffgehalte Boden

Bei OU können die in Tabelle 3 aufgeführten Beurteilungswerte als Maßstab für die Höhe der Schadstoffgehalte verwendet werden.

sehr hoch: Die Schadstoffgehalte überschreiten die in Tabelle 3 aufgeführten Beurteilungswerte mehrfach.

hoch: Die Schadstoffgehalte entsprechen etwa den Beurteilungswerten aus Tabelle 3.

gering: Die Schadstoffgehalte unterschreiten deutlich die Beurteilungswerte aus Tabelle 3.

Grundwassergefährdung

Grundwasser- gefährdung

Wenn alle Bewertungskriterien ermittelt wurden, kann eine Abschätzung der Grundwassergefährdung nach der Bewertungsmatrix (Tabelle 2) erfolgen.

wahrscheinlich: Ein hinreichender Verdacht auf schädliche Bodenveränderungen liegt vor. Die Voraussetzungen nach § 9 Abs. 2 BBodSchG für die Anordnung weiterer Untersuchungen sind erfüllt.

zu erwarten: Der Anfangsverdacht hat sich zwar erhärtet, er ist jedoch u.U. noch nicht ausreichend für die Anordnung weiterer Untersuchungen nach § 9 Abs. 2 BBodSchG. Weitere Untersuchungen sind empfehlenswert

nicht zu erwarten: Der Anfangsverdacht hat sich nicht bestätigt. Liegen keine konkreten Hinweise auf Grundwasserverunreinigungen vor (z. B. erhöhte Messwerte im Grundwasserabstrom, Kenntnisse von Unfällen oder Leckagen), ist der Verdacht einer Grundwassergefährdung ausgeräumt.

Tab 3: Beurteilungswerte für Boden und Bodenluft

Parameter	Beurteilungswert	
	Boden ^{a, b} [mg/kg]	Bodenluft ^k [mg/m ³]
Arsen	150	
Blei	500	
Cadmium	5	
Chrom ^c	500	
Kupfer	300	
Nickel	250	
Quecksilber	5	
Zink	750	
Cyanid (leicht freisetzbar)	5	
BTEX ^d	25	5
Benzol	2,5	1
PAK ^e (ohne Naphthalin)	25	
Benzo[a]pyren	1	
Naphthalin	5	
LCKW (gesamt) ^f	10	5
PCB ^h	5	
MKW	2 500	
Phenole (nach Destillation)	25	

^a Schadstoffgehalte im Boden, bezogen auf die Trockensubstanz des Bodens

^b Der Beurteilungswert für leichtflüchtige Stoffe gilt nur für bindige Böden (z. B. schluffige/tonige Böden). Bei der Probenahme muss das Ausgasender Stoffe berücksichtigt werden.

^c Bei Überschreitung der Werte sollte auch Cr (VI) untersucht werden.

^d Summe einkerniger Aromaten, mindestens Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole (o,m,p), Styrol, Cumol

^e Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe. I.d.R. 15 Einzelsubstanzen nach der Liste der US-EPA, ohne Naphthalin

^f Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe. Zu analysieren sind mindestens Dichlormethan, Trichlormethan, Tetrachlormethan, 1,1-Dichlorethen, cis-1,2-Dichlorethen, Trichlorethen, Tetrachlorethen, 1,1,1-Trichlorethan sowie bei Hinweisen 1,2-Dichlorethan.

^h Polychlorierte Biphenyle: I.d.R. Summe der 6 Indikatorverbindungen nach DIN 38407-3

ⁱ Die Messergebnisse können durch natürliche organische Substanzen (z. B. Holzreste, Torf) beeinflusst sein.

^k Bodenluftmessungen haben ausschließlich relativen Charakter und sind nicht für Grenzwertbetrachtungen geeignet.

3.5 Berechnungsbeispiel für die Schadstofffracht und Dauer des Schadstoffaustrags

Die nachfolgenden Hinweise sind in erster Linie bei verbal-argumentativen Sickerwasserprognosen im Rahmen von orientierenden Untersuchungen (OU) anwendbar. Falls Stofftransportmodelle wie ALTEX-1D eingesetzt werden, werden Schadstofffrachten und die Dauer des Schadstoffaustrags durch das Modell errechnet [3].

Definition Fracht

Bei der Sickerwasserprognose versteht man unter der Fracht diejenige Menge an Schadstoffen, die mit dem Sickerwasser pro Zeiteinheit in das Grundwasser gelangt. Die Fracht wird i. d. R. als Kilogramm Schadstoff pro Jahr [kg/a] oder Gramm pro Tag [g/d] angegeben.

Zweck der Frachtabschätzung

Abschätzungen der Schadstofffrachten können verschiedenen Zwecken dienen, z. B. der Beurteilung des Ausmaßes einer Grundwassergefährdung oder zur Prüfung der Verhältnismäßigkeit weiterer Maßnahmen. Allerdings ist in vielen Fällen nur eine grobe Abschätzung der Frachten möglich.

Berechnung der Schadstofffracht

Liegen Grundwasser-, Sickerwasser- oder Eluatuntersuchungen vor, ist prinzipiell eine Berechnung der Schadstofffracht möglich (siehe untenstehendes Berechnungsbeispiel). Ansonsten muss die Fracht aufgrund der Mobilität der Schadstoffe und der auf der Verdachtsfläche insgesamt vorhandenen Schadstoffmenge grob abgeschätzt werden. Die Genauigkeit der Abschätzung hängt von den verfügbaren Ausgangsdaten ab.

Die Berechnung von Schadstofffrachten kann auf mehreren Wegen erfolgen, je nachdem, welche Daten zur Verfügung stehen. Das nachfolgende Berechnungsbeispiel stützt sich u. a. auf Analysen der Schadstoffgehalte in mehreren Bodenproben, auf Eluatuntersuchungen und auf die Sickerwasserrate:

Berechnungsbeispiel für die Schadstofffracht und die Dauer des Schadstoffaustrags:

Berechnungsbeispiel

Ein altlastverdächtiger Altstandort weist Bodenverunreinigungen mit Arsen auf. Die kontaminierte **Fläche** erstreckt sich über **2 000 m²**. Die Arsenverunreinigungen reichen bis durchschnittlich 0,25 m unter Geländeoberkante. Daraus ergibt sich ein kontaminiertes **Volumen** von **500 m³**. Bei einer Bodendichte von 2 000 kg/m³ entspricht dieses Volumen einer Masse von 1 000 000 kg Boden.

Der durchschnittliche gemessene Arsengehalt beträgt 400 mg/kg Boden. Daraus errechnet sich eine Schadstoffmenge von 400 000 000 mg Arsen, umgerechnet **400 kg Arsen** (d. h. in dem verunreinigten Bodenvolumen von 500 m³ sind insgesamt 400 kg Arsen verteilt).

Mittels Eluatuntersuchungen (z. B. 2:1-Schüttelverfahren nach DIN 19529) werden Konzentrationen im **Eluat** von ca. **0,05 mg/l** Arsen gemessen (= 50 µg/l Arsen).

Die Abschätzung der **Sickerwasserrate** [mm/a] oder [l/(s * km²)] kann auf mehreren Wegen erfolgen:

- Die Sickerwasserrate kann nach DIN 19687, nach dem TUB-BGR-Verfahren [9] oder nach BEIMS & GUTT [10] ermittelt werden. Letztgenanntes Verfahren ist Bestandteil von ALTEX-1D [3]. Eingabeparameter sind Niederschlag, Bodentyp, Vegetationsart und Versiegelungsgrad.

- Vereinfachend kann angenommen werden, dass entstehendes Sickerwasser vollständig zur Grundwasserneubildung beiträgt. Dann kann die Sickerwasserrate [mm/a] gleich der Grundwasserneubildung gesetzt werden.

Für Hessen können über das HLNUG Karten zur Grundwasserneubildung abgerufen werden:

<https://www.hlnug.de/publikationen/karten-und-daten> (Medium: Wasser; Kartenthema: Daten zur Grundwasserneubildung; Karte: Hessen; Jährliche Grundwasserneubildung aus Niederschlag 2011–2020). Abbildung 8 zeigt die Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1991–2020.

Häufig werden Sickerwasserraten und Grundwasserneubildungsraten in der Einheit [mm/a] angegeben. Für die untenstehende Frachtberechnung ist dann die Umrechnung in die Einheit [l/(s * km²)] erforderlich. Der Umrechnungsfaktor beträgt 0,032. Beispielsweise entsprechen 100 mm/a umgerechnet 3,2 l/(s * km²).

Im Berechnungsbeispiel wird für die Verdachtsfläche eine Sickerwasserrate von 240 mm/a angenommen. Durch Multiplikation mit dem Umrechnungsfaktor 0,032 ergibt sich im Berechnungsbeispiel eine Sickerwasserrate von ca. 8 l/(s * km²). Da die kontaminierte Fläche eine Größe von 2 000 m² bzw. 0,002 km² aufweist, errechnet sich für diese Fläche eine Sickerwassermenge von 0,016 l/s (d. h. im Jahresdurchschnitt versickern pro Sekunde 0,016 l Niederschlagswasser auf der 2 000 m² großen kontaminierten Fläche).

Die Fracht errechnet sich mit folgender Formel:

Fracht [mg/s] = Sickerwassermenge [l/s] * Eluatkonzentration [mg/l]

Im vorliegenden Fall errechnet sich: 0,016 l/s * 0,05 mg/l = 0,0008 mg/s = 0,025 kg/Jahr

Durch Einsetzen des Umrechnungsfaktors von 2,74 ergibt sich eine tägliche Fracht von ca. 0,07 g/d¹⁵.

Die Dauer des Schadstoffaustrags errechnet sich mit folgender Formel:

Dauer des Schadstoffaustrags = Schadstoffmenge [kg] ÷ Fracht [kg/Jahr]

Im vorliegenden Fall errechnet sich: 400 kg ÷ 0,025 kg/Jahr = 16 000 Jahre

Dies bedeutet, dass bei einem gleichmäßigen Austrag von 0,025 kg Arsen pro Jahr nach Ablauf von ca. 16 000 Jahren das Arsen vollständig aus dem kontaminierten Boden ausgewaschen wäre.

Schadstoffaustrag aus dem Boden

Dauer des Schadstoffaustrags

¹⁵ Zur Prüfung, ob Schadstofffrachten nur „gering“ sind, können die im Handbuch Altlasten Band 3 Teil 7 „Arbeitshilfe zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen“ genannten Grundwasser-Frachtwerte herangezogen werden [11].

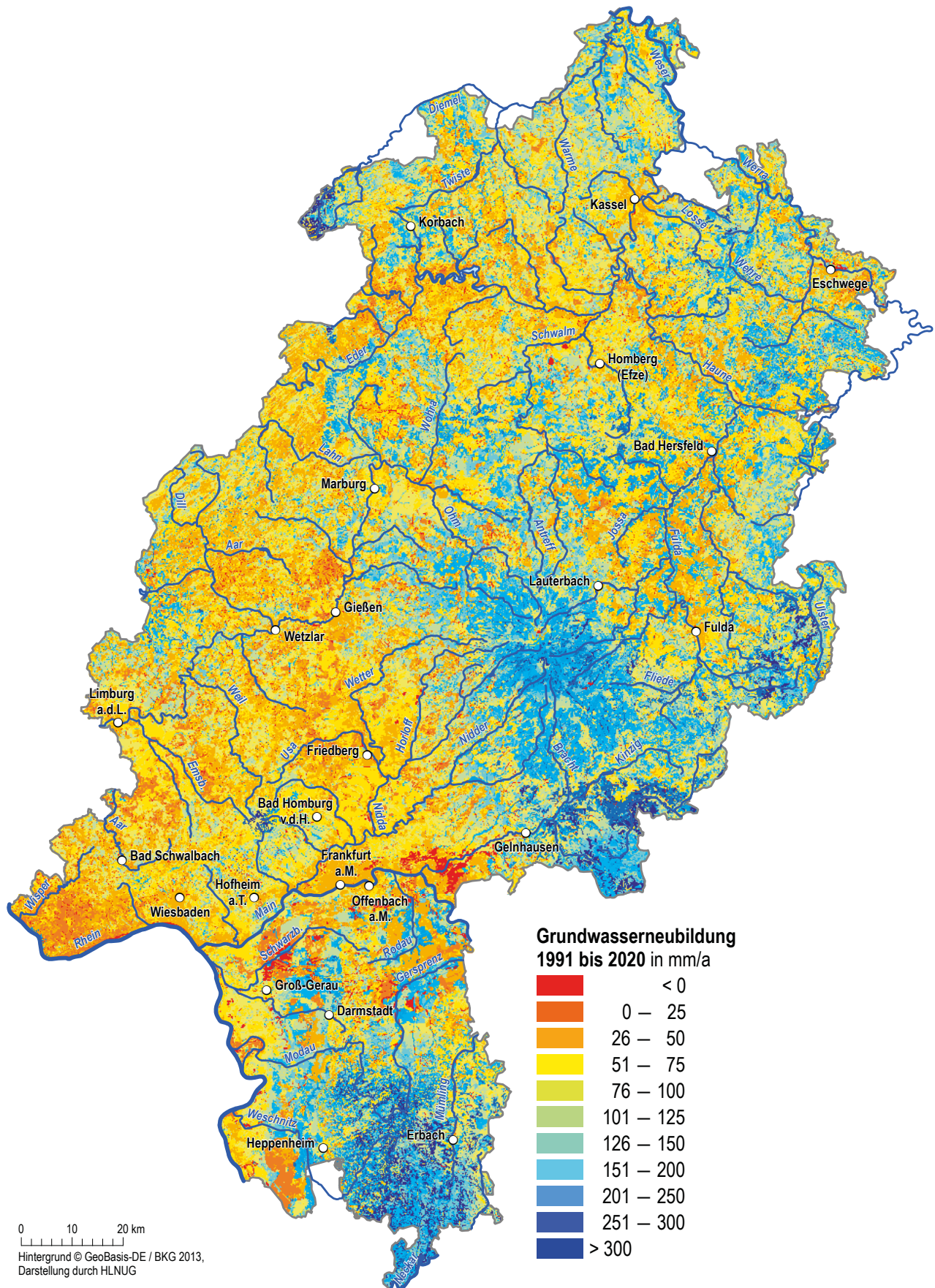


Abb. 8: Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1991–2020. Quelle: HLNUG

**Anhang: Prüfwerte der BBodSchV Anlage 2 für den Wirkungspfad Boden→Grundwasser
(Ort der Probennahme, Ort der Beurteilung)**

Tab. A1: Prüfwerte für **anorganische Stoffe** für den Wirkungspfad Boden→Grundwasser am **Ort der Probennahme**

Stoff	Prüfwert bei TOC-Gehalt < 0,5 % [µg/l]	Prüfwert bei TOC-Gehalt ≥ 0,5 % [µg/l]
Antimon	10	10
Arsen	15	25
Blei	45	85
Bor	1 000	1 000
Cadmium	4	7,5
Chrom (gesamt)	50	50
Chrom (VI)	8	8
Kobalt	50	125
Kupfer	50	80
Molybdän	70	70
Nickel	40	60
Quecksilber	1	1
Selen	10	10
Zink	600	600
Cyanide (gesamt)	50	50
Cyanide (leicht freisetzbar)	10	10
Fluorid	1 500	1 500

Tab. A2: Prüfwerte für **anorganische Stoffe** für den Wirkungspfad Boden→Grundwasser im Sickerwasser am **Ort der Beurteilung**

Stoff	Prüfwert [µg/l]
Antimon	5
Arsen	10
Blei	10
Bor	1 000
Cadmium	3
Chrom (gesamt)	50
Chrom (VI)	8
Kobalt	10
Kupfer	50
Molybdän	35
Nickel	20
Quecksilber	1
Selen	10
Zink	600
Cyanide (gesamt)	50
Cyanide (leicht freisetzbar)	10
Fluorid	1 500

Tab. A3: Prüfwerte für **organische Stoffe** für den Wirkungspfad Boden→Grundwasser (diese gelten sowohl am Ort der Probenahme als auch am Ort der Beurteilung)

Stoff	Prüfwert [µg/l]
Aldrin	0,03
Summe alkylierte Benzole (BTEX) ¹	20
Benzol	1
Summe Chlorbenzole	2
Chlorethen (Vinylchlorid)	0,5
Summe Chlorphenole	2
Hexachlorbenzol (HCB)	0,1
Summe Kohlenwasserstoffe ²	200
Summe leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe (LHKW) ³	20
Summe Tri- und Tetrachlorethen	10
Methyl-tertiär-butylether (MTBE)	10
Summe Nonylphenole (= 4-Nonylphenol, verzweigt und Nonylphenol-Isomere)	3
Pentachlorphenol (PCP)	0,1
Phenol	80
Summe aus PCB ₆ und PCB 118	0,01
PAK ₁₅ ⁴	0,2
Naphthalin und Methylnaphthaline	2
2,4-Dinitrotoluol	0,05
2,6-Dinitrotoluol	0,05
2,4,6-Trinitrotoluol (TNT)	0,2
2,2',4,4', 6,6'-Hexanitrodiphenylamin (Hexyl)	2
1,3,5-Trinitro-hexahydro-1,3,5-triazin (Hexogen)	1
Nitropenta (Pentaerythrityltetranitrat (PETN))	10
Perfluorbutansäure (PFBA)	10
Perfluorhexansäure (PFHxA)	6
Perfluoroktansäure (PFOA)	0,1
Perfluornonansäure (PFNA)	0,06
Perfluorbutansulfonsäure (PFBS)	6
Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS)	0,1
Perfluoroktansulfonsäure (PFOS)	0,1

¹ Summe Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylole² Summe der Kohlenwasserstoffe, die zwischen n-Dekan (C 10) und n-Tetracontan (C 40) von der gaschromatographischen Säule eluieren³ Summe leichtflüchtiger Halogenkohlenwasserstoffe (LHKW): Summe der halogenierten C1- und C2-Kohlenwasserstoffe, einschließlich Trihalogenmethane. Der Prüfwert für Chlorethen ist zusätzlich einzuhalten.⁴ PAK₁₅: PAK₁₆ ohne Naphthalin und Methylnaphthaline

Literatur

- [1] BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716).
- [2] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Boden (LABO) (2024): Arbeitshilfe zur Sickerwasserprognose https://www.labo-deutschland.de/documents/AH_Sickerwasserprognose_LABO.pdf
- [3] Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG) [Hrsg.] (2020): ALTEX-1D, Analytische Lösung der 1D-Transportgleichung mit MS-EXCEL, Version 3.4.5 (Anmerkung Stand 2025: ALTEX-1D wird zurzeit überarbeitet und soll als Webversion erscheinen) https://www.lbeg.niedersachsen.de/boden_grundwasser/altlasten/arbeitshilfen/sickerwasserprognose/sickerwasserprognose-870.html
- [4] ZEIN, H. & BRÜMMER, G.W. (1989): Chemische Extraktion zur Bestimmung von Schwermetallbindungsformen in Böden, Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen, 59, 1, S. 505–510.
- [5] Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) [Hrsg.] (2016): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, Aktualisierte und überarbeitete Fassung https://www.lawa.de/documents/geringfuegigkeits_bericht_seite_001-028_1552302313.pdf
- [6] Deutscher Bundestag (2021): Drucksache 19/29636, 12.05.2021, Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung <https://dserver.bundestag.de/btd/19/296/1929636.pdf>
- [7] HÖLTING, B. et al. (1995): Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung, Geologisches Jahrbuch Reihe C, 1995
- [8] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG): Handbuch Altlasten Band 3 Teil 5, Auswertung von Mineralöl-Gaschromatogrammen, 2005 https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/altlasten/handbuch/hba35_web.pdf
- [9] WESSOLEK, G., DUIJNESVELD, W. & TRINKS, S. (2004): Ein neues Verfahren zur Berechnung der Sickerwasser-rate aus dem Boden: Das TUB-BGR-Verfahren, Wasser- und Stofftransport in heterogenen Einzugsgebieten, Forum für Hydrogeologie und Wasserbewirtschaftung, 5
- [10] BEIMS, U. & GUTT, B. (2002): Entwicklung eines rationellen Verfahrens zur Bewertung von Bodenkontaminationen und deren Exposition (EXPOSI), Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben
- [11] Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG): Handbuch Altlasten Band 3 Teil 7, Arbeitshilfe zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen, 4. Auflage 2025 https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/altlasten/handbuch/Handbuch_Altlasten_Bd3_2025_digital_druck.pdf

Abkürzungsverzeichnis

BBodSchG	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz)
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz-Altlastenverordnung
BTEX	Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole
DU	Detailuntersuchungen
LABO	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LCKW	Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
OdB	Ort der Beurteilung
OdP	Ort der Probennahme
OU	Orientierende Untersuchungen
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PW	Prüfwert