




Altlasten und Grund-  
wasserschadensfälle 42

# Untersuchungsstrategie Grundwasser


 Leitfaden zur Untersuchung bei belasteten Standorten



Baden-Württemberg



# Untersuchungsstrategie Grundwasser

 Leitfaden zur Untersuchung bei belasteten Standorten



<b>HERAUSGEBER</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg 76231 Karlsruhe, Postfach 10 01 63 <a href="http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de">www.lubw.baden-wuerttemberg.de</a>
<b>BEARBEITER</b>	Rainer Dinkel, Peter Rothschink UW Umweltwirtschaft GmbH, 70499 Stuttgart  Thomas Osberghaus Ingenieurgesellschaft Dr. Eisele mbH, 72108 Rottenburg  Stephan Denzel dplan GmbH, 76199 Karlsruhe  Dr. Thomas Ertel Sachverständigenbüro Dr. Ertel, 73734 Esslingen
<b>REDAKTION</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Referat 44 – Altlasten, Schadensfälle
<b>GESTALTUNG</b>	Petra Dobusch Zeichenbüro Dobusch, 74392 Freudental
<b>BEZUG</b>	Die Broschüre ist für 11,00 Euro erhältlich bei der Verlagsauslieferung der LUBW JVA Mannheim – Druckerei Herzogenriedstraße 111, 68169 Mannheim Telefax 0621/398-370 E-Mail <a href="mailto:bibliothek@lubw.bwl.de">bibliothek@lubw.bwl.de</a> sowie als Download unter: <a href="http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de">www.lubw.baden-wuerttemberg.de</a>
<b>ISSN</b>	1437-0158
<b>ISBN</b>	978-3-88251-332-5
<b>STAND</b>	September 2008, 1. Auflage
<b>DRUCK</b>	

Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>		<b>5</b>
<b>1</b>	<b>GRUNDLAGEN</b>	<b>6</b>
1.1	Modellvorstellungen zur Schadstoffausbreitung	7
1.2	Bewertungsgrundlagen und Stufenprogramm	10
1.3	Orientierende Untersuchung	10
1.4	Detailuntersuchung	11
1.4.1	Allgemeines, Tatbestandsseite	11
1.4.2	Immissions-/Emissions-Betrachtung	11
1.5	Sanierungsuntersuchung und Sanierung	15
1.6	Berücksichtigung von Natural Attenuation	15
1.7	Behördliche Überwachung und Eigenkontrolle	17
<b>2</b>	<b>KONZEPTION</b>	<b>19</b>
2.1	Allgemeines	19
2.2	Konzeptionelles Standortmodell	22
2.2.1	Hydrogeologisches Arbeitsmodell	22
2.2.2	Schadstoffausbreitung	22
2.3	Qualitätsanforderungen zur räumlichen Erfassung eines Schadstoffeintrags	26
2.3.1	Untersuchungen am Ort der Beurteilung	26
2.3.2	Untersuchungen im direkten Grundwasserabstrom	26
2.3.2.1	Entfernung zum Schadstoffherd	26
2.3.2.2	Festlegung der Abstrombreite	27
2.3.3	Untersuchungen im weiteren Grundwasserabstrom	29
<b>3</b>	<b>UNTERSUCHUNGSMETHODIK</b>	<b>31</b>
3.1	Auswahl und Herstellung von Grundwasseraufschlüssen	31
3.2	Beprobung von Grundwasseraufschlüssen	35
3.3	Pumpversuche und andere hydraulische Testverfahren	37
3.3.1	Planung von Pumpversuchen	37
3.3.2	Bestimmung von Aquiferkennwerten	38
3.3.3	Immissionspumpversuche	39
3.4	Integrale Grundwasseruntersuchung	40
3.5	Hydrochemische Daten	41
3.6	Qualitätssicherung	42

<b>ANHANG</b>		<b>45</b>
I	Definitionen und Abkürzungen	45
II	Ausgewählte Hintergrundwerte, Prüfwerte, Geringfügigkeitsschwellenwerte und Emissionsschwellenwerte	50
III	Handlungsmatrix für den Wirkungspfad Boden – Grundwasser	52
IV	Checklisten für die Begründung und Dokumentation des konzeptionellen Standortmodells	53
V	Vorschlag für eine stufenweise Vorgehensweise bei Planung und Umsetzung von Untersuchungsstrategie und -plan	55
VI	Gesetze und Verordnungen	56
VII	Literaturverzeichnis	57

# Zusammenfassung

Der Leitfaden befasst sich mit der Untersuchung von schädlichen Bodenveränderungen (SBV) und Altlasten als Grundlage für:

- die Gefährdungsabschätzung nach Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) und Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) im Rahmen der orientierenden Untersuchung (OU) oder Detailuntersuchung (DU),
- die Entscheidung über die Erforderlichkeit einer Sanierungsuntersuchung (SU),
- die Charakterisierung der hydrogeologischen und hydrochemischen Verhältnisse im Hinblick auf die Auswahl und Planung von Sanierungsverfahren im Rahmen der SU,
- die Überwachung beziehungsweise Erfolgskontrolle von Sanierungsmaßnahmen oder Natural Attenuation (NA).

Er richtet sich vor allem an Sachverständige, Fachbüros und Fachbehörden, aber auch an Grundstückseigentümer und Untersuchungspflichtige, die Untersuchungsstrategien entwickeln, prüfen oder beauftragen. Er beschreibt die Vorgehensweise bei der Entwicklung von Untersuchungsstrategien zur Schaffung der Datengrundlage für Entscheidungen nach Altlastenrecht für das Schutzgut Grundwasser. Dabei werden auch die kosten- und zeitsparenden Möglichkeiten von innovativen Untersuchungsmethoden berücksichtigt, wie integrale Pumpversuche oder schnelle Methoden der Proben- und Messwertbestimmung. Detaillierte Ausführungen zu einzelnen Methoden bleiben getrennten Dokumenten wie Methodensammlungen, Statusberichten oder speziellen Handlungshilfen und der Fachliteratur vorbehalten.

Der Leitfaden ist dreiteilig aufgebaut:

- Kapitel 1 erläutert Aufgabenstellungen von Untersuchungen sowie wesentliche bodenschutz- und wasserrechtliche Untersuchungs- und Bewertungsgrundlagen.
- Kapitel 2 erläutert die Entwicklung geeigneter Untersuchungsstrategien sowie konzeptionelle Anforderungen an Grundwasseruntersuchungen. Es vermittelt zwischen den rechtlichen Fragen und der technischen Untersuchung.
- Kapitel 3 befasst sich mit Methoden der Grundwasseruntersuchung. Es regt insbesondere an, innovative oder neuere Untersuchungsmethoden und -geräte zur Einsparung von Bearbeitungskosten und -zeit zu nutzen.

Dieser Leitfaden enthält die wichtigen Entscheidungskriterien der durch Zeitablauf außer Kraft getretenen Gemeinsamen Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Umwelt und Verkehr und des Sozialministeriums Baden-Württemberg über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen (VwV OW), sodass künftige Entscheidungen der Verwaltungsbehörden auf diesem Leitfaden basieren können.

Dieser Leitfaden aktualisiert und ersetzt auch den „Leitfaden Erkundungsstrategie Grundwasser“ [37] aus dem Jahre 1996 der damaligen LfU.

# 1 Grundlagen

Die Untersuchung von Schadstoffbelastungen des Untergrunds, wie sie als Folge des früheren sorglosen Umgangs mit umweltgefährdenden Stoffen an vielen Industrie- und Gewerbestandorten noch heute häufig anzutreffen sind, ist kostspielig und zeitaufwändig. Weil durch die Untersuchung die Gefahrenlage nicht verbessert wird, ist man bestrebt, den Aufwand hierfür so gering wie möglich zu halten und eher in die Sanierung des Standorts zu investieren. Andererseits sind zuverlässige Standortuntersuchungen notwendige Voraussetzungen für sachgerechte Standortbewertungen und Entscheidungen über einen eventuell erforderlichen Handlungsbedarf sowie über einen gezielten und effektiven Mitteleinsatz im Falle von Sanierungsmaßnahmen. Übertriebene Sparsamkeit bei der Standortuntersuchung kann beispielsweise dazu führen, dass vorhandene Gefahrensituationen nicht erkannt werden und erforderliche Abwehrmaßnahmen unterbleiben oder Sanierungsmaßnahmen ineffektiv sind.

Liegen Anhaltspunkte für eine Altlast oder eine schädliche Bodenveränderung vor, sind die Verdachtsflächen nach § 3 Abs. 3 BBodSchV zunächst einer orientierenden Untersuchung (OU) zu unterziehen. Die Ergebnisse der (OU) sind zu bewerten. Gehen von den Verdachtsflächen Gefahren für das Grundwasser aus, ist zur Bewertung gem. § 4 Abs. 3 BBodSchV im Rahmen der Detailuntersuchung (DU) eine Sickerwasserprognose zu erstellen. Dafür ist die Schadstoffkonzentration am Ort der Beurteilung, das ist der Übergangsbereich zwischen der wasserungesättigten Bodenzone und dem Grundwasser, zu bestimmen oder zu prognostizieren.

Die Anforderungen bei der Sanierung von Gewässern bestimmen sich nach dem Wasserrecht (§ 4 Abs. 4 S. 3 BBodSchG). Dies sind in Baden-Württemberg das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und das Wassergesetz für Baden-Württemberg (WG). Auf dieser Basis wurde die Gemeinsame Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Umwelt und Verkehr und des Sozialministeriums Baden-Württemberg über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen (VwV OW) erlassen. Sie enthält

detaillierte Regelungen für die Beurteilung von Grundwasserbelastungen und die Entscheidung über einen erforderlichen Handlungsbedarf. Sie hat sich in Baden-Württemberg bei einer Vielzahl von Entscheidungen bewährt, ist jedoch inzwischen durch Zeitablauf außer Kraft getreten. Es bestehen jedoch keine Einwände dagegen, weiterhin danach zu verfahren, soweit dadurch nicht gegen geltende Gesetze oder Verordnungen verstoßen wird. Dieser Leitfaden fasst die wichtigen Entscheidungskriterien daraus zusammen, sodass künftige Entscheidungen der Verwaltungsbehörden auf diesem Leitfaden basieren können und nicht mehr auf die VwV OW zurückgegriffen werden muss.

Zur Unterstützung des bodenschutz- und wasserrechtlichen Vollzugs bei der Grundwasseruntersuchung von altlastverdächtigen Flächen und Altlasten veröffentlichte die damalige LfU im Jahre 1996 den „Leitfaden Erkundungsstrategie Grundwasser“ [37]. Er beschrieb einen Ansatz zur hydrogeologischen Untersuchung des Untergrunds als Grundlage für die Gefährdungsabschätzung und Entscheidungen über den weiteren Handlungsbedarf. Strategie und Durchführung dieser Untersuchung wurden anhand von Leitfragen mit methodischen Hinweisen für einzelne Untersuchungsstufen und hydrogeologische Verhältnisse dargestellt und an Fallbeispielen erläutert. Der Leitfaden fand breite Anwendung und Akzeptanz, entsprach jedoch in weiten Teilen nicht mehr den aktuellen rechtlichen Grundlagen und neueren technischen Möglichkeiten. Damit auf ihn künftig ebenfalls nicht mehr zurückgegriffen werden muss, sind die dort enthaltenen Inhalte im vorliegenden Leitfaden entsprechend aktualisiert.

Nachfolgend wird erläutert, welche fachtechnischen und rechtlichen Fragen durch Grundwasseruntersuchungen beantwortet werden müssen. Dazu werden zunächst in Abschnitt 1.1 Modellvorstellungen zur Schadstoffausbreitung erläutert. Anschließend werden in Abschnitt 1.2 die bodenschutz- und wasserrechtlichen Bewertungsgrundlagen und Untersuchungsziele für die jeweiligen Untersuchungsstufen dargestellt.



## 1.1 MODELLVORSTELLUNGEN ZUR SCHADSTOFFAUSBREITUNG

Wichtige Fragestellungen bei der Beurteilung der Gefahrenlage sind:

- Befindet sich die Schadstoffquelle in der ungesättigten Zone oder im Grundwasser?
- Ist bereits ein Grundwasserschaden eingetreten oder wird dies in Zukunft der Fall sein? (diese Frage betrifft nur Schadstoffquellen in der ungesättigten Zone).
- Ist die Schadstoffquelle beseitigt oder nicht auffindbar und besteht dennoch ein Grundwasserschaden?

Daher sollte zunächst mit dem Vorwissen zum Standort und seiner Umgebung sowie aus Erfahrungen an vergleichbaren Fällen eine Modellvorstellung zum mutmaßlichen

Ausmaß und zum Verhalten der Schadstoffbelastung entwickelt werden. Vereinfacht lassen sich die in Abbildung 1 schematisch dargestellten Fallkonstellationen unterscheiden. Nachfolgend werden die beiden Fallkonstellationen II und IV herausgegriffen und daran wichtige Grundbegriffe der Bewertung von Schadstoffbelastungen des Grundwassers erläutert.

**Schadstoffherd oberhalb des Grundwassers** - Diese Konstellation (Fall II) ist in Abbildung 2 vergrößert dargestellt. Das Gefährdungspotenzial hängt von den Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser des Schadstoffherds  $c_{SH}$  und vom Sickerwasservolumenstrom ab. Auf dem Weg des Sickerwassers von der Schadstoffquelle zum Grundwasser

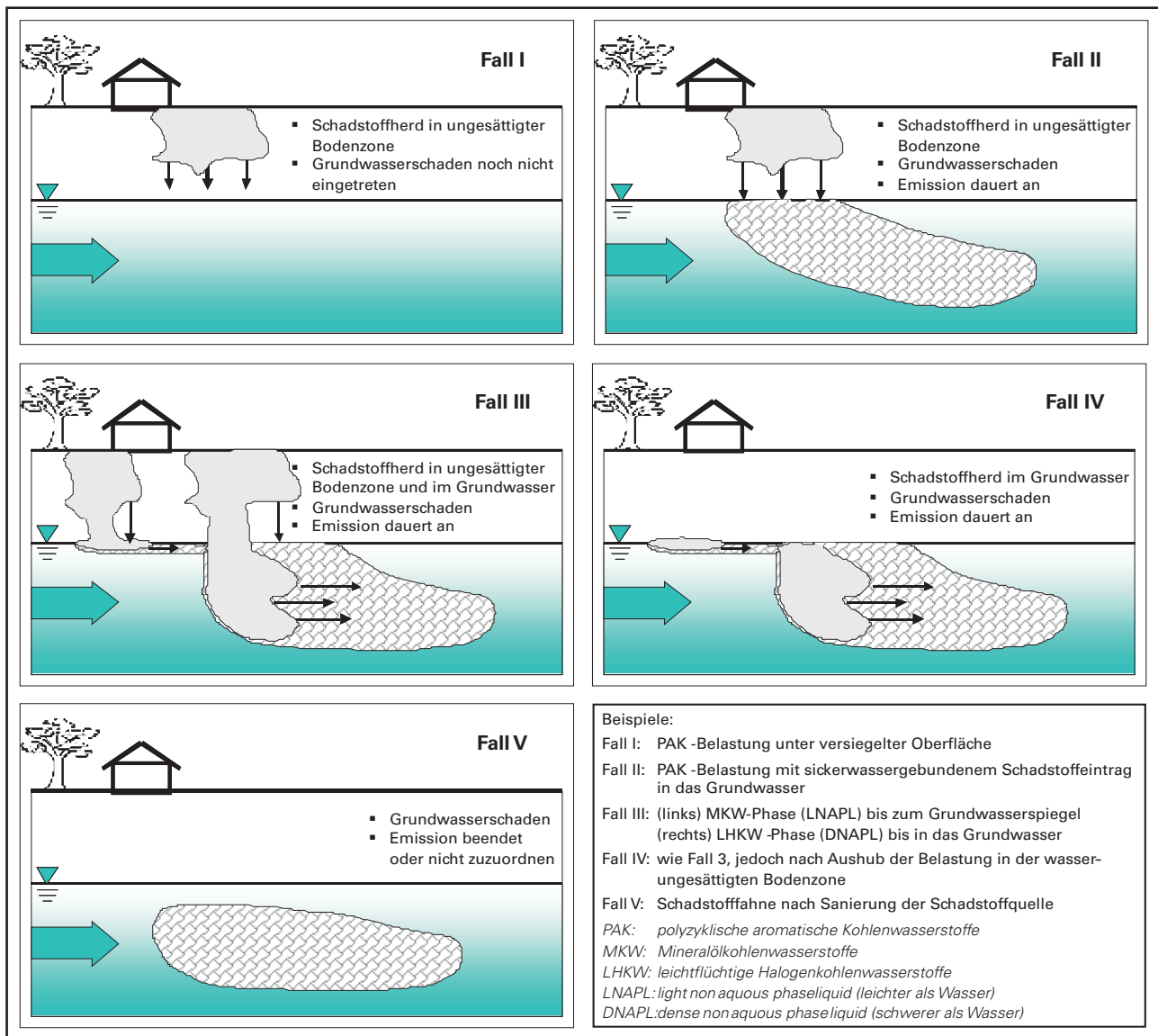


Abbildung 1: Fallkonstellationen der Schadstoffausbreitung (in Anlehnung an [27])

kann es zu einer natürlichen Schadstoffminderung kommen, sodass die ursprünglichen Schadstoffkonzentrationen und -frachten abnehmen. Nur diejenigen Schadstoffkonzentrationen  $c_{\text{OdB}}$  und -frachten  $E_{\text{OdB}}$ , die den Übergangsbereich von der ungesättigten in die wassergesättigte Bodenzone bzw. in das Grundwasser erreichen, sind für die bodenschutz- und wasserrechtliche Gefährdungsabschätzung relevant. Hiermit befasst sich die Sickerwasserprognose. Der Übergangsbereich zwischen ungesättigter und gesättigter Bodenzone wird bodenschutzrechtlich als **Ort der Beurteilung** bezeichnet (näheres siehe Abschnitt 1.4.2). In der Sickerwasserprognose werden die derzeitigen und zukünftig zu erwartenden Stoffkonzentrationen und -frachten am Ort der Beurteilung ermittelt oder prognostiziert. Anhang 1 Nr. 3.3 der BBodSchV nennt drei Möglichkeiten der Sickerwasserprognose und räumt ein, dass diese nur Näherungswerte liefern:

1. Rückschlüsse oder Rückrechnungen aus Untersuchungen im Grundwasserabstrom unter Berücksichtigung der Stoffkonzentration im Grundwasseranstrom, der Verdünnung, des Schadstoffverhaltens in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone sowie des Schadstoffinventars im Boden,

2. auf der Grundlage von In-situ-Untersuchungen,
3. auf der Grundlage von Materialuntersuchungen im Labor (Elution, Extraktion).

Innerhalb des Grundwassers erfahren die Schadstoffe eine Verdünnung durch Diffusion und Konvektion. Deshalb differieren die Schadstoffkonzentrationen  $c_A$  im Grundwasser und an der Grundwasseroberfläche  $c_{\text{OdB}}$ . Im direkten Grundwasserabstrom – dieser Bereich ist von oben betrachtet der Rand des Schadstoffherds und definitionsgemäß noch nicht signifikant von natürlichen Schadstoffminderungsprozessen beeinflusst (vgl. Abschnitt 2.3.2.1) – sind die abströmenden Schadstofffrachten  $E_A$  aber noch annähernd dieselben wie die ins Grundwasser eingetragenen. Erst im weiteren Abstrom führen Retardations- und natürliche Minderungsprozesse (Natural Attenuation - NA) dazu, dass neben Konzentrationen auch die Schadstofffrachten räumlich und zeitlich signifikant abnehmen.

Die **Schadstofffahne** ist definiert als der Bereich mit Konzentrationen gelöster Schadstoffe über Geringfügigkeitschwellen (GFS) oder Prüfwerten.

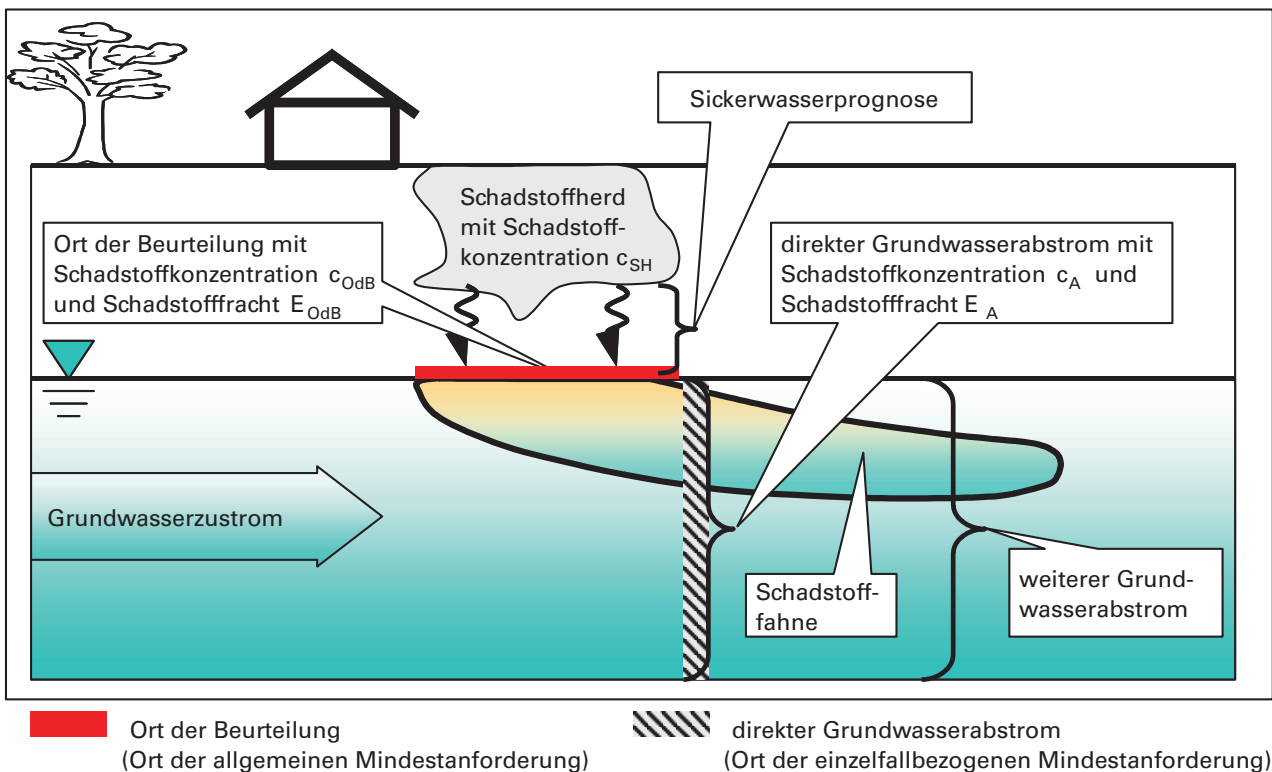
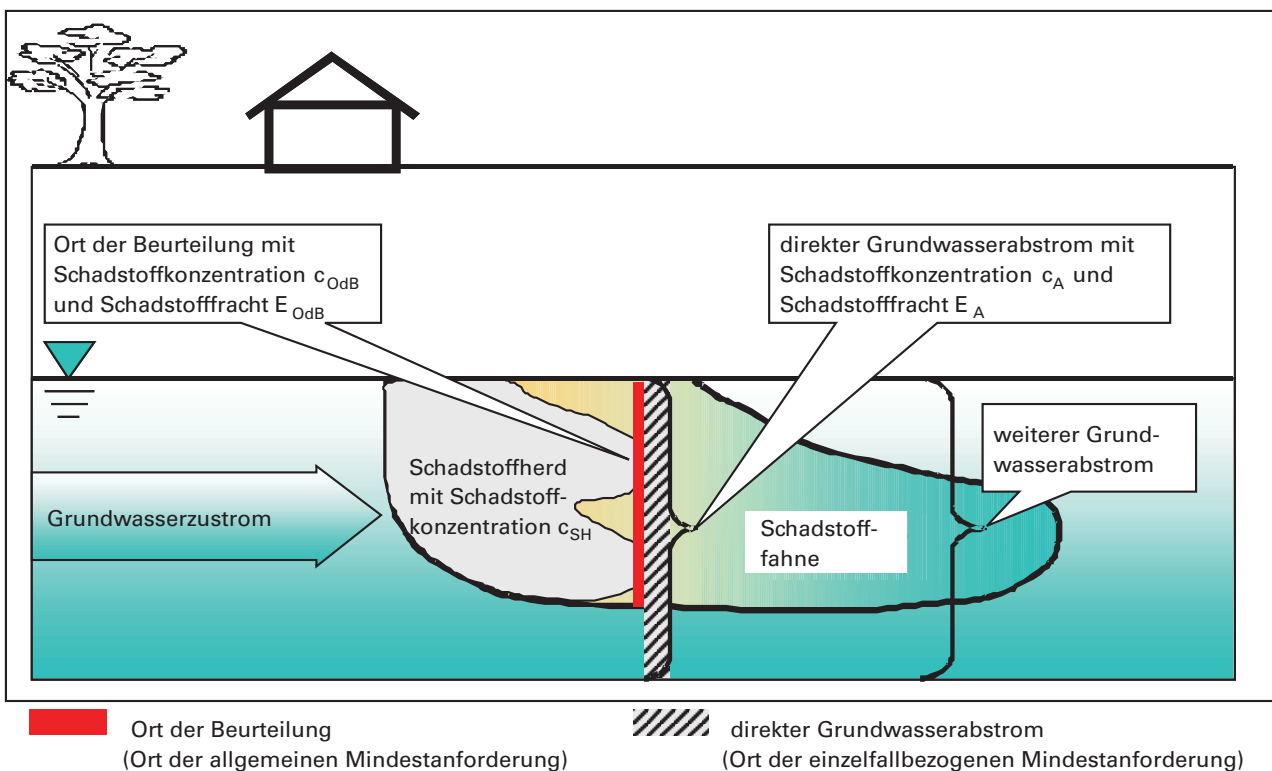


Abbildung 2: Grundbegriffe bei Schadstoffherden oberhalb des Grundwassers

Falls sowohl Frachten aus dem Schadstoffherd  $E_{\text{OdB}}$  als auch aus dem Grundwasserabstrom  $E_A$  vorliegen, wird dies zur Plausibilitätsprüfung genutzt. Wenn das Grundwasser unmittelbar am abstromigen Rand des Schadstoffherds untersucht wird (vgl. Abschnitt 2.3.2.1), dürften sich beide Größen nicht wesentlich unterscheiden. Wenn  $E_A$  kleiner als  $E_{\text{OdB}}$  ist, könnte dies an Retardations- und natürlichen Schadstoffminderungsprozessen auf der Strecke zwischen Schadstoffeintrag und abstromigem Rand des Schadstoffeintrags liegen.

Schadstoffherd im Grundwasser - Diese Konstellation (Fall V) ist in Abbildung 3 vergrößert dargestellt. Die verwendeten Begriffe und Erläuterungen entsprechen denen der Abbildung 2.

Bei Schadstoffherden im Grundwasser gibt es im Unterschied zu Schadstoffherden oberhalb des Grundwassers keine Differenz zwischen der Quellstärke  $c_{\text{SH}}$  und der Schadstoffkonzentration am Ort der Beurteilung  $c_{\text{OdB}}$ . Ort der Beurteilung ist in diesem Fall das so genannte Kontaktgrundwasser, d. h. der Übergangsbereich zwischen dem Schadstoffherd und dem vorbeiströmenden Grundwasser.



LUBW

Abbildung 3: Grundbegriffe bei Schadstoffherden im Grundwasser

## 1.2 BEWERTUNGSGRUNDLAGEN UND STUFENPROGRAMM

Grundlage für die Bewertung der Gefahrenlage sind bei Schadstoffherden in der ungesättigten Bodenzone das BBodSchG und die BBodSchV mit den darin enthaltenen Prüfwerten. Bei Schadstoffherden in der wassergesättigten Bodenzone sowie im Grundwasser ist Bewertungsgrundlage – wie erwähnt - das WG sowie die VwV OW.

Der bodenschutz- und wasserrechtliche Handlungsbedarf wird zweckmäßigerweise in mehreren Schritten untersucht und bewertet. Dadurch wird sichergestellt, dass sich die Untersuchungen auf das notwendige Maß beschränken und flexibel auf den jeweiligen Kenntnisstand reagiert werden kann. Auf eine orientierende Untersuchung (OU) folgt im Bedarfsfall eine Detailuntersuchung (DU), der sich bei Bedarf eine Sanierungsuntersuchung (SU) anschließt, welche die Grundlage für die Sanierungsentscheidung bildet. Die stufenweise Vorgehensweise ist in Abbildung 4 dargestellt und in Tabelle 1 erläutert. Abweichungen von dieser Vorgehensweise sind möglich, beispielsweise bei Gefahr im Verzug oder wenn Gefahren mit einfachen Mitteln abgewehrt oder beseitigt werden können (§ 3 Abs. 5 Satz 2 BBodSchV).

Hinweise zu den einzelnen Untersuchungsstufen enthalten die nachfolgenden Abschnitte. Grundlage dafür sind bodenschutz- und wasserrechtliche Regelungen sowie fachtechnische Erläuterungen, wie die nachfolgend genannten Erläuterungen der LUBW zur VwV OW:

- Erläuterung Nr. 1 Kernpunkte
- Erläuterung Nr. 2 Hintergründe der Regelungen zum Grundwasserschutz
- Erläuterung Nr. 3 Sanierungsnotwendigkeit und Sanierungsziel zum Schutz von Grundwasser
- Erläuterung Nr. 5 Nutzungswürdigkeit eines Grundwasservorkommens
- Erläuterung Nr. 6 Tiefenmittelung über den direkt betroffenen Grundwasserleiter
- Erläuterung Nr. 7 Auswirkungen der VwV auf die Bewertung auf Beweisniveau 3
- Erläuterung Nr. 9 Beurteilung von Bodenluftwerten (Schutzgut Grundwasser)
- Erläuterung Nr. 10 Zur Sanierungsnotwendigkeit bei Ammonium-Emissionen

Diese Erläuterungen sind im Altlasten-Fachinformationssystem AlfaWeb [28] der LUBW als Anlage zur VwV OW in aktualisierter Form enthalten.

## 1.3 ORIENTIERENDE UNTERSUCHUNG

Mit den Ergebnissen der orientierenden Untersuchung (OU) muss entschieden werden können, ob konkrete Anhaltspunkte vorliegen, die den hinreichenden Verdacht einer Altlast begründen.

Die OU ist Aufgabe der zuständigen Behörden (§ 9 Abs. 1 BBodSchG). Von einer OU kann abgesehen werden, wenn sich aus der Erfassung oder aus anderen Quellen bereits ein hinreichender Gefahrenverdacht oder ein dringender Handlungsbedarf ergibt und somit unmittelbar Maßnahmen zur Gefahrenabwehr eingeleitet werden können [25]. Hinweise für den Verwaltungsvollzug bei der OU und Fallbeispiele enthält der Leitfaden der LUBW „Die Amtsermittlung bei altlastverdächtigen Flächen nach § 9 Abs. 1 BBodSchG“ [30].

In der OU werden oft In-situ-Untersuchungen oder Materialuntersuchungen im Labor durchgeführt. Eine Sickerwasserprognose anhand von Rückrechnungen aus dem Grundwasserabstrom erfolgt in dieser Untersuchungsstufe nur dann, wenn dies angesichts der Standortsituation und der hydrogeologischen Verhältnisse als geeignet und verhältnismäßig erscheint. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn der eigentliche Verdachtsbereich nicht direkt zugänglich ist, besondere Heterogenitäten erwarten lässt oder wenn mehrere Verdachtsbereiche integral über Abstrommessungen erfasst werden sollen.

## 1.4 DETAILUNTERSUCHUNG

### 1.4.1 ALLGEMEINES, TATBESTANDSSEITE

Mit den Ergebnissen der Detailuntersuchung (DU) muss entschieden werden können:

- Ergeben sich aus räumlich begrenzten Anreicherungen von Schadstoffen innerhalb einer schädlichen Bodenveränderung oder einer Altlast Gefahren und ist eine Abgrenzung von nicht belasteten Flächen geboten (§ 3 Abs. 5 BBodSchV)?
- In welchem Ausmaß sind die Prüfwerte am Ort der Beurteilung überschritten oder werden sie künftig überschritten?
- In welchem Ausmaß besteht im Grundwasser eine Prüfwertüberschreitung oder eine erhebliche Schadstofffracht (Überschreitung des  $E_{\max}$ -Werts) oder ist dies gemäß einer Sickerwasserprognose zukünftig zu erwarten?
- Müssen Maßnahmen zur Gefahrenabwehr geprüft werden (SU nach Abschnitt 1.5)

Hinsichtlich der Berücksichtigung von NA-Prozessen bei der Detailuntersuchung wird auf Abschnitt 1.6 verwiesen.

Von der DU kann abgesehen werden, wenn die von schädlichen Bodenveränderungen oder Altlasten ausgehenden Gefahren, erheblichen Nachteile oder erheblichen Belästigungen mit einfachen Mitteln abgewehrt werden können (§ 3 Abs. 5 Satz 2 BBodSchV). Zu den einfachen Mitteln kann beispielsweise ein Aushub von Bodenverunreinigungen im Domschachtbereich von unterirdischen Tanks gehören.

### 1.4.2 IMMISSIONS-/EMISSIONS-BETRACHTUNG

Nachfolgend werden Kriterien zur Beurteilung des Ausmaßes von Gefahren oder Schäden und zur Entscheidung über einen Sanierungsbedarf dargestellt.

Wenn im Grundwasser auf Dauer nur „lokal begrenzt erhöhte Schadstoffkonzentrationen“ und nur „geringe Schadstofffrachten“ bestehen, ist dies nach § 4 Abs. 7 BBodSchV bei der Verhältnismäßigkeitsprüfung von Untersuchungs- und Sanierungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Gefahren oder Schäden hinsichtlich des Grundwassers können also

in einem bestimmten Ausmaß toleriert werden, falls die Abwägung ergibt, dass eine vollständige Gefahrenabwehr bzw. Schadensbeseitigung aus wirtschaftlichen, technischen oder rechtlichen Gründen unverhältnismäßig wäre.

Bei der Entscheidung über einen Handlungsbedarf bei genutzten oder nutzungswürdigen Grundwasservorkommen wird zwischen der **allgemeinen** und der **einzelfallbezogenen** Mindestanforderung unterschieden (VwV OW).

Die **allgemeine** Mindestanforderung lautet:

Sanierungsbedarf besteht nicht, wenn

- die Prüfwerte am Ort der Beurteilung eingehalten werden (vgl. Anhang II).

Die **einzelfallbezogene** Mindestanforderung lautet:

Sanierungsbedarf besteht nicht, wenn die beiden folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Die tiefengemittelte, d. h. vertikal verdünnte Schadstoffkonzentration  $c_A$  liegt direkt am abstromigen Rand des Schadstoffherds unterhalb der wasserrechtlichen Geringfügigkeitsschwelle bzw. des Prüfwerts (vgl. Anhang II). Dafür steht der Begriff „**Immissionsbegrenzung**“.

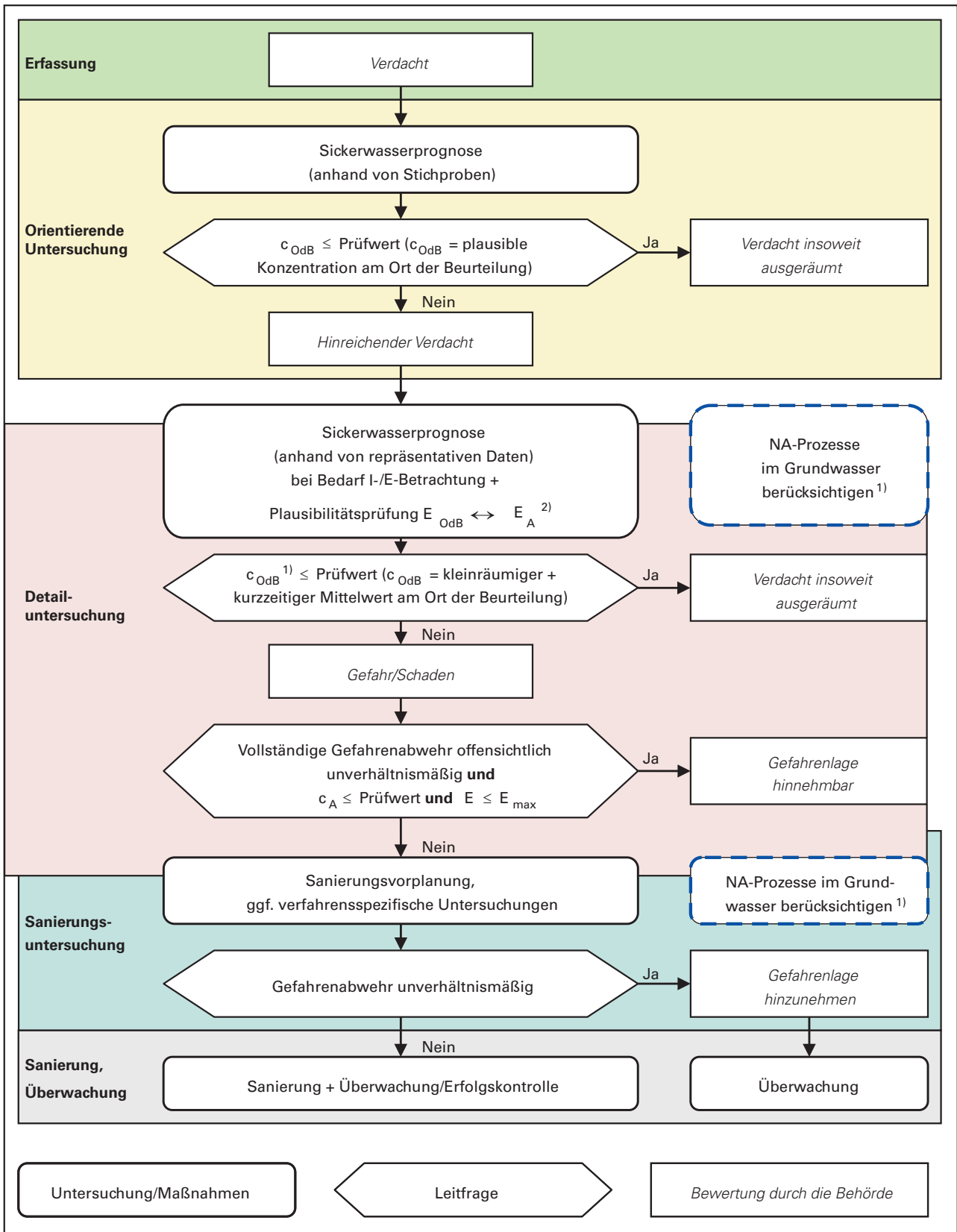
Vereinfacht ausgedrückt wird die Geringfügigkeitsschwelle vom Ort der Beurteilung nach BBodSchV in den direkten Grundwasserabstrom verlagert.

- Die tägliche Schadstofffracht  $E$  liegt unterhalb des  $E_{\max}$ -Werts (vgl. Anhang II). Dafür steht der Begriff „**Emissionsbegrenzung**“.

Ohne diese Begrenzung könnte es bei ergiebigen Grundwasserleitern mit hoher Verdünnungskapazität zu einer übermäßigen Schadstoffemission kommen.

**Hinweis:** Ob die Emissionsbegrenzung anhand der Fracht  $E_{\text{OdB}}$  oder  $E_A$  überprüft wird, ist eine Frage der Untersuchung bzw. Datenlage und der Standortverhältnisse. Deshalb wird hier nicht mehr zwischen  $E_{\text{OdB}}$  und  $E_A$  unterschieden.

Die Prüfung der beiden Bedingungen wird auch **Immissions-/Emissions-Betrachtung** (kurz: **I-/E-Betrachtung**) genannt. Abbildung 5 illustriert den Ort der Beurteilung und die Prüfkriterien bei der einzelfallbezogenen Mindestanforderung.



<sup>1)</sup> ggf. identifizieren + quantifizieren

<sup>2)</sup> wenn sowohl  $E_{\text{OdB}}$  als auch  $E_{\text{A}}$  bekannt ist

Abbildung 4: Stufenprogramm für die Altlastenbearbeitung (Standard)

Tabelle 1: Entscheidungsgrundlagen nach definierten Untersuchungsstufen

Stufe	Ort	Entscheidung		
<b>Erfassung</b>	Schadstoffherd	Verdacht (Anhaltspunkte?)		
<b>Orientierende Untersuchung OU</b> (Die Datenlage ist punktuell, d. h. der Schadstoffherd ist räumlich noch nicht eingegrenzt)	Ort der Beurteilung	Prüfwerteinhal- tung, derzeit und zukünftig ?	ja	Verdacht insoweit ausgeräumt
			nein	hinreichender Verdacht (konkrete Anhaltspunkte)
<b>Erläuterungen:</b> Wenn sich bei der OU keine Hinweise auf Prüfwertüberschreitungen <sup>1</sup> am Ort der Beurteilung ergeben haben, ist der Gefahrenverdacht insoweit ausgeräumt. Es besteht kein weiterer Handlungsbedarf. Wenn ein Prüfwert am Ort der Beurteilung überschritten wird oder eine Überschreitung zu erwarten ist, besteht der <b>hinreichende Verdacht</b> einer SBV/Altlast. Nach der OU muss allerdings noch nicht bekannt sein, wie groß der Bereich mit prognostizierten Prüfwertüberschreitungen ist und ob die Prüfwertüberschreitungen jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen. Dies ist Gegenstand der DU.				
<b>Detailuntersuchung DU</b> (Die Daten sind kleinräumig und kurzzeitig gemittelt, der Schadstoffherd ist räumlich eingegrenzt)	Ort der Beurteilung	Prüfwerteinhal- tung, derzeit und zukünftig ?	ja	Verdacht insoweit ausgeräumt
			nein (künftig)	Gefahr → SBV/Altlast
			nein (derzeit)	Gefahr + Schaden → SBV/Altlast
<b>Erläuterungen:</b> Für den Ort der Beurteilung sind die Schadstoffkonzentrationen abzuschätzen, welche sich bei einer kleinräumigen und kurzzeitigen Mittelwertbildung ergeben [25]. Eine Mittelwertbildung ist kleinräumig, wenn sie sich über maximal einige 100 m <sup>2</sup> sickerwasserbildende Geländeoberfläche erstreckt. Die zeitliche Mittelwertbildung kann sich auf ca. ein Jahr beziehen [21] <sup>2</sup> . (Tatbestandsseite) Sofern davon ausgegangen werden kann, dass der Prüfwert am Ort der Beurteilung bei einer derartigen Mittelwertbildung weder derzeit noch künftig überschritten wird, ist der Gefahrenverdacht insoweit <u>ausgeräumt</u> . Wenn Prüfwertüberschreitungen am Ort der Beurteilung nicht nur kleinräumig auftreten und wenn dies auch im Jahresdurchschnitt der Fall ist, gilt dies als Nachweis für eine Gefahrensituation und einen Schaden. Ist die Prüfwertüberschreitung am Ort der Beurteilung erst zu einem späteren Zeitpunkt zu erwarten, liegt bis dahin nur eine Gefahr vor <sup>3</sup> . In beiden Fällen (Gefahr oder Schaden) handelt es sich um den Tatbestand einer SBV/Altlast (§ 2 Abs. 3 und 5 BBodSchG), die in der Regel einer SU bedarf.				
	Ort der Beurteilung und Abstrom	Gefahrenlage „hinnehmbar“? (vollständige Gefahrenabwehr ist offensichtlich unverhältnismäßig <b>und</b> es bestehen auf Dauer nur lokal begrenzt erhöhte Schadstoffkonzentrationen (Prüfwert/GFS tiefengemittelt eingehalten) <b>und</b> nur geringe Schadstofffrachten ( $E < E_{max}$ )). Dies ist die „einzelfallbezogene Mindestanforderung“ (vgl. Abschnitt 1.4.2).(Rechtsfolgende Seite)		
<b>Sanierungsuntersuchung SU</b>	Ort der Beurteilung und direkter Abstrom	Gefahrenlage hinzunehmen oder Sanierungsbedarf? (Prüfung der Eignung und Angemessenheit von Sanierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der einzelfallbezogenen Mindestanforderung). Wenn auch die einzelfallbezogene Mindestanforderung mangels Verhältnismäßigkeit nicht erreicht werden kann, ist die Gefahrenlage „hinzunehmen“.		
<b>Sanierung, Überwachung</b>	Ort der Beurteilung und direkter Abstrom	Erreichen des Sanierungsziels und Einhalten der Kontrollziele.		



- <sup>1</sup> Die geogen bedingte Hintergrundsituation ist bei der Anwendung der Prüfwerte zu berücksichtigen (Anhang 2 BBodSchV).
- <sup>2</sup> Unabhängig von diesen Richtgrößen ist die Mittelwertbildung einzelfallspezifisch festzulegen. So kann es beispielsweise bei kleinen, aber starken Schadstoffbelastungen im Bereich unterirdischer Tankanlagen sachgerecht und verhältnismäßig sein, die Mittelwertbildung auf weniger als 100 m<sup>2</sup> Fläche zu beziehen.
- <sup>3</sup> Falls lediglich Grundwasseruntersuchungen aus dem Abstrom ohne Daten aus dem Schadstoffherd vorliegen, kann nicht beurteilt werden, ob eine Gefahr noch vorliegt (Fall I in Abbildung 1), sondern nur, ob bereits ein Schaden eingetreten ist.

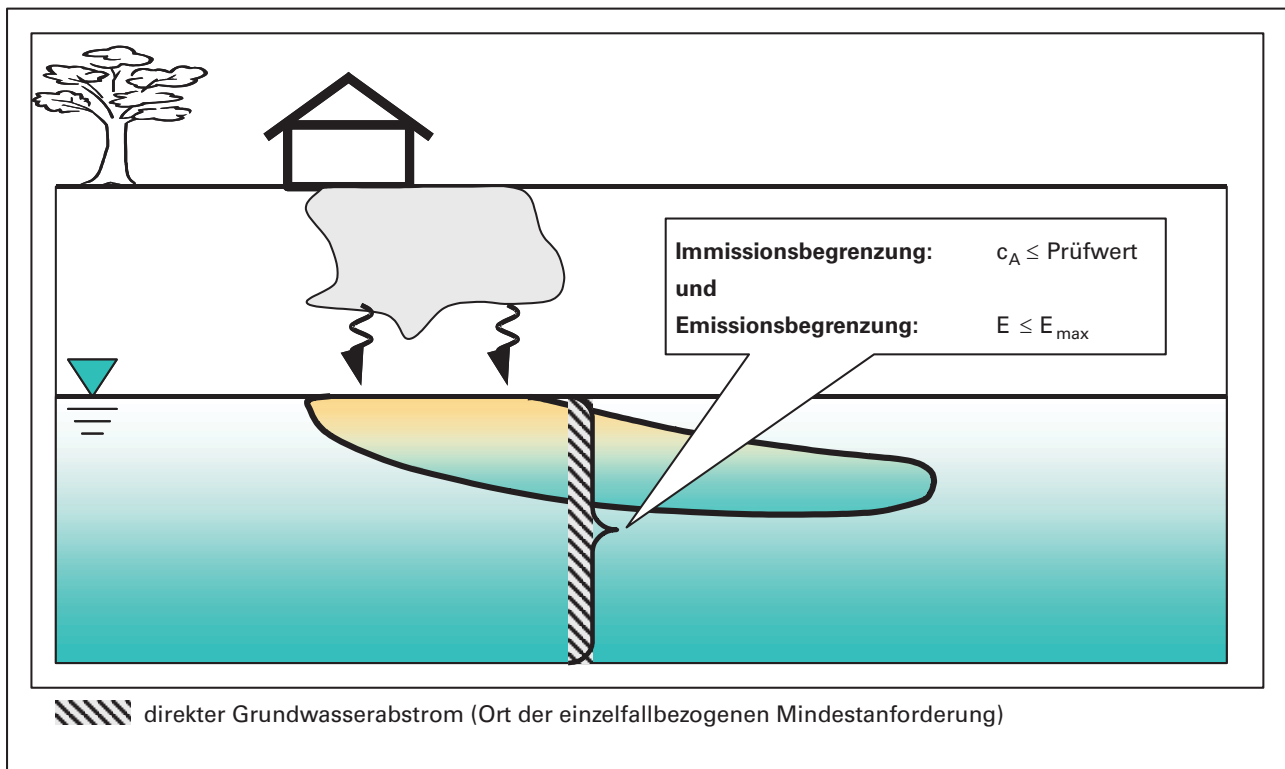


Abbildung 5: Ort der Beurteilung und Prüfkriterien bei der einzelfallspezifischen Mindestanforderung nach VwV OW (für Schadstoffherde im Grundwasser (Abbildung 3) gilt sinngemäß dasselbe)

LUBW

Die Prüfwerte sind in Anhang II dargestellt und - soweit bekannt - den Hintergrundwerten oder Geringfügigkeitsschwellen (GFS) gegenübergestellt.

Die Schadstoffgehalte  $c_A$  im direkten Grundwasserabstrom einer Schadstoffquelle (Immission) sind als durchschnittliche Konzentrationen über die Mächtigkeit des Grundwassers definiert. Bei großen Mächtigkeiten soll nur eine Tiefe von maximal 30 m zur Mittelung herangezogen werden. Wichtige Vorgaben zur Tiefenmittelung sind entsprechend Erläuterung Nr. 6 zur VwV OW „Tiefenmittelung über den direkt betroffenen Grundwasserleiter“ [28]:

1. Die Tiefenmittelung erstreckt sich über die Tiefe bis zur Aquifersohle bzw. bis zum nächsten Zwischenhorizont
2. Es sollte nur die Tiefe, die den Schutz vorhandener Grundwasserfassungen sicherstellt, zur Tiefenmittelung herangezogen werden.
3. Sind Aquiferabschnitte alleine nicht nutzungswürdig, zusammengefasst jedoch nutzungswürdig, so sind sie zu einem (nutzungswürdigen) Grundwasserleiter zusammenzufassen.
4. Die Tiefenmittelung erfolgt dort, wo die Schadstoff-

fe der Altlast in einen (ggf. aus mehreren Aquiferabschnitten zusammengefassten) Grundwasserleiter eintreten, der nutzungswürdig ist und somit zum nutzungswürdigen Grundwasservorkommen zählt.

Die Art und Weise der Tiefenmittelung (beispielsweise anhand von zuflussgewichteten Pumpproben aus geeigneten Messstellen oder rechnerisch anhand von horizontalen Messdaten) ist in der Untersuchungskonzeption festzulegen (vgl. Kapitel 3).

Die Tiefenmittelung bezieht sich auf die im Grundwasser gelösten Schadstoffe. Phasenkörper organischer Schadstoffe sind hiervon nicht berührt und müssen grundsätzlich einer gesonderten Bewertung unterzogen werden.

Größere Schadensbereiche sind bei der I-/E-Betrachtung in mehrere etwa gleich belastete Teilströme (Stromröhren) zu gliedern (Erläuterung Nr. 3 zur VwV OW).

Über geringere Anforderungen an den Schutz von nicht nutzungswürdigen Grundwasservorkommen entscheidet die zuständige Wasserbehörde.



Auf die Einhaltung der einzelfallbezogenen Mindestanforderung kann in besonderen Fällen verzichtet werden, beispielsweise bei:

1. äußerst gering ergebigen (nicht nutzbaren) Grundwasserleitern,
2. sehr schmalen Uferstreifen zwischen Schadstoffherd und Vorfluter oder
3. besonders kleinen Emissionen von weniger als 1 % des  $E_{\max}$ -Werts.

Für nicht nutzungswürdige Grundwasservorkommen reicht es aus, die Emissionsbegrenzung einzuhalten (Erläuterung Nr. 5 zur VwV OW)[28].

Auf die „Grundsätze des nachsorgenden Grundwasserschutzes bei punktuellen Schadstoffquellen“ der LABO-LAWA [27] wird verwiesen, die ebenfalls § 4 Abs. 7 BBodSchV konkretisieren. Damit werden die in Baden-Württemberg als Immissions-/Emissionsbetrachtung seit 1993 eingeführten ermessensleitenden Regelungen erstmals auch auf Bund-/Länderebene vom Ansatz her aufgegriffen. Zusätzlich wird darin für Schäden mit **abgeschlossenem** Stoffeintrag aus der **ungesättigten** Zone (Fallgruppen IV und V in Abbildung 1) ein ergänzendes Kriterium eingeführt, nämlich die Größe der Grundwasserverunreinigung bzw. die Schadstoffmenge. Danach kann eine Verunreinigung des Grundwassers (d. h. die Schadstoffquelle innerhalb des Grundwassers einschließlich Fahne) als „klein“ gelten, wenn die Schadstoffgehalte in 10.000 m<sup>3</sup> Wasser- und Gesteinsvolumen maximal beim 100-fachen der Geringfügigkeitsschwelle oder in 1.000.000 m<sup>3</sup> Wasser- und Gesteinsvolumen maximal bei der Geringfügigkeitsschwelle liegen. Zwischengrößen sind zu interpolieren. Dieses Kriterium kann ergänzend zur fachlichen Einzelfallabwägung über die Erforderlichkeit von weiteren Maßnahmen herangezogen werden.

Abschließend wird darauf hingewiesen, dass nach dem 01.03.1999 eingetretene schädliche Bodenveränderungen oder Altlasten zu **beseitigen** sind, soweit dies im Hinblick auf die Vorbelastung des Bodens verhältnismäßig ist (§ 4 Abs. 5 Satz1 BBodSchG).

## 1.5 SANIERUNGSUNTERSUCHUNG UND SANIERUNG

Die Sanierungsuntersuchung (SU) hat folgende Ziele:

- Feststellung, auf welche Art und mit welchem Aufwand die Prüfwerte an der Übergangszone von der ungesättigten zur gesättigten Bodenzone eingehalten werden können. (**Allgemeine** Mindestanforderung nach Abschnitt 1.4.2).
- Feststellung, auf welche Art und mit welchem Aufwand die Prüfwerte und die  $E_{\max}$ -Werte im Grundwasserabstrom eingehalten werden können. (**Einzelfallbezogene** Mindestanforderung“ nach Abschnitt 1.4.2).

Beide Untersuchungsziele sind in Abbildung 6 illustriert.

Je nach Fallgestaltung kann es für Entscheidungen über Sanierungsbedarf und -ziel erforderlich sein, die künftige Entwicklung der Schadstofffahne im Grundwasserabstrom zu prognostizieren.

Die Anforderungen an Sanierungsuntersuchungen sind in Anhang 3 der BBodSchV aufgeführt

## 1.6 BERÜCKSICHTIGUNG VON NATURAL ATTENUATION

### BEGRIFFE UND ABGRENZUNG

Mit dem Begriff Natural Attenuation (NA - Natürliche Schadstoffminderung) wird die Summe aller physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse umschrieben, die – ohne menschliches Zutun und unter Frachtreduktion – Schadstoffe im Boden und Grundwasser verringern. Frachtreduzierende Prozesse sind in der Regel von mikrobiologischer Natur; untergeordnet sind abiotische Prozesse. Sorptions- und Fällungsreaktionen sind weitere wichtige Prozesse der Frachtreduktion innerhalb der Schadstofffahne. Sie sind grundsätzlich reversibel und führen nicht zu einem Abbau der Schadstoffe, sondern nur zu einer Verlagerung aus dem Grundwasser in den Boden. Verdünnungs- bzw. Verflüchtigungseffekte werden nicht als NA-Prozesse betrachtet. Der kontaminierte Bereich des Aquifers dient in diesem Fall als Reaktionsraum, in dem die Abbaureaktionen ablaufen. Auch in der ungesättigten Zone sind Schadstoffminderungsprozesse möglich. Diese

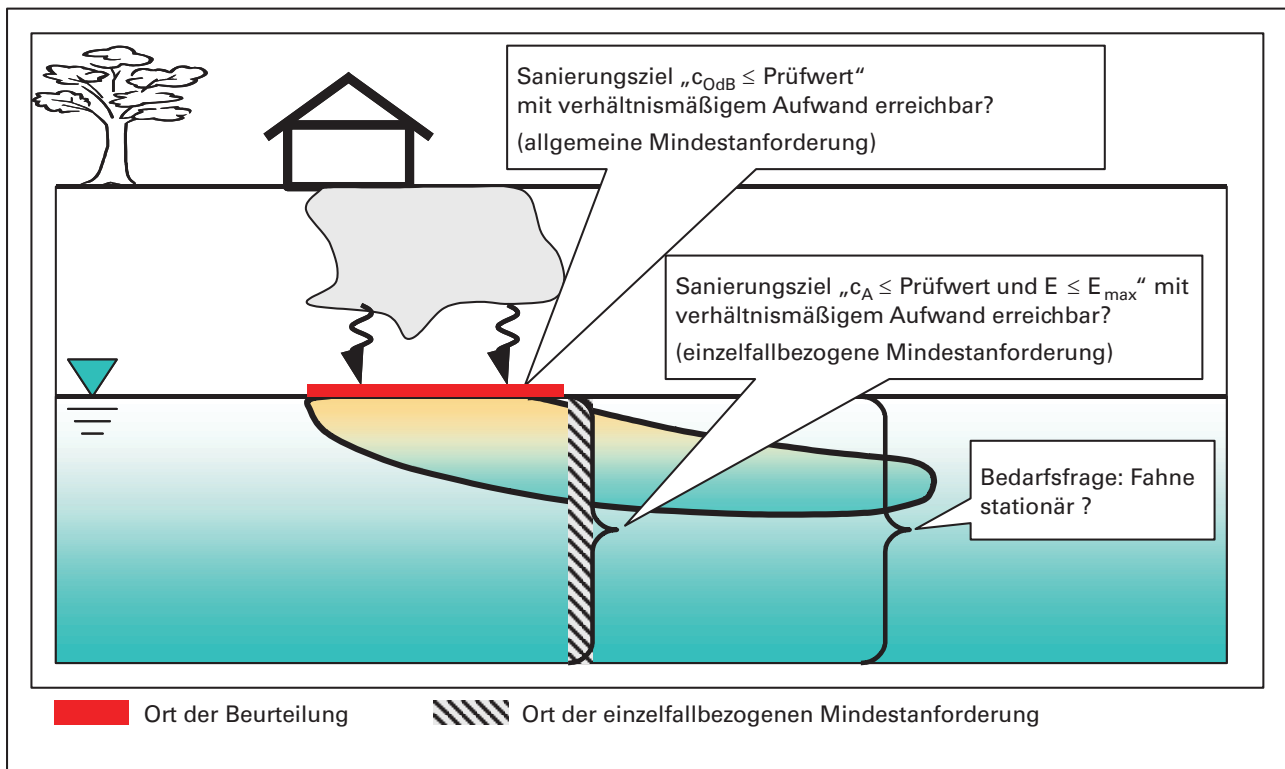


Abbildung 6: Abwägung von Sanierungszielen im Rahmen der Sanierungsuntersuchung (für Schadstoffherde im Grundwasser (Abbildung 3) gilt sinngemäß dasselbe)

sind Gegenstand der Sickerwasserprognose in der ungesättigten Zone (vgl. Abschnitt 1.2) und werden hier nicht weiter betrachtet.

Unter dem Begriff Monitored Natural Attenuation (MNA) ist der durch Überwachungsmaßnahmen kontrollierte NA-Prozess zu verstehen. Grundlage für die behördliche Entscheidung ist ein MNA-Konzept. Das Dokument weist das umfassende Verständnis und den erfolgreichen Ablauf von Schadstoffminderungsprozessen nach und enthält die Anforderungen zur Überwachung aller NA-Prozesse.

Enhanced Natural Attenuation (ENA) ist eine Sonderform der In-situ-Sanierungsmaßnahmen. Durch Einbringen von Substanzen in die Reaktionsräume von Schadstofffahnen werden die NA-Prozesse initiiert, stimuliert oder unterstützt.

#### GRUNDSÄTZLICHES ZUR BERÜCKSICHTIGUNG VON NA-PROZESSEN

1. NA-Prozesse, die als Option zur Gefahrenminderung/-abwehr an einem Standort toleriert werden sollen, sind zu identifizieren und zu überwachen (MNA).
2. MNA ist keine aktive Sanierungsmaßnahme im Sinne des BBodSchG. Die Sanierungsuntersuchung und die darin enthaltenen NA-Untersuchungen werden von der zuständigen Behörde oder der Bewertungskommission einer fachlichen Prüfung unterzogen. Bei einer vorliegenden Sanierungsnotwendigkeit wird sie eine Sanierungsvariante empfehlen. NA-Prozesse werden somit nur als eine Alternative oder Ergänzung zu einer aktiven Sanierung toleriert.
3. Voraussetzung für die Akzeptanz eines MNA-Konzepts ist neben fachlichen Anforderungen auch die Unverhältnismäßigkeit einer herkömmlichen Sanierungsmaßnahme.
4. Die grundsätzliche Sanierungsnotwendigkeit wird durch die Akzeptanz eines MNA-Konzepts nicht in Frage gestellt.
5. Für ein einzelfallbezogenes MNA-Konzept sind folgende Nachweise notwendig:
  - a. Die Schadstofffahne verhält sich quasi stationär.
  - b. Die prognostizierten Abläufe der NA-Prozesse sind langfristig stabil und nicht reversibel.
  - c. Eine Gefährdungslage für noch nicht beeinträchtigtes Grundwasser und weitere Schutzgüter existiert nicht.

- d. Eine alternative Handlungsoption (in der Regel Sanierungsmaßnahme) liegt bereit, falls die NA-Prozesse am Standort nicht mehr im erforderlichen Umfang zu beobachten sind.
6. Auf die Akzeptanz eines MNA-Konzepts, als Alternative zu einer Sanierungsmaßnahme, besteht kein Anspruch. Sie ist immer eine behördliche Einzelfallentscheidung.

#### AUFBAU UND SYSTEMATIK DES MNA-KONZEPTS

Die Untersuchung der NA-Prozesse ist stufenweise aufgebaut und wird im Rahmen der systematischen Altlastenbearbeitung ergänzend vertieft. Die Untersuchungstiefe ist abhängig vom jeweiligen Kenntnisstand. In der systematischen Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg werden NA-Prozesse in der Regel wie folgt berücksichtigt:

#### ERFASSUNG:

Bei der Erfassung von altlastverdächtigen Flächen werden schadstoffmindernde Prozesse in Untergrund und Grundwasser nicht betrachtet.

#### ORIENTIERENDE UNTERSUCHUNG (OU):

Die Feststellung schadstoffmindernder Prozesse ist nicht Gegenstand der OU. Auch wenn in der OU eine Grundwasseruntersuchung erfolgt, beschränkt sich die Fragestellung auf die Feststellung des hinreichenden Verdachts oder die Ausräumung des Verdachts einer SBV oder Altlast. Daher werden weiterführende Ergebnisse, die einen NA-Prozess anzeigen, in der Regel nicht vorliegen.

#### DETAILUNTERSUCHUNG (DU):

Nur in Einzelfällen wird im Rahmen der DU eine Fahnenuntersuchung durchgeführt. Untersuchungen des Grundwassers im Schadstoffherd oder unmittelbaren Abstrom (vgl. Abschnitt 2.3) finden dagegen regelmäßig statt. Hieraus können sich jedoch schon allgemeine Hinweise auf mögliche NA-Prozesse ergeben. So deuten Abbauprodukte und eine Reduktion von Nitrat im Grundwasserleiter auf mikrobiologische Abbaureaktionen hin, ebenso bestimmte Redoxpotenziale, die relativ einfach gemessen werden

können. Wenn sich im konkreten Fall schon in einer frühen Bearbeitungsphase Sanierungsbedarf abzeichnet, kann es vorteilhaft sein, an den Grundwasserproben der DU zusätzlich Messparameter zu bestimmen, die für eine erste Abschätzung der Anwendbarkeit von NA und die Entwicklung von Folgeuntersuchungsprogrammen zweckdienlich sind.

#### SANIERUNGSUNTERSUCHUNG (SU):

Erst im Rahmen der SU werden gezielt spezielle NA-Untersuchungen durchgeführt, wenn MNA als mögliche Alternative zu einer aktiven Sanierungsmaßnahme konkretisiert wird (Entscheidungsprozess). Oft erfolgen die relativ aufwändigen Spezialuntersuchungen zu NA-Prozessen in einer ergänzenden Stufe der SU.

## 1.7 Behördliche Überwachung und Eigenkontrolle

Die behördliche Überwachung im Rahmen der Grundwasseruntersuchung bezieht sich insbesondere auf die

- maßnahmenbegleitende Überwachung während der Untersuchung und Sanierung, einschließlich der Langzeitüberwachung von Sicherungsmaßnahmen, z. B. Messstellenbau und Grundwassermonitoring,
- Kontrolle der Wirksamkeit und Nachhaltigkeit von Maßnahmen (Erfolgskontrolle).

Nach § 15 Abs. 1 BBodSchG unterliegen Altlasten und altlastverdächtige Flächen soweit erforderlich der Überwachung durch die zuständige Behörde. § 15 Abs. 2 BBodSchG ermächtigt die zuständige Behörde, dem Pflichtigen Eigenkontrollmaßnahmen aufzuerlegen. Mit § 4 LBodSchAG werden die Anforderungen des § 15 BBodSchG auch auf schädliche Bodenveränderungen (SBV) übertragen. Eigenkontrollmaßnahmen sind beispielsweise in folgenden Fällen möglich:

- Kontrolle der Immissions- und Emissionsbegrenzung im Grundwasser, v. a. wenn Schäden aus Verhältnismäßigkeitserwägungen hingenommen werden,
- Kontrolle des Sanierungserfolgs und Nachsorge nach Durchführung von Dekontaminations- und Sicherungsmaßnahmen.

Der Leitfaden „Fachtechnische Kontrolle von altlastverdächtigen Flächen, Altlasten und Schadensfällen“ [36] liefert weitere technische Hinweise zur Überwachung der Grundwasserbeschaffenheit, beispielsweise zur Auswahl oder Platzierung von Grundwassermessstellen, zur Festlegung eines physikalisch-chemischen Kontrollprogramms oder zur Bestimmung von Messintervallen und Anforderungen an die Probennahme.

# 2 Konzeption

## 2.1 ALLGEMEINES

Die Untersuchungsstrategie beschreibt die prinzipielle Vorgehensweise zur Erreichung eines Untersuchungsziels. Das Ziel ist die Schaffung der erforderlichen Daten als Grundlage für rechtliche und fachliche Entscheidungen. Für häufige Fragestellungen wurden in Kapitel 1 Leitfragen und Prüfkriterien aus der BBodSchV und der VwV OW abgeleitet. Die Leitfragen und Kriterien können meist als Ja/Nein-Entscheidungen formuliert werden. Primäres Ziel von Untersuchungen ist also nicht die bestmögliche Beschreibung der Standortsituation, sondern die Gewinnung geeigneter Daten zur Entscheidung konkreter Fragestellungen. Dies kann sich mindernd auf die Untersuchungskosten auswirken.

Am Beginn der Überlegungen für eine Untersuchungsstrategie steht das konzeptionelle Standortmodell. Es beschreibt die hydrogeologische Situation und den mutmaßlichen Transfer von Schadstoffen aus dem Schadstoffherd zum Grundwasser und bedrohten Nutzungen. Mit Standortuntersuchungen wird es später verfeinert, widerlegt oder bestätigt, sodass daraus Schlussfolgerungen für die nachfolgende Bearbeitungsstufe gezogen werden können. In Kap. 2.2 wird auf das konzeptionelle Standortmodell näher eingegangen.

Zur Erreichung des Untersuchungsziels können verschiedene Untersuchungsstrategien mit Einsatz unterschiedlichster Untersuchungsmethoden geeignet sein. Für die konkrete Fragestellung ist beispielsweise zu klären, ob zu ihrer Lösung die Bestimmung von Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser tiefengemittelt, zuflussgewichtet oder tiefenorientiert erfolgen muss. Danach richten sich Art und Ausbau von Grundwassermessstellen sowie die Art und Häufigkeit von Probennahmen.

Häufig gibt es mehrere Alternativen zur Gewinnung einer bestimmten Information oder Entscheidung einer konkreten Fragestellung. Beispiele sind:

- Die Schadstoffkonzentration am Ort der Beurteilung ( $c_{\text{odB}}$ ) kann anhand von Konzentrationen aus dem

Schadstoffherd abgeschätzt werden (Sickerwasserprognose, die nicht Gegenstand des Leitfadens ist) oder anhand von gemessenen Konzentrationen aus dem Grundwasserabstrom zurückgerechnet werden. Sofern nach sorgfältiger Prüfung der Umstände davon ausgegangen werden kann, dass der Schadstoffeintrag in das Grundwasser schon erfolgt ist, liefern Grundwasseruntersuchungen zur indirekten Emissionsermittlung über Rückrechnungen oftmals belastbarere Ergebnisse als direkte Emissionsermittlungen aus dem Schadstoffherd. Dies begründet sich unter anderem durch kleinräumige Heterogenitäten der Schadstoffverteilung und Untergrundbeschaffenheit, die im Schadstoffherd häufig ausgeprägter als in Porengrundwasserleitern sind und die Bestimmung repräsentativer Daten erschweren können.

- Materialproben und Daten des Untergrunds können entweder mit großkalibrigen Dauermessstellen oder mit kleinkalibrigen Direct-Push-Methoden gewonnen werden.
- Der durchflusswirksame Hohlraumanteil kann entweder mit Markierungsversuchen gemessen, aus Materialkennwerten abgeschätzt oder aus vergleichbaren Situationen übernommen werden.
- Eine bestimmte Erfassungsbreite in einem Grundwasserabstrom kann entweder durch einige wenige (großkalibrige) Messstellen und großer Pumprate oder mit einer Vielzahl (kleinkalibriger) Messstellen mit geringer Pumprate realisiert werden.

Die unterschiedlichen Bestimmungsmethoden für ein und dieselbe Messgröße weisen in der Regel erhebliche Unterschiede in Zeitaufwand, Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Kosten auf, was bei den weiteren Überlegungen zur Untersuchungsstrategie zu berücksichtigen ist.

Die wesentlichen Zusammenhänge zwischen Fragestellung, Konzeption und Methodik als Grundlage einer Untersuchungsstrategie sind in Tabelle 2 aufgezeigt.

Die Auswahl einer geeigneten Untersuchungsstrategie erfolgt zweckmäßigerweise durch Vergleich alternativer Untersuchungsstrategien unter Berücksichtigung von Gesichtspunkten, wie:

- Erreichbarkeit des Untersuchungsziels,
- erforderliche Datenqualität und Datenmenge,
- Schadensbild und Untergrundsituation,
- Erfahrungen zum Schadensbild an ähnlichen Fällen,
- Zeitbedarf und Zeitvorgaben,
- Realisierbarkeit, örtliche Zugänglichkeit,
- Verwendungsfähigkeit von Messstellen bei späteren Bearbeitungsstufen,
- Arbeits- und Gesundheitsschutz und
- Kostenbedarf.

Wenn absehbar ist, dass weitere Bearbeitungsstufen am Standort durchzuführen sind, kann es sinnvoll sein, dies bei der Entwicklung einer Untersuchungskonzeption zu berücksichtigen und beispielsweise Materialproben als Rückstellproben für gegebenenfalls erforderliche Messungen zu nehmen oder erforderliche Messdaten im Vorgriff zu bestimmen, um Bearbeitungszeit oder mehrmaliges Anfahren von Probennahmegerät und -mannschaft zu sparen.

Die konzeptionellen und methodischen Überlegungen der Untersuchungsstrategie münden unter Berücksichtigung der Anforderungen zur Qualitätssicherung in den Untersuchungsplan. Der Untersuchungsplan enthält alle erforderlichen Beschreibungen und Arbeitsanweisungen zur Erstellung der Messstellen, zur Entnahme und Behandlung der Proben, zur Arbeitsplanung, zum Arbeitsschutz sowie zur Qualitätssicherung. Auf Grundlage des Untersuchungsplans erfolgt die eigentliche Untersuchung. Bei der realen Ausführung des Untersuchungsplans können Abweichungen im Einzelfall unumgänglich sein. Sie sind in jedem Fall zu dokumentieren und zu begründen.

Bei Planung und Umsetzung von Untersuchungsstrategie und -plan kann in folgenden Stufen vorgegangen werden:

- Stufe 1: Identifizierung der zu klärenden Fragestellung(en)
- Stufe 2: Entwicklung des konzeptionellen Standortmodells
- Stufe 3: Entwicklung eines Untersuchungskonzepts,

Stufe 4: Entwicklung des Untersuchungsplans und Qualitätssicherungsplans

Stufe 5: Untersuchungsvorbereitung und -durchführung

Stufe 6: Auswertung, Bewertung und Dokumentation

Beispiele für einzelne Arbeitsschritte in diesen Bearbeitungsstufen sind in Anhang V zusammengestellt.

#### **VERHÄLTNISSMÄSSIGKEIT**

Untersuchungen und Sanierungen müssen verhältnismäßig sein. Deshalb sollte der Untersuchungsaufwand gegen den Zugewinn an Kenntnissen abgewogen werden. Wenn ein hoher Untersuchungsaufwand nur einen geringen Zuwachs an Entscheidungssicherheit bietet, muss gegebenenfalls auf der Basis ungünstiger Annahmen entschieden werden.

Tabelle 2: Zusammenhänge zwischen Fragestellung, Konzeption und Methodik als Grundlage einer Untersuchungsstrategie

Stufe	Fragestellung (Kapitel 2)	Fachliche Entscheidungsgrundlage	Konzeption (Kapitel 3)	Methodik und Qualitätssicherung (Kapitel 4)
	Rechtliche Frage (nach Abschluss der Untersuchung)		Untersuchungskonzept (Varianten je nach konzeptionellem Standortmodell)	Bestimmung von hydrogeologischen und hydrochemischen Parametern (Beispiele)
OU	Verdacht insoweit ausgeräumt oder hinreichender Verdacht?	Schadstoffkonzentration am OdB (Übergangsbereich ungesättigte in die gesättigte Zone oder Kontaktgrundwasser) (Die Daten sind punktuell, der Schadstoffherd ist nicht eingegrenzt)	Untersuchung am OdB (Messung von $c_{\text{OdB}}$ )  Untersuchung im direkten Grundwasserabstrom mit Sickerwasserprognose (Rückrechnung auf $c_{\text{OdB}}$ anhand von $c_A$ , $Q_{\text{S,gr}}$ , $Q_z$ , $c_z$ )	Aktenauswertung (Hydrogeologische Kartierung, regionale Erfahrungen u. a.) Untersuchung von Proben aus GWM mit kleiner Filterstrecke oder aus anderen Aufschlüssenarten  Informationsquellen: wie oben (Planungsphase). Untersuchung von Proben aus teil- oder vollfiltrierten GWM Bestimmung hydraulischer Parameter
DU	Verdacht insoweit ausgeräumt oder SBV/Altlast (hinreichender Verdacht bestätigt)?  Bei SBV/Altlasten: Gefahrenlage hinnehmbar oder weiterer Handlungsbedarf?	Schadstoffkonzentration am OdB (Die Daten sind kleinräumig und kurzzeitig gemittelt, der Schadstoffherd ist eingegrenzt)  Schadstoffkonzentration und Schadstofffracht im direkten Grundwasserabstrom, tiefengemittelt  Lage, Schadstoffkonzentration und räumliche Ausdehnung des Schadstoffherds (Quellterm)  Schadstofffrahme (Länge, Ausdehnung und Entwicklung) und betroffene Nutzungen	wie OU  Untersuchung am OdB (Messung von $c_{\text{OdB}}$ ) mit anschließender Berechnung von $c_A$ und $E_A$ anhand von $Q_A$ , $Q_{\text{S,gr}}$ , $Q_z$ , $c_z$ (= direkte Emissionsermittlung)  Untersuchung im direkten Grundwasserabstrom zur Bestimmung von $c_A$ und $E_A$ mit Berücksichtigung von $Q_A$ , $Q_{\text{S,gr}}$ , $Q_z$ , $c_z$ (= indirekte Emissionsermittlung)  Untersuchung im Schadstoffherd (Wechselbereich und gesättigte Zone) (Messung von $c_{\text{SH}}$ )  Prognose nach Erfahrungswerten (Abschätzung von $c_{\text{SH}}$ )  Untersuchung im weiteren Grundwasserabstrom zur Bestimmung von $c_{\text{Fahme}}$ und $E_{\text{Fahme}}$  Prognose nach Erfahrungswerten (Abschätzung von $c_{\text{Fahme}}$ und $E_{\text{Fahme}}$ )	wie OU  Aktenauswertung (Hydrogeologische Kartierung, regionale Erfahrungen u. a.) Untersuchung von Proben aus GWM mit kleiner Filterstrecke oder aus anderen Aufschlüssenarten  Untersuchung von Proben aus teil- oder vollfiltrierten GWM, vorzugsweise durch Immissionspumpversuche Bestimmung hydraulischer Parameter  Untersuchung von Proben aus GWM mit kleiner Filterstrecke oder aus anderen Aufschlüssenarten  Berücksichtigung der Stoffeigenschaften und der Schadstoffkonzentrationen am OdB  Untersuchung von Proben aus teil- oder vollfiltrierten GWM oder aus anderen Aufschlüssenarten Bestimmung hydraulischer Parameter  Berücksichtigung der chemisch-physikalischen Stoffeigenschaften, des Quellterms und der Schadstoffkonzentrationen am OdB Bestimmung hydraulischer Parameter  siehe oben (Quellterm)
SU	Störidentifizierung  Gefahrenlage hinzunehmen oder Sanierungsbedarf?	Lage des Schadstoffherds  Eignung und Angemessenheit von Sanierungsmaßnahmen (vollständige oder eingeschränkte Gefahrenabwehr)  Schadstofffrahme (Länge, Ausdehnung und Entwicklung)	siehe oben (Quellterm)  Sanierungsvorplanung (Untersuchung der Kosten-Wirksamkeit)  wie DU, jedoch bezogen auf NA	entfällt  Untersuchung und Datengrundlagen wie DU, jedoch bezogen auf NA
Kontrolle	wie DU  Gefahr beseitigt?	wie DU  wie DU (unter Berücksichtigung des Sanierungsverfahrens)	wie DU (am OdB, im direkten oder weiteren Grundwasserabstrom)  wie DU (unter Berücksichtigung des Sanierungsverfahrens)	Untersuchung und Datengrundlagen wie DU  Untersuchung und Datengrundlagen wie DU

## 2.2 KONZEPTIONELLES STANDORT-MODELL

Voraussetzung für die Planung, Durchführung und Auswertung der Grundwassererkundung ist ein grundsätzliches Modellverständnis vom Schadstoffherd und den Ausbreitungswegen der Schadstoffe hin zu möglicherweise betroffenen Schutzgütern (konzeptionelles Standortmodell). Dazu sind Grundkenntnisse zur Hydrogeologie, Standorthistorie, möglichen Verursachung einer Schadstoffverunreinigung und zu Transportprozessen notwendig, die häufig aus Kartenwerken, Literatur, früheren Untersuchungen oder aus ähnlichen Fällen abgeleitet werden können. Das konzeptionelle Standortmodell besteht aus den Teilen:

- Hydrogeologisches Arbeitsmodell (Abschnitt 2.2.1) und
- Schadstoffausbreitung (Abschnitt 2.2.2).

### 2.2.1 HYDROGEOLOGISCHES ARBEITS-MODELL

In das hydrogeologische Arbeitsmodell gehen Kenntnisse oder Annahmen zu folgenden Aspekten ein:

- Geometrie und Lage der Schadstoffquelle
- hydrogeologische Gegebenheiten im Untersuchungsraum, wie:
  - Schichtaufbau und Schichtlagerung
  - Aquifertyp, Aquifergeometrie
  - Grundwasserneubildung
  - Grundwasserfließrichtung
  - hydraulische Kennwerte und Volumenströme
  - geogene Grundwasserbeschaffenheit
  - Aufbau der ungesättigten Zone.

Auf den Leitfaden „Hydrogeologische Modelle“ [20] wird verwiesen.

Die Überlegungen und Annahmen zum hydrogeologischen Modell sowie alle gesicherten Grundlagen einschließlich ihrer Quellen sind zu dokumentieren. Auf die Checkliste zur Dokumentation des hydrogeologischen Arbeitsmodells in Anhang IV wird verwiesen.

### 2.2.2 SCHADSTOFFAUSBREITUNG

Aus den Ergebnissen von Dokumentationen, Untersuchungen und Ermittlungen am Standort und seiner Umgebung sowie Erfahrungen aus ähnlich gelagerten Fällen sind Möglichkeiten der Schadstoffausbreitung zu eventuell betroffenen Schutzgütern abzuleiten. Dabei sind Aspekte wie Sickerwasserprognose, Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser (Immissionen) sowie die Emissionen in das Grundwasser für die bewertungsrelevanten Schadstoffe zu prüfen.

Als Ergebnis dieser Betrachtung sind die handlungsentcheidenden Mess- bzw. Berechnungsgrößen zu benennen. Ihre räumliche Lage an einem schematisierten Standort veranschaulichen Abbildung 7 (Schadstoffherd in der ungesättigten Zone) und Abbildung 8 (Schadstoffherd im Grundwasser).

In der Praxis treten häufig Kombinationen beider Fallgestaltungen auf, wenn der Schadstoffherd nur teilweise oberhalb des Grundwassers liegt. Dann sind beide Betrachtungsweisen zur Ermittlung der Emission  $E_{\text{OdB}}$  erforderlich. Ohne Lokalisierung des Schadstoffherds, d. h. ausschließlich mit Rückrechnungen aus dem Grundwasserabstrom, ist es allerdings nicht möglich, die Frachtanteile aus der ungesättigten und aus der gesättigten Zone rechnerisch voneinander zu trennen.

Die Dokumentation der ermittelten Mess- und Berechnungsgrößen erfolgt in einer tabellarischen Übersicht gemeinsam mit den Kennwerten des hydrogeologischen Arbeitsmodells gemäß Tabelle 3. Dieses Datenblatt steht im Altlasten-Fachinformationssystem AlfaWeb [28] zum Download bereit. Es fasst sämtliche Eingangsparameter (Schätzwerte sowie gemessene geometrische, hydraulische oder hydrogeologische Parameter und alle Schadstoffkonzentrationen) zusammen. Es ist die Angabe von Wertebereichen für die Eingangsparameter (Spalte „min.“ und Spalte „max.“) vorgesehen. Eine Wertung der Intervallgrenzen kann über die Spalte „plausibel“ vorgenommen werden. Mathematische Verknüpfungen der Zellen führen





Tabelle 3: Modelldaten Hydrogeologie und Schadstoffausbreitung

Parameter	Formel, Bemerkung	min.	plausibel	max.
<b>Geometrie</b>				
$A_{SiWa}$	[m <sup>2</sup> ]			
$B_A$	[m]			
$h_{GW}$	[m] (u. U. maßgebliches $h_{GW}$ )			
$A_A$	[m <sup>2</sup> ] $B_A \cdot h_{GW}$			
$h_{KGW}$	[m]			
$A_{KGW}$	[m <sup>2</sup> ] $B_A \cdot h_{KGW}$			
<b>Hydraulik</b>				
Fließen	[°]			
T	[m <sup>2</sup> /s]			
$k_f$	[m/s]			
l	[-]			
$n_f$	[-]			
a	[m] Zylinderformel			
a	[m] Bear & Jacobs			
$Q_{PV}$	[m <sup>3</sup> /s]			
$t_{PV}$	[h]			
<b>Volumenströme</b>				
$Q_A$	[m <sup>3</sup> /d] $k_f \cdot A_A \cdot l \cdot 86\,400$			
$Q_{SiWa}$	[m <sup>3</sup> /d] $(A_{SiWa} \cdot GWN) / 365\,000$			
$Q_{KGW}$	[m <sup>3</sup> /d] $k_f \cdot A_{KGW} \cdot l \cdot 86\,400$			
$Q_{SH}$	[m <sup>3</sup> /d] $Q_{SiWa} + Q_{KGW}$			
$Q_{ZT}$	[m <sup>3</sup> /d] $Q_A - Q_{SH}$			
GWN	[mm/a]			
<b>Konzentrationen und Frachten für: ... <math>E_{max}</math>-Wert: ... [g/d] Prüfwert: ... [µg/l]</b>				
$c_z$	[µg/l]			
$c_{SH}$	[µg/l] $c_{SiWa, SH}$ oder $c_{KGW, SH}$			
AF	[-] $c_{SH} / c_{OdB}$ (Abminderung)			
$c_{OdB}$	[µg/l] $c_{SiWa, OdB}$ oder $c_{KGW, OdB}$			
$c^*_{OdB}$	[µg/l] $E_A / (Q_{SH} \cdot 10^{-3})$			
$c_A$	[µg/l] (direkte Immission)			
$c^*_A$	[µg/l] $(Q_{SH} \cdot c_{OdB} + Q_{ZT} \cdot c_z) / Q_A$ (indir. Immission)			
$E_{OdB}$	[g/d] $Q_{SH} \cdot c_{OdB} \cdot 10^{-3}$ (direkte Emission)			
$E_A$	[g/d] $(Q_A \cdot c_A - Q_{ZT} \cdot c_z) \cdot 10^{-3}$ (indir. Emission)			
$E_{plausibel}$	[g/d]			
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 20%; background-color: #ffffcc; padding: 2px;">Messung von Konzentrationen im Schadstoffherd oder am OdB</div> <div style="width: 20%; background-color: #e0ffff; padding: 2px;">Messung von Konzentrationen im direkten Grundwasserabstrom</div> </div>				

c\* sind Schadstoffkonzentrationen, die nicht gemessen, sondern unter Berücksichtigung der Verdünnung im Grundwasser berechnet wurden.

Erläuterungen zur Tabelle 3

**Fall 1: Messung am OdB und Grundwasseruntersuchung im direkten Abstrom**

Parameter	Formel, Bemerkung	
$c_{\text{OdB}}$	[µg/l]	<b>Messwert</b>
$c_{\text{OdB}}^*$	[µg/l]	$E_A / (Q_{\text{SH}} \cdot 10^{-3})$
$c_A$	[µg/l]	<b>Messwert</b>
$c_A^*$	[µg/l]	$(Q_{\text{SH}} \cdot c_{\text{OdB}} + Q_{\text{ZT}} \cdot c_Z) / Q_A$
$E_{\text{OdB}}$	[g/d]	$Q_{\text{SH}} \cdot c_{\text{OdB}} \cdot 10^{-3}$
$E_A$	[g/d]	$(Q_A \cdot c_A - Q_{\text{ZT}} \cdot c_Z) \cdot 10^{-3}$
Messung von Konzentrationen im Schadstoffherd oder am OdB		
Messung von Konzentrationen im direkten Grundwasserabstrom		

Es liegen Messwerte für  $c_{\text{OdB}}$  und  $c_A$  vor. Somit werden  $c_{\text{OdB}}^*$ ,  $c_A^*$ ,  $E_{\text{OdB}}$  und  $E_A$  berechnet und einer Plausibilitätskontrolle (Abgleich zwischen direkter und indirekter Emissionsermittlung) unterzogen.

**Fall 2: Messung im Schadstoffherd und Grundwasseruntersuchung im Abstrom**

Parameter	Formel, Bemerkung	
$c_{\text{SH}}$	[µg/l]	<b>Messwert</b>
$c_{\text{OdB}}$	[µg/l]	Prognosewert
$c_{\text{OdB}}^*$	[µg/l]	$E_A / (Q_{\text{SH}} \cdot 10^{-3})$
$c_A$	[µg/l]	<b>Messwert</b>
$c_A^*$	[µg/l]	$(Q_{\text{SH}} \cdot c_{\text{OdB}} + Q_{\text{ZT}} \cdot c_Z) / Q_A$
$E_{\text{OdB}}$	[g/d]	$Q_{\text{SH}} \cdot c_{\text{OdB}} \cdot 10^{-3}$
$E_A$	[g/d]	$(Q_A \cdot c_A - Q_{\text{ZT}} \cdot c_Z) \cdot 10^{-3}$
Messung von Konzentrationen im Schadstoffherd oder am OdB		
Messung von Konzentrationen im direkten Grundwasserabstrom		

Es liegen Messwerte für  $c_{\text{SH}}$  und  $c_A$  vor. Im Unterschied zum Fall 1 liegt  $c_{\text{OdB}}$  nicht als Messwert vor, sondern wird auf Grundlage von  $c_{\text{SH}}$  abgeschätzt (Sickerwasserprognose). Ansonsten bestehen keine Unterschiede zum Fall 1.

**Fall 3: Messung im Schadstoffherd**

Parameter	Formel, Bemerkung	
$c_{\text{SH}}$	[µg/l]	<b>Messwert</b>
$c_{\text{OdB}}$	[µg/l]	Prognosewert
$c_A^*$	[µg/l]	$(Q_{\text{SH}} \cdot c_{\text{OdB}} + Q_{\text{ZT}} \cdot c_Z) / Q_A$
$E_{\text{OdB}}$	[g/d]	$Q_{\text{SH}} \cdot c_{\text{OdB}} \cdot 10^{-3}$
Messung von Konzentrationen im Schadstoffherd oder am OdB		

Es liegen Messwerte für  $c_{\text{SH}}$  vor,  $c_{\text{OdB}}$  wird abgeschätzt (Sickerwasserprognose). Anschließend werden  $E_{\text{OdB}}$  und  $c_A^*$  berechnet. Eine Plausibilitätskontrolle zwischen direkter und indirekter Emissionsermittlung kann nicht erfolgen.

**Fall 4: Messung im direkten Abstrom**

Parameter	Formel, Bemerkung	
$c_{\text{OdB}}^*$	[µg/l]	$E_A / (Q_{\text{SH}} \cdot 10^{-3})$
$c_A$	[µg/l]	<b>Messwert</b>
$E_A$	[g/d]	$(Q_A \cdot c_A - Q_{\text{ZT}} \cdot c_Z) \cdot 10^{-3}$
Messung von Konzentrationen im direkten Grundwasserabstrom		

Es liegen Messwerte für  $c_A$  vor.  $E_A$  und  $c_{\text{OdB}}^*$  (Sickerwasserprognose) werden berechnet.





Grundwasser so nahe wie möglich beim Schadstoffherd zu entnehmen. Wegen mangelnder Zugänglichkeit kann es jedoch nötig sein, Messstellen weiter in den Abstrom zu verschieben. Das kann dazu führen, dass die tatsächliche Immission und Emission von Schadstoffen infolge natürlicher Minderung oder Verdünnung nicht erkannt wird. Aus diesem Grund ist der **direkte Grundwasserabstrom** definiert als der abstromige Rand des Schadstoffherds (von oben betrachtet), an dem noch kein signifikanter Einfluss von NA-Prozessen im Aquifer auf die Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser besteht. Aus Gründen der Datenqualität und Praktikabilität ist es nötig, eine maximale Entfernung zwischen den Grundwasseraufschlüssen und der Schadstoffquelle zu definieren. Im Sinne einer Konvention wird hierfür empfohlen: Der Abstand zwischen Grundwassermessstellen und abstromigem Rand des Schadstoffherds sollte im Bereich des einfachen Flurabstands liegen, jedoch 30 bis 50 m nicht übersteigen.

Folgende Faktoren sprechen für eine möglichst nahe am Schadstoffherd liegende Abstrombeprobung [14]:

- große Grundwasser-Durchflussmenge
- große Durchlässigkeit des Grundwasserleiters
- gut adsorbierbare Stoffe oder sorptionsfähiger Untergrund
- geringe Breite der Schadstoffquelle quer zur Grundwasserfließrichtung, geringe Länge der Schadstoffquelle längs der Fließrichtung und geringer Grundwasserflurabstand.

### 2.3.2.2 FESTLEGUNG DER ABSTROMBREITE

Durch entsprechende Festlegung der räumlichen Lage der Messstellen ist sicherzustellen, dass der Ursprung einer Schadstofffahne in seiner räumlichen Lage hinreichend

sicher erkannt wird. Die Wahrscheinlichkeit eines „Fahnentreffers“ ist bei Grundwasseraufschlüssen umso höher,

- je besser die Lage des Schadstoffherds und die Fließrichtung bekannt sind,
- je breiter der Schadstoffabstrom quer zur Fließrichtung ist und
- je homogener der Schadstoffabstrom in hydraulischer und hydrochemischer Hinsicht ist.

Die Breite des Abstroms hängt insbesondere von folgenden Faktoren ab:

- Form und Ausdehnung der Schadstoffquelle
- Homogenität bzw. Heterogenität des Grundwasserleiters
- Grundwasserfließrichtung und deren Schwankung im Jahresverlauf
- Durchlässigkeit des Grundwasserleiters
- Grundwassergefälle
- Art der Schadstoffe.

Zahlreiche Untersuchungen belegen, dass Schadstofffahnen im Grundwasser, selbst bei geringen hydraulischen Gradienten, sehr schmal sein können. Weiterhin muss mit ausgeprägten Heterogenitäten gerechnet werden, was in Abbildung 9 dargestellt ist.

Bei der Planung der Untersuchungen sind begründete Annahmen hinsichtlich der Breite und Tiefe des Schadstoffabstroms erforderlich. Die vermutliche Abstrombreite  $B_A$  wird anhand der Grundwasserfließrichtung und der Geometrie des Schadstoffherds festgelegt (vgl. Abbildung 10). Bei bekannter und gleich bleibender Grundwasserfließrichtung ergibt sich  $B_A$  rechtwinklig zur Fließrichtung im direkten Abstrom des Schadstoffherds.  $B_A$  wird dabei begrenzt durch die Einhüllenden des Schadstoffherds in Fließrichtung. Lässt sich bei wechselnder Grundwasserfließrichtung

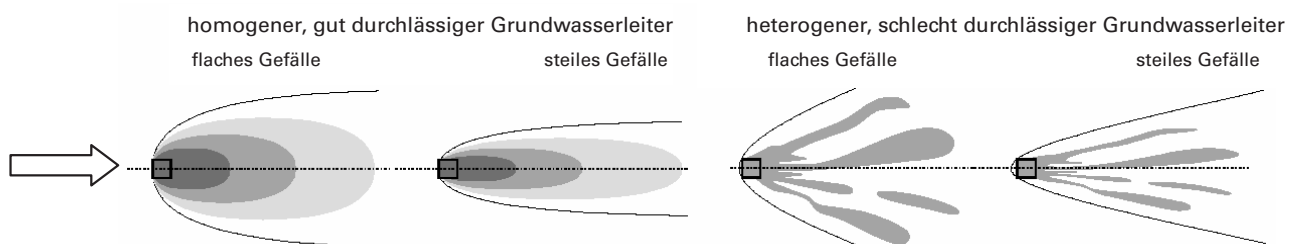


Abbildung 9: Fahnentypen im Grundwasserabstrom (schematisch, nach [14])

eine vorherrschende Richtung bestimmen, kann ebenso verfahren werden. Wenn jedoch der Schwankungsbereich der Fließrichtung berücksichtigt werden muss, werden zuerst die Tangenten in Richtung der beiden extremen Fließrichtungen an den Schadstoffherd gelegt und  $B_A$  über die Senkrechte zur Winkelhalbierenden ermittelt.

Die Abbildung 10 berücksichtigt lediglich geometrische Faktoren. Zusätzliches Kriterium ist die vermutliche Homogenität bzw. Heterogenität des Abstroms. Je größer die Unsicherheit hinsichtlich der Lage des Schadstoffabstroms ist, desto größer sollte die zu erfassende Breite zunächst angenommen werden. Weitere Möglichkeiten zur Bestimmung der Grundwasserfließrichtung, wie Fotolineationen, geomorphologische Erscheinungen oder Ergebnisse von Markierungsversuchen, sind in der Methodensammlung [34] erläutert.

Die Erfassung des Abstroms in seiner gesamten geometrischen Breite bedeutet oft einen unverhältnismäßigen Aufwand. Deshalb wird oft nur ein Teil der gesamten Abstrombreite betrachtet. Bei Sickerwasserprognosen anhand von Rückrechnungen aus dem Grundwasserabstrom und bei I-/E-Betrachtungen hat sich nach bisheriger Erfahrung entsprechend der Untersuchungsstufe folgender Mindestanteil von  $B_A$  bewährt, wobei in jedem Fall bekannte oder vermutete Schadstoffeintragsstellen zu erfassen sind:

- **Orientierende Untersuchung:**  
Erfassung von etwa 20 % der Abstrombreite ( $B_A$ )  
Auf dieses Kriterium kann verzichtet werden, wenn am Ort der Beurteilung eine Prüfwertüberschreitung nachgewiesen ist, beispielsweise durch punktuelle Messungen.
- **Detailuntersuchung:**  
Erfassung von mind. 50 % der Abstrombreite ( $B_A$ )

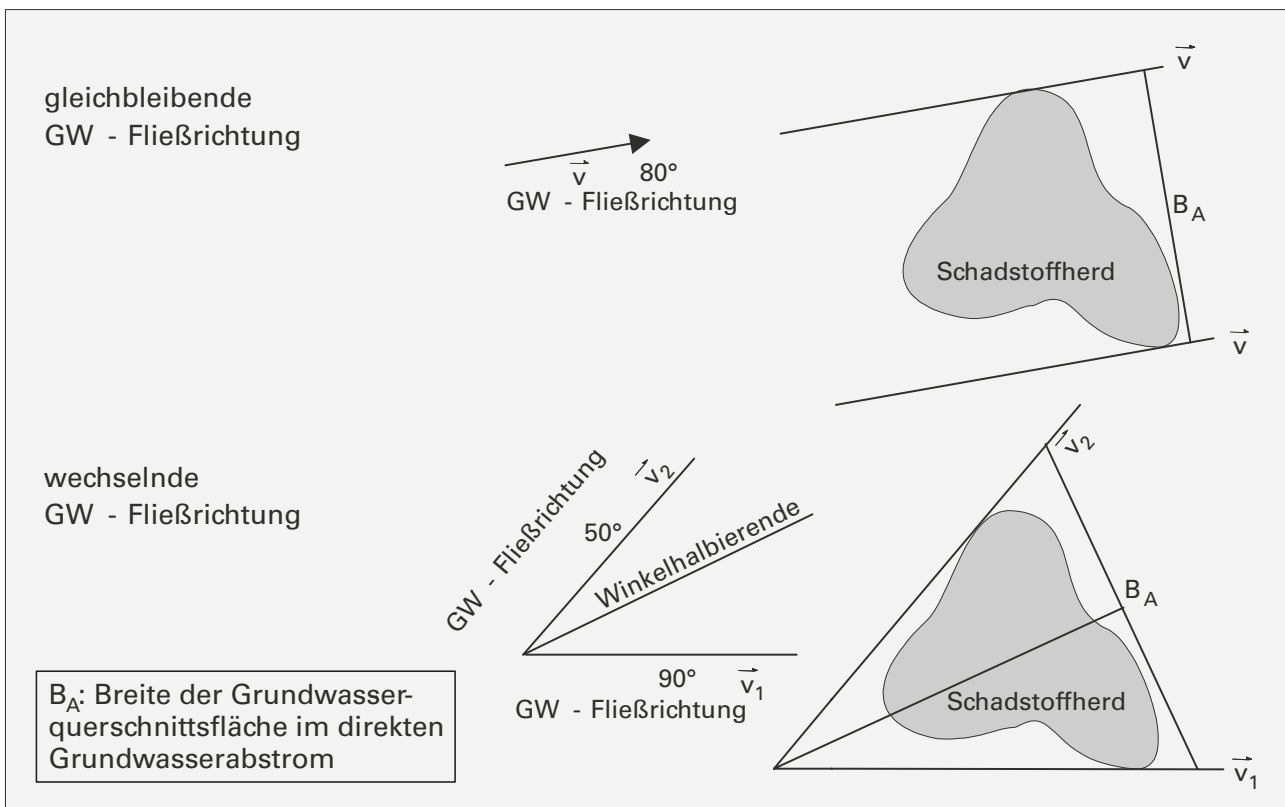


Abbildung 10: Festlegung der Breite des direkten Grundwasserabstroms

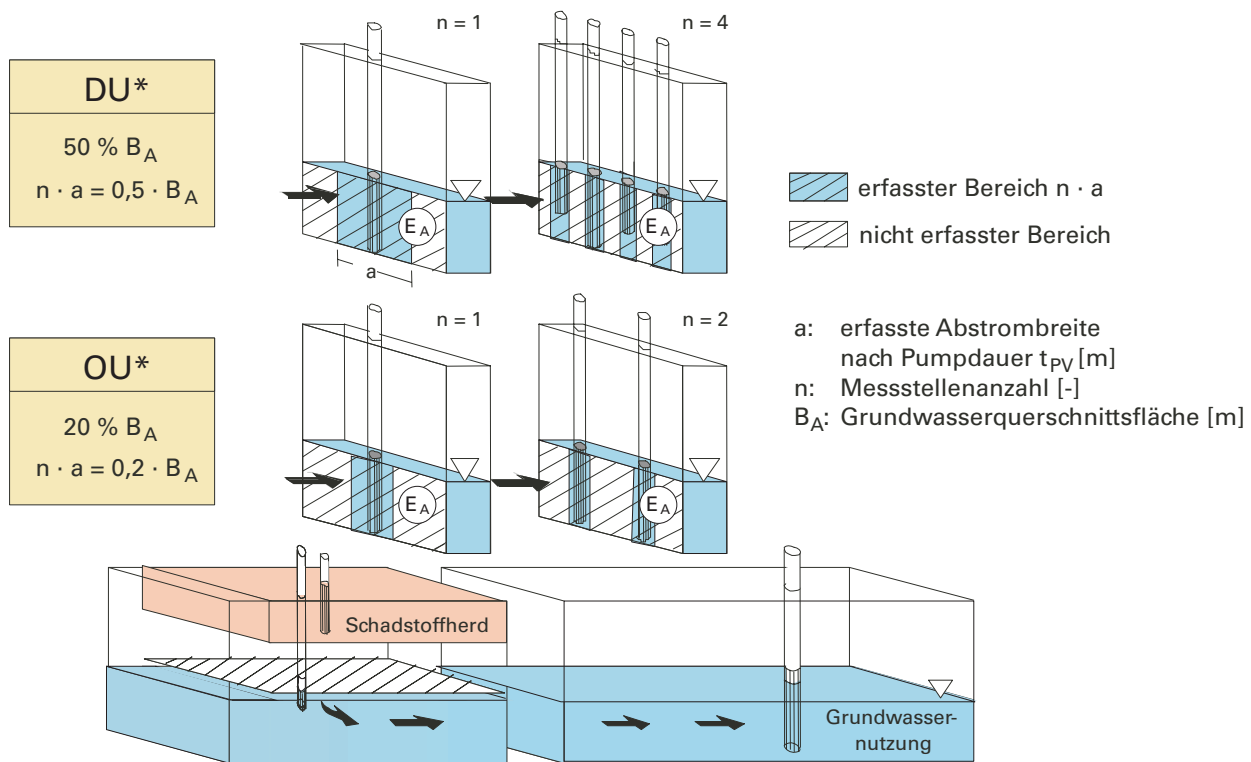
Für die unterschiedliche Erfassungsbreite bei OU und DU hat sich der Begriff „20-/50%-Kriterium“ etabliert.

Abbildung 11 veranschaulicht die Grundlagen der Emissionsprognose. Die zu erfassende Abstrombreite (etwa 20 % bei der OU oder 50 % bei der DU) kann grundsätzlich durch eine geeignete Kombination von Messstellenanzahl sowie entsprechende Wahl von Pumpversuchsdauer und -rate erreicht werden. Eine höhere Messstellenanzahl wird man eher bei kleinen Grundwasserflurabständen und geringer Aquifermächtigkeit realisieren, während man bei großen Flurabständen und Aquifermächtigkeiten aus Kostenerwägungen die Zahl der Messstellen möglichst minimieren wird. Aufgabe des planenden Sachverständigen ist es, das Optimum zu finden. Bei Aufstellung des Untersuchungskonzepts sind begründete Abweichungen von den o. g. Standards möglich. Hinweise zur einzelfallspezifischen Festlegung enthält Tabelle 4.

Um keine übermäßige Verdünnung zu bewirken, sollte die erfasste Abstrombreite  $a$  je Messstelle jedoch nicht mehr als 20 m betragen. Ausnahmen hiervon sind Immissionspumpversuche (vgl. Abschnitt 3.3.3) bei entsprechender rechnerischer Auswertung.

### 2.3.3 UNTERSUCHUNGEN IM WEITEREN GRUNDWASSERABSTROM

Zur Untersuchung von Schadstofffahnen und bei NA-Konzeptionen, im Bedarfsfall auch bei Unzugänglichkeit des direkten Abstroms, kann es sinnvoll sein, Grundwasseraufschlüsse im weiteren Abstrom zu platzieren. Ihre Lage ist einzelfallspezifisch festzulegen und zu begründen.



**LUBW**

\* bei Sickerwasserprognosen anhand von Rückrechnungen aus dem Grundwasserabstrom und bei I/E-Betrachtungen

Abbildung 11: Mindestens zu erfassender Anteil von  $B_A$  in der OU und DU (20 %-/50 %-Kriteriums)

Tabelle 4: Einzelfallkriterien zur Festlegung des zu erfassenden Abstoms

Einzelfallspezifische Besonderheit	Mögliche Abweichungen oder Alternativen zur Standardempfehlung
GW-Flurabstand > 30 m Besonders geringer Volumenstrom des direkten Abstoms (< 0,25 l/s)	Reduzierung der zu erfassenden Abstombreite
Sehr heterogene Verhältnisse: z. B. ausgeprägte Verkarstung und hoher GW-Flurabstand	Festlegung nach karsthydrologischen Gesichtspunkten  Untersuchung vorhandener aussagekräftiger GW-Aufschlüsse (z. B. Quellen, falls keine Verflüchtigungseffekte von Schadstoffen zu besorgen sind) anstelle des direkten Abstoms  Beschränkung auf eine Schadstoffherduntersuchung
Mehrere betroffene Grundwasserstockwerke	Untersuchung der tieferen Stockwerke
Mächtigkeit der ungesättigten Zone > 15 m und Durchlässigkeitsbeiwert < $1 \cdot 10^{-7}$ m/s	Beschränkung auf eine Schadstoffherduntersuchung
Besonders hohe Entnahmeraten (> 5 – 10 l/s)	Reduzierung der zu erfassenden Abstombreite





# 3 Untersuchungsmethodik

Grundlage für die Untersuchungsdurchführung ist der Untersuchungsplan (vgl. Abschnitt 2.1). Im Untersuchungsplan wird die praktische Vorgehensweise bei Auswahl und Bau der Messstellen sowie Probennahme und -behandlung detailliert beschrieben. Wichtige Aspekte bei Planung und Durchführung der Grundwasseruntersuchung werden nachfolgend dargestellt. Eine umfassende Übersicht über Methoden zur Grundwasseruntersuchung enthält die Methodensammlung der LUBW [34].

## 3.1 AUSWAHL UND HERSTELLUNG VON GRUNDWASSERAUFSCHLÜSSEN

Die Anforderungen an den technischen Ausbau von Grundwasseraufschlüssen hängen von der Untersuchungsstufe und dem zur fachlichen Entscheidung ausgewählten Untersuchungskonzept ab. Bei der Messstellenauswahl sind bereits vorhandene und geeignete Aufschlüsse (z. B. Quellen und Brunnen) zu berücksichtigen. Erfahrungsgemäß ist es in der überwiegenden Zahl der Fälle notwendig, zusätzliche Aufschlüsse im Rahmen des Untersuchungsprogramms herzustellen und je nach Fragestellung als temporäre oder dauerhafte Messstelle auszubauen. Ein wesentlicher Vorteil von dauerhaften Grundwassermessstellen ist die Wiederholbarkeit von Probennahmen über längere Zeiträume. Bei Dauermessstellen hat sich ein Ausbaudurchmesser von über 125 mm in vielen Fällen bewährt.

Aus Bohrprofilen sind wichtige Informationen zum petrographischen Aufbau und zur Geometrie des Aquifers ablesbar. Fachgerecht ausgebaute Grundwassermessstellen liefern wichtige Informationen zur Grundwasserhydraulik und zu Stoffkonzentrationen im Grundwasser.

Bohrungen zum Bau von Grundwassermessstellen sind nach Möglichkeit als Trockenkernbohrungen niederzubringen. Damit ist das Erkennen von Grundwasserzutritten während der Bohrarbeiten möglich. Sind Bohrspülungen unumgänglich, sollte nur Wasser in Trinkwasserqualität und ohne Spülmittelzusätze verwendet werden.

Der Ausbau von Grundwassermessstellen muss auf den Wasserstand, die Wasserzutritte, den Gesteinsaufbau, die erwartete Ergiebigkeit der Messstelle und das Untersuchungsziel abgestimmt sein. Sind beim Ausbau einer Bohrung die zu verfilternden Bereiche aus der geologischen Kernansprache und aus der hydrogeologischen Interpretation von Wasserzutritten bzw. Wasserständen nicht sicher festzulegen, können bohrlochgeophysikalische Messungen wie Flowmeter-, Salinometer-, Temperatur-, Elektrik- und Gamma-Log zweckdienliche Informationen liefern.

Getrennte Grundwasserstockwerke müssen durch separate Messstellen erschlossen und untersucht werden. Aus grundsätzlichen wasserwirtschaftlichen Erwägungen dürfen durch Grundwassermessstellen keine hydraulischen Verbindungen zwischen getrennten Grundwasserleitern hergestellt werden. Auch sind die Messwerte an derartigen Messstellen kaum interpretierbar.

Neben der einfach und vollständig verfilterten Grundwassermessstelle, die einen weitgehend homogenen Aquifer in ganzer Mächtigkeit erschließt, können bei schichtgebundenen Schadstoff- bzw. Grundwasserzuflüssen mehrfach verfilterte Grundwassermessstellen errichtet werden. Bei mehreren teilweise oder vollständig getrennten Grundwasserstockwerken ist die Herstellung von stockwerksspezifischen Messstellen zwingend erforderlich (Messstellengruppen). Sondermessstellen sind dadurch gekennzeichnet, dass in verschiedenen Tiefen Filterstrecken mit stationären Probennahmesystemen, die hydraulisch voneinander getrennt betrieben werden können, eingebaut werden.

Die verschiedenen Messstellenarten sind in Abbildung 14 dargestellt. Zu Vor- und Nachteilen der einzelnen Arten wird auf die Spezialliteratur verwiesen (beispielsweise [51]).

Bei Schadstoffquellen oberhalb des Grundwassers sind zur Ermittlung von  $c_{\text{odB}}$  Kleinmessstellen gegenüber Grundwassermessstellen zu bevorzugen, da sie kleinräumig reprä-

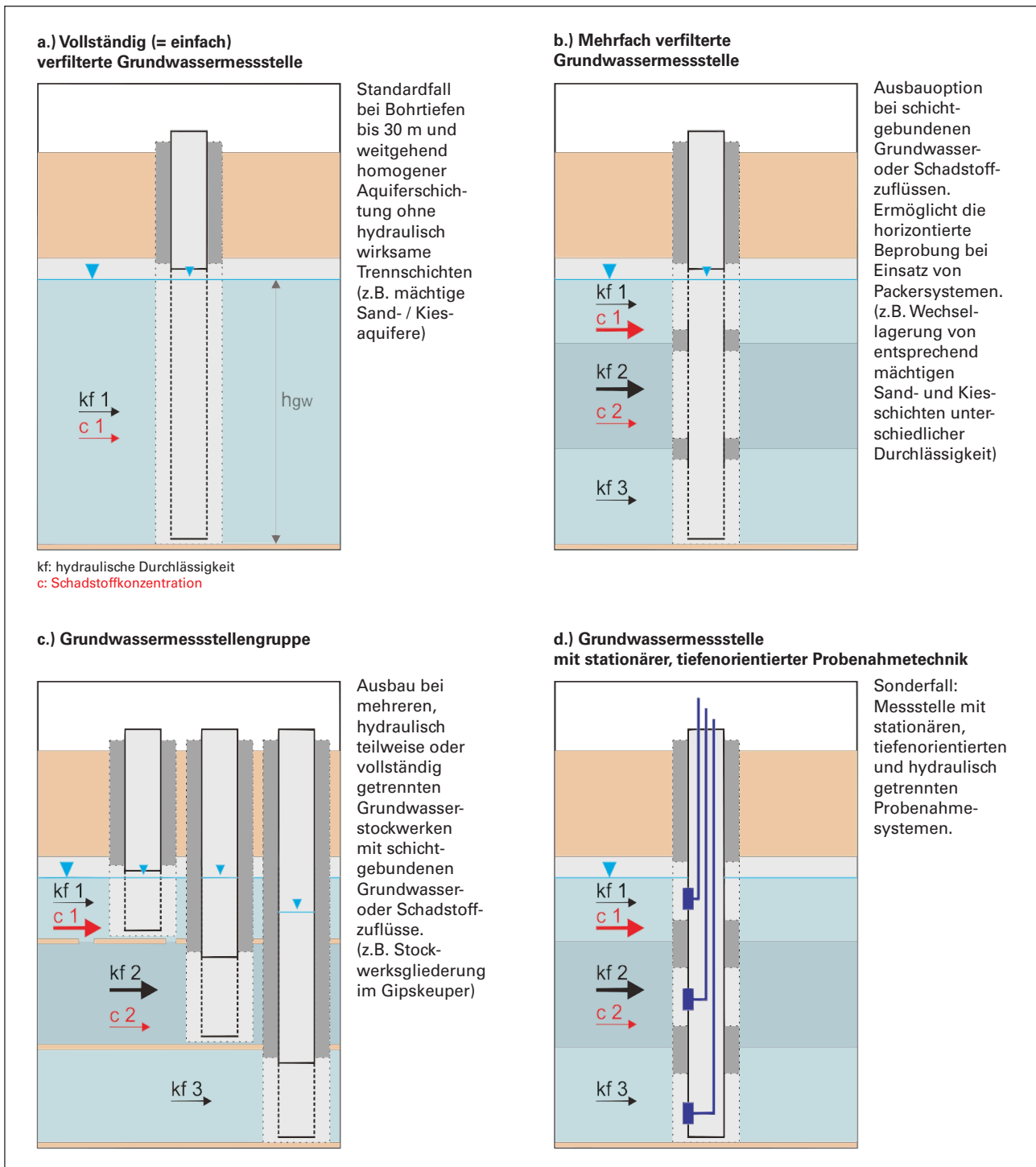


Abbildung 12: Messstellenarten [47]

sentative Proben liefern. Kleinmessstellen sind im Regelfall kostengünstiger herzustellen.

Die Einbindetiefe von Grundwassermessstellen und die Tiefenlage der Filterstrecke sind auf die Aquifermächtigkeit und die zu erwartenden Schadstoffe abzustimmen. Einige ausgewählte Fallgestaltungen zeigt Tabelle 5.

Tabelle 5: Einbindetiefe und Tiefenlage der Filterstrecke von Grundwassermessstellen

Fallgestaltung	Einbindetiefe/Filterstrecke
Standardfall	Einbindetiefe min. $0,7 h_{\text{GW}}$ (ab dieser Tiefe kann bei der hydraulischen Auswertung auf eine Korrektur verzichtet werden [45])
Beprobung am OdB	Einbindetiefe $< 1 \text{ m}$ (bei Schadstoffherden oberhalb des GW)
Schadstoffe in Phase LNAPL (z. B. Mineralöl)	Einbindetiefe $0,5 h_{\text{GW}}$ und Filterstrecke oberhalb Grundwasserspiegel zur Erfassung aufschwimmender Phase
Schadstoffe in Phase DNAPL (z. B. LHKW)	Einbindetiefe $h_{\text{GW}}$ (evtl. Untersuchung tieferer Grundwasserstockwerke)
Schutzgut GW-Nutzung (z. B. Vertikalbrunnen)	Anpassung an die Tiefe der GW-Nutzung
Lage am Vorfluter bei aufsteigender GW-Strömung	Einbindetiefe $< 0,7 h_{\text{GW}}$
Gespannte Grundwasserverhältnisse	Filterstrecke auf den Bereich des Grundwasserleiters beschränken
Hohe Aquifermächtigkeit ohne DNAPL	Einbindetiefe max. $30 \text{ m}$
Schwabende Grundwasserkörper und schichtgebundene Grundwasserzuflüsse	Abweichungen vom Standard sind möglich, kleinräumig vorhandene Trennschichten können unter Beachtung von Vorsichtsmaßnahmen durchbohrt werden, sofern keine Schadstoffphase vorliegt. Die Filterstrecke darf unabhängige wasserführende Schichten dennoch nicht verbinden



Neuere Untersuchungstechniken wie die Direct-Push-Technologien, das sind Probennahmeeinrichtungen oder Sensoren, die durch kleinkalibrige Hohlgestänge mittels Bohren, Drücken oder Vibration in den Untergrund eingebracht werden und Materialproben fördern oder Messwerte erzeugen, zielen neben der Abstromuntersuchung eines Standortes insbesondere auch auf die Schadstoffherduntersuchung. Gegenüber herkömmlichen Untersuchungstechniken, bei denen Bodenmaterial und Grundwasser entnommen werden kann, ermöglicht Direct-Push insbesondere die In-situ-Messung physikalischer und chemischer Parameter sowohl des Bodens als auch des Grundwassers. Vorteile dieser Untersuchungstechniken

sind tiefenorientierte Messungen und eine hohe Untersuchungsdichte bei vergleichsweise geringem Zeitaufwand, allerdings manchmal bei eingeschränkter Empfindlichkeit und Präzision. Ein direkter Vergleich von Messergebnissen der Direct-Push-Methoden mit herkömmlichen Untersuchungsmethoden ist häufig nicht möglich, weil die Messort- und Probennahmebedingungen nicht identisch sind. Eine umfassende Darstellung dieser Techniken und ihrer Einsatzmöglichkeiten ist in [4] zusammengestellt. Daraus wurden die in Tabelle 6 zusammengestellten Einsatzmöglichkeiten von Direct-Push-Methoden und Sensorik bei der Altlastenuntersuchung abgeleitet.

Tabelle 6: Einsatzmöglichkeiten von Direct-Push-Methoden und Sensorik

(Die Ziffern in eckigen Klammern verweisen auf die Nummer des Methodenblattes in „Innovative Mess- und Überwachungsmethoden (Grundwassermonitoring)“, Schriftenreihe des altlastenforums Heft 11 [4])

	<b>Aufgabe oder Fragestellung</b>	<b>Methode des Aufschlusses bzw. Zuganges</b>	<b>Methode der Probennahme</b>	<b>Methode der Parameterbestimmung</b>
<b>Untersuchung der Hydrogeologie</b>				
1	Untergrundaufbau, -schichtung	Fugro [1]	CMT [4]	
2	Grundwasserstand	Geoprobe [2]		
3	hydrogeologische Parameter	Sonic-Drilling [3]		
<b>Untersuchung der Schadstoffquelle oder des Schadensherds</b>				
4	räumliche Ausdehnung (direkt)	Fugro [1]	CMT [4]	MIP-Sondiertechnik [8]
		Geoprobe [2]	Multilevel-Lost-Pumpsystem [9]	EFA® - Sensor [16]
		Sonic-Drilling [3]	MP System - tiefenorientiertes Probennahmesystem[10]	Fluorometer faseroptisches System [17]
			Multilevel-Schlauchpackersystem [11]	Kontavisor faseroptisches System [18]
			Profiler [13]	NAPL - Sonde faseroptisches System [19]
			Screen Point Sampler [14]	
Waterloo System - tiefenorientiertes Probennahmesystem [15]				
5	räumliche Ausdehnung (indirekt)			Radonmessung
6	Schadstoffinventar	Fugro [1]	LCKW-Probenehmer [7]	MIP-Sondiertechnik [8]
		Geoprobe [2]	Multilevel-Lost-Pumpsystem [9]	EFA® - Sensor [16]
		Sonic-Drilling [3]	MP System - tiefenorientiertes Probennahmesystem[10]	Fluorometer faseroptisches System [17]
			Multilevel-Schlauchpackersystem [11]	Kontavisor faseroptisches System [18]
			Profiler [13]	NAPL - Sonde faseroptisches System [19]
			Screen Point Sampler [14]	
Waterloo System - tiefenorientiertes Probennahmesystem [15]				
<b>Untersuchung der Schadstofffahne</b>				
7	räumliche Ausdehnung (direkt)	Fugro [1]	LCKW-Probenehmer [7]	MIP-Sondiertechnik [8]
		Geoprobe [2]	Multilevel-Lost-Pumpsystem [9]	EFA® - Sensor [16]
		Sonic-Drilling [3]	MP System - tiefenorientiertes Probennahmesystem[10]	Fluorometer faseroptisches System [17]
			Multilevel-Schlauchpackersystem [11]	Kontavisor faseroptisches System [18]
			CMT [4]	NAPL - Sonde faseroptisches System [19]
		Gore™ Surveys - Passivsammler [5]		
		PDB-Sammler [12]		
		Profiler [13]		
		Screen Point Sampler [14]		
Waterloo System - tiefenorientiertes Probennahmesystem [15]				

Aufgabe oder Fragestellung	Methode des Aufschlusses bzw. Zuganges	Methode der Probennahme	Methode der Parameterbestimmung
8	räumliche Ausdehnung (indirekt)	Kleinmessstelle	Gore™ Surveys - Passivsammler [5] Vor-Ort-Messung Bodenluftuntersuchung Laboruntersuchung
9	Schadstofffracht	Fugro [1] Geoprobe [2] Sonic-Drilling [3] Kleinmessstelle	Keramik-Dosimeter und Toximeter [5] außerdem die in Zeile 7 genannten in Verbindung mit hydr. Kenndaten Laboruntersuchung
10	Monitoring, Begleitung der Sanierung, Anlagensteuerung	Fugro [1] Geoprobe [2] Sonic-Drilling [3] Kleinmessstelle	siehe Zeile 7 bzw. 9 MIP-Sondiertechnik [8] EFA® -Sensor [16] Fluorometer faseroptisches System [17] Kontavisor faseroptisches System [18] NAPL-Sonde faseroptisches System [19] Preussag CKW-Indikator [20]

Abkürzungen:

CMT Continuous Multichannel Tubing

CPT Cone Penetration Test

EFA Evaneszent Field Absorbance Sensor

MIP Membrane Interphase Probe

NAPL

PDB

ROST

nonaqueous phase liquid

Polyethylen-Diffusions-Beutel-Sammler (Passivsammler)

Rapid Optical Screening Tool



### 3.2 BEPROBUNG VON GRUNDWASSER-AUFSCHLÜSSEN

Ziel der Beprobung von Grundwasseraufschlüssen ist es, die Konzentrationen  $c_A$  oder  $c_{\text{OdB}}$  zu bestimmen. Bei der Vorgehensweise zur Beprobung sind folgende Typen von Grundwasseraufschlüssen zu unterscheiden:

- Grundwassermessstellen ( $\geq$  DN 125)
- Kleinbohrungen ( $<$  DN 125) mit Ausbau zur Messstelle
- kleinkalibrige Bohrungen mit Möglichkeit zur direkten Probennahme, beispielsweise Direct-Push-Verfahren.

Bei Grundwassermessstellen mit Ausbaudurchmessern  $\geq$  DN 125 ist der Einbau von Unterwassermotorpumpen ohne Einschränkung möglich. Die Vorgaben zur Probenahme, wie Entnahme des Standwasservolumens [51] oder das Erreichen einer vorgegebenen Entnahmebreite, können - eine entsprechende Ergiebigkeit vorausgesetzt - damit aus technischer Sicht eingehalten werden. Pumpversuche zur Probennahme sind durchführbar, sofern die Förderrate mindestens in der Größenordnung von 0,1 l/s liegt. Pumpproben aus Grundwassermessstellen sind besonders zur Ermittlung von  $c_A$  geeignet, da über die Filterstrecke eine Tiefenmittelung über den Grundwasserkörper stattfindet.

Die Probennahme an Kleinmessstellen erfolgt beispielsweise mit Hilfe von Tauchpumpen, Fußventilpumpen, Low-Flow-Miniaturpumpen oder Peristaltikpumpen. Es ist insbesondere zur Erfassung von  $c_{\text{OdB}}$  kein Pumpversuch zur Probennahme notwendig.

Alternativ zu Pumpproben können bei geeigneten Voraussetzungen auch Proben mit Hilfe von Passivsammlern gewonnen werden. Bei Passivsammlern werden die physikalischen Eigenschaften von geeigneten Sorbentien (Feststoff oder Flüssigphase) ausgenutzt, um die zu untersuchenden Schadstoffe zu binden. Folgende Voraussetzungen müssen zum Einsatz von Passivsammlern erfüllt sein:

- Die zu untersuchenden Stoffe müssen ausreichend sorbierbar sein und durch die zum Schutz des Sorbens erforderliche Membrane diffundieren können. Eine Anreicherung der zu untersuchenden Stoffe in der Membran ist auszuschließen. Die Eignung des Probennahmesystems ist nachzuweisen.
- Für quantitative Aussagen müssen die hydrogeologischen Kennwerte des Aquifers ausreichend genau bekannt sein.
- Die Messstelle muss geeignet sein. Beispielsweise müssen störende Vertikalströmungen ausgeschlossen sein.

Mit Direct-Push-Verfahren kann bei geeigneten Untergrundverhältnissen  $c_{\text{OdB}}$  und  $c_A$  ermittelt werden. Im Idealfall kann der Ort der Beurteilung direkt beprobt werden. Theoretisch ist es möglich, jeden beliebigen Profilschnitt separat zu beproben. Die Methode versagt im Festgestein. Sie erlaubt lediglich die Entnahme von sehr kleinen Proben volumina. Wiederholungen sind nur mit erheblichem Aufwand möglich. Große Entnahmebreiten können nicht erzielt werden.

Um die Anzahl der erforderlichen Probennahmezeitpunkte festzulegen, sind verschiedene Faktoren zu berücksichtigen:

- wechselnde Fließverhältnisse,
- schwankende Grundwasserstände,
- zeitlich und örtlich ungleichmäßiger Schadstoffaustrag und Schadstofftransport,
- Abbau und Rückhalt von Schadstoffen.

Bei Grundwasserentnahmeraten von weniger als 0,1 l/s empfehlen sich Pumpproben, wobei die Pumpdauer vor der Entnahme der Proben den jeweiligen Gegebenheiten anzupassen ist. In Extremfällen (tiefe Messstelle, tiefer Wasserstand) können auch Schöpfproben genommen werden.

Bei der Beprobung von Grundwasseraufschlüssen ist prinzipiell zwischen tiefengemittelten (ggf. zusätzlich zuflussgewichteten) Proben und tiefenorientierten Proben zu unterscheiden. Die **tiefengemittelte** Probe wird z. B. erreicht durch den Pumpversuch zur Probennahme (vgl. auch Abschnitt 3.3). Alle angeregten Zuflüsse tragen zur Förderrate bei. Die tiefengemittelte Probe liefert den beurteilungsrelevanten Wert  $c_A$ . **Tiefenorientierte** Proben können in entsprechend ausgebauten Messstellen (siehe Abbildung 12 in Abschnitt 3.1) z. B. mit pneumatischen Doppelventilpumpen oder mit Minipumpen genommen

werden. Tiefenorientierte Proben werden notwendig, falls  $c_{\text{OdB}}$  direkt durch Messung bestimmt werden soll. Bei besonderen Verhältnissen im Grundwasserabstrom, z. B. horizontalisierte Nutzung des Grundwassers durch flache Gartenbrunnen, sind tiefenorientierte Proben zur Bestimmung von  $c_A$  unentbehrlich.

Die Anforderungen an die Qualitätssicherung von Probenahmen sind zu beachten [23]. Eine zusammenfassende Darstellung und Bewertung verschiedener Probennahmesysteme und Probennahmetechniken enthält [51]. Da die Qualität der Probennahme ausschlaggebend für die Ergebnisse und somit auch für die Beurteilung ist, sind die Proben sachkundig und von geschultem Personal zu entnehmen. Eine entsprechende Qualifikation kann beispielsweise durch erfolgreiche Teilnahme an den jährlich stattfindenden Probennehmerlehrgängen im Rahmen der analytischen Qualitätssicherung (AQS) Baden-Württemberg erworben werden.

Planung und Durchführung der Untersuchung erfordern große Sorgfalt und Zuverlässigkeit und sollten vom Auftraggeber überwacht werden.

Anweisungen für den Geländeeinsatz sind in einem **Untersuchungsplan** zusammenzustellen (vgl. hierzu Bearbeitungsstufe 4 in Abschnitt 2.1). Der Untersuchungsplan enthält sämtliche Informationen und Daten, die zur fehlerfreien Erstellung der Messstellen und Durchführung der Probennahme benötigt werden.

Probennahme, -vorbehandlung und -analyse im Chemischen Labor müssen aufeinander abgestimmt werden.

Tabelle 7 zeigt die Abstimmung der Probennahme auf Fallgestaltung und Untersuchungsziel.

Tabelle 7: Besondere Fragestellungen bei der Entnahme von Grundwasserproben

Fallgestaltung	Hinweis zur Probennahme
Hohe Ableitungs-/Entsorgungskosten des geförderten Grundwassers bei Pumpversuchsdurchführung zu erwarten  Lage am Vorfluter, durch Pumpversuch können influente Verhältnisse entstehen (Oberflächenwassereinfluss)	Verzicht auf Pumpversuch, stattdessen 2 bis 5-maliger Austausch der Wassersäule der Messstelle
Verdacht auf NAPL - Phasen	Tiefenorientierte Probennahme durchführen (zum Ausbau von Messstellen vgl. Tabelle 5)

### 3.3 PUMPVERSUCHE UND ANDERE HYDRAULISCHE TESTVERFAHREN

Pumpversuche werden im Rahmen der OU, DU oder SU eingesetzt zur Ermittlung von hydraulischen Kennwerten des Grundwasserleiters, von Schadstoffkonzentrationen (Immission) und Schadstofffrachten (Emission).

#### 3.3.1 PLANUNG VON PUMPVERSUCHEN

Um den geforderten Anteil der Abstrombreite  $B_A$  zu erfassen (vgl. Abschnitt 2.3.2), muss durch Variation von Messstellenzahl und Pumpdauer bzw. Entnahmbreite ein Optimum gefunden und ein einzelfallspezifisches Konzept erstellt werden. Bei Aquiferen mit geringer Grundströmung, guter Ergiebigkeit und geringer bis mittlerer Mächtigkeit (z. B. Talniederungen) lassen sich zumeist ausreichend

große Entnahmbreiten erzielen. Die Abstrommessstellen können in diesen Fällen größere Abstände zueinander aufweisen. Dagegen können in Aquiferen mit hohem hydraulischen Gefälle und geringer Ergiebigkeit in der Regel nur geringe Entnahmbreiten erzielt werden, was eine höhere Messstellenanzahl entlang der Abstrombreite erforderlich macht.

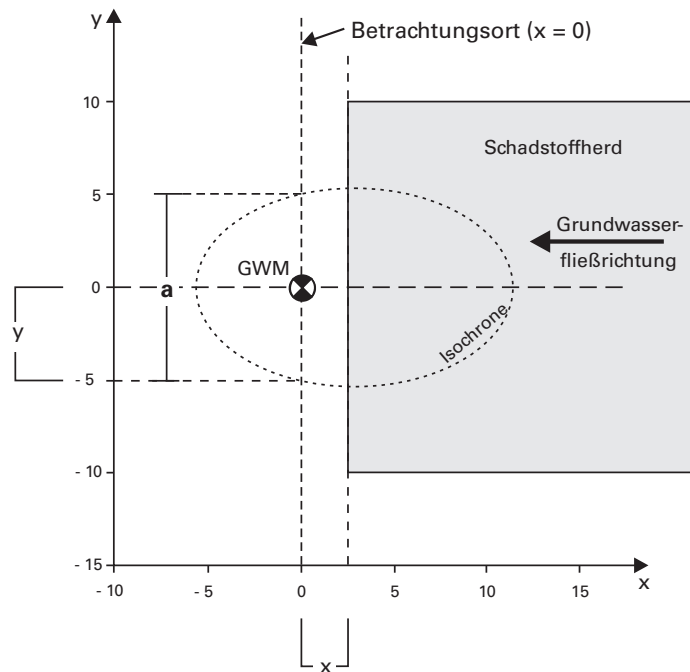
Die erzielbare bzw. die erzielte Entnahmbreite eines Pumpversuches kann mit sog. Strömungsgleichungen (z. B. nach Bear & Jacobs, wie in Abbildung 13 dargestellt), ermittelt werden. Die Entnahmbreite erfährt in vielen Fällen bereits nach einigen Tagen Pumpzeit nur noch geringe Zuwächse. Insbesondere bei längeren Pumpzeiten von mehreren Tagen sollte die Dauer des Pumpversuchs auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten geprüft werden.

$$t_{PV} = \left( \frac{n_f \cdot Q_{PV} \cdot 86.400}{2 \pi \cdot v_f^2 \cdot h_{GW}} \cdot \left[ x \cdot \frac{2 \pi \cdot h_{GW} \cdot v_f}{Q_{PV} \cdot 86.400} - \ln \left( x \cdot \sin \left[ y \cdot \frac{2 \pi \cdot h_{GW} \cdot v_f}{Q_{PV} \cdot 86.400} \right] / y + \cos \left[ y \cdot \frac{2 \pi \cdot h_{GW} \cdot v_f}{Q_{PV} \cdot 86.400} \right] \right) \right] \right) \cdot 24$$

Linien gleicher Fließzeit (Isochronen) bei stationärer, paralleler Grundströmung.

- $t_{PV}$  = Pumpversuchsdauer [h]
- $n_f$  = durchflusswirksamer Hohlraumanteil [-]
- $Q_{PV}$  = Entnahmerate [ $m^3/s$ ]
- $v_f$  = Filtergeschwindigkeit  $v_f = k_f \cdot I \cdot 86.400$  [m/d]
- $h_{GW}$  = Grundwassermächtigkeit [m]
- $x, y$  = Ortskoordinaten [m]

Argumente für sin und cos im Bogenmaß



$a$  = erfasste Abstrombreite für  $x = 0$  m [m]

Abbildung 13: Strömungsgleichung nach Bear & Jacobs

Zur überschlägigen Abschätzung der Pumpzeit und Entnahmebreite kann bei geringem hydraulischem Gefälle oder in der Frühphase eines Pumpversuches auch die Zylinderformel angewandt werden, die eine eventuell vorhandene Grundströmung unberücksichtigt lässt:

$$a = 2 \cdot \sqrt{\frac{t_{PV} \cdot Q_{PV} \cdot 3.600}{\pi \cdot h_{GW} \cdot n_f}} \Rightarrow t_{PV} = \frac{a^2 \cdot \pi \cdot h_{GW} \cdot n_f}{Q_{PV} \cdot 14.400}$$

mit:

- a = erfasste Abstrombreite der Messstelle zum Zeitpunkt  $t_{PV}$  [m]
- $t_{PV}$  = Pumpversuchsdauer [h]
- $n_f$  = durchflusswirksamer Hohlraumanteil [-]
- $Q_{PV}$  = Entnahmerate [ $m^3/s$ ]
- $h_{GW}$  = Grundwassermächtigkeit [m]

Insbesondere bei höheren Durchlässigkeiten ( $k_f$  größer als  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s), hohem Grundwassergefälle ( $I$  größer als 1 %) und längeren Pumpzeiten (über 48 Stunden) sollte ein Rechenansatz mit Berücksichtigung der Grundströmung verwendet werden, um erhebliche Fehlinterpretationen der Messergebnisse des Versuchs zu vermeiden.

### 3.3.2 BESTIMMUNG VON AQUIFERKENNWERTEN

Zur Abschätzung der Emission  $E_A$  aus Konzentrationsmessungen sind die hydraulischen Kennwerte des jeweils betroffenen Grundwasserleiters möglichst zuverlässig zu bestimmen. Die Ermittlung der hydraulischen Aquifereigenschaften (Transmissivität,  $k_f$ -Wert, Speicherkoeffizient) erfolgt bei Messstellenergiebigkeiten von über 0,1 l/s in der Regel durch Pumpversuche. Werden die Pumpversuche mit Tracerversuchen kombiniert, kann auch die wichtige Kenngröße des durchflusswirksamen Hohlraumanteils ermittelt werden.

Sind die Ergiebigkeiten geringer, sollten alternativ zu Pumpversuchen andere Testverfahren (z. B. Slug-Test) angewandt werden. Allerdings zeigt die Erfahrung, dass bei  $k_f$ -Werten von weniger als  $10^{-7}$  m/s selbst bei hohen Schadstoffkonzentrationen kaum noch relevante Schadstofffrachten im Aquifer bewegt werden. Die Eignung von Bohrlochtests für verschiedene Durchlässigkeitsbereiche ist in Abbildung 14 dargestellt.

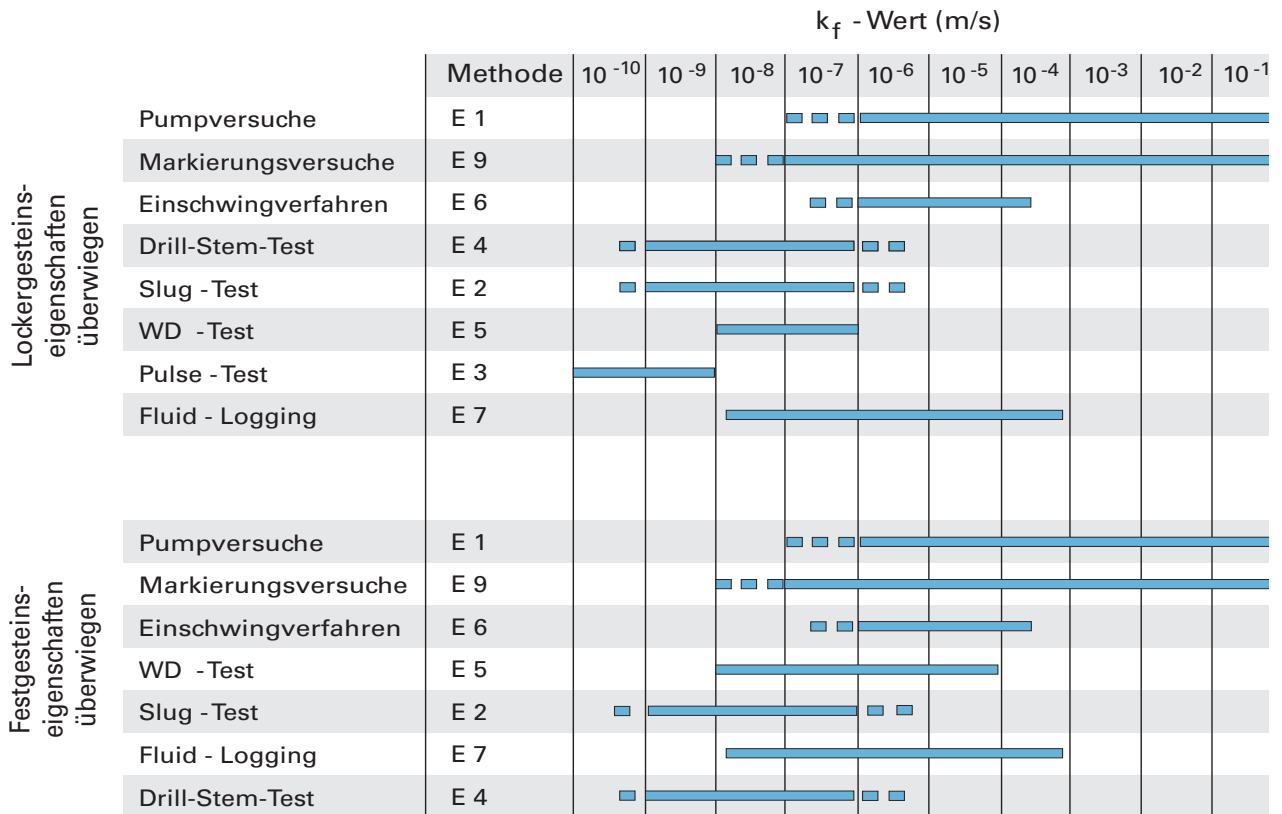


Abbildung 14: Eignung von Bohrlochtests (verändert nach [38])



### 3.3.3 IMMISSIONSPUMPVERSUCHE

Bei Immissionspumpversuchen kann unter bestimmten Voraussetzungen und Annahmen aus den ermittelten Konzentrationen in Wasserproben in Verbindung mit dem Entnahmezeitpunkt auf die gemittelte Schadstoffkonzentration über die Entnahmebreite oder der Schadstofffahne sowie auf die räumliche Entfernung des Ortes der Schadstoffkonzentration vom Entnahmebrunnen geschlossen werden. Die Ergebnisse werden umso genauer, je kürzer die Abstände zwischen den einzelnen Probennahmen sind und je mehr Proben untersucht werden. Je Pumpversuch werden üblicherweise ca. 5 bis 10 Wasserproben entnommen. Die Entnahmezeitpunkte für die Proben werden zweckmäßigerweise so gewählt, dass die Zunahme der Entnahmebreite zwischen den einzelnen Probennahmen möglichst konstant ist. Die Größe der Zunahme der Entnahmebreite von Probe zu Probe bestimmt die räumliche Auflösung, mit der Aussagen zur Lage einer Schadstofffahne möglich sind. Die Auswertung der Ergebnisse des Immissionspumpversuchs erfolgt bei einfachen hydrogeologischen Verhältnissen mit analytischen Verfahren, z.B. mit dem IPV-Tool [28], oder in besonderen Fällen mit ausgeprägten Heterogenitäten und komplexen Untergrundverhältnissen mit numerischen Strömungs- und Transportmodellen.

Grundwasserproben, die während eines Pumpversuchs entnommen werden, sind aus Mischwasser der jeweiligen gesamten Isochronenfläche zusammengesetzt. Wird dies bei Konzentrations- und Frachtermittlungen nicht berücksichtigt, kann es zu erheblichen Fehlinterpretationen der Messwerte kommen. Durch rechnerische Auswertung der Konzentrationsentwicklung während des Pumpversuchs kann auf die Konzentration in einer Schadstofffahne und damit auch auf die Schadstofffracht geschlossen werden. Analytische Auswerteverfahren gehen dabei zumeist von homogenen, isotropen Modellannahmen aus.

In Abbildung 15 wird der Zusammenhang zwischen den im Labor gemessenen und den im Grundwasser tatsächlich vorkommenden Schadstoffkonzentrationen für den angenommenen Fall einer seitlich an der Messstelle vorbeiströmenden Schadstofffahne mit homogener Schadstoffbelastung bei  $c = 100 \mu\text{g/l}$  beispielhaft erläutert. Zum besseren Verständnis der wesentlichen Zusammenhänge werden einfache Modellannahmen getroffen, wie homogener und

isotroper Aquifer, keine Übergangszone zwischen unbelastetem und belastetem Grundwasser, kein Konzentrationsgradient in Grundwasserfließrichtung. Des Weiteren werden Rechengrößen ggf. gerundet. Diese Schadstofffahne wird im Verlauf des Pumpversuchs erfasst und beigezogen. Die Isochronen der Proben 1, 2 und 3 zu Beginn des Pumpversuchs erfassen die Schadstofffahne noch nicht. Die Schadstoffgehalte dieser Proben sind Null bzw. kleiner Bestimmungsgrenze. Probe 4 erfasst die Schadstofffahne. Entsprechend dem Lageplan setzt sich ihre Isochrone zu drei Vierteln aus unbelastetem ( $c = 0 \mu\text{g/l}$ ) und zu einem Viertel aus belastetem Grundwasser ( $c = 100 \mu\text{g/l}$ ) zusammen. Infolgedessen weist sie die Mischkonzentration  $25 \mu\text{g/l}$  auf. Dieser (Analysen)-Wert darf nicht verwechselt werden mit dem Mittelwert über die gesamte Entnahmebreite, wie er häufig Grundlage für Bewertungen ist. Dieser setzt sich – wie der Lageplan verdeutlicht – zu sieben Achteln aus unbelastetem Grundwasser ( $c = 0 \mu\text{g/l}$ ) und lediglich zu einem Achtel aus belastetem Grundwasser ( $c = 100 \mu\text{g/l}$ ) zusammen und beträgt hier  $12,5 \mu\text{g/l}$ .

Umgekehrt kann aus dem Verlauf der Messwerte der Proben 1 bis 4 auf die Höhe der Schadstoffkonzentration der Fahne ( $100 \mu\text{g/l}$ ) geschlossen werden. Im Beispiel sollte:

- die Konzentration der Fahne ( $100 \mu\text{g/l}$ ) zur Prüfung der Immissionsbedingung und
- die mittlere Schadstoffkonzentration entlang der Entnahmebreite ( $12,5 \mu\text{g/l}$ ) für die Berechnung der Fracht zur Prüfung der Emissionsbedingung

verwendet werden.

Zur Planung von Immissionspumpversuchen ist Sachverstand und Erfahrung erforderlich, weil wichtige Kenndaten, die die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Versuchsergebnisse wesentlich bestimmen, wie Pumpraten, Dauer des Versuchs, Zahl der Proben sowie Probennahmerhythmus, vorab bestimmt werden müssen und erst danach geprüft werden kann, ob sie richtig gewählt waren.

Die größten Kosten bei Grundwasseruntersuchungen entstehen beim Messstellenbau und beim Pumpversuchsbetrieb. So gesehen können bei Immissionspumpversuchen gegenüber einer Einmalbeprobung mit verhältnismäßig geringem Mehraufwand wesentlich verbesserte Rückschlüsse auf die Schadstoffbelastung am Standort gezogen werden.

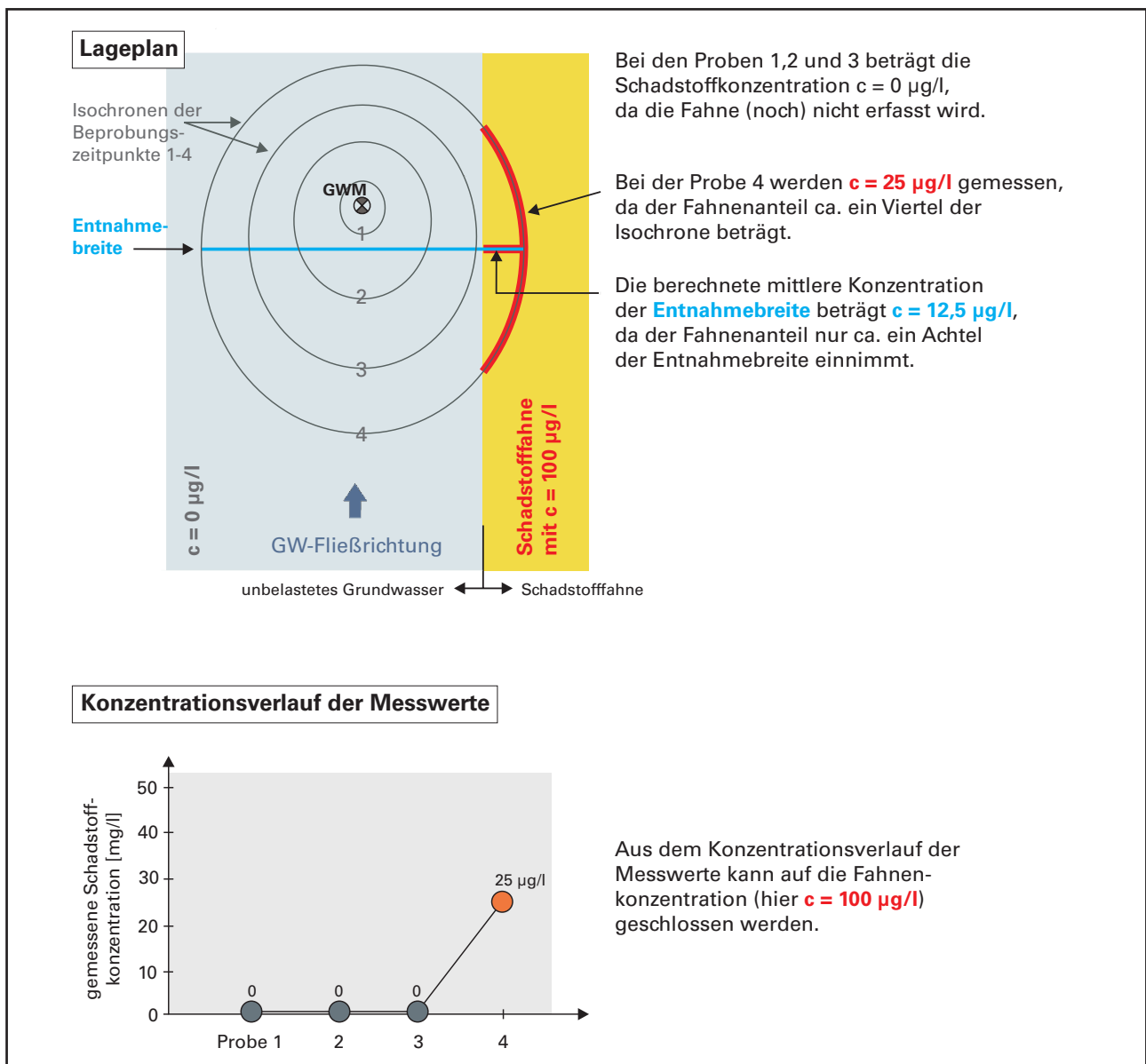


Abbildung 15: Vereinfachte Darstellung des Zusammenhangs zwischen gemessener und tatsächlicher Schadstoffkonzentration am Beispiel eines Immissionspumpversuches mit zunehmender Schadstoffkonzentration (Erläuterungen siehe Text)

### 3.4 INTEGRALE GRUNDWASSERUNTERSUCHUNG

Die integrale Grundwasseruntersuchung kann bei geeigneten hydrogeologischen Verhältnissen eine Möglichkeit darstellen, um

- über den Gefahrverdacht einzelner Bereiche innerhalb großräumiger und heterogener Verdachtsflächen zu entscheiden und
- die Schadstoffemission zu bilanzieren.

Dazu wird die Schadstofffracht an mehreren Kontroll-ebenen in der Schadstofffahne, die idealerweise senkrecht zur Grundwasserfließrichtung verlaufen, durch sich über-

lappende Immissionspumpversuche ermittelt. Für die Reihenfolge der Pumpversuchsdurchführung gilt:

1. zunächst mit der in Grundwasserfließrichtung entfernt gelegenen Kontrollebene beginnen und danach sukzessive die näheren Kontrollebenen am Schadensherd untersuchen (Faustregel: „aus dem Abstrom in den Zustrom“)
2. benachbarte Pumpversuche nacheinander ausführen, da sonst keine Überlappung der Entnahmebreiten möglich ist. Die Methodik der integralen Grundwasseruntersuchung mittels Immissionspumpversuchen ist in [3] beschrieben.

Werden die Ergebnisse der integralen Grundwasserunter-

suchung mit den Informationen aus der Erfassung altlastverdächtiger Flächen oder mit bereits vorliegenden Untersuchungsergebnissen auf den Flächen abgeglichen, können gegebenenfalls einzelne Schadstoffeintragsstellen lokalisiert oder Entscheidungen über einen Gefahrenverdacht getroffen werden [3].

### 3.5 HYDROCHEMISCHE DATEN

Neben dem hydrogeologischen Arbeitsmodell (vgl. Abschnitt 2.2.1), das wesentlich zum hydraulischen Verständnis des Systems beiträgt, liefert die hydrochemische Charakterisierung wertvolle Eingangsdaten und Hinweise zur geogenen Grundwasserbeschaffenheit sowie zu Aufbau, Dynamik und Wechselwirkungen der hydraulisch wirksamen Einheiten. Der Parameterumfang für die Grundwasseruntersuchung besteht in der Regel aus einer Kombination mehrerer, sich ergänzender Parameter:

- Milieuparameter, wie elektrische Leitfähigkeit, Redox-Parameter, Anionen und Kationen, beispielsweise zur allgemeinen Charakterisierung der Grundwassergüte oder zur Beurteilung der Eignung hinsichtlich Natural Attenuation,
- branchenspezifische Parameter, bei Vorliegen eines Verdachts, auch wenn dafür keine Prüf- oder Maßnahmenwerte existieren,
- Parameter, für die Prüf- oder Maßnahmenwerte existieren (siehe Anhang II).

Die Analytik der orientierenden Untersuchungen konzentriert sich auf die Analyse derjenigen Parameter, für die ein Verdacht nach Abschluss der Erfassung besteht. Hierzu existieren Listen, anhand derer eine sinnvolle Auswahl von spezifischen Parametern zusammengestellt werden kann. So gibt der Branchenkatalog [38] Hinweise zu den eingesetzten Stoffen im Produktions- und Verfahrensablauf. Weitergehende Informationen für branchenspezifische Untersuchungsparameter und ihre Abbauprodukte werden die im Zuge des BMBF-Forschungsschwerpunktes KORA [11] erstellten Branchenleitfäden enthalten.

Bei der Detailuntersuchung ist zu prüfen, ob einerseits der Parameterumfang auszuweiten ist oder andererseits, insbesondere bei umfangreichen Untersuchungsreihen, eine Reduzierung auf ausgesuchte Leitparameter möglich ist.

Die Anwendung von Methoden der Vor-Ort-Analytik sollte insbesondere in Verbindung mit dem Einsatz der Direkt-Push-Technologie sowie bei der Ausführung von Immissionspumpversuchen geprüft werden. Für den Bereich der Untersuchung und Überwachung können sich qualitative und halbquantitative Messsysteme eignen. Zur Optimierung der zeitlichen und räumlichen Auflösung von Immissionspumpversuchen sind quantitative Messsysteme (z. B. CKW-Indikator) erforderlich. Eine Übersicht über Messsysteme gibt erwähnte Tabelle 6 und [4]. Der Einsatz derartiger Messsysteme erfordert gegenüber herkömmlicher Probennahme und Laboranalytik eine angepasste Vorgehensweise bei Planung, Feldeinsatz und Qualitätssicherung. Messstrategien und dazugehörige Vorgehensweisen incl. erforderlicher Dokumentation sind in der weiterführenden Literatur (z. B. [33]) beschrieben.

Forensische Verfahren wie GC-MS-Fingerprinting und Isotopensignaturen werden eingesetzt:

- zur eindeutigen Störidentifikation,
- zur räumlichen Abgrenzung verschiedener Schäden mit identischen Schadstoff-Spektren,
- zur zeitlichen Einordnung von Schadensereignissen (Altersbestimmung),
- zur Beurteilung des mikrobiologischen Abbaus [1][2] [46] und Berücksichtigung bei der Beurteilung von NA-Prozessen.

GC-MS-Fingerprinting ermöglicht, Verunreinigungen des Untergrundes mit Mineralölerzeugnissen zu charakterisieren. Anhand typisierender Verteilungsmuster lassen sich Ausgangsprodukte sowie Verhalten und Transport in der Umwelt bestimmen. Eine Charakterisierung der Ausgangsprodukte ist über die durch die Destillation bedingte Fraktionierung der Produkte in Benzinfraktion, Mitteldestillat und Schweröl möglich. Sind Mineralölerzeugnisse in den Untergrund gelangt, unterliegen sie vielfältigen physikochemischen und biologischen Abbauprozessen, wie Verdampfung, Lösung, Verdünnung oder mikrobieller Abbau, sowie der Interaktion mit Bodenpartikeln. Anhand der Charakteristika der Verteilungsmuster kann eine Klassifizierung des Abbaus von Mineralölprodukten durchgeführt werden [1][2].

Herstellungsbedingt unterscheiden sich technische Produkte wie chlorierte und aromatische Kohlenwasserstoffe in ihren Isotopensignaturen. Da nur selten zwei unterschiedliche Kontaminationen mit den gleichen Chargen erfolgten, ist in vielen Fällen eine Differenzierung der Kontaminationen anhand ihrer Isotopensignaturen möglich [2].

Lassen die standortspezifischen Verhältnisse und die Art des Schadstoffs einen mikrobiologischen Abbau zu, so ist dieser zumeist mit einer signifikanten Verschiebung der Isotopensignatur verbunden. Die Bindungen leichter Isotope eines Elements ( $^{12}\text{C}$ ) werden schneller gespalten als die von schweren Isotopen (z. B.  $^{13}\text{C}$ ). Als Folge dieser Isotopenfraktionierung reichern sich die schweren Isotope im verbleibenden Schadstoff im Lauf der Reaktion an. Anhand der gemessenen Änderung der Isotopensignatur kann der Abbau von organischen Verbindungen in der Umwelt nachgewiesen werden. Für einzelne Schadstoffe und ihre Abbauewege ist es auch möglich, Abbauraten zu quantifizieren.

Die Beurteilung von Natural Attenuation-Prozessen erfordert die Kombination von schadstoffspezifischen Untersuchungen zum Nachweis und zur Quantifizierung von Abbauprozessen (Fingerprints, Isotopensignaturen) mit der Untersuchung so genannter Milieuparameter (Nitrat, Nitrit, Ammonium, Sulfat, Eisen gelöst, Redox-Potenzial, Sauerstoff etc.), die Aufschluss geben über die grundsätzliche Eignung des Untergrundes zum Schadstoffabbau sowie tatsächlich ablaufende mikrobielle Abbauprozesse. Weiterführende Hinweise enthalten [9] [11][15]).

### 3.6 QUALITÄTSSICHERUNG

Qualitätsvorgaben finden sich in Normen, Technischen Regeln und sonstigen Methoden, wie sie beispielsweise in der BBodSchV genannt und für Untersuchungen in deren Gültigkeitsbereich für verbindlich erklärt wurden oder in allgemein anerkannten Fachschriften. Qualitätsvorgaben sind einzelfallspezifisch im Hinblick auf den Zweck der Untersuchung festzulegen. Qualitätsvorgaben betreffen beispielsweise:

- Lieferfristen
- mangelfreie und verlässliche, der Zweckbestimmung

entsprechend verwertbare Ergebnisse

- vollständige und nachvollziehbare Dokumentationen.

Für Auftragnehmer sind sie ein Mittel, den vertragsgemäßen Anforderungen und Kundenwünschen gerecht zu werden, um Haftungsrisiken zu vermeiden und die Marktposition zu stärken.

Zur generellen Zuständigkeit für die Qualitätssicherung gilt:

- Anforderung, Definition von Maßstab und Aufgabenstellung: Auftraggeber
- Projektdurchführung, Lieferung: Auftragnehmer
- Prüfung gemäß Anforderung und Maßstab: Auftraggeber.

Leistungsbeschreibung und Vertrag müssen neben Termin und Preis insbesondere Angaben zur Zweckbestimmung und zu den fachlichen Anforderungen enthalten. Hierzu gehören neben allgemeinen Vertragsbestimmungen (Grundlagen, Honorar, Kündigung, Haftung etc.):

- Darstellung von Sachverhalt und Ausgangslage
- Beschreibung von Randbedingungen und Zeitplan
- Definition erwarteter Leistungen und Untersuchungsziel
- Zusammenstellung besonderer fachlicher Anforderungen, wie die Beachtung landesspezifischer Vorgaben, Leitfäden und Handlungsempfehlungen.

Ein diesen Vorgaben entsprechender Ingenieurvertrag ist eine Grundvoraussetzung für ein auf die einzelfallspezifischen Bedürfnisse zugeschnittenes und sachgerechtes Gutachten.

Die Auftraggeberpflichten umfassen während der Ausführung der Untersuchungen die laufende Überwachung und Kontrolle, gegebenenfalls Eingriff und Steuerung des Projektes sowie nach Abschluss der Arbeiten die formale und inhaltliche Prüfung sowie Abgleich mit den eingangs formulierten Zielen (Abnahme der erbrachten Leistungen). Zur Erfüllung dieser Aufgaben des Auftraggebers ist ein hohes Maß an Sachkunde erforderlich. Nur wer die vielfältigen Vorgaben kennt und um die kritischen Punkte in der Praxis weiß, ist in der Lage, optimale projektspezifische Leistungsverzeichnisse zu erstellen und die Ausführung

von Projekten sachkundig zu überwachen. Ist diese Sachkunde nicht vorhanden, empfiehlt es sich, Sonderfachleute einzuschalten.

Als allgemeine Eignungsvoraussetzungen für Auftragnehmer gelten neben persönlicher Erfahrung, Referenzen und laufender Weiterbildung der Mitarbeiter insbesondere die verschiedenen Anerkennungs- und Zulassungsverfahren wie:

- Sachverständige und Untersuchungsstellen nach § 18 BBodSchG oder § 36 Gewerbeordnung
- Qualitätsmanagementsysteme und dazugehörige DIN-Akkreditierung für Ingenieurdienstleister
- Probennehmerlehrgänge der AQS Baden-Württemberg
- DIN-Akkreditierung und BAM-Zulassung für Laboratorien
- DVGW-Bescheinigung für Bohrunternehmen.

Zur Bearbeitung von Grundwasseruntersuchungen existieren eine Reihe von Regelwerken und Arbeitshilfen für die einzelnen Bearbeitungsschritte. Den gesamten Themenkomplex umfassen beispielsweise die ALA Arbeitshilfe Qualitätssicherung [16] sowie die Seminarreihe „Qualitätssicherung in der Altlastenbearbeitung“ des Fortbildungsverbands boden und altlasten Baden Württemberg [23]. Beide Sammlungen enthalten Übersichten zu einzelnen, je Bearbeitungsschritt zu beachtenden Regelwerken.

Fehler können sowohl im Umgang mit Proben als auch mit Messdaten vorkommen. Beim Umgang mit Proben können sich ihre Eigenschaften verändern, beispielsweise durch Schadstoffverschleppungen, Querkontaminationen, Ausgasungen, Sorption oder chemische und biologische Reaktionen. Darüber hinaus können Messfehler oder -unsicherheiten auftreten. Beim Umgang mit Messdaten können Verwechslungen oder Übertragungsfehler vorkommen. Qualitätssicherungskonzepte umfassen sowohl vorbeugende als auch kontrollierende Qualitätssicherungsmaßnahmen.

Bei der Herstellung von Grundwassermessstellen ist besonderes Augenmerk zu richten auf die Festlegung von Bohrverfahren, Bohrdurchmesser und Ringraum, Kiese

und Schlitzweiten sowie die Materialauswahl und Bauausführung für Ringraumabdichtungen. Die Aufnahme von Bohrprofilen hat grundsätzlich durch Sachverständige zu erfolgen. Eine fachgerechte Profilbeschreibung enthält zwingend Angaben zu Stratigraphie, Genese, Petrographie und Verwitterungsgrad. Weiter zu beachten sind Trennflächengefüge, Farbe, Gefüge, Konsistenz und sonstige Merkmale wie kontaminationsspezifische Auffälligkeiten. Reichen Kenntnisse aus der Bohraufnahme nicht aus, um den Messstellenausbau festzulegen, sind bohrlochgeophysikalische Messungen durchzuführen.

Neu erstellte sowie bereits vorhandene Grundwassermessstellen gilt es regelmäßig auf ihre Tauglichkeit zu überprüfen. Grundsätzliche hydraulische Anforderungen sind ein guter Kontakt zum verfilterten Aquifer sowie keinerlei Kontakt zu nicht verfilterten Bereichen. Um hydrochemisch einwandfreie Verhältnisse sicher zu stellen, müssen Messstellen frei von Sedimenten, Fremdkörpern und Schmutz sein. Mögliche Einflüsse der Bohr- und Ausbauarbeiten (Spülung, Zementation) müssen beseitigt oder abgeklungen sein. Zur Überprüfung eignen sich Ausloten, Kamerabefahrung und geophysikalische Messungen (Ausbauzustand, Ausbaus Schäden), hydraulische Verfahren wie Pump- oder Auffüllversuche, Packertests (Brunnenzustand, Dichtheit) sowie hydrochemische Untersuchungen.

Chemische Grundwasseruntersuchungen sollen gesicherte und verlässliche Messwerte liefern. Neben den bereits erwähnten Mindestanforderungen an Probennehmer und Labor empfiehlt es sich insbesondere bei Detailuntersuchungen als Grundlage für schwierige oder folgenschwere Entscheidungen, stichprobenhaft Parallel-Untersuchungen durch ein zweites Labor zu veranlassen und Kontrollen während der Probennahme vorzunehmen. In jedem Fall sollten Probenmaterial für weitere oder absichernde Untersuchungen zurückgestellt und die Untersuchungsbefunde auf Plausibilität geprüft werden. Der Schnittstelle und Abstimmung zwischen Probennahme und Labor kommt eine besondere Bedeutung zu, beispielsweise bei der Abstimmung von Probennahmestrategie (Methoden, Gefäße), methodischer Vorgehensweise bei Probennahme und -vorbereitung sowie bei der Sicherstellung einer ausreichenden Datenqualität.

Bei der Erstellung und Prüfung von Untersuchungsberichten ist zu prüfen, ob diese

- vollständig, logisch und schlüssig, systematisch aufbereitet sind
- Analysen und Untersuchungsbefunde in ausgewerteter Form als Tabellen und Diagramme enthalten
- nachvollziehbare Schlussfolgerungen enthalten
- sämtliche Originalbefunde (Bohrdaten, Pumpversuchsprotokolle, Analysenbefunde des Labors) enthalten.

Weiterführende Erläuterungen enthalten die „Anforderungen an ein Gutachten im Bereich der Altlastenuntersuchung“ [29] und der Leitfaden „Die Amtsermittlung bei altlastverdächtigen Flächen“ [30], dessen Inhalte sich hinsichtlich der Qualitätssicherung von Gutachten nicht nur auf orientierende Untersuchungen beschränken.

## Anhang I: Definitionen und Abkürzungen

### DEFINITIONEN

Abstrom	Es wird zwischen dem direktem Grundwasserabstrom, an dem die einzelfallbezogene Mindestanforderung geprüft wird, und dem weiteren Abstrom unterschieden. → Schadstofffahne
Allgemeine Mindestanforderung	Damit wird eine Grundwasserbeschaffenheit definiert, die im Allgemeinen bei nutzungswürdigen Grundwasservorkommen toleriert werden kann oder die bei Überschreitung eine Sanierungsuntersuchung erfordert (VwV OW).
Detailuntersuchung	Bei Detailuntersuchungen wird auch untersucht, ob sich aus räumlich begrenzten Anreicherungen von Schadstoffen innerhalb einer Verdachtsstelle oder altlastverdächtigen Fläche Gefahren ergeben und ob und wie eine Abgrenzung von nicht belasteten Flächen geboten ist. (§ 3 Abs. 5 BBodSchV)
Direct-Push-Methoden	Probennahmeeinrichtungen oder Sensoren, die durch kleinkalibrige Hohlgestänge mittels Bohren, Drücken oder Vibration in den Untergrund eingebracht werden und Materialproben fördern oder Messwerte erzeugen.
Emission	Schadstofffracht aus einer Schadstoffquelle in das Grundwasser (VwV OW). Die übliche Einheit ist Gramm pro Tag.
Einzelfallbezogene Mindestanforderung	Damit wird eine Grundwasserbeschaffenheit definiert, die im Einzelfall bei nutzungswürdigen Grundwasservorkommen toleriert werden kann oder die bei Überschreitung eine Sanierungsuntersuchung erfordert (VwV OW)
Enhanced Natural Attenuation	Sonderform von In-situ-Sanierungsmaßnahmen, bei der durch Einbringen von Substanzen in die Reaktionsräume von Schadstofffahnen die natürlichen Minderungsprozesse initiiert, stimuliert oder unterstützt werden.
Gefahr:	Zustand, der bei ungehindertem Geschehensablauf mit hinreichender Wahrscheinlichkeit zum Eintritt eines Schadens an Rechtsgütern führt.
Gefährdungspfade	Sind die unterschiedlichen Wege, auf denen Schadstoffe sich ausbreiten und beispielsweise in das Grundwasser oder in den menschlichen Körper gelangen können.
Geringfügigkeitsschwelle	Grenze zwischen einer geringfügigen Veränderung der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers und einer schädlichen Verunreinigung [17]. Die mit der Geringfügigkeitsschwellen-Überschreitung definierte Grundwasserverunreinigung ist synonym zu dem Begriff „nachteilige Veränderung der Eigenschaften des Grundwassers“ des WHG. In Baden-Württemberg wird die Geringfügigkeitsschwelle numerisch mit den Prüfwerten der BBodSchV gleichgesetzt.

<b>Immission</b>	Schadstoffkonzentration im direkten Grundwasserabstrom (tiefengemittelt über den direkt betroffenen Grundwasserleiter) (VwV OW).
<b>Konzeptionelle Standortmodell</b>	Das konzeptionelle Standortmodell beschreibt die hydrogeologische Situation und den mutmaßlichen Transfer von Schadstoffen aus dem Schadensherd zum Grundwasser, bedrohten Nutzungen oder Schutzgütern.
<b>Monitored Natural Attenuation</b>	Kontrollierte natürliche Schadstoffminderung – Durch Überwachungsmaßnahmen kontrollierte natürliche Schadstoffminderungsprozesse.
<b>Natural Attenuation</b>	Natürliche Schadstoffminderungsprozesse – Summe aller physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse, die ohne menschliches Zutun und unter Frachtreduktion Schadstoffe im Boden und Grundwasser verringern.
<b>Nutzungswürdiges Grundwasservorkommen</b>	Grundwasservorkommen, aus dem – unter Würdigung aller Umstände des Einzelfalles jetzt oder künftig – ein Entnehmen, Zutagefördern, Zutageleiten oder Ableiten von Grundwasser mit dem Ziel, dieses Wasser zu nutzen (unabhängig von der Art der Nutzung), möglich und zweckmäßig sein kann. Zu den Umständen des Einzelfalles zählen insbesondere das Grundwasserdargebot und die geogene Beschaffenheit. Nicht zu berücksichtigen sind in der Regel wirtschaftliche Aspekte, eine möglicherweise anthropogen beeinträchtigte Grundwasserqualität, oder dass eine Nutzung derzeit nicht beabsichtigt ist.
<b>Orientierende Untersuchung</b>	Im Rahmen der orientierenden Untersuchung (OU) wird geprüft, ob konkrete Anhaltspunkte dafür vorliegen, die den hinreichenden Verdacht einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast nach § 3 Abs. 4 BBodSchV begründen. Die Datenlage ist punktuell, d. h. der Schadstoffherd ist räumlich noch nicht eingegrenzt.
<b>Ort der Beurteilung</b>	Übergangsbereich von der ungesättigten zur wassergesättigten Zone beim Wirkungspfad Boden – Grundwasser (§ 4 Abs. 3 Satz 3 BBodSchV). Ort der Beurteilung für Schadstoffherde innerhalb des Grundwassers ist der Kontaktbereich Grundwasser – Schadstoffherd (Kontaktgrundwasser) ohne Verdünnung durch das umgebende Grundwasser.
<b>Prüfwert</b>	Wert, bei dessen Überschreitung unter Berücksichtigung der Nutzung eine einzelfallbezogene Prüfung durchzuführen und festzustellen ist, ob eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast vorliegt (§ 8 Abs. 1 Nr. 1 BBodSchG). Die Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden – Grundwasser entsprechen in Baden-Württemberg der wasserrechtlichen Geringfügigkeitsschwelle.
<b>Sanierungsuntersuchung</b>	In einer Sanierungsuntersuchung werden verschiedene prinzipiell mögliche Maßnahmen zur Gefahrenabwehr vergleichend geprüft mit dem Ziel, die für den Einzelfall am ehesten geeignete Variante abzuleiten.
<b>Schaden</b>	Im Sinne des Wasserrechts eine bestehende Überschreitung der wasserrechtlichen Geringfügigkeitsschwelle am Ort der Beurteilung.



Schadstofffahne	Die Schadstofffahne ist der Teil einer Grundwasserverunreinigung, in dem die Schadstoffe vorwiegend gelöst vorliegen [27] und die Geringfügigkeitsschwelle oder Prüfwerte überschreiten.
Schadstoffherd (Synonym: Schadstoffquelle)	Als Schadstoffherd werden in der Bodenmatrix gebundene Schadstoffe, residual gesättigte Bereiche und Phasenkörper in gesättigter oder ungesättigter Zone bezeichnet. Im Grundwasser ist die Grenze zwischen Schadstoffherd und -fahne im Allgemeinen an einer deutlichen Änderung des Verhältnisses zwischen Gesamtstoffgehalten und gelösten Anteilen erkennbar.
Sickerwasserprognose	Abschätzung der von einer Verdachtsfläche, altlastverdächtigen Fläche, schädlichen Bodenveränderung oder Altlast ausgehenden oder in überschaubarer Zukunft zu erwartenden Schadstoffeinträge über das Sickerwasser in das Grundwasser, unter Berücksichtigung von Konzentrationen und Frachten und bezogen auf den Übergangsbereich von der ungesättigten zur wassergesättigten Zone (§ 2 Nr. 5 BBodSchV).
Untersuchungsplan	Er enthält alle erforderlichen Beschreibungen und Arbeitsanweisungen zur Erstellung der Messstellen, zur Entnahme und Behandlung der Proben, zur Arbeitsplanung, zum Arbeitsschutz sowie zur Qualitätssicherung.
Untersuchungsstrategie	Sie beschreibt eine grundsätzliche Vorgehensweise zur Daten- und Informationsgewinnung im Hinblick auf ein konkretes Untersuchungsziel

#### ABKÜRZUNGEN

Erläuterungen zu den Abkürzungen s. auch Abbildung 7 und Abbildung 8.

Indizes:	A	- Abstrom, z. B. $c_A$ , $Q_A$
	KGW	- Kontaktgrundwasser, z. B. $c_{\text{KGW}}$ , $Q_{\text{KGW}}$
	GW	- Grundwasser, z. B. $h_{\text{GW}}$
	OdB	- Ort der Beurteilung, z. B. $c_{\text{OdB}}$
	Z	- Zustrom, z. B. $c_Z$ , $Q_Z$
	ZT	- Zustromanteil, z. B. $Q_{\text{ZT}}$
	SH	- Schadstoffherd, z. B. $c_{\text{SH}}$ , $Q_{\text{SH}}$
	SiWa	- Sickerwasser, z. B. $c_{\text{SiWa}}$ , $Q_{\text{SiWa}}$

- a - durch einen Pumpversuch nach der Pumpversuchsdauer  $t_{\text{PV}}$  erfasste Abstrombreite rechtwinklig zur Grundwasserfließrichtung [m]
- $A_A$  - Grundwasserquerschnittsfläche im unmittelbaren Abstrom des Schadstoffherds  $A_A = B_A \cdot h_{\text{GW}}$  [m<sup>2</sup>]
- AF - Abminderungsfaktor  $c_{\text{SH}} / c_{\text{OdB}}$ , ermittelt aus der Sickerwasserprognose
- $A_{\text{KGW}}$  - Querschnittsfläche des Schadstoffherds, die der Kontaktgrundwasservolumenstrom durchfließt [m<sup>2</sup>]
- $A_{\text{SiWa}}$  - Grundfläche des Schadstoffherds, die der Sickerwasservolumenstrom durchsickert [m<sup>2</sup>]
- $B_A$  - Breite der Grundwasserquerschnittsfläche  $A_A$  [m]
- BAM - Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

BMBF	- Bundesministerium für Bildung und Forschung
BN	- Beweisniveau
$c, c^*$	- Konzentration [ $\mu\text{g/l}$ ]; $c^*$ steht für Konzentrationen am Ort der Beurteilung oder im direkten Grundwasserabstrom, die unter Berücksichtigung der Verdünnung im Grundwasser zurückgerechnet oder berechnet werden.
$c_A$	- Schadstoffkonzentration im direkten Grundwasserabstrom des Schadstoffherds [ $\mu\text{g/l}$ ]
$c_{\text{Fahne}}$	- Schadstoffkonzentration innerhalb der Schadstofffahne [ $\mu\text{g/l}$ ]
$c_{\text{KGW, OdB}}$	- Schadstoffkonzentration im Kontaktgrundwasser des Schadstoffherds am Ort der Beurteilung [ $\mu\text{g/l}$ ] (eine Unterscheidung zwischen Kontaktgrundwasser innerhalb des Schadstoffherds und Kontaktgrundwasser am Ort der Beurteilung (Rand des Schadstoffherds) analog zu Schadstoffherden oberhalb des Grundwassers ( $c_{\text{SiWa}}$ ) entfällt.
CMT	- Continuous Multichannel Tubing
$c_{\text{OdB}}$	- Oberbegriff für $c_{\text{KGW}^? \text{ OdB}}$ und $c_{\text{SiWa}^? \text{ OdB}}$
CPT	- Cone Penetration Test
$c_{\text{SiWa, cSH}}$	- Schadstoffkonzentration im Sickerwasser innerhalb des Schadstoffherds [ $\mu\text{g/l}$ ]
$c_{\text{SiWa, cOdB}}$	- Schadstoffkonzentration im Sickerwasser am Ort der Beurteilung unterhalb des Schadstoffherds [ $\mu\text{g/l}$ ]
$c_{\text{SH}}$	- Oberbegriff für $c_{\text{KGW}^? \text{ SH}}$ und $c_{\text{SiWa}^? \text{ SH}}$
$c_Z$	- Schadstoffkonzentration im Grundwasserzustrom [ $\mu\text{g/l}$ ]
DIN	- Deutsches Institut für Normung e.V.
DU	- Detailuntersuchung
E	- Emission bzw. Schadstofffracht [ $\text{g/d}$ ]
$E_A$	- Emission von Schadstoffen aus dem Schadstoffherd in das Grundwasser, berechnet aus der Grundwasseruntersuchung [ $\text{g/d}$ ]
EFA	- Evaneszent Field Absorbance Sensor
$E_{\text{Fahne}}$	- Schadstofffracht innerhalb der Schadstofffahne [ $\text{g/d}$ ]
eM	- einzelfallbezogene Mindestanforderung gemäß VwV OW
$E_{\text{max}}\text{-W}$	- maximal zulässige Emission bezogen auf den Schutz von Grundwasser [ $\text{g/d}$ ]
ENA	- Enhanced Natural Attenuation
$E_{\text{OdB}}$	- Emission von Schadstoffen aus dem Schadstoffherd in das Grundwasser unter Berücksichtigung einer eventuellen Schadstoffminderung in der ungesättigten Zone [ $\text{g/d}$ ].
GFS	- Geringfügigkeitsschwelle
GW	- Grundwasser
GWL	- Grundwasserleiter
GWM	- Grundwassermessstelle
GWN	- Grundwasserneubildung [ $\text{mm/a}$ ]
$h_{\text{GW}}$	- Grundwassermächtigkeit [ $\text{m}$ ]
$h_{\text{KGW}}$	- Kontaktgrundwassermächtigkeit [ $\text{m}$ ]
I	- Grundwassergefälle [-]
IPV	- Immissionspumpversuch
$k_f$	- Durchlässigkeitsbeiwert für Grundwasser [ $\text{m/s}$ ]
KORA	- BMBF-Förderschwerpunkt: Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden
MIP	- Membrane Interphase Probe
MNA	- Monitored Natural Attenuation - Kontrolle von natürlichen Minderungsprozessen

NA	- Natural Attenuation – natürliche Schadstoffminderungsprozesse
NAPL	- nonaqueous phase liquid
n	- Anzahl der Grundwassermessstellen [-]
$n_f$	- durchflusswirksamer Hohlraumanteil [-]
OdB	- Ort der Beurteilung
OU	- orientierende Untersuchung
PDB	- Polyethylen-Diffusions-Beutel-Sammler (Passivsammler)
P-W	- Prüfwert zum Schutz von Grundwasser vor Schadstoffeinträgen aus kontaminiertem Boden bzw. Ablagerungsgut [ $\mu\text{g/l}$ ]
$Q_A$	- Grundwasservolumenstrom über die Breite des Schadstoffherds in dessen direktem Abstrom. $Q_A$ enthält $Q_{SH}$ [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]
$Q_{KGW}$	- Kontaktgrundwasservolumenstrom über die Breite des Schadstoffherds in dessen direktem Abstrom [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]
$Q_{PV}$	- Grundwasserentnahmerate bei einem Pumpversuch [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$Q_{SiWa}$	- Sickerwasservolumenstrom, der nach Durchsickerung von kontaminiertem Material des Schadstoffherds dem Grundwasser zuströmt [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]
$Q_{SH}$	- Überbegriff für $Q_{KGW}$ und $Q_{SiWa}$ : Sickerwasservolumenstrom $Q_{SiWa}$ bzw. Kontaktgrundwasservolumenstrom $Q_{KGW}$ , der nach Durchsickerung von bzw. Kontakt mit kontaminiertem Material dem Grundwasser zufließt [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]
$Q_Z$	- Grundwasservolumenstrom über die Breite des Schadstoffherds in dessen Zustrom [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]
$Q_{ZT}$	- Teilstrom von $Q_Z$ , der nicht den Schadstoffherd durchströmt [ $\text{m}^3/\text{d}$ ]
ROST	- Rapid Optical Screening Tool
SBV	- schädliche Bodenveränderungen
SU	- Sanierungsuntersuchung
T	- Transmissivität [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$t_{PV}$	- Pumpversuchsdauer [h]
v	- Fließgeschwindigkeit [m/s]
$v_f$	- Filtergeschwindigkeit nach DARCY [m/s]
x, y	- Ortskoordinaten [m]

## Anhang II: Ausgewählte Hintergrundwerte, Prüfwerte, Geringfügigkeitsschwellenwerte und Emissionsschwellenwerte

Hinweise zur Anwendung:

1. Die Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden – Grundwasser definieren in Baden-Württemberg auch die wasserrechtliche Geringfügigkeitsschwelle.
2. Sofern nach Bodenschutz- und Wasserrecht keine Werte vorgegeben sind, kann auf anerkannte Listenwerte, wie die Empfehlungen der LABO oder LAWA, zurück-

gegriffen werden oder sind einzelfallspezifische Ableitungen auf der Grundlage der Bekanntmachung der Ableitungsmethoden und -maßstäbe im Bundesanzeiger Nr. 161a vom 28.08.1999 möglich. In jedem Fall entscheidet die zuständige Verwaltungsbehörde über die Anwendbarkeit nicht gesetzlich geregelter Werte.

Anorganische Parameter	Hintergrundwert <sup>1)</sup> (µg/l)	Prüfwert (µg/l)	GFS-Wert (µg/l)	E <sub>max</sub> -Wert <sup>1)</sup> (g/Tag)	Organische Parameter	Hintergrundwert <sup>1)</sup> (µg/l)	Prüfwert (µg/l)	GFS-Wert (µg/l)	E <sub>max</sub> -Wert <sup>1)</sup> (g/Tag)
Aluminium	100	150 <sup>1)</sup>		320	Aldrin		0,1	0	
Ammonium	100	500 <sup>1)</sup>		1.100	Benzol	< BG	1	1	2
Antimon		10	5		Σ BTEX <sup>3)</sup>	< BG	20	20	20
Arsen	3	10	10	22	Σ Chlorbenzole			1	
Barium			340		Σ Chlorphenole			1	
Blei	4	25	7	20	Dichlor-ethan;1,2			2	
Bor			740		DDT		0,1		
Cadmium	1	5	0,5	6,5	HCB			0,01	
Chlorid			250.000		Σ HCH		0,1 <sup>1)</sup>		0,2
Chrom ges.	2	50		90	Σ LHKW <sup>4)</sup>	< BG	10	20	20
Chrom (III)			7 (50) <sup>9)</sup>		Mineralöl-KW <sup>2)</sup>	10 <sup>7)</sup>	200	100	100
Chrom (VI)	0,4	8		18	MTBE			15	
Cyanid ges.	< BG	50	5 (50) <sup>10)</sup>	85	Naphthalin	0,05	2		4,5
Cyanid leicht freisetzbar.		10			PAK ges. <sup>6)</sup>	0,05	0,2	0,2	0,32
Fluorid	250	750	750	1.600	PCB ges. <sup>5)</sup>	< BG	0,05	0,01	0,1
Kobalt		50	8		PCDD/F (I-TEq)	< BG	0,000005 <sup>1)</sup>		0,00001
Kupfer	5	50	14	220	PCP	< BG	0,1 <sup>1)</sup>	0,1	0,2
Molybdän		50	35		Pestizide	< BG	0,1 <sup>1)</sup>	0,5 <sup>11)</sup>	0,2
Nickel	3	50	14	45	Phenole	10	20	8	65
Quecksilber	0,05	1	0,2	1,5	Σ Tri- und Tetrachlor-ethen			10	
Selen	4	10	7	17,5	Vinylchlorid			0,5	
Sulfat			240.000						
Thallium	3	8 <sup>1)</sup>	0,8	17,5					
Vanadium			4 <sup>8)</sup>						
Zink	150	500	58	3.200					
Zinn	2	40		20					

- 1) Werte nicht aus BBodSchV, sondern aus VwV Orientierungswerte.
- 2) n-Alkane (C 10...C39), Isoalkane, Cycloalkane und aromatische Kohlenwasserstoffe.
- 3) Leichtflüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe (Benzol, Toluol, Xylole, Ethylbenzol, Styrol, Cumol).
- 4) Leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe (Summe halogenierte C1- und C2- Kohlenwasserstoffe). GFS-Wert: Incl. Trihalogenmethane. GFS von Tri- und Tetrachlorethen, Dichlorethan und Vinylchlorid ist zusätzl. einzuhalten.
- 5) PCB, ges.: Summe der polychlorierten Biphenyle; in der Regel Bestimmung über die 6 Kongeneren nach Ballschmiter gemäß Altöl V0 (DIN 51527) multipliziert mit 5; ggf. z. B. bei bekanntem Stoffspektrum einfache Summenbildung aller relevanten Einzelstoffe (DIN 38407 3 2 bzw. 3 3).
- 6) PAK, ges.: Summe der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe ohne Naphthalin und Methylnaphthaline; in der Regel 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).
- 7) Hintergrundwert für IR-Spektroskopie.
- 8) Die Anwendung ist bis zum 31.12.2007 ausgesetzt, um die Datenbasis zu verbessern.
- 9) Liegt kein Chrom (VI) vor, gilt der Wert der TrinkwV (50 µg/l) als Geringfügigkeitsschwelle.
- 10) Liegt kein freies Cyanid vor, gilt der Wert der TrinkwV (50 µg/l) als Geringfügigkeitsschwelle.
- 11)  $\Sigma$  Pflanzenschutzmittel + Biozide (PSMBP).

## ANHANG III: HANDLUNGSMATRIX FÜR DEN WIRKUNGSPFAD BODEN - GRUNDWASSER

BN 1: Bewertung nach Erfassung


BN 2: Bewertung nach orientierender Untersuchung

BN 3: Bewertung nach Detailuntersuchung

BN 4: Bewertung nach Sanierungsuntersuchung

BN 5: Bewertung nach Sanierung

Handlungsbedarf	Kriterium	BN 1	BN 2	BN 3	BN 4	BN 5	Kürzel
A	ohne	x	x	x	x	x	A
A nach Kontrolle	ohne			x	x		A n K
A nach Sanierung	ohne					x	A n S
B	Anhaltspunkte; derzeit keine Exposition	x					B Aex
B	Entsorgungsrelevanz	x	x	x	x	x	B Ent
B	Neubewertung bei Nutzungsänderung		x	x	x	x	B Neu
B	Neubewertung bei Änderung der Exposition		x	x	x	x	B Nex
B	Gefahrenlage hinnehmbar/hinzunehmen			x	x		B Gh
B nach Kontrolle	Entsorgungsrelevanz			x	x		B Ent
B nach Kontrolle	Neubewertung bei Nutzungsänderung			x	x		B Neu
B nach Kontrolle	Neubewertung bei Änderung der Exposition			x	x		B Nex
B nach Kontrolle	Gefahrenlage hinnehmbar/hinzunehmen			x	x		B Gh
B nach Sanierung	Entsorgungsrelevanz					x	B Ent
B nach Sanierung	Neubewertung bei Nutzungsänderung					x	B Neu
B nach Sanierung	Neubewertung bei Änderung der Exposition					x	B Nex
B nach Sanierung	Gefahrenlage hinnehmbar/hinzunehmen					x	B Gh
K	Gefahrenlage derzeit hinnehmbar/hinzunehmen			x	x	x	K Gdh
K	Überwachung des hinzunehmenden Schadens				x	x	K Schaden
K	Prüfung von Sicherungsmaßnahmen					x	K S
K	Gefahrenlage nicht weiter erkundbar			x			K ne
K nach Sanierung	Gefahrenlage derzeit hinzunehmen					x	K Gdh
K nach Sanierung	Überwachung des hinzunehmenden Schadens					x	K Schaden
K nach Sanierung	Prüfung von Sicherungsmaßnahmen					x	K S
Eigenüberwachung	Gefahrenlage derzeit hinnehmbar/hinzunehmen			x	x	x	K Gdh
Eigenüberwachung	Überwachung des hinzunehmenden Schadens				x	x	K Schaden
Eigenüberwachung	Prüfung von Sicherungsmaßnahmen					x	K S
Eigenüberwachung	Gefahrenlage nicht weiter erkundbar			x			K ne
OU	ohne	x					OU
DU	ohne		x				DU
DU	Sanierungsbeginn sehr wahrscheinlich		x				DU S
SU	Sanierungsuntersuchung			x			SU
S	Sicherungsmaßnahme		x	x	x		S S
S	Dekontaminationsmaßnahme		x	x	x		S D

 kein Verdacht

 Verdacht

 Altlast

**LUBW**

## ANHANG IV: CHECKLISTEN FÜR DIE BEGRÜNDUNG UND DOKUMENTATION DES KONZEPTIONELLEN STANDORTMODELLS

Zur vollständigen Dokumentation und Nachvollziehbarkeit der Überlegungen zum konzeptionellen Standortmodell kann eine tabellarische Form verwendet werden. Tabelle A bietet die Möglichkeit, Ausprägung, Datenquellen und Annahmen für hydrogeologische Merkmale verbal zu beschreiben. Das Ergebnis ist eine Darstellung der wesentlichen Fakten zur hydrogeologischen Modellvorstellung in Kurzform. Zur späteren Nachvollziehbarkeit ist es möglich,

in dieser Tabelle neben der Merkmalsausprägung auch die Datenquelle (z. B. „Geologische Karte GK xxxx“, „WSG-Gutachten Auquelle vom xx.xx.xxxx“) anzugeben. Sind mangels konkreter Daten Annahmen zu treffen, wird dies ebenfalls in der Tabelle dokumentiert (z. B. „keine Markierungsversuche dokumentiert, daher Annahme für  $n_f$  0,02, Erfahrungswert für Kluftgrundwasserleiter aus Projekt xy in z“).

Tabelle A: Hydrogeologisches Arbeitsmodell (in der rechten Spalte sind kursiv Stichworte wiedergegeben, zu denen hier Ausführungen sinnvoll sind)

Merkmale	Merkmalsausprägung, Datenquelle
Modellraum	<i>Definition/räumliche Abgrenzung</i>
Schichtaufbau, Schichtlagerung	<i>Geol. Einheiten, Mächtigkeiten, Geometrie, Tektonik</i>
Ungesättigte Zone	<i>Petrographischer Aufbau, Durchlässigkeit</i>
Grundwasserleiter	<i>Stockwerke, Petrographischer Aufbau, Kluft-/ Poren-/ Karst-GWL, Mächtigkeiten, Heterogenitäten, Relief (z. B. Rinnen)</i>
Besonderheiten der Grundwasserleiter	<i>Staugrenzen, Vorfluter, Drainagen, GW-Entnahmen, Subrosion, Arteser, Verwitterungsbereiche</i>
Grundwasserfließrichtung	<i>Werte mit wasserstandsabhängigen Variationen</i>
Durchlässigkeiten, Speicherkoeffizient, durchflusswirksamer Hohlraumanteil, Dispersivität	<i>Werte oder Wertebereiche für alle relevanten Einheiten, ggf. Anisotropien bei hydraul. Kenngrößen</i>
Grundwasserneubildung	<i>Werte und deren räumliche Variabilität</i>
Geogene und anthropogene Grundwasserbeschaffenheit	<i>Geogene Vorbelastungen, Typisierung, Schadstoffgehalte</i>
Vorhandene Grundwasseraufschlüsse	<i>Art, Zustand, Verwendbarkeit für Untersuchungen</i>



Tabelle B ist die Dokumentation der Eingangsgrößen zum „Datenblatt zur Ermittlung von Konzentrationen und Frachten“ (siehe Abschnitt 2.2.2). Das Datenblatt ist zentrales Element zur Beantwortung der häufigsten Leitfragen. Auf den Eingangsgrößen basiert die Entscheidung für

weitere Maßnahmen. In der nachfolgenden Tabelle B können konkrete Quellen, Verweise etc. aufgeführt werden, um die Herleitung der Eingangsgrößen zu belegen. Zur Nachvollziehbarkeit der Zahlenwerte und zur Qualitätskontrolle ist die Dokumentation von Nutzen.

Tabelle B: Dokumentation der Eingangsgrößen im „Datenblatt zur Ermittlung von Konzentrationen und Frachten“

Datenherkunft für das „Datenblatt zur Ermittlung von Konzentrationen und Frachten“ (Abschnitt 2.2.2) Beispiele	
$A_{SiWa}$	Schadstoffherduntersuchung, s. Lageplan ...
$B_A$	Schadstoffherduntersuchung, s. Lageplan ...
$h_{GW}$	Profilaufnahme GWM, s. Kapitel ...
$h_{KGW}$	Profilaufnahme GWM, Schadstoffherduntersuchung, s. Kapitel ...
Fließrichtung	Gutachten LGRB zum WSG .... vom .....
T	Pumpversuche, s. Kapitel ...
$k_f$	Pumpversuche, s. Kapitel ...
l	Stichtagsmessung vom ...
$n_f$	Gutachten LGRB zum WSG .... vom .....
$Q_{PV}$	Pumpversuche, s. Kapitel ...
$t_{PV}$	Pumpversuche, s. Kapitel ...
GWN	Gutachten LGRB zum WSG .... vom .....
$c_z$	Analytik an Zustrommesstelle, s. Kapitel ...
$c_{SH}$	Analytik, s. Kapitel ...
$c_{OdB}$	Sickerwasserprognose, s. Kapitel ...
$c_A$	Analytik, s. Kapitel ...





## ANHANG V: VORSCHLAG FÜR EINE STUFENWEISE VORGEHENSWEISE BEI PLANUNG UND UMSETZUNG VON UNTERSUCHUNGSSTRATEGIE UND -PLAN

Planungsstufe	Beispiele für einzelne Arbeitsschritte
1. Identifizierung der zu klärenden Fragestellung(en) <sup>4</sup>	
2. Entwicklung des konzeptionellen Standortmodells	<p>Grundlagenermittlung und Auswertung vorhandener Unterlagen oder Informationen zur Standortgeschichte</p> <p>Erstellung eines hydrogeologischen Arbeitsmodells</p> <p>Abschätzung von Aquiferdaten aus Vorkenntnissen, hydrogeologischen Kartenwerken, Untersuchungen in der Nachbarschaft u.ä.</p> <p>Ermittlung der relevanten Schadstoffeigenschaften im Hinblick auf das Ausbreitungsverhalten im gesättigten und ungesättigten Untergrund</p> <p>Identifizierung von möglicherweise betroffenen Schutzgüter, wie Mineral- oder Heilquellen, öffentliche Trinkwassergewinnungsanlagen, Eigen- oder Brauchwasserentnahmen</p>
3. Entwicklung eines Untersuchungskonzepts nach Durchführung eines Alternativenvergleichs	<p>Darstellung und Vergleich grundsätzlich möglicher Untersuchungsalternativen</p> <p>Festlegung der erforderlichen Messgrößen, wie Schadstoffkonzentrationen in Boden und Grundwasser, Materialkennwerte, Parameter zur Charakterisierung der Grundwasserbeschaffenheit und Methoden der Probennahme und -analyse</p> <p>Konzeption von ungefährender Lage der Probennahmestellen</p> <p>Konzeption der Randbedingungen für Probennahmen, wie Pumpversuch, Schöpfprobe, Passivsammler</p> <p>Festlegung der Anforderungen an die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Messgrößen im Hinblick auf die anstehenden Entscheidungen</p>
4. Entwicklung des Untersuchungsplans und des Qualitätssicherungsplans	<p>Festlegung der genauen Bohransatzpunkte, Bohrtiefe, Beschreibung von Bohrverfahren (Berücksichtigung von Bohrhindernissen, wie Leitungen, Kampfmittelverdacht)</p> <p>Art und Ausbau der Messstellen, wie Ausbaumaterial, Filterstrecken, Abdichtung von Zwischenhorizonten</p> <p>Beschreibung der Vorgehensweise bei Entnahme, Behandlung und Analyse der Proben, wie Probennahmeverfahren, Entnahmetiefe, Förderrate, Probennahmeintervalle, Abpumpzeiten, Probenstabilisierung</p> <p>Art und Umfang von Vor-Ort-Messungen, wie Geophysik, Sensortechnik</p> <p>weiterer Verbleib der Messstellen, wie Rückbau oder Erhalt</p> <p>Beschreibung der Messungen zur Eignungsprüfung der Messstellen</p> <p>Nullproben, Doppelproben und Vergleichsanalysen, Kalibrierungen</p> <p>Arbeitsschutz</p>
5. Untersuchungsvorbereitung und -durchführung	<p>Bohranzeige</p> <p>Wasserrechtsverfahren</p> <p>Feldarbeiten, wie Messstellenbau, Probennahme, -vorbereitung, -übergabe, Messungen an Ort und Stelle</p> <p>Ausführungskontrolle und Kontrollmessungen</p> <p>Protokollierung</p>
6. Auswertung, Bewertung und Dokumentation	<p>Ergebnisdarstellung</p> <p>Plausibilitätsprüfung</p> <p>Bewertung der Ergebnisse und Entwicklung von Vorschlägen zur weiteren Vorgehensweise</p>



<sup>4</sup> Beispiele für Fragestellungen sind: Entscheidung über einen Gefahrverdacht, Bescheinigung der Schadstofffreiheit, Abgrenzung zwischen schadstoffbelasteten und -unbelasteten Bereichen, Ermittlung des Verursachers, Entscheidung über einen Handlungsbedarf zur Gefahrenabwehr, Entscheidung über alternative Sanierungsmethoden, Entscheidung über Anwendung von Natural Attenuation

## ANHANG VI: GESETZE UND VERORDNUNGEN

**BBodSchG** Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz) vom 17.03.1998 (BGBl. I S. 502, geänd. durch Art. 17 Siebtes Euro-Einführungsg v. 9.9.2001 (BGBl. I S. 2331) und Art.3 G zur Anpassung von Verjährungsvorschriften an das Gesetz zur Modernisierung des Schuldrechts v. 9.12.2004 (BGBl. I S. 3214)

**BBodSchV** Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung in der Fassung vom 12.07.1999, ( BGBl. I S. 1554)

**FrAl** Richtlinien des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg über die Förderung von Maßnahmen zur Erfassung und Behandlung altlastverdächtiger Flächen und Altlasten (Förderrichtlinien Altlasten) vom 14.12.2004, ( GABl. Nr. 1 S. 72).

**LBodSchAG** Gesetz zur Ausführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes Baden-Württemberg (Landes-Bodenschutz- und Altlastengesetz) vom 14.12.2004,( GABl. S. 908).

**VwV OW** Gemeinsame Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Umwelt und Verkehr und des Sozialministeriums Baden-Württemberg über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen vom 16.09.1993 in der Fassung vom 01.03.1998 (GABl. S.295) (Anm.: Die Gültigkeit der VwV OW ist am 31.12.2005 erloschen. Es bestehen jedoch keine Einwände sich an ihr weiterhin zu orientieren, soweit ihr Regelungsgehalt nicht geltenden Gesetzen oder Verordnungen widerspricht.

**WHG** Wasserhaushaltsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 19. August 2002 (BGBl. I S. 3245)

**WG** Wassergesetz für Baden-Württemberg in der Fassung der Bekanntmachung vom 20. Januar 2005 (GBl. S. 219, ber. S. 404)

## ANHANG VII: LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Alimi, H.; Ertel, T. und Schug, B. (2002): Fingerprinting of Hydrocarbon Fuel Contaminants: Literature Review. *Environmental Forensics* 3/2003, S. 25-39.
- [2] Alimi, H. und Ertel, T. (2001): Charakterisierung von organischen Schadstoffen in Boden und Grundwasser, *TerraTech* 5/2001, S. 32-36.
- [3] Altlastenforum Baden-Württemberg e. V. (2002): Grundwasserabstromuntersuchung durch Immissionsmessung. Heft 8. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. – Stuttgart.
- [4] Altlastenforum Baden-Württemberg e. V. (2006): Innovative Mess- und Überwachungsmethoden. Heft 11. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. – Stuttgart.
- [5] ASTM: Standard Guide for Installation of Direct Push Ground Water Monitoring Wells, D 6724-01, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [6] ASTM: Standard Practice for Direct Push Installation of Prepacked Screen Monitoring Wells in Unconsolidated Aquifers, D 6725-01, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [7] ASTM: Standard Guide Direct Push Water Sampling for Geoenvironmental Investigation, D 6001, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [8] ASTM: Standard Guide for Direct Push Soil Sampling for Environmental Site Characterisation, D 6282, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [9] Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2004): Natürliche Schadstoffminderung bei Grundwasserverunreinigungen durch Altlasten und schädliche Bodenveränderungen - Natural Attenuation; Merkblatt 3.8/3. – München.
- [10] BMBF, KORA TV8 (2005): Untersuchung der rechtlichen Rahmenbedingungen für den kontrollierten und natürlichen Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Böden und Grundwässer; Schlussbericht. – Berlin.
- [11] BMBF-Förderschwerpunktes KORA [www.naturalattenuation.de](http://www.naturalattenuation.de)
- [12] Bracke, R.: Direct Push-Technologien (2001): Der Einsatz von Direct Push-Verfahren für Geomonitorings und baugrundtechnische Fragestellungen, *ECOS – umwelttechnische und wissenschaftliche Publikationen*.
- [13] Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e. V. (2004): Erarbeitung von Leistungsbeschreibungen und Leistungsverzeichnissen zur Grundwasserprobennahme bei Altlasten im Lockergestein; Merkblatt 5 (Entwurf). – Pfullingen.
- [14] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (2003): Probenahme von Grundwasser bei belasteten Standorten. – Bern.
- [15] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), Ständiger Ausschuss Altlasten (ALA) Ad-hoc Unterausschuss „Natural Attenuation“: Berücksichtigung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse bei der Altlastenbearbeitung; Positionspapier. (06.2005)
- [16] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), Ständiger Ausschuss Altlasten (ALA) Unterausschuss „Arbeitshilfe für Qualitätsfragen bei der Altlastenbearbeitung“ (2002): Arbeitshilfe Qualitätssicherung.
- [17] Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), Altlastenausschuss (ALA): Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei orientierenden Untersuchungen, 07.2003
- [18] Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (2004): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser. – Düsseldorf.
- [19] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), Altlastenausschuss (ALA): Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei Detailuntersuchungen, 10.2006
- [20] Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Geologischen Gesellschaft (2002): Hydrogeologische Modelle - Ein Leitfaden mit Fallbeispielen. – Hannover.

- [21] Fehlau/Hilger/König: Vollzugshilfe Bodenschutz und Altlastensanierung: Erläuterungen zur Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. – Berlin: Erich Schmidt, 2000.
- [22] Field Analytical Technology Encyclopedia (FATE), fate.clu-in.org
- [23] Fortbildungsverbund Boden und Altlasten Baden-Württemberg: Seminarreihe „Qualitätssicherung in der Altlastenbearbeitung“. – Stuttgart. [www.iws.uni-stuttgart.de/weiterbildung/fortbildungsverbund/index.html](http://www.iws.uni-stuttgart.de/weiterbildung/fortbildungsverbund/index.html)
- [24] Gerstner, D., Scheydt, T. und Fälder, C. (2006): Untersuchung von Altlasten – Einsatzmöglichkeiten und Grenzen von Direct Push Technologien bei der Altlastenbearbeitung. In: altlasten spektrum 6/2006.
- [25] Hipp/Rech/Turian: Das Bundes-Bodenschutzgesetz mit Bodenschutz- und Altlastenverordnung: Leitfaden. – 1. Aufl. – München; Berlin: Rehm, 2000.
- [26] Kohler, W., Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (2006): Monitored Natural Attenuation - Konzepte im Rahmen der systematischen Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg. – Karlsruhe.
- [27] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Boden (LABO) (2006): Grundsätze des nachsorgenden Grundwasserschutzes bei punktuellen Schadstoffquellen, Mainz, 05.2006
- [28] Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2007): Altlasten-Fachinformationen im WWW
- [29] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2005): Anforderungen an ein Gutachten im Bereich der Altlastenuntersuchung; Sonstige Berichte Nr. 30 (Entwurf). – Karlsruhe.
- [30] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2005): Die Amtsermittlung bei altlastverdächtigen Flächen nach § 9 Abs. 1 BBodSchG (orientierende Untersuchung); Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Band 39. – Karlsruhe.
- [31] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2004): XUMA-Bewertung.
- [32] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2002): Altlastenbearbeitung Baden-Württemberg: Stand des Priorisierungsverfahrens und Fortschreibung für die Wirkungspfade Boden - Grundwasser, Boden - Mensch, Boden - Nutzpflanze und Gefahren durch Deponiegas. – Karlsruhe.
- [33] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) (2001): Handlungsempfehlung zum Einsatz von Vor-Ort-Analytik; Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Band 33. – Karlsruhe.
- [34] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) (1998): Methodensammlung; Materialien zur Altlastenbearbeitung Band 20. – Karlsruhe.
- [35] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) (1997): Anleitung zur Probennahme von Grund-, Roh- oder Trinkwasser. – Karlsruhe.
- [36] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) (1997): Leitfaden fachtechnische Kontrolle von altlastverdächtigen Flächen, Altlasten und Schadensfällen; Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Band 25. – Karlsruhe.
- [37] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) (1996): Leitfaden Erkundungsstrategie Grundwasser; Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Band 19. – Karlsruhe.
- [38] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) (1991): Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit; Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 8. – Karlsruhe.
- [39] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Landesamt für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein (1999): Branchenkatalog zur Erhebung von Altstandorten. – Karlsruhe/Kiel
- [40] Landesgesundheitsamt und Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2005): Berechnung orientierender Hinweise auf Prüfwerte für flüchtige Stoffe in der Bodenluft; Altlasten und Boden News 1/2005. – Karlsruhe.
- [41] Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2006): Grundwasseruntersuchungen an Altlasten im Lockergestein; Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz (MALBO) Band 25. – Essen.

- [42] Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2005): Leistungsbuch Altlasten und Flächenentwicklung 2004/2005; Materialien zur Altlastenbearbeitung und zum Bodenschutz (MALBO) Band 20. – Essen.
- [43] Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2006): Überwachung, Nachsorge und Eigenkontrolle bei der Altlastenbearbeitung; Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz Band 24. – Essen.
- [44] Langguth, Horst-Robert und Voigt, Rudolf: Hydrogeologische Methoden, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage 2004, Springer-Verlag
- [45] Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt Baden-Württemberg (1976): Arbeitsblatt Pumpversuche in Porengrundwasserleitern; Schriftenreihe Wasserwirtschaftsverwaltung Baden-Württemberg. – Stuttgart.
- [46] MORRISON, R.D. & MURPHY, B.L. eds. (2006): Environmental Forensics – A contaminant specific guide, Elsevier Academic press, London.
- [47] Nitsche, C. (2005): Tiefenorientierte Probennahme. Vortrag im Rahmen AQS Baden-Württemberg, Lehrgang III, 03.03.2005 (modifiziert). – Stuttgart.
- [48] Umweltbundesamt (1999): Erarbeitung von Programmen zur Überwachung von altlastverdächtigen Flächen und Altlasten; UBA-Texte 96/99. – Berlin.
- [49] United States Environmental Protection Agency – US EPA (2005): Groundwater Sampling and Monitoring with Direct Push Technologies, EPA 540/R-04/005, [www.epa.gov](http://www.epa.gov).
- [50] United States Environmental Protection Agency US EPA (1997): Expedites Site Assessment Tools for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Regulators, [www.epa.gov/Swerust1/sam.thm](http://www.epa.gov/Swerust1/sam.thm).
- [51] Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau (1997): Stand des Wissens bei der Beprobung von Grundwasser bei Altlasten. – Stuttgart.





