



Systematische Vorgehensweise bei Sanierungsuntersuchungen**A: Grundlagenermittlung und
 konzeptionelles Standortmodell****B: Verfahrensvorauswahl****C: Ausarbeitung von grundsätzlich
 geeigneten Sanierungsvarianten****D: Bewertung nicht-monetärer Kriterien****E: Vergleichende Beurteilung und
 Ableitung Sanierungskonzept****F: Abschließender Vorschlag zu
 verbindlichen Sanierungszielen**

Sanierungsuntersuchung nach § 13 Abs. 1 BBodSchG

Sanierungsuntersuchungen von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen

 Leitfaden zur Untersuchung von Sanierungsverfahren

Sanierungsuntersuchungen von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen

 Leitfaden zur Untersuchung von Sanierungsverfahren

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, www.lubw.de
BEARBEITUNG	ARCADIS Germany GmbH Dr. Michael Reinhard, Judith Zwigl, Sandra Rettermayer LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Jochen Stark, Dr. Helena Salowsky Referat 22 – Boden, Altlasten
REDAKTION	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Referat 22 Jochen Stark, Dr. Helena Salowsky, Alicia Graf
BEZUG	https://pd.lubw.de/10392
STAND	Februar 2022
SATZ UND BARRIEREFREIHEIT	Satzweiss.com Print Web Software GmbH Mainzer Straße 116, 66121 Saarbrücken
TITELBILD	ARCADIS Germany GmbH
ZITIERVORSCHLAG	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg., 2022): Sanierungsuntersuchung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen, Leitfaden zur Untersuchung von Sanierungsverfahren, Karlsruhe

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

ZUSAMMENFASSUNG		7
1	MOTIVATION UND ANLASS	9
2	RECHTLICHE ANFORDERUNGEN	10
2.1	Rechtliche Grundlagen zur Sanierungsuntersuchung	10
2.2	Bearbeitungssystematik Baden-Württemberg	10
2.3	Grundsätze zu Gefahrenbeurteilung und Sanierungszielen	12
2.4	Grundsätze zu Ermessen und Verhältnismäßigkeitsprüfung	14
2.5	Gefahrenabwehr und Störungsbeseitigung im Grundwasser/Ableitung von Sanierungszielen	15
2.6	Sofort- und Beschränkungsmaßnahmen	18
3	SYSTEMATISCHE VORGEHENSWEISE	19
4	GRUNDLAGENERMITTLUNG UND KONZEPTIONELLES STANDORTMODELL (SCHRITT A)	22
4.1	Inhalt des konzeptionellen Standortmodells	22
4.2	Betrachtung der Schadstoffquelle und der Schadstofffahne	23
4.3	Bedarfsweise ergänzende Untersuchungen	24
5	VERFAHRENSVORAUSWAHL (SCHRITT B)	25
6	AUSARBEITUNG GRUNDSÄTZLICH GEEIGNETER SANIERUNGSVARIANTEN (SCHRITT C)	28
6.1	Inhalte der Ausarbeitungen	28
6.2	Hinweise zu Kostenschätzungen	28
6.3	Schwankungsbereich Kosten, Kostenrisiken/-chancen	29
6.4	Ergänzende Standortuntersuchungen/Vorversuche/Pilotversuche	29
7	BEURTEILUNG NICHT-MONETÄRER KRITERIEN (SCHRITT D)	31
8	VERGLEICHENDE BEURTEILUNG UND ABLEITUNG SANIERUNGSKONZEPT (SCHRITT E)	32
9	ABSCHLIESSENDER VORSCHLAG ZU VERBINDLICHEN SANIERUNGSZIELEN (SCHRITT F)	33
9.1	Konkretisierung der Sanierungsziele	33
9.2	Bewertungskommission für Altlasten	33
10	ANFORDERUNGEN AN DIE DOKUMENTATION	34
11	ANLAGE I	36
12	ANLAGE II	46
13	ABBILDUNGEN UND TABELLEN	48
13.1	Abbildungen	48
13.2	Tabellen	48
14	LITERATUR UND WEITERE VERWEISE	49

Zusammenfassung

Die auf die Detailuntersuchung folgende Sanierungsuntersuchung stellt die Weichen für die spätere Sanierung. Der Sanierungsuntersuchung kommt eine erhebliche strategische Bedeutung zu. Unvollständige, fehlerhafte oder nachlässige Sanierungsuntersuchungen führen in der Regel zu erhöhten Aufwendungen und Zeitverlusten bei den anschließenden Sanierungen.

Bereits im Jahr 1994 veröffentlichte die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg im Rahmen der „Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung“ die Arbeitshilfe „Eingehende Erkundung für Sanierungsmaßnahmen/Sanierungsvorplanung (E3-4)“. Die Grundzüge dieser Arbeitshilfe haben immer noch Bestand. Seit dieser Zeit hat sich jedoch nicht nur die Gesetzgebung des Bundes mit Inkrafttreten des BBodSchG und der BBodSchV maßgeblich geändert, es wurden auch verschiedene Arbeitshilfen und Leitfäden anderer Bundesländer sowie bundesweiter Initiativen veröffentlicht. Dies war ein Anlass, die Arbeitshilfe als Leitfaden vollständig neu zu bearbeiten.

Der neue Leitfaden „Sanierungsuntersuchungen von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen“ ist an Vollzugsbehörden, Gutachter:innen und Sachverständige adressiert und soll ein einheitlich hohes Qualitätsniveau bei den Sanierungsuntersuchungen gewährleisten. Ein Schwerpunkt des Leitfadens liegt auf der Bearbeitung des Wirkungspfades des Boden-Grundwasser.

Der Leitfaden wurde so erstellt, dass dieser auch nach der am 16.07.2021 im Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2021, Teil 1 Nr. 43 veröffentlichten Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung bzw. Mantelverordnung vom 09.07.2021, die am 01.08.2023 in Kraft tritt, weiter gelten soll. Die Inhalte der Neufassung der BBodSchV (2021) wurden vollständig berücksichtigt.

Der Leitfaden ist wie folgt aufgebaut:

Nach einem einführenden ersten Kapitel beschreibt Kapitel 2 die rechtlichen und fachlichen Anforderungen an die Sanierungsuntersuchung. Ein Schwerpunkt liegt auf der Einbindung der Sanierungsuntersuchung in die Bearbeitungssystematik Baden-Württembergs und der Diskussion der Sanierungsziele. Die behördliche Verhältnismäßigkeitsprüfung und das Ermessen bei der Festlegung von Sanierungszielen sind ein weiterer wesentlicher Inhalt. Auf das Erfordernis der jeweiligen Betrachtung von Schadstoffquelle und Schadstofffahne wird verwiesen und dieses im rechtlichen Kontext beschrieben.

Kapitel 3 enthält die systematische Vorgehensweise bei einer Sanierungsuntersuchung in sieben aufeinander folgenden Bearbeitungsschritten:

- Grundlagenermittlung und konzeptionelles Standortmodell (Schritt A)
- Verfahrensvorauswahl (Schritt B)
- Ausarbeitung von grundsätzlich geeigneten Sanierungsvarianten (Schritt C)
- Beurteilung nicht-monetärer Kriterien (Schritt D)
- Vergleichende Beurteilung und Ableitung Sanierungskonzept (Schritt E)
- Abschließender Vorschlag zu verbindlichen Sanierungszielen (Schritt F)

Detaillierte Inhalte und Qualitätsvorgaben zu den Bearbeitungsschritten finden sich in den Kapiteln 4 bis 9. Kapitel 10 enthält Anforderungen an die Dokumentation einer Sanierungsuntersuchung.

In Anlage 1 sind die in der Praxis aktuell angewandten Sanierungsverfahren tabellarisch aufgeführt. Anlage 2 enthält eine Matrix zu möglichen Bewertungen in Abhängigkeit der Stufe der Altlastenbewertung.

1 Motivation und Anlass

Die auf die Detailuntersuchung folgende Sanierungsuntersuchung stellt die Weichen für die spätere Sanierung. Somit kommt der Sanierungsuntersuchung eine erhebliche strategische Bedeutung zu. Unvollständige, fehlerhafte oder nachlässige Sanierungsuntersuchungen führen in der Regel bei der späteren Sanierung zu erhöhten Aufwendungen und Zeitverlust [HIPPE, RECH, TURIAN 2000].

Bereits im Jahr 1994 veröffentlichte die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg im Rahmen der „Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung“ die Arbeitshilfe „Eingehende Erkundung für Sanierungsmaßnahmen/Sanierungsvorplanung (E3-4)“ [LfU 1994]. Die Grundzüge dieser Arbeitshilfe haben immer noch Bestand, es hat sich seit dieser Zeit jedoch nicht nur die Gesetzgebung des Bundes mit Inkrafttreten des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) und der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) maßgeblich geändert, es wurden auch verschiedene Arbeitshilfen und Leitfäden anderer Bundesländer sowie bundesweiter Initiativen veröffentlicht. Aus diesem Grund erfolgte eine vollständige

Neubearbeitung der Arbeitshilfe, die die rechtlichen Rahmenbedingungen, den aktuellen Stand des Wissens und die Erkenntnisse verfügbarer Arbeitshilfen und Veröffentlichungen (siehe Kapitel 14 Literatur und weitere Verweise) einbezieht.

Der Leitfaden wurde so erstellt, dass dieser auch nach Inkrafttreten der Mantelverordnung (MantelV) am 01.08.2023, welche die Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) enthält, anwendbar ist. Die Inhalte der Neufassung der BBodSchV [2021] wurden vollständig berücksichtigt.

Für eine schnelle Orientierung werden in der Anlage 1 des Leitfadens die in der Praxis aktuell angewandten Sanierungsverfahren tabellarisch mit einer kurzen Verfahrensbeschreibung, der Eignung für verschiedene Schadstoffe, den Wirkungsbereich für die ungesättigte/gesättigte Zone, den Wirkungsort sowie die Einordnung nach dem Stand der Technik aufgeführt.

Hinweise zur Anwendung

Der Leitfaden ist an Vollzugsbehörden, Gutachter:innen und Sachverständige (im weiteren Text nachfolgend als Sachverständigen bezeichnet) adressiert und soll ein einheitlich hohes Qualitätsniveau bei den Sanierungsuntersuchungen gewährleisten.

Die Anwendungsfälle in der Praxis sind sehr unterschiedlich und jeder Fall ist ein Einzelfall. Deshalb kann es keine rezeptartig vorgefertigten Lösungen zur Bearbeitung von Sanierungsuntersuchungen geben. In dem Leitfaden werden die grundsätzlichen Vorgehensweisen und Anforderungen, die sich insbesondere aus rechtlichen Vorgaben ergeben, beschrieben.

Eine Berücksichtigung aller prinzipiell möglichen Wirkungspfade und Fallkonstellationen würde den Rahmen des Leitfadens sprengen. Deshalb liegt der Schwerpunkt auf der Bearbeitung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser, der für mehr als 80% aller Fälle [LUBW 2021] den dominierenden Anteil der betroffenen Wirkungspfade ausmacht. Für die übrigen Wirkungspfade können die im Leitfaden beschriebenen grundsätzlichen Vorgehensweisen angewendet werden. Lediglich die auf den Wirkungspfad Boden-Grundwasser fokussierten Texte können dann ausgeblendet werden.

In Abhängigkeit des Einzelfalls variiert der erforderliche Bearbeitungsumfang der Sanierungsuntersuchung. Dies ist abhängig von der Komplexität des jeweiligen Falls. In diesem Zusammenhang wird auf die Anforderung verwiesen, dass die Inhalte von der zuständigen Behörde vollständig prüfbar sein müssen. Die zuständige Behörde muss in die Lage versetzt werden, ihre Abwägungs- und Entscheidungsprozesse ausüben zu können.

2 Rechtliche Anforderungen

2.1 Rechtliche Grundlagen zur Sanierungsuntersuchung

Die Sanierungsuntersuchung liefert die Grundlagen für die Entscheidung, auf welche Weise der rechtlich Verantwortliche die Gefahr für ein Schutzgut abwehren und die Störung beseitigen soll und welche Sanierungsmaßnahmen geeignet, erforderlich und angemessen sind. Sanierungsuntersuchungen sind dann zulässig, wenn die Notwendigkeit einer Sanierung zumindest dem Grund nach feststeht (Rechtsfolge, siehe Kapitel 2.5). Dies ist dann der Fall, wenn eine Altlast oder schädliche Bodenveränderung festgestellt worden ist (Tatbestand, siehe Kapitel 2.5).

Nach den Vorgaben von § 13 Abs. 1 BBodSchG sind in der Sanierungsuntersuchung die bisherigen Gefährdungsabschätzungen zusammenzufassen und die bisherigen Nutzungen (Historie) der Sanierungsgrundstücke anzugeben.

Soweit bekannt, sind die beabsichtigten zukünftigen Nutzungen anzugeben. Außerdem ist zu untersuchen, mit welchen Maßnahmen das Sanierungsziel erreicht bzw. die Gefahr abgewehrt werden kann (Sanierung), welche Schadstoffanteile im Boden verbleiben und welche rechtlichen, organisatorischen und finanziellen Gegebenheiten für die Sanierungsdurchführung bedeutend sind.

Die Anforderungen an die Sanierungsuntersuchung sind in der BBodSchV [1999] im Anhang 3 vorgegeben. Diese haben sich in der Praxis bewährt. In der neu gefassten BBodSchV [2021] sind die Anforderungen in § 16 Abs. 1 und 2 dargestellt:

- (1) Ziel von Sanierungsuntersuchungen ist, anhand eines Sanierungsziels zu ermitteln, mit welchen Maßnahmen eine Sanierung im Sinne des § 4 Absatz 3 des Bundes-Bodenschutzgesetzes erreicht werden kann, inwieweit Veränderungen des Bodens nach der Sanierung verbleiben und welche rechtlichen, organisatorischen und finanziellen Umstände für die Durchführung der Maßnahmen von Bedeutung sind.
- (2) Im Rahmen von Sanierungsuntersuchungen sind die geeigneten, erforderlichen und angemessenen Maßnahmen unter Berücksichtigung von Maßnahmenkombinationen zu ermitteln. Insbesondere sind die

Eignung der Verfahren, deren technische Durchführbarkeit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit, der erforderliche Zeitaufwand, die Wirkungsdauer der Maßnahmen und deren Überwachungsmöglichkeiten, die Erfordernisse der Nachsorge und die Nachbesserungsmöglichkeiten, die Auswirkungen auf die Betroffenen im Sinne des § 12 Satz 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes und auf die Umwelt, Zulassungserfordernisse sowie die Entstehung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen zu prüfen und miteinander zu vergleichen. Die Ergebnisse der Prüfung und das danach vorzugswürdige Maßnahmenkonzept sind mit einer Abschätzung der Kosten darzustellen.

Die in Betracht kommenden Maßnahmen sind unter Berücksichtigung von Maßnahmenkombinationen und von erforderlichen Begleitmaßnahmen darzustellen.

Die Ermittlung und Prüfung der geeigneten Maßnahmen sollen unter Verwendung vorhandener Daten, insbesondere aus den Untersuchungsergebnissen der Orientierenden Untersuchung gemäß § 9 Abs. 1 BBodSchG und der Detailuntersuchung (= Gefährdungsabschätzung) gemäß § 9 Abs.2 BBodSchG durchgeführt werden. Soweit die Informationen insbesondere zur gesicherten Abgrenzung belasteter Bereiche oder zur Beurteilung der Eignung von Sanierungsverfahren im Einzelfall nicht ausreichen, sind ergänzende Untersuchungen zur Prüfung der Eignung eines Verfahrens durchzuführen (siehe auch ergänzende Hinweise in Kapitel 3).

Die Ergebnisse der Prüfung und das vorzugswürdige Maßnahmenkonzept sind darzustellen.

Nach § 13 Abs. 2 BBodSchG kann die zuständige Behörde verlangen, dass die Sanierungsuntersuchung von anerkannten Sachverständigen nach § 18 BBodSchG erstellt wird. Diese Entscheidung liegt im Ermessen der zuständigen Behörde.

2.2 Bearbeitungssystematik Baden-Württemberg

In Baden-Württemberg wird seit 1987/88 zur systematischen, einheitlichen und stufenweisen Altlastenbewertung das Priorisierungsverfahren eingesetzt [Landtag von Baden-

Württemberg 1988]. Die Altlastenbearbeitung gliedert sich hierbei in zwei Teilbereiche: die formale Feststellung der Bearbeitungspriorität durch Abschätzung des vergleichenden Risikos, das von einer Fläche ausgeht, und die Festlegung des sich daraus ergebenden Handlungsbedarfs gemäß BBodSchG/BBodSchV [LUBW 2016].

Die Bearbeitung verläuft über die Erfassung (inkl. Historische Untersuchung), Orientierende Untersuchung und Detailuntersuchung bis zur Sanierungsuntersuchung in insgesamt vier Stufen, wobei jede neue Stufe das Erreichen eines bestimmten „Beweisniveaus“ voraussetzt (BN 1 bis BN 4). Das Bearbeitungsschema des Stufenplans ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

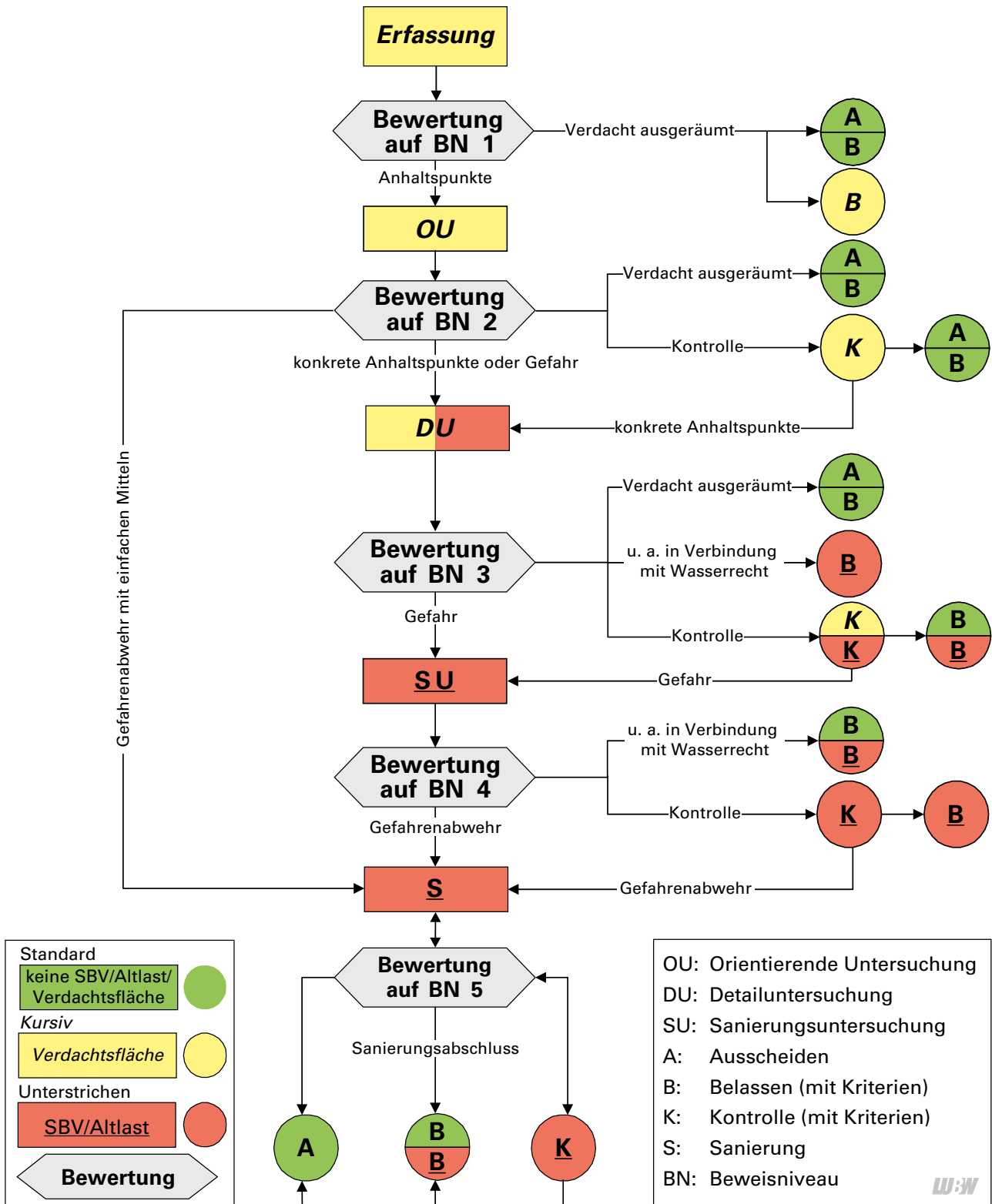


Abbildung 2.1: Stufenweise Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg [LUBW 2020]

Mit Abschluss der Detailuntersuchung inkl. der räumlichen, d. h. nach Fläche und Tiefe vorgenommenen Abgrenzung der Belastung(en) steht eindeutig fest, ob die untersuchte Fläche eine Gefahrenlage für Schutzgüter darstellt. Falls dies zutrifft, wird aus der altlastverdächtigen Fläche eine Altlast, die grundsätzlich sanierungsbedürftig ist. Die sich anschließende Sanierungsuntersuchung soll aufzeigen, wie, wieviel oder ob überhaupt saniert werden kann. Mit der Sanierungsuntersuchung (i. d. R. eine Untersuchung ohne technische Maßnahmen) wird das Beweisniveau 4 erreicht. Die Sachverständigen haben alle Sachverhalte zu untersuchen, die als Grundlage für die Verhältnismäßigkeitsprüfung erforderlich sind. Die behördliche Verhältnismäßigkeitsprüfung nach der Sanierungsuntersuchung entscheidet über Notwendigkeit und Art erforderlicher Maßnahmen. Es gibt immer wieder auch mit verhältnismäßigen Mitteln nicht sanierbare Altlasten. Evtl. stehen dann andere Optionen offen, z. B. ein MNA-Konzept, also die Kontrolle des natürlichen Rückhalts und Abbaus von Schadstoffen, welches jedoch keine Sanierung darstellt.

Nach Abschluss der Sanierungsuntersuchung gibt es auf Beweisniveau 4 die in Anlage 2 aufgeführten möglichen Bewertungen des Handlungsbedarfs.

2.3 Grundsätze zu Gefahrenbeurteilung und Sanierungszielen

Bei der Diskussion der Sanierungsziele zur Abwehr von Gefahren sind die Hintergründe zu Wirkungspfaden und die zugeordneten Prüf- und Maßnahmenwerte nach BBodSchV zu beachten. Diese werden nachfolgend kurz beschrieben.

Stellung der Prüf- und Maßnahmenwerte

„Prüf- und Maßnahmenwerte sind gefahrenverknüpfte, wirkungs- und nutzungsbezogene Werte.“ [HIP/RECH/TURIAN 2000, Rn 332]

Die BBodSchV betrachtet die drei Wirkungspfade Boden-Grundwasser, Boden-Mensch und Boden-Nutzpflanze. Bei den Wirkungspfaden Boden-Mensch und Boden-Nutzpflanze sind nutzungsorientierte Beprobungstiefen vorgegeben. Beim Wirkungspfad Boden-Grundwasser ist zwischen dem Ort der Probenahme und dem Ort der Beurteilung (Übergang des Sickerwassers der ungesättigten Bodenzone in die gesättigte Bodenzone, also ins

Grundwasser) zu unterscheiden. Für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser spielt die gesamte Mächtigkeit der kontaminierten ungesättigten Bodenzone für die Bewertung der Gefahrenlage eine Rolle. In Baden-Württemberg [LUBW 2016] werden weiterhin der „Pfad Boden-Oberflächengewässer“, „Gefahren durch Deponiegas“ (Austritt gasförmiger, flüchtiger Verbindungen in Gebäude) sowie „sonstige Gefahren“, wie z. B. Rutschungsgefahren durch Starkregenereignisse, bewertet.

Maßnahmenwerte für einige Stoffe als Anhaltspunkte für einen wahrscheinlichen Sanierungsbedarf stehen in der BBodSchV nur für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Nutzpflanze zur Verfügung.

Hingegen liegen Prüfwerte für alle drei oben genannten Wirkungspfade in der BBodSchV vor. Liegt der Messwert am Ort der Probenahme unterhalb des Prüfwertes, kann eine Gefahr ausgeschlossen werden, liegt der Messwert oberhalb des Prüfwertes, sind weitere Prüfschritte, wie z. B. eine Sickerwasserprognose für das Schutzgut Boden-Grundwasser erforderlich. Wird am Ort der Beurteilung ein Wert oberhalb des Prüfwertes prognostiziert, liegt ein hinreichender Verdacht auf eine Gefahrenlage vor. Es ist dann im Einzelfall weiter zu prüfen, unter welchen Expositionsbedingungen eine Gefahrenlage für das betroffene Schutzgut wahrscheinlich ist, d. h. ob ein Transfer von Schadstoffen zum Schutzgut (siehe auch Abbildung 2.2) stattfinden kann (Prognoseabschätzung) oder schon stattgefunden hat (Zustandsermittlung).

Einzelfallbezogene Sachverhaltsermittlung und Gefahrenbeurteilung

Die einzelfallbezogene Sachverhaltsermittlung soll die Expositionsbedingungen untersuchen und die Wirkungen auf die Schutzgüter bewerten. Unter Expositionsbedingungen sind die Bedingungen, Verhältnisse oder Zustände gemeint, die bestimmen, in welchem Maß die Schutzgüter der Wirkung vorhandener Schadstoffe ausgesetzt sein können, differenziert nach der Art der Nutzung der Fläche [HIP/RECH/TURIAN 2000, Rn 705]. Laut Anhang 1 Nr. 1.2 der BBodSchV [1999] und § 13 BBodSchV [2021] zählen insbesondere die für die verschiedenen Wirkungspfade bedeutsamen mobilen oder mobilisierbaren sowie resorptionsverfügbaren Anteile der Schadstoffgehalte zu den maßgeblichen Expositionsbedingungen. „Prüfwerte

sind so konzipiert, dass im ungünstigsten Expositionsfall auf das Vorliegen einer Gefahr zu schließen ist“ [HIPPE/RECH/TURIAN 2000, Rn 332]. „Treffen im Einzelfall alle bei der Ableitung eines Prüfwertes angenommenen ungünstigen Umstände zusammen, können Maßnahmen bereits dann erforderlich sein, wenn der Gehalt oder die Konzentration eines Schadstoffes geringfügig oberhalb des jeweiligen Prüfwertes liegt“ (§ 18 Abs. 3 BBodSchV [2021]). Zeigen demnach die Expositionsverhältnisse einen geringeren oder abgemilderten Transfer vom Schadensherd zum Schutzgut, liegt die Gefahrenschwelle entsprechend höher als der Prüfwert.

Schutzgutbezogene Gefahrenbeurteilung

Die Beurteilung einer Gefahrenlage ist somit immer im Kontext eines betroffenen Schutzguts oder Rezeptors zu sehen. Für die Beurteilung einer Schädigung des Rezeptors sind weitere Rechts- und Fachbereiche heranzuziehen. Beim Grundwasser und Oberflächengewässer sind wasserrechtliche Vorschriften (WHG, GrwV, OGewV) in Verbindung der LAWA-GFS-Werte [LAWA 2017] mit öko- und humantoxikologisch abgeleiteten Werten der Geringfügigkeitsschwelle [ZEDDEL et al. 2016], (siehe auch Abbildung 2.3) und bei Nutzpflanzen das Futter- und Lebensmittelrecht zu beachten. Das Schutzgut Nutzpflanze wird aus landwirtschaftlicher Sicht durch das Landwirtschaftsamt und das Schutzgut Mensch aus medizinischer Sicht durch das Gesundheitsamt beurteilt (siehe auch Kapitel 9.2 zur Bewertungskommission).

Die Prüfwerte liefern somit erste Beurteilungsmaßstäbe auf der Emissionsseite (Schadensherd), die zu der Prognose führen, ob und inwieweit das Schutzgut oder der Rezep-

tor in Abhängigkeit der Exposition auf der Immissionsseite durch einen Transfer an Schadstoffen mit hinreichender Wahrscheinlichkeit geschädigt werden kann oder bereits geschädigt wurde. Rezeptoren für Schadstoffe können zum Beispiel die Schutzgüter Grundwasser (und Grundwasser-nutzung), Oberflächengewässer (mit Biozönose), Mensch und Nutzpflanze (als Lebensmittel und für tierische Erzeugnisse) sein.

Beurteilung der Grundwasserbeschaffenheit

Wertemaßstab für die Beurteilung der Grundwasserbeschaffenheit sind die 2016 überarbeiteten Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS-Werte) der Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser [LAWA 2017]. Die Anwendungsgrundsätze im dortigen Kapitel 3.3 sollen bei der Verdachtsbewertung bzw. der Frage, ob eine schädliche Gewässeränderung des Grundwassers vorliegt oder zu erwarten ist, im Rahmen der Gefahrenbewertung berücksichtigt werden. „Die GFS-Werte für das Grundwasser beziehen sich auf ein für Messungen zugängliches Grundwasservolumen. Unbeschadet der Anwendungsgrundsätze ist die Tatsache, dass bei Überschreitung der GFS-Werte im Grundwasser eine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit vorliegt. Ob das Ausmaß einer solchen Veränderung hinreichend ist, den Verdacht oder den Tatbestand einer schädlichen Bodenveränderung bezüglich des Wirkungspfades Boden-Grundwasser bzw. einer schädlichen Gewässeränderung im Rahmen der wasserrechtlichen Nachsorge zu begründen, kann unter Berücksichtigung der vorgenannten Grundsätze bestimmt werden“ [LAWA 2017].

Mit Inkrafttreten der BBodSchV 1999 waren die Prüfwerte Boden-Grundwasser noch identisch mit den GFS-Werten.

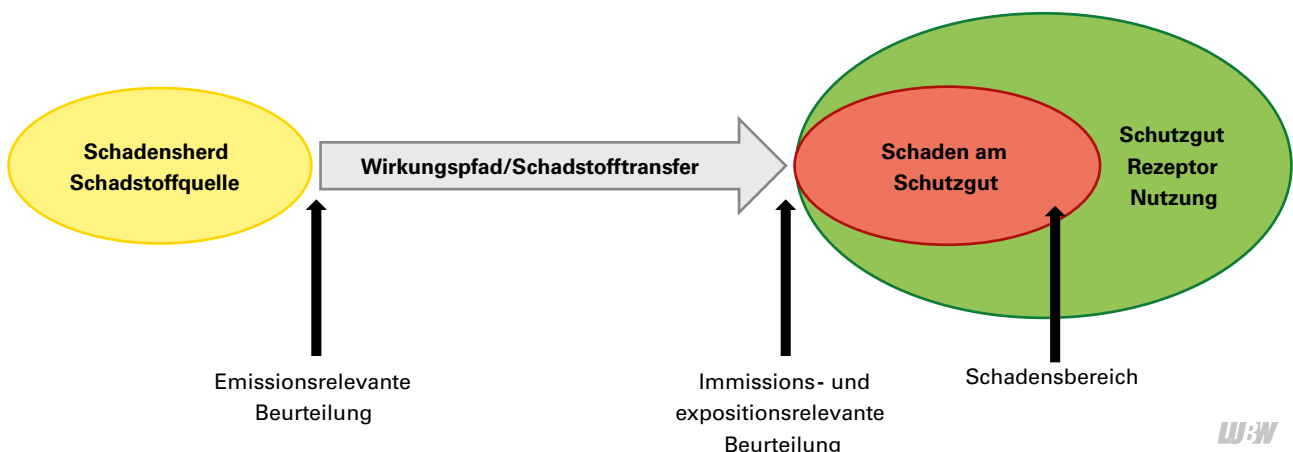


Abbildung 2.2: Schema zu Emission und Immission (Abb. verändert aus „Leitfaden KORA-Themenverbund 4 „Deponien, Altablagerungen“, Teil B 3.3.2 Feststellung von Schäden und Gefahren, 2008“)

Im Zuge der Neufassung der BBodSchV 2021 wurden die Prüfwerte im Einklang mit den Anwendungsgrundsätzen der LAWA [2017] für die GFS-Werte neu abgeleitet. Die Prüfwerte in der BBodSchV 2021 unterscheiden sich in Teilen von den GFS-Werten für das Grundwasser, da einige Prüfwerte unterschiedliche Ableitungskriterien aufweisen [siehe Begründungstext BBodSchV 2021 zu Anlage 2 der Tabellen 1 bis 3 mit den Prüfwerten für anorganische und organische Stoffe für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser im Sickerwasser].

Sanierungsziele

Aus bodenschutzrechtlicher Sicht ist die Abwehr von Gefahren für die Schutzgüter der relevante Bewertungsmaßstab für den Umfang der zu ergreifenden Maßnahmen. Je nach Wirkungspfad und der Art von Dekontaminations-, Sicherungs- oder Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen kann einzelfallbezogen ein Sanierungsziel abgeleitet werden (siehe Schritt F in Kapitel 9).

Das LAWA-Papier „Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser 2016“ [LAWA 2017] enthält neben den aktualisierten GFS-Werten in Kapitel 3.3 Anwendungsgrundsätze für die Gefahrenbewertung im Anwendungsbereich des nachsorgenden Bodenschutz- und Wasserrechts. Hinsichtlich der Sanierungsziele im Grundwasser wird ausgeführt: „Gemäß § 4 Abs. 4 BBodSchG bestimmen sich die bei der Sanierung von Gewässern zu erfüllenden Anforderungen nach dem Wasserrecht. Die Geringfügigkeitsschwellen, die zunächst nur eine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit indizieren, sind nicht unmittelbar als Sanierungsziele für das Grundwasser heranzuziehen. Sanierungsziele sind einzelfallbezogen festzulegen. Sanierungsziele heben nicht nur auf Konzentrationen ab, sondern müssen weitere Bewertungskriterien (z. B. Fracht im Grundwasser) berücksichtigen sowie dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit folgen“ [LAWA 2017]. Die mit dem WHG [2009] eingeführten Begriffe der nachteiligen und schädlichen Veränderung von Gewässern sind bei ZEDDEL et al. [2016] erläutert. Nach § 3 Nr. 10 WHG bezeichnet der Begriff der schädlichen Gewässeränderung Veränderungen der Gewässereigenschaft, die u. a. das Wohl der Allgemeinheit, insbesondere die öffentliche Wasserversorgung, beeinträchtigen.

Ableitung von Maßnahmenkonzepten zur Gefahrenabwehr

Mithilfe des Modellbilds (Abbildung 2.2) können verschiedene Maßnahmenkonzepte zur Abwehr von Gefahren und zur Erreichung von Sanierungszielen verdeutlicht werden:

- Dekontaminationsmaßnahmen zur Reduzierung oder Beseitigung von Belastungen im Schadensherd gemäß § 2 Abs. 7 Nr. 1 BBodSchG
- Sicherungsmaßnahmen zur dauerhaften Unterbrechung oder Verminderung des Schadstofftransfers in das Schutzgut hinein gemäß § 2 Abs. 7 Nr. 2 BBodSchG
- Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen der jeweiligen Nutzung im Schutzgut gemäß § 2 Abs. 8 BBodSchG (stellt keine Sanierung dar, kann jedoch im Wege der Gefahrenabwehr greifen), z. B. Betretungsverbot einer Altlastfläche, Anbauverbot für bestimmte Nutzpflanzen, die besonders leicht Schadstoffe aufnehmen, Anbauempfehlung für schadstoffverträgliche Nutzpflanzen oder Vorerntemonitoring von Nutzpflanzen vor der Freigabe einer Vermarktung

2.4 Grundsätze zu Ermessen und Verhältnismäßigkeitsprüfung

Bei der Sanierungsuntersuchung sind alle fachlichen Sachverhalte zu erheben, die als Grundlagen für eine behördliche Verhältnismäßigkeitsprüfung erforderlich sein können.

Ermessen

Ermessen bedeutet, dass die Behörde einen Handlungsspielraum besitzt, in dessen Rahmen sie ihre Entscheidung im Einzelfall trifft. Die Behörden haben bei ihrer Entscheidung immer den Zweck und die inhaltlichen Grenzen der zur Ausübung des Ermessens ermächtigenden Vorschrift zu beachten. Zudem sind die allgemeinen Rechtsgrundsätze, wie z. B. Eignung, Erforderlichkeit und Angemessenheit der Mittel sowie die Zumutbarkeit für den Betroffenen zu berücksichtigen.

Das verwaltungsrechtliche Handeln unterscheidet zwei Ermessensformen:

- **Entschießungsermessen:** Die Behörde hat pflichtgemäß zu entscheiden, ob sie Maßnahmen ergreift.

- **Auswahlmessen:** Die Behörde hat zwischen mehreren in Betracht kommenden Handlungsalternativen zu wählen, z. B. Auswahl des Sanierungsverfahrens oder Auswahl des Störers gem. § 4 BBodSchG.

Prüfung der Verhältnismäßigkeit

Innerhalb der Ermessensausübung kommt der Prüfung der Verhältnismäßigkeit eine zentrale Bedeutung zu. Der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit wurde aus dem im Grundgesetz verankerten Rechtsstaatsprinzip (Bindung der staatlichen Gewalt an das Recht) hergeleitet und hat daher Verfassungsrang. Der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit ist eine verfassungsrechtliche Schranke der Grundrechtsbegrenzung. Ein Grundrechtseingriff ist nur dann verfassungskonform, wenn er verhältnismäßig ist.

Im Anhang 3 „Sanierungsuntersuchung“ der BBodSchV [1999] heißt es: „Mit Sanierungsuntersuchungen bei Altlasten sind die zur Erfüllung der Pflichten nach § 4 Abs. 3 des BBodSchG geeigneten, erforderlichen und angemessenen Maßnahmen zu ermitteln.“ Eine nahezu identische Formulierung findet sich in der Neufassung der BBodSchV 2021 in § 16 Abs. 2 Satz 1.

Die Verhältnismäßigkeitsprüfung gliedert sich in drei Schritte:

- **Eignung der Maßnahme:** Ist die Art der Maßnahme, die ausgewählte Technik überhaupt geeignet, den gewünschten Zweck bzw. angestrebten Erfolg (Ziel) zu erreichen?
- **Erforderlichkeit der Maßnahme:** Eine Maßnahme ist erforderlich, wenn es keine andere, mildere, aber ebenso taugliche Maßnahme gibt, um das Ziel zu erreichen.
- **Angemessenheit der Maßnahme:** Steht die ausgewählte Maßnahme in einem zumutbaren Verhältnis von Aufwand und angestrebtem Erfolg?

Eine Maßnahme ist angemessen, wenn die Nachteile, die mit der Maßnahme einhergehen, insbesondere für den Betroffenen, nicht außer Verhältnis zu dem beabsichtigten Erfolg stehen.

Bei der Prüfung der Verhältnismäßigkeit sind im Wesentlichen folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Erhebung und Darstellung der Nachteile der in Frage kommenden Maßnahmen.
- Prüfung, ob es Handlungsalternativen zu der vorgesehenen Maßnahme gibt, die zur Zielerreichung ebenfalls geeignet sind.
- Vergleich, ob die bevorzugte Maßnahme im Hinblick auf die Nachteile tatsächlich die am besten geeignete ist.

Bei der Prüfung der Angemessenheit (Verhältnismäßigkeit im engeren Sinn) handelt es sich um keine standardisierte Beurteilung. Vielmehr bedarf es einer wertenden Entscheidung im jeweiligen Einzelfall durch die Behörde.

Der Verhältnismäßigkeitsgrundsatz erfordert ein nach Gefährdungs- und/oder Störungssituation und Schwere des behördlichen Eingriffs entsprechend abgestuftes Vorgehen. Im Rahmen der Altlastenbearbeitung bedeutet dies, dass die behördlich festgelegten Maßnahmen und deren Folgen für den Pflichtigen in einem angemessenen Verhältnis zum Ausmaß der abzuwehrenden Gefahr zu stehen haben.

Aus dem Gebot der Verhältnismäßigkeit ergibt sich generell, dass nicht jede Beeinträchtigung von Bodenfunktionen bereits umfassende Sanierungsmaßnahmen rechtfertigt; je nach Ausmaß der durch die Beeinträchtigung der Bodenfunktionen drohenden Gefahren können unterschiedliche Sanierungsmaßnahmen verhältnismäßig sein, gegebenenfalls auch der Verzicht auf derartige Maßnahmen.

2.5 Gefahrenabwehr und Störungsbeseitigung im Grundwasser/Ableitung von Sanierungszielen

Die Abwehr von Gefahren für das Grundwasser, die von schädlichen Bodenveränderungen oder Altlasten ausgehen (Gefahrenabwehr) richtet sich nach den Bestimmungen des Bodenschutzrechts (§ 4 Abs. 3 BBodSchG), während die materiellen Anforderungen an eine Gewässersanierung gemäß § 4 Abs. 4 Satz 3 BBodSchG nach Wasserrecht erfolgen. Ein Fokus dieses Leitfadens richtet sich auf die Sanierung und Sanierungsziele der Schutzgüter Grundwasser und Grundwassernutzungen. Der Anteil der von altlastverdächtigen Flächen und Altlasten betroffenen Wirkungspfade dominiert beim Wirkungspfad Boden-Grundwasser mit etwa 82 % [LUBW 2021]. Insofern ist begründet, dass in Kapitel 5 und Kapitel 6 bei der Verfahrensvorauswahl der Sanierungsmaßnahmen auf die getrennte Betrachtung der

Schadstoffquelle und der Schadstofffahne differenziert eingegangen wird.

Vollständige Gefahrenabwehr

Eine vollständige Gefahrenabwehr bedeutet, dass im Sickerwasser am Ort der Beurteilung (Übergangsbereich der ungesättigten zur gesättigten Bodenzone), zumindest nach kleinräumiger und kurzzeitiger Mittelwertbildung¹, die Prüfwerte der BBodSchV eingehalten werden [LABO 2016, LUBW 2016]. Zukünftig, d. h. mit der Novellierung der BBodSchV soll ergänzend eine Einmischungsprognose des Sickerwassers in das Grundwasser über eine pauschale Einmischtiefe von einem Meter berücksichtigt werden, um festzustellen, ob in einem begrenzten Volumen eine wasserrechtlich schädliche Gewässeränderung (Grundwasserschaden) zu erwarten ist [§ 14 Abs. 5 BBodSchV 2021].

Tatbestands- und Rechtsfolgenseite

Ob eine Gefahr („Prognose“) im Rahmen der Untersuchung („Diagnose“) einer Schädigung des Grundwassers festgestellt wird, hängt von den Kriterien der LAWA 2017 ab. Ein Schaden im Grundwasser bzw. eine schädliche Gewässeränderung wird auf der Tatbestandsseite festgestellt. Die fachlichen und rechtlichen Konsequenzen aus der Feststellung der Tatbestandsseite ergeben sich auf der Rechtsfolgenseite.

Die Beseitigung oder Sanierung („Therapie“) eines Schadens im Grundwasser (Störung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung) wird auf der Rechtsfolgenseite bestimmt, sofern die Maßnahme verhältnismäßig ist.

Eingeschränkte Gefahrenabwehr aus Ermessen

Für das Schutzgut Grundwasser (und Grundwassernutzung) enthält § 4 Abs. 7 BBodSchV eine Regelung über die Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen. „Wenn erhöhte Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser oder andere Schadstoffausträge auf Dauer nur geringe Schadstofffrachten und nur lokal begrenzt erhöhte Schadstoffkonzentrationen in Gewässern erwarten lassen, ist dieser Sachverhalt bei der Prüfung der Verhältnismäßigkeit von Untersuchungs- und Sanierungsmaßnahmen zu berücksichtigen.“ Inhaltlich gleichlautend heißt es in § 15 Abs. 8 BBodSchV [2021]:

„Bei der Bewertung der Untersuchungsergebnisse und der Entscheidung über die zu treffenden Maßnahmen ist zu berücksichtigen, ob erhöhte Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser oder andere Schadstoffausträge auf Dauer nur geringe Schadstofffrachten und nur lokal begrenzt erhöhte Schadstoffkonzentrationen in Gewässern erwarten lassen.“

Dies eröffnet Ermessensspielräume im Rahmen der Verhältnismäßigkeitsprüfung [LABO 2016], die in Baden-Württemberg als ermessensleitende Regelungen für die Bestimmung der Sanierungsziele genutzt werden.

Bei der Entscheidung über einen Handlungsbedarf bei genutzten und nutzungswürdigen Grundwasservorkommen wird seit 1993 mit der inzwischen außer Kraft getretenen, da nicht mehr verlängerten VwV über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen (VwV OW) zwischen der allgemeinen (aM) und der einzelfallbezogenen Mindestanforderung (eM) unterschieden. In diesem Zusammenhang wird rechtlich auch von einer eingeschränkten Gefahrenabwehr bzw. eingeschränkten Störungsbeseitigung als einzelfallbezogene Mindestanforderung gesprochen (siehe auch Abbildung 2.3). Die Entscheidungskriterien der außer Kraft getretenen Verwaltungsvorschrift über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen [VwV OW, siehe LUBW 1998] sind im Leitfaden „Untersuchungsstrategie Grundwasser“ enthalten [LUBW 2008] und sollen nach wie vor angewendet werden.

Gefahrenabwehr im Schadensherd

Die einzelfallbezogene Mindestanforderung (eingeschränkte Gefahrenabwehr) im Rahmen der Ausübung des Ermessens bedeutet für den Schadensherd zum einen

1. dass die tiefengemittelte Konzentration des Schadstoffes c_A (max. 30 m Tiefe) am direkten abstromigen Rand des Schadensherdes unterhalb der wasserrechtlich relevanten geringfügigkeitsschwelle GFS (Immissionsbegrenzung) liegt
sowie zum anderen
2. dass die tägliche Schadstofffracht E_{\max} (Emissionsbegrenzung) des Schadstoffes eingehalten wird [LUBW 2008].

¹ „Eine Mittelwertbildung ist kleinräumig, wenn sie sich über maximal 100 m² sickerwasserbildende Geländeoberfläche erstreckt. Die zeitliche Mittelwertbildung kann sich auf einen Zeitraum von ca. einem Jahr beziehen.“ [Zitat FEHLAU/HILGER/KÖNIG in LUBW 2016]

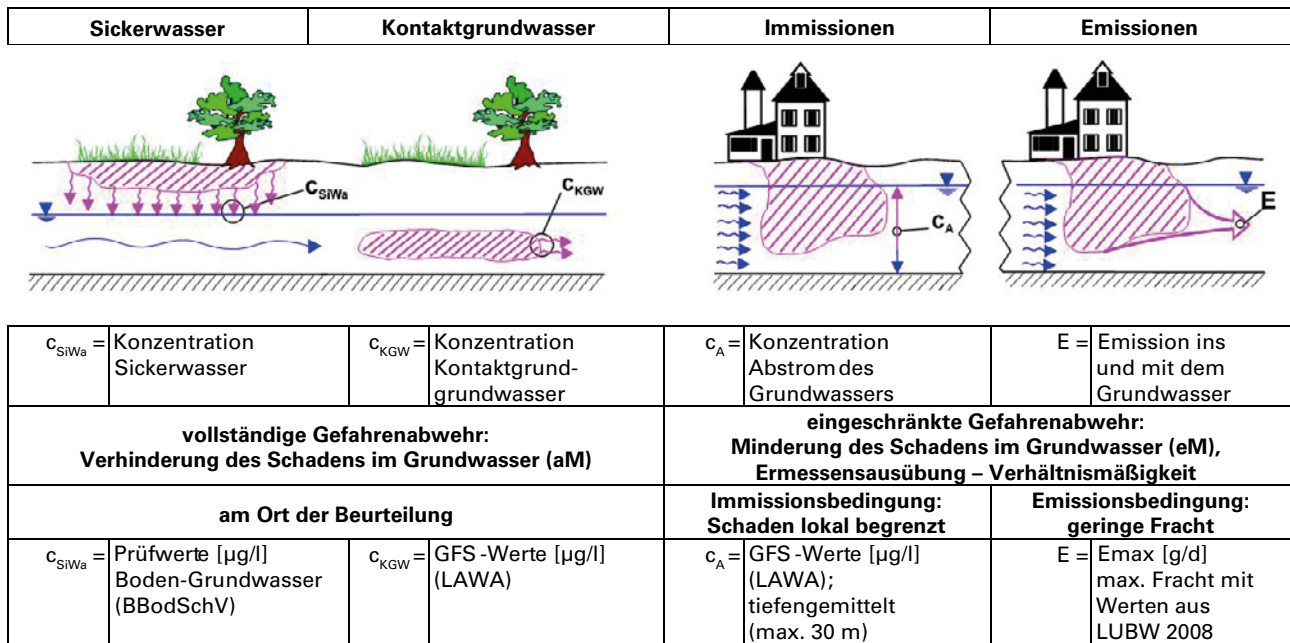


Abbildung 2.3: Darstellung der Bewertungsgrundsätze bei der Gefahrenabwehr zum Schutz des Grundwassers



Störungsbeseitigung in Schadstofffahnen

Die allgemeine Mindestanforderung für das Schutzgut Grundwassernutzung ist eingehalten, wenn im weiteren Abstrom der sanierten Altlast die Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser unterhalb der GFS-Werte liegen. Dies kann auch im Zuge einer Fahnenanierung des Grundwasserschadens, sofern verhältnismäßig, erreicht werden (vollständige Störungsbeseitigung). Eine Fahnenanierung dürfte, wie die Vergangenheit gezeigt hat, jedoch nur in seltenen Fällen in Frage kommen (Abbildung 2.4, aM). Die Sanierung des Schadensherdes hat gegenüber einer Fahnenanierung Priorität, um weitere Gefahren für das Grundwasser zu reduzieren oder zu beseitigen. Eine Fahnenanierung kann unter Umständen dann eine Rolle spielen, wenn der Schadensherd aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht sanierbar ist. Weiterhin kann eine Fahnenanierung dann näher in Betracht gezogen werden, wenn die Fahne kleinräumig ausgebildet ist, die aufzubereitende Wassermenge deutlich geringer als in einem betroffenen Wasserwerk ist oder dieses über keine geeignete Wasseraufbereitung verfügt.

Die einzelfallbezogene Mindestanforderung bezüglich der (vom sanierten Schadensherd abgerissenen) Schadstofffahne im nutzungswürdigen oder genutzten Grundwasservorkommen eröffnet weitere Ermessensspielräume (eingeschränkte Störungsbeseitigung).

Weitere Szenarien (keine abschließende Aufstellung) können in Betracht gezogen werden (Abbildung 2.4, eM):

1. Es handelt sich um ein nutzungswürdiges Grundwasservorkommen, das Grundwasser wird jedoch aktuell nicht oder nicht mehr genutzt, d. h. es sind derzeit keine genutzten Brunnen betroffen. Eine Fahnenanierung wird als nicht verhältnismäßig eingestuft. Es ist ein Grundwassermonitoring durchzuführen, um eine Kontrolle oder Eigenüberwachung des zunehmenden Grundwasserschadens zu gewährleisten (siehe Anlage 2 LUBW-Matrix).
2. Die Aufbereitung des belasteten Grundwassers kann im Wasserwerk selbst durchgeführt werden. Die Schadstofffahne wird vollständig oder nur teilweise erfasst. In diesem Fall ist es eine Zweckmäßigkeitsüberlegung, an welcher Stelle die Schadstoffe am geeignetsten aus dem Teil des Grundwassers entfernt werden, der zur Nutzung als Trink- oder Brauchwasser vorgesehen ist.
3. Der Nutzer des Grundwassers braucht kein besseres Grundwasser (Einhaltung der GFS-Werte nicht erforderlich). Dem Nutzer reicht die Qualität des Grundwassers für seine Zwecke aus, z. B. die Entnahme von Brauchwasser für Kühlzwecke, sofern die Wiedereinleitung unaufbereitet rechtlich möglich ist.

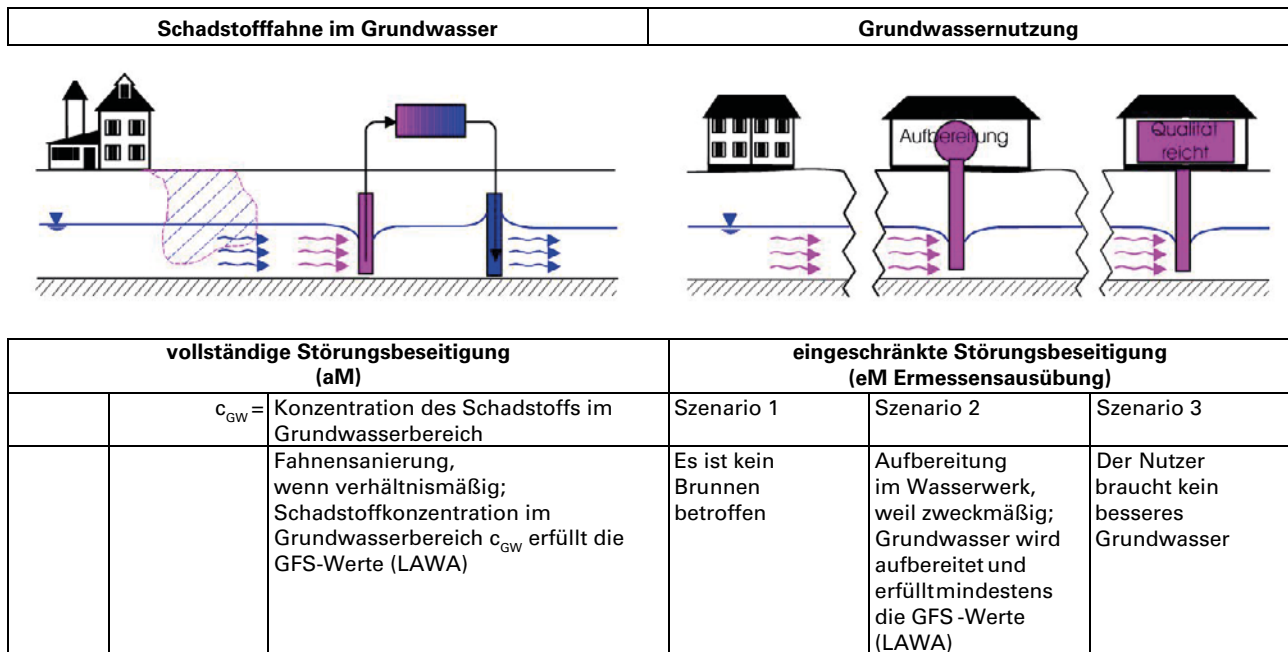


Abbildung 2.4: Darstellung der Bewertungsgrundsätze zur Störungsbeseitigung bei Schadstofffahnen



Hinweise zu Szenario 2 „Schadensabwehr im Wasserwerk“

Erscheint eine Grundwassersanierung technisch oder aus Gründen der Verhältnismäßigkeit nicht möglich, ergibt sich bei Nutzung des Grundwassers die Situation, dass ggf. eine Aufbereitung des entnommenen Wassers – je nach Nutzungszweck – erforderlich sein kann. Insofern können Ansprüche des Nutzers gegen den Verursacher in Betracht kommen. Diesbezüglich wäre eine Vereinbarung zwischen Verursacher und Wasserversorger zu empfehlen.

Schutzgutes zu bewerten und abhängig davon Sofortmaßnahmen vorzuschlagen.

Sollte erkennbar werden, dass eine gegenwärtige Gefahr sofortiges Handeln erfordert, etwa bei einer Gesundheitsgefahr von Menschen oder einer zeitnahen Betroffenheit von Wasserversorgungen, ist dies unmittelbar und unabhängig vom Bearbeitungsstand der zuständigen Behörde mitzuteilen. Diese bewertet abschließend und leitet die im Einzelfall erforderlichen Schritte ein.

Sofortmaßnahmen zur Gefahrenabwehr können zum Beispiel sein:

2.6 Sofort- und Beschränkungsmaßnahmen

Als Ergebnis der Sanierungsuntersuchung können sich geeignete Maßnahmen ergeben, deren Planung und technische Ausführung absehbar einen längeren Zeitraum in Anspruch nehmen werden. Für diesen Fall ist zu prüfen, ob Sofortmaßnahmen bis zum Erreichen der Wirksamkeit der Sanierungsmaßnahme erforderlich sind. Bei der Prüfung ist das Maß der Gefährdung meistens abhängig von der Ausbreitungsdynamik der Schadstoffe und Sensibilität des

- Betrieb eines Abwehrbrunnes zum hydraulischen Schutz, z. B. einer Wasserfassung
- Beschränkung der Nutzung des Grundwassers als Trinkwasser oder zur Bewässerung
- Abdeckung durch verschweißte Kunststoff-Dichtbahnen zur Vermeidung von Staubemissionen etc.
- Zugangsbeschränkungen zur Verhinderung des Direktkontakts
- Beschränkungen landwirtschaftlicher oder gärtnerischer Nutzungen

3 Systematische Vorgehensweise

Die Sanierungsuntersuchung besteht aus einzelnen gleichwertigen Arbeitsschritten, die als Ganzes ein schlüssiges und nachvollziehbares Ergebnis liefern sollen. Die Qualität jedes Einzelschrittes trägt maßgeblich zu der Qualität des Gesamtergebnisses bei, eine ökologisch, ökonomisch und technisch optimale Lösung zur Sanierung der schädlichen Bodenveränderung/Altlast auszuwählen.

Die Sanierungsuntersuchung ist hinsichtlich ihrer systematischen Grundzüge mit der Grundlagenermittlung und der Vor- und Entwurfsplanungen gemäß den Leistungsphasen 1 bis 3 nach der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) vergleichbar und kann von ihrem Leistungsumfang her über diese hinausgehen.

Die Bearbeitungsschritte und Abläufe sind in Abbildung 3.1 dargestellt.

Grundlagenermittlung und konzeptionelles Standortmodell (Schritt A)

Im Rahmen der Grundlagenermittlung sind die für die weitere Bearbeitung erforderlichen Planungsrandbedingungen zu ermitteln. Es erfolgt eine Analyse aller vorliegenden Untersuchungsergebnisse auf Vollständigkeit, Plausibilität und Inhalt. Gegebenenfalls vorhandene Wissenslücken und Informationsdefizite sind festzustellen. Durch Ortsbegehungen werden die vorliegenden Informationen auf Aktualität überprüft.

Die ermittelten Daten bilden die Grundlage für die Konkretisierung des im Rahmen von OU und DU erstellten konzeptionellen Standortmodells. Das konzeptionelle Standortmodell dient zum einen als Planungsgrundlage und zum anderen zur Prüfung der Konsistenz der vorhandenen Daten.

Es werden erste Sanierungsziele definiert, die zur Reduzierung der primären Umweltauswirkungen durch die Altlast anzustreben sind. Diese Sanierungsziele entsprechen im Regelfall der schon in der Detailuntersuchung abgeleiteten und bewerteten Gefahrenschwelle.

Hinweise zu ergänzenden Untersuchungen

Da Sanierungsuntersuchungen nur dann zulässig sind, wenn das Erfordernis einer Sanierung zumindest dem Grund nach feststeht, können ergänzende Standortuntersuchungen nicht die Aufklärung der Gefährdungssituation zum Ziel haben. Ist die Gefährdungssituation nicht geklärt, wäre das Beweinsniveau 3 (siehe Abbildung 2.1) nicht erreicht und es müsste eine ergänzende Detailuntersuchung durchgeführt werden. Ergänzende Standortuntersuchungen im Rahmen der Sanierungsuntersuchung dienen vielmehr der Klärung einer prinzipiellen Einsetzbarkeit und Effizienz von Sanierungsverfahren, z. B. im Rahmen von Feld- bzw. Pilotversuchen.

Verfahrensvorauswahl (Schritt B)

In diesem Schritt werden die Grundlagen analysiert und technisch grundsätzlich geeignete Sanierungsvarianten bezüglich ihrer Einsatzmöglichkeit für den vorliegenden Fall ausgewählt. Ergibt die Vorauswahl, dass keine geeigneten Techniken/Verfahren zur Verfügung stehen, so sind die Zielvorgaben, z. B. hinsichtlich der (vorläufigen) Sanierungsziele oder der geplanten Nutzung anzupassen.

Ausarbeitung von grundsätzlich geeigneten Sanierungsvarianten (Schritt C)

Für die grundsätzlich verfügbaren und geeigneten Techniken/Verfahren oder deren Kombinationen sind realisierbare standortbezogene Sanierungsszenarien (Varianten) zu erarbeiten, darzustellen und zu erläutern. Hierbei sind auch Vorabstimmungen mit Behörden und im Einzelfall anderen Betroffenen (z. B. Nachbarschaften) zu führen, die im späteren Genehmigungsverfahren (z. B. bei Erlaubnissen zur Nutzung von Fremdgrundstücken) eingebunden werden müssten. Die Kosten sind zu schätzen.

Der Variantenvergleich bildet einen Schwerpunkt in der Sanierungsuntersuchung.

Eine transparente Gegenüberstellung und spätere vergleichende Beurteilung geeigneter Sanierungsverfahren sind

unerlässlich, um die geeigneten, erforderlichen und angemessenen Maßnahmen, also die verhältnismäßigen Maßnahmen, ableiten und begründen zu können. Die zuständige Behörde muss in die Lage versetzt werden, ihre Abwägungs- und Entscheidungsprozesse ausüben zu können.

Der Sanierungspflichtige hat die Möglichkeit firmenstrategische Überlegungen in seine Auswahl einer Sanierungsvariante einfließen zu lassen, die bei dem behördlichen Abwägungsprozess mitberücksichtigt werden sollen. So kann er zum Beispiel eine Sanierungsvariante wählen, die zu einer sicheren und vollständigen Dekontamination führt (z. B. vollständiger Aushub der Quelle im Rahmen einer Neubebauung). In diesem Fall würde ein Variantenvergleich entfallen, wenn der Pflichtige geprüft hat, dass durch seine Vorzugsvariante die Sanierungsziele im Schadensherd erreicht und die Umwelt und Allgemeinheit nicht in inakzeptabler Weise beeinträchtigt werden.

Tipp

Während der Sanierungsuntersuchung beschäftigen sich die Sachverständigen bei der Ausarbeitung von Lösungsmöglichkeiten in Schritt C schon planerisch mit wesentlichen Ausführungsdetails und treffen hier teilweise Annahmen. Damit dieses Wissen erhalten bleibt, sollten Ideen und Hinweise für die späteren Planungen dokumentiert werden.

Beurteilung nicht-monetärer Kriterien (Schritt D)

Für die vorausgewählten, grundsätzlich geeigneten Sanierungsvarianten aus Schritt C sind die sekundären Auswirkungen der Sanierung auf die Umwelt für die Prüfung der Verhältnismäßigkeit zu bewerten (siehe Kapitel 7). Eine Sanierung ist immer mit Eingriffen in die Umwelt verbunden und daher ohne sekundäre Auswirkungen auf die Umwelt nicht zu leisten. Die unterschiedlichen Auswirkungen der Varianten sind zu bewerten. Die Bewertung erfolgt ohne Berücksichtigung von Kosten.

Vergleichende Beurteilung der Kriterien und Ableitung Sanierungskonzept (Schritt E)

Die monetären und nicht-monetären Kriterien werden einer vergleichenden Beurteilung unterzogen. Die aus der Kostenwirksamkeit abgeleitete Rangfolge wird der nicht-monetären Rangfolge (Schritt D) gegenübergestellt und ein angemessenes Sanierungskonzept abgeleitet.

Abschließender Vorschlag zu verbindlichen Sanierungszielen (Schritt F)

Das Ergebnis der Sanierungsuntersuchung ist ein Sanierungskonzept, welches die Grundlage für den Sanierungsplan nach § 13 BBodSchG bildet. Die Sanierungsziele sind mit dem konkreten Sanierungskonzept verbunden. Die von den Sachverständigen vorgeschlagenen Sanierungsziele werden standort- und verfahrensspezifisch am Ende der Sanierungsuntersuchung konkretisiert und durch die Behörde festgelegt. Sie können als verbale Umschreibung oder als Zahlenwerte formuliert werden.

Systematische Vorgehensweise bei Sanierungsuntersuchungen

**A: Grundlagenermittlung und
konzeptionelles Standortmodell**

B: Verfahrensvorauswahl

**C: Ausarbeitung von grundsätzlich
geeigneten Sanierungsvarianten**

D: Bewertung nicht-monetärer Kriterien

**E: Vergleichende Beurteilung und
Ableitung Sanierungskonzept**

**F: Abschließender Vorschlag zu
verbindlichen Sanierungszielen**

Sanierungsuntersuchung nach § 13 Abs. 1 BBodSchG

Abbildung 3.1: Ablaufdiagramm zur systematischen Vorgehensweise bei Sanierungsuntersuchungen



größen zu benennen und die räumliche Lage der entsprechenden Messpunkte zu veranschaulichen.

Die wesentlichen Bausteine des konzeptionellen Standortmodells sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Je nach Einzelfall ist nicht zwingend für alle Bausteine eine Bearbeitung notwendig. Im Allgemeinen sollten die Inhalte des konzeptionellen Standortmodells so gewählt werden, dass belastbare Prognosen zur Schadstoffausbreitung und zu Auswirkungen auf die Schutzgüter möglich sind.

4.2 Betrachtung der Schadstoffquelle und der Schadstofffahne

Nach § 1 BBodSchG ist neben der schädlichen Bodenveränderung auch das hierdurch verunreinigte Gewässer zu sanieren. Die materiellen Anforderungen an eine Sanierung von Gewässern bestimmen sich nach dem Wasserrecht (§ 4 Abs. 4 Satz 3 BBodSchG). Wie in Kapitel 2.5 dargelegt, gibt es unterschiedliche Bewertungsansätze für die Schutzgüter Grundwasser (Schadstoffquelle, Schadstoffherd) und Grundwassernutzungen (Schadstofffahne). Bei der Verfahrensvorauswahl der Sanierungsmaßnahmen sind deshalb die Schadstoffquelle und die Schadstofffahne differenziert zu betrachten.

Schadstoffquelle

Die wesentlichen Informationen zur Schadstoffquelle sollen in Schnitten sowie ergänzend in Lageplänen dargestellt werden. Folgende Inhalte sollen insbesondere beschrieben werden:

- Räumliche Lage des Schadensherdes (horizontale und vertikale Ausdehnung in gesättigter und/oder ungesättigter Zone)
- Physiko-chemische Eigenschaften der relevanten organischen und anorganischen Schadstoffe und deren biologische Abbaubarkeit
- Zustandsform der Schadstoffe (gelöst, freie Phase, residuale Phase)
- Schadstoffmenge und -gehalte im Schadensherd (Schadstoffpotential)
- Grundwasserbelastung im Schadensherd und im unmittelbaren Abstrom (zu Beginn der Messungen und aktuell)

Schadstofffahne (sofern vorhanden)

Die Geometrie der Schadstofffahne ist zu beschreiben und in Lageplan- und Schnittdarstellungen darzustellen. Folgende Aspekte sollen insbesondere beschrieben werden:

- Konzentrationsentwicklungen in allen vorhandenen Grundwasseraufschlüssen. Entwicklung von Schadstofffrachten entlang von (Kontroll-)Ebenen
- Natural Attenuation Prozesse im Grundwasser (Vorhandensein von Metaboliten, Ausbildung von Redoxzonen, etc.)

Schadstofftransport

Basierend auf den vorliegenden Daten werden die Mechanismen für den Schadstofftransport eingehend beschrieben. Zu berücksichtigen sind alle betroffenen Transferpfade, zum Beispiel:

- Boden – (Sickerwasser) – Grundwasser – Transport im Grundwasser
- Boden – Bodenluft – (Raumluft)
- Grundwasser – Bodenluft – (Raumluft)
- ...

Hinweis für die Betrachtung des Wirkungspfads Boden-Grundwasser

Das Ziel der Sanierung der Schadstoffquelle ist, dass der Schadstoffeintrag in das Grundwasser unterbunden oder reduziert wird (Maßnahme zur Gefahrenabwehr). Ziel der Sanierung der Schadstofffahne ist die Wiederherstellung der Nutzungsmöglichkeiten durch die Reinigung des Grundwassers (Maßnahme zur Störungsbeseitigung, vgl. Kapitel 2.5). Die Sanierung des Schadensherdes hat im Allgemeinen gegenüber einer Fahnenanierung Priorität, um weitere Gefahren für das Grundwasser zu reduzieren oder zu beseitigen. Eine Fahnenanierung dürfte, wie die Vergangenheit gezeigt hat, nur in seltenen Fällen in Frage kommen (siehe oben).

4.3 Bedarfsweise ergänzende Untersuchungen

Im Rahmen der Sanierungsuntersuchung müssen eine Reihe von Fragen hinsichtlich der Anwendbarkeit von Sanierungsverfahren beantwortet werden.

Insbesondere für die Beurteilung der Machbarkeit von Verfahren zur Dekontamination sind das Schadstoffinventar im Untergrund sowie die räumliche Verteilung der Schadstoffe entscheidende Faktoren.

Außerdem sind zur Beurteilung von in-situ-Maßnahmen oft detailliertere Informationen zu Geologie, Schichten-

aufbau, Sedimenteigenschaften (Porosität, Sorption, Mineralogie, etc.), Hydrogeologie sowie ggf. Hydrochemie erforderlich, die im Rahmen der Untersuchungen zur Gefährdungsabschätzung noch nicht relevant waren.

Um zu einer zuverlässigen Verfahrensauswahl zu gelangen, sind deshalb noch fehlende notwendige Basisdaten zu erheben und in das konzeptionelle Standortmodell einzubauen. Die noch fehlenden Informationen bzw. Basisdaten können stark in Abhängigkeit des jeweilig betrachteten Sanierungsverfahrens variieren.

5 Verfahrensvorauswahl (Schritt B)

In der Verfahrensvorauswahl (Schritt B) werden die grundsätzlich geeigneten Sanierungstechniken/-verfahren (siehe auch Kapitel 2.3, Ableitung von Maßnahmenkonzepten zur Gefahrenabwehr) insbesondere nach den folgenden Kriterien ausgewählt:

- technische Durchführbarkeit
- Erreichbarkeit der gesetzten ersten Sanierungsziele
- schadstoff-, boden-, material-, standortspezifische Eignung
- grundsätzliche Verfügbarkeit

Methodisch eignen sich zur Vorprüfung tabellarische Darstellungen mit Kurzbeschreibungen der Verfahren, des Entwicklungsstands und der Marktverfügbarkeit. Die Verfahren werden dann hinsichtlich ihrer, auf den Sanierungsfall bezogenen, grundsätzlichen Eignung (vollständig oder eingeschränkt) zur Durchführbarkeit bewertet und die Bewertung kurz begründet. Innovative Verfahren mit fortgeschrittener Entwicklung sollten in der Auflistung mitberücksichtigt werden.

Als Hilfsmittel für die Verfahrensvorauswahl können die Tabellen 5.1 und 5.2 herangezogen werden. In ihnen sind derzeit marktreife sowie in fortgeschrittener Entwicklung befindliche Sanierungsverfahren (nicht abschließend) – Dekontamination und/oder Sicherung – zusammengestellt und nach den folgenden Kriterien klassifiziert:

- Sanierungsverfahren (Dekontamination (Tabelle 5.1), Sicherung (Tabelle 5.2))
- Wirkungsbereich (ungesättigte und gesättigte Zone)
- Wirkungsort (Schadensherd und/oder Schadstoffahne)
- Art des Verfahrens (überwiegend bautechnische, biologische, chemische oder physikalische Verfahren)

Bei der Anwendung der Tabellen ist zu beachten, dass Unter- und Sondervarianten der Verfahren u. U. nicht gesondert aufgeführt sind. Anlage 1 enthält für jedes der genannten Sanierungsverfahren ergänzend jeweils eine kurze Verfahrensbeschreibung. Die Aufstellung der Verfahren in Anlage 1 erfolgt, zur besseren Übersicht und Handhabbarkeit, in alphabetischer Reihenfolge.

Hinsichtlich detaillierter Verfahrensbeschreibungen und Anwendungsbereiche einzelner Sanierungsverfahren wird auf die in der Literaturliste aufgeführte Fachliteratur verwiesen.

Die unbestimmten Rechtsbegriffe „dauerhaft“ nach § 4 Abs. 3 BBodSchG und „langfristig“ nach § 2 Abs. 7 Nr. 2 BBodSchG bei Sicherungsmaßnahmen umfassen in technischer Hinsicht eine Beständigkeit der Bauwerke, erstellt nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik, in den meisten Fällen einen Zeitraum von etwa 50 bis 100 Jahren. Entscheidend ist der Einzelfall. Durch Kontrollmaßnahmen und Monitoringprogramme ist die langfristige Wirksamkeit der Sanierungsbauwerke regelmäßig zu überwachen, zu überprüfen und bei Bedarf wieder zu ertüchtigen.

Tabelle 5.1: Übersichtstabelle Dekontaminationsverfahren für die gesättigte und ungesättigte Zone

		Dekontaminationsverfahren	
		Schadensherd	Schadstofffahne
Ungesättigte Zone	A1 Bautechnische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> ■ Dekontamination durch Bodenaustausch ohne Baugrubenverbau – offene Baugrube ■ Dekontamination durch Bodenaustausch mit Baugrubenverbau – offene Baugrube 	
	A2 Physikalische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bodenluftabsaugung (BLA) ■ Thermisch Unterstützte Boden-Luft-Absaugung (mittels Dampf-(Luft-)Injektion) – TUBA ■ Thermische In-situ-Sanierung mit Festen Wärmequellen – THERIS ■ Multi-phase Extraction (MPE) – Mehr-Phasen-Extraction/Dual Phase Extraction (DPE) – Zwei-Phasen-Extraktion ■ Elektrokinetische Verfahren 	
	A3 Chemische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bodenspülung 	
	A4 Biologische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bioventing 	
Gesättigte Zone	B1 Bautechnische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> ■ Dekontamination durch Bodenaustausch mit Baugrubenverbau – offene Baugrube ■ Dekontamination durch Bodenaustausch mit Verbaulementen – Spundwandkästen ■ Dekontamination durch Bodenaustausch mit Verbaulementen – Wabenverbau ■ Dekontamination durch Bodenaustausch mit Großlochbohrungen 	
	B2 Biologische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> ■ Enhanced Natural Attenuation (ENA) 	Biologische Verfahren <ul style="list-style-type: none"> ■ Enhanced Natural Attenuation ■ Durchströmte reaktive Wände (Permeable Reactive Barrier)
	B3 Physikalische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> ■ Multi-phase Extraction (MPE) – Mehr-Phasen-Extraction ■ Dual Phase Extraction (DPE) – Zwei-Phasen-Extraktion/Skimming für organische Phasen ■ Pump-and-Treat ■ Airsparging ■ Elektrokinetische Verfahren ■ Hydroschockverfahren ■ Alkoholspülung ■ Tensidspülung ■ Verbrennung oder Verschwelung von brennbaren Schadstoffen (STAR) 	Physikalische Verfahren <ul style="list-style-type: none"> ■ Pump-and-Treat
	B4 Chemische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> ■ In-situ Chemische Oxidation (ISCO) ■ In-situ Chemische Reduktion (ISCR) 	Chemische Verfahren <ul style="list-style-type: none"> ■ Durchströmte Reinigungswände (Permeable Reactive Barrier)



Tabelle 5.2: Übersichtstabelle Sicherungsverfahren für die gesättigte und ungesättigte Zone

	Sicherungsverfahren	
	Schadensherd	Schadstofffahne
Ungesättigte Zone	C1 Bautechnische Verfahren <ul style="list-style-type: none"> ■ Horizontale Sicherung: Oberflächenabdichtung ■ Vertikale Sicherung: Dicht-/ Spundwände 	
	C2 Physikalische Verfahren <ul style="list-style-type: none"> ■ Immobilisierung (Einbindung in Matrix) 	
	C3 Chemische Verfahren <ul style="list-style-type: none"> ■ Immobilisierung (Chemische Umwandlung) 	
Gesättigte Zone	D1 Bautechnische Verfahren <ul style="list-style-type: none"> ■ Vertikale Sicherung: Dicht-/Spundwände 	
	D2 Physikalische Verfahren <ul style="list-style-type: none"> ■ Pump-and-Treat ■ Durchströmte Reinigungswände (Permeable Reactive Barrier) ■ Immobilisierung (Einbindung in Matrix) 	Physikalische Verfahren <ul style="list-style-type: none"> ■ Pump-and-Treat ■ Durchströmte Reinigungswände (Permeable Reactive Barrier)
	D3 Biologische Verfahren <ul style="list-style-type: none"> ■ Durchströmte Reinigungswände (Permeable Reactive Barrier, (mikro-)biologisch reaktive Materialien) 	Biologische Verfahren <ul style="list-style-type: none"> ■ Durchströmte Reinigungswände (Permeable Reactive Barrier, (mikro-)biologisch reaktive Materialien)
	D4 Chemische Verfahren <ul style="list-style-type: none"> ■ Immobilisierung (Chemische Umwandlung) 	



Hinweise zu Monitored Natural Attenuation

Die Nutzung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse (Monitored Natural Attenuation, MNA) stellt keine Sanierungsmaßnahme im bodenschutzrechtlichen Sinne dar und leistet somit auch keinen aktiven Beitrag zur Gefahrenabwehr. MNA-Konzepte kommen nur dann zur Anwendung, wenn Sanierungsmaßnahmen unverhältnismäßig sind und Abbau- und Rückhalteprozesse von Schadstoffen nachgewiesen werden können. In dem Positionspapier „Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung“ sind die Grundsätze zur Anwendung von MNA geregelt [LABO 2015]. In der BBodSchV 2021 wird in § 17 Abs. 4 auf die Möglichkeit der Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung im Rahmen der Entscheidung über Sanierungsmaßnahmen hingewiesen. Natural Attenuation Prozesse können außerdem Einfluss auf die Ausgestaltung aktiver Sanierungsmaßnahmen haben.

Aus den genannten Gründen sollte der natürliche Abbau grundsätzlich bei ergänzenden Untersuchungsprogrammen berücksichtigt werden.

6 Ausarbeitung Grundsätzlich geeigneter Sanierungsvarianten (Schritt C)

6.1 Inhalte der Ausarbeitungen

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Schritten A und B sind für die grundsätzlich geeigneten Techniken/Verfahren oder deren Kombinationen realisierbare standortbezogene Sanierungsvarianten zu erarbeiten, darzustellen und zu erläutern. Zu betrachten sind neben Einzelverfahren auch räumliche oder zeitliche Verfahrenskombinationen sowie ggf. erforderliche Begleitmaßnahmen.

Die Sanierungsvarianten sollen so beschrieben und dargestellt werden, dass eine Bewertung möglich ist:

- **Technische Beschreibung**
 - Technische Beschreibung, prinzipieller Ablauf mit Lageplan
 - Eignung des Verfahrens, Technische Durchführbarkeit, Zuverlässigkeit (technische Kontrollierbarkeit)
 - Marktverfügbarkeit
- **Zeitaufwand und Wirkungsdauer**
 - Erforderlicher Zeitaufwand bis zum Sanierungsbeginn (Genehmigungsphase, Planungs- und Ausschreibungsphase) sowie für die Durchführung der Maßnahme(n)
 - Zeitbedarf der Sanierung inkl. Angabe zur Dauer bis zum Eintritt der Sanierungswirkung (Reduzierung des Schadstoffeintrags, Erreichen der Sanierungsziele)
 - Wirkungsdauer der Maßnahmen sowie Überwachungsmöglichkeiten
- **Nachsorge**
 - Erfordernisse und Umgang bei der Nachsorge (technische Lebensdauer von Anlagen, Bauwerken oder Stoffen) und Nachbesserungsmöglichkeiten
- **Auswirkungen auf Umwelt und Dritte mit Maßnahmen zur Vermeidung/Verminderung**
 - Auswirkungen auf Betroffene und Anwohner (im Sinne § 12 Abs. 1 BBodSchG)
 - Auswirkungen auf die Umwelt (sofern relevant auch Energieaufwand, CO₂-Footprint)

- Auswirkungen auf Beschäftigte/Umfang des Arbeits- und Emissionsschutzes
- Betrachtung der Entstehung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen (Durchführung von abschätzenden Mengenberechnungen)
- Einschränkungen zukünftiger Flächennutzungen (Sanierungsinfrastruktur)
- Baugrundveränderung (Standicherheit etc.)

■ Genehmigungen

- Betrachtung der grundsätzlichen Genehmigungsfähigkeit
- weitere Zulassungen, Zulassungserfordernisse

■ Kosten und Risiken

- Risiken/Kenntnisdefizite
- Kostenschätzung (vgl. auch Kapitel 6.2)

Bauabläufe, einzusetzende Baugeräte und Anlagen sind so zu ermitteln und zu beschreiben, dass eine nachvollziehbare Kostenschätzung (siehe Kapitel 6.2) erarbeitet werden kann. Können die Sanierungsziele bei einem Verfahren durch unterschiedliche technische Vorgehensweisen erreicht werden, so ist die gewählte Ausführungsvariante zu erläutern und kurz zu begründen.

6.2 Hinweise zu Kostenschätzungen

Für die jeweiligen Sanierungsvarianten sind Kostenschätzungen durchzuführen. Aus der Kostenstruktur muss der technische Ablauf der jeweiligen Sanierungsmaßnahme deutlich hervorgehen, so dass die Kosten transparent, nachvollziehbar und vergleichbar dargestellt werden können (Darstellung der Vorabmaßnahmen, Kernleistungen, bau- und verfahrensbegleitenden Maßnahmen, Nachsorge und Folgemaßnahmen). Die Genauigkeit der Kostenschätzung ist in Anlehnung an DIN 276 mit +- 30% anzustreben.

Die Kostenschätzungen sind tabellarisch mit Angabe der Leistungen, Mengen und Kostenrichtwerte für Dritte nachvollziehbar darzustellen.

Bei der Kostenschätzung von länger laufenden Maßnahmen ist es erforderlich zur weiteren Berechnung des Kostenbarwertes oder zu Zinsberechnungen zwischen Investitions- und Betriebskosten zu unterscheiden:

- Investitionskosten sind einmalig zu entrichten. Reinvestitionskosten für Anlagenteile mit einer Nutzungsdauer von über 5 Jahren zählen zu den Investitionskosten. Hierzu zählen auch einmalige anfallende Kosten, die keine Sachinvestitionen darstellen (z. B. Planungskosten).
- Betriebskosten fallen in der Betriebsphase regel- oder unregelmäßig wiederkehrend an. Reinvestitionskosten für Anlagenteile mit einer Nutzungsdauer von unter 5 Jahren zählen zu den Betriebskosten.

Eingangsgrößen für die Schätzung der Gesamtkosten von langlaufenden Sanierungen sind die Laufzeit sowie die jährlich anfallenden zukünftigen Betriebskosten. Die Betriebskosten sollen nach der Barwertmethode nach LAWA [2005] oder vergleichbaren Methoden kapitalisiert werden, um diese mit Methoden vergleichen zu können, die in kurzen Zeiträumen abgeschlossen werden.

Sanierungsverfahren mit nicht absehbarer Sanierungsdauer werden nach dem gegenwärtig üblichen Vorgehen häufig für einen Zeitraum von 25 Jahren abgeschätzt. Es ist jedoch abzuwägen, ob nicht die hochgerechnete tatsächliche Gesamtdauer einer Maßnahme abzuschätzen und anzusetzen ist, auch wenn diese deutlich über dem genannten Ansatz von 25 Jahren liegen sollte. Ein Ansatz von 25 Jahren kann in Fällen mit sehr langer Sanierungsdauer (in der Regel bei Sicherungen) zu deutlich unterschätzten Kosten führen, die das Gesamtergebnis verfälschen würden.

Aus den Berechnungen ergibt sich für den angesetzten Zeitraum ein entsprechender Diskontierungsfaktor (Abzinsungsfaktor). Die Berechnung des Kostenbarwertes erfolgt in der Regel nach der Formel: Kostenbarwert = Diskontierungsfaktor × jährliche Betriebskosten.

6.3 Schwankungsbereich Kosten, Kostenrisiken/-chancen

Die Kostenschätzungen sollen ein von den Sachverständigen eingeschätztes realistisches Szenario (base case) beschreiben.

Für die Sanierungsvarianten gibt es technische Risiken oder Chancen, die sich aus Randbedingungen ergeben können, die noch nicht bekannt sind oder eventuell über die Sanierungsdauer latent bleiben. Eine solche Randbedingung kann zum Beispiel der Unsicherheitsbereich des Schadstoffinventars oder der genauen Schadstoffausdehnung sein, der eine kostenrelevante Erhöhung oder Verringerung von Mengen, Massen und Flächen auslösen kann. Ein anderes Beispiel wäre die kostenrelevante Dauer einer in-situ-Maßnahme.

Zur systematischen Berücksichtigung solcher Risiken bzw. Chancen werden für jede untersuchte Sanierungsvariante die wesentlichen kostenrelevanten Randbedingungen ermittelt (z. B. für den Aushub mögliche Massenveränderungen, für Pump-and-Treat-Maßnahmen mögliche Veränderungen der Fracht und Dauer, etc.). Diese Kostenrisiken /-chancen sind nachvollziehbar zu beschreiben und zu berechnen. Dabei ergibt sich eine Abweichung vom base case in Richtung good case (plausibler optimaler Fall, Chance) und worse case (plausibler schlechter Fall, Risiko).

Die Darstellung der Bandbreite der Kostenspannen sowie die Angabe möglicher Maßnahmen zur Erhöhung der Genauigkeit sollen in die Betrachtungen aufgenommen werden.

6.4 Ergänzende Standortuntersuchungen/ Vorversuche/Pilotversuche

Das Erfordernis zur Durchführung ergänzender Standortuntersuchungen, Vorversuchen oder Pilotversuchen im Feldmaßstab im Anschluss an die Detailuntersuchung kann sich aus Kenntnisdefiziten nach der Auswertung des konzeptionellen Standortmodells und der Auswahl geeigneter Sanierungsvarianten ergeben. Sie dienen der Verifizierung von Annahmen der Verfahrensvorauswahl sowie der Erhebung verfahrensspezifischer standortabhängiger Parameter für die Definition der Vorzugsvariante.

Beispielhafte Auswahl ergänzender Standortuntersuchungen:

- Biologische Untersuchungen zum natürlichen Schadstoffabbau
- Chemische Untersuchungen zu Mobilisierung/Abbau (Eignung des Verfahrens, Auswahl von z. B. geeigneten Oxidationsmitteln, Bestimmung von Störstoffen)
- Physikalische Versuche (z. B. bei thermischen Verfahren)

- Immobilisierungsversuche
- Baugrunduntersuchungen
- Abfallrechtliche Untersuchungen
- Hydraulische Versuche

Das Schadstoffinventar ist eine zentrale Kenngröße für eine zuverlässige Abschätzung von Sanierungsdauer und -kosten und sollte bereits mit Abschluss der Detailuntersuchung ermittelt worden sein.

7 Beurteilung nicht-monetärer Kriterien (Schritt D)

Die nicht-monetäre Bewertung berücksichtigt technische und organisatorische Kriterien, Umweltauswirkungen sowie den Arbeits- und Umgebungsschutz. Es handelt sich um Kriterien, die keine monetären Komponenten enthalten und als weitere Grundlagen zur Verhältnismäßigkeitsprüfung der einzelnen Sanierungsvarianten dienen:

Technische Kriterien:

- Entwicklungsstand (Referenzen, Praxiserfahrungen) und Marktverfügbarkeit*
- Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit, Wartungsaufwand, Überwachungsmöglichkeiten, Nachbesserungsmöglichkeiten*
- Flexibilität in der Anpassung an Randbedingungen*

Organisatorische Kriterien:

- Sanierungsdauer*
- Genehmigungsanforderungen (bzw. Zulassungserfordernisse)*
- Flächenbedarf/Infrastrukturbedarf****
- Auswirkung auf Nachnutzung (Funktionalität, Einschränkungen z. B. bzgl. Kontroll-, Wartungs-, Reparaturmöglichkeiten, Standsicherheit)****
- Öffentliche/politische Akzeptanz

Umweltauswirkungen, Arbeits-/ Umgebungsschutz:

- Dauer/Zeitaufwand bis zum Erreichen der vollen Wirksamkeit*
- Umgebungsschutz/Landschaftsschutz/Nachbarschaftsschutz (Betroffene im Sinne § 12 BBodSchG)*
- Verkehrsbelastung (Auswirkung auf Umgebungsschutz und Umwelt) ***
- Anfall und Verwertbarkeit von Abfällen*
- Arbeitsschutz der Sanierungsarbeiter**
- Erfordernis und Dauer der Nachsorge**

- Lärm/Gerüche/Staub/Abwasser***
- Störung natürlicher Untergrundverhältnisse***
- Energieverbrauch***
- CO₂-Footprint***
- Schadstoffbilanz (Eliminierung, Verlagerung)***
- (Kompatibilität mit anderen in der Nähe angewandten Sanierungsverfahren)

Die Kriterien können ergänzt werden.

Die einzelnen Kriterien sind nicht in einem einheitlich genormten System bewertbar. Deshalb werden die Sanierungsvarianten hinsichtlich der nicht-monetären Kriterien vergleichend beurteilt. Dazu sollten die im Einzelfall bezüglich der örtlichen Situation relevanten Kriterien ausgewählt werden.

Bei der vergleichenden Bewertung kann eine vorausgewählte Sanierungsvariante als Beurteilungsgrundlage dienen. Die Beurteilung der übrigen Varianten erfolgt dann im Vergleich zu der ausgewählten Variante. Dies kann in einer Tabelle, Matrix und verbal erfolgen und ist einzelfallabhängig.

Wenn sich augenscheinlich eine sehr deutlich negative Umweltauswirkung ergibt, ist diese – soweit möglich – mit einfachen Berechnungen zu plausibilisieren und zu beschreiben. Eine solche Situation kann sich zum Beispiel bei einem erheblichen CO₂-Ausstoß durch lange Transportstrecken zu Deponien oder sonstigen Entsorgungsanlagen ergeben.

Das Ergebnis der nicht-monetären Beurteilung und die resultierende Rangfolge der nach nicht-monetären Kriterien am besten geeigneten Verfahren wird verbal beschrieben und konkret begründet.

* entsprechende Kriterien sind in MantelV bzw. BBodSchV [2021] genannt

** entsprechende Kriterien sind in BBodSchV [1999] genannt

*** Kriterien, die Auswirkungen auf die Umwelt beschreiben

**** Kriterien zur Nachhaltigkeit (nicht abschließend)

8 Vergleichende Beurteilung und Ableitung Sanierungskonzept (Schritt E)

Die monetären und nicht-monetären Kriterien werden einer vergleichenden Beurteilung unterzogen. Diese besteht aus der Analyse der Kostenwirksamkeit der jeweiligen Sanierungsverfahren und deren nicht-monetären Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Ziel ist die Ermittlung der nach technischen, organisatorischen und ökologischen Gesichtspunkten optimalen Sanierungsvariante bei gleichzeitig sparsamem und zielgerichtetem Einsatz finanzieller Mittel.

Es wird vorgeschlagen, zunächst die Kostenwirksamkeit darzustellen.

Kosteneffizienz

Die Wirksamkeit der jeweiligen Sanierungsvariante wird durch die Reduzierung von Schadstoffkonzentrationen und -frachten auf einen durch das gewählte Sanierungsverfahren erreichbaren Sanierungszielwert definiert. Zur Abschätzung der Kostenwirksamkeit eignet sich eine graphische Gegenüberstellung von Wirksamkeit und Kosten. Da die Kosten nur mit einer gewissen Unschärfe angegeben werden können, ergeben sich daraus für jedes Sanierungsverfahren bzw. jede Verfahrenskombination Kostenbereiche, die darzustellen sind. Die Spannen möglicher Kostenrisiken oder -chancen sind dabei zu berücksichtigen. Mit der beschriebenen Vorgehensweise kann das Verfahren (bzw. die Verfahrenskombination) ausgewählt werden, welche die höchste Kosteneffizienz (optimale Kostenwirksamkeit) aufweist.

Die aus der Kostenwirksamkeit abgeleitete Rangfolge wird der nicht-monetären Rangfolge (siehe Kapitel 7) gegenübergestellt und ein angemessenes Sanierungskonzept abgeleitet.

Angemessenheit des Sanierungskonzeptes

Bei der Prüfung der Angemessenheit (Verhältnismäßigkeit im engeren Sinn) handelt es sich um keine standardisierte Beurteilung. Vielmehr bedarf es einer wertenden

Entscheidung im jeweiligen Einzelfall. Im Rahmen der Altlastenbearbeitung bedeutet dies, dass die behördlich festgelegten Maßnahmen und deren Folgen für den Pflichtigen in einem angemessenen Verhältnis zum Ausmaß der abzuwehrenden Gefahr zu stehen haben. Eine Maßnahme ist angemessen, wenn die Nachteile, die mit der Maßnahme einhergehen, insbesondere für den Betroffenen, nicht außer Verhältnis zu dem beabsichtigten Erfolg stehen.

Im Wesentlichen sind dabei folgende Aspekte zu berücksichtigen und darzustellen:

- Erhebung und Darstellung der Nachteile der in Frage kommenden Maßnahmen.
- Prüfung, ob es Handlungsalternativen zu der vorgesehenen Maßnahme gibt, die zur Zielerreichung ebenfalls geeignet sind.
- Vergleich, ob die bevorzugte Maßnahme im Hinblick auf die Nachteile tatsächlich die am besten geeignete ist.

Als Grundlage der Verhältnismäßigkeitsabwägung der Sachverständigen im Vorfeld der behördlichen Entscheidung soll eine Gegenüberstellung der wesentlichen negativen Einflüsse (unterteilt in temporär und dauerhaft) durchgeführt werden.

Hinweis zur Dokumentation

Während der Sanierungsuntersuchung beschäftigen sich die Sachverständigen bei der Ausarbeitung von Lösungsmöglichkeiten in Schritt C meist schon planerisch mit wesentlichen Ausführungsdetails, da sie für die technischen Beschreibungen und die Kostenschätzungen plausible Annahmen entwickeln müssen. Damit diese ersten planerischen Ansätze oder Gedanken zu erforderlichen Untersuchungen, Berechnungen, etc. in der späteren Bearbeitung nicht verloren gehen, sollten diese schon in der Sanierungsuntersuchung als Hilfestellung kurz dokumentiert werden.

9 Abschließender Vorschlag zu verbindlichen Sanierungszielen (Schritt F)

9.1 Konkretisierung der Sanierungsziele

Nach Vorliegen der Ergebnisse der Detailuntersuchung haben die Sachverständigen im Rahmen der behördlichen Einzelfallentscheidung erste Sanierungsziele formuliert. Die Sanierungsziele beschreiben den am Standort durch eine Sanierungsmaßnahme angestrebten Zustand.

Basierend auf dem Ergebnis der durchgeführten Sanierungsuntersuchung werden von den Sachverständigen die Sanierungsziele konkretisiert, gegebenenfalls angepasst und durch die Behörde festgelegt.

Sanierungsziele sind für die relevanten Wirkungspfade bzw. Schutzgüter zu benennen und können als konkrete Zahlenwerte (Sanierungszielwerte, z. B. zu Konzentrationen, Frachten, Geometrien) festgelegt bzw. verbal beschrieben werden (z. B. Gefahrenabwehr für bestimmte Schutzgüter, Verhinderung der Ausbreitung einer Belastungsfahne, Verminderung des Eintrags in das Grundwasser, Schutz einer Trinkwassergewinnungsanlage oder eines Oberflächengewässers, Trendumkehr).

Wurde das Sanierungsziel so bestimmt, dass mit verhältnismäßigen Mitteln keine vollständige Gefahrenabwehr erreicht wird, muss geprüft werden, ob zusätzlich Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen erforderlich sind (z. B. Nutzungsbeschränkungen), um verbleibende Gefahren abzuwenden.

9.2 Bewertungskommission für Altlasten

Die zuständige Behörde wird in Baden-Württemberg von der Bewertungskommission unterstützt. Nach § 1 der Verordnung des Umweltministeriums über Bewertungs-

kommissionen für Bodenschutz und Altlasten (KommissionsVO) hat die Bewertungskommission die Aufgabe, die Ergebnisse der Untersuchungen von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen zu bewerten und die zuständige Bodenschutz- und Altlastenbehörde zu beraten. Die Kommission führt auf Basis fachlicher und wirtschaftlicher Gesichtspunkte die Bewertung durch. Weiterhin empfiehlt die Kommission der zuständigen Behörde auf der Grundlage der Sanierungsuntersuchung das Sanierungsziel mit den möglichen Sanierungs-, Schutz- oder Beschränkungsmaßnahmen.

Ständige Mitglieder sind die betroffene untere Bodenschutz- und Altlastenbehörde (Landratsamt oder Bürgermeisteramt des Stadtkreises) als Vorsitz, die höhere Bodenschutz- und Altlastenbehörde beim zuständigen Regierungspräsidium, die Landesanstalt für Umwelt (LUBW) und das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB). Bei Bedarf können weitere Behörden hinzugezogen werden. Das Schutzgut Nutzpflanze und die mögliche Vermarktung wird aus landwirtschaftlicher Sicht durch das zur Bewertungskommission hinzugezogene Landwirtschaftsamt beurteilt. Das Schutzgut Mensch ist aus medizinischer Sicht durch das Gesundheitsamt zu beurteilen. Deren Teilnahme an der Bewertungskommission ist gemäß § 2 Abs. 3 KommissionsVO geregelt.

Im Falle der Notwendigkeit einer Sanierung werden im Rahmen der Bewertung auf Beweismiveau 4 (BN 4) das Sanierungsziel vorgeschlagen und der zuständigen Behörde ein Sanierungsverfahren empfohlen. Auf dieser Entscheidungsgrundlage ist nach § 13 BBodSchG ggf. ein Sanierungsplan zu erstellen.

10 Anforderungen an die Dokumentation

Die Dokumentation bzw. die Berichtserstellung der Sanierungsuntersuchung ist einzelfallabhängig und obliegt dem Verantwortungsbereich der Sachverständigen. Nachfolgend ist eine Grundgliederung dargestellt.

Einzelfallabhängig kann von der Gliederung abgewichen werden – die Inhalte sollten jedoch grundsätzlich abgehandelt werden. Wenn einige Inhalte im Einzelfall nicht zutreffen, sollte dies kurz begründet und dokumentiert werden.

1. Rahmenbedingungen und Grundlagenermittlung

1. Projektgebiet/Lage
2. Historische Nutzung
3. Aktuelle und planungsrechtlich zulässige Nutzung
4. Bestehende Genehmigungen und Bescheide
5. Geologie
6. Hydrogeologie
7. Projekthistorie
 - Liste aller vorhandener Unterlagen
 - kurze Erläuterung bisher durchgeführter Untersuchungen
 - bisher durchgeführte Gefahrenabwehrmaßnahmen
8. Kontaminationssituation
 - Schadstoffverteilung nach Inventar, Menge, Verteilung
 - Bodenverunreinigungen
 - Grundwasser-/ Gewässerverunreinigung
 - Dokumentation Ergänzender Untersuchungen
 - Veranlassung und Ziel
 - Darstellung der Untersuchungen
 - Untersuchungsergebnisse
 - Bewertung der Untersuchungsergebnisse
9. Gefährdungsabschätzung (getrennt nach Wirkungspfaden)
10. Konzeptionelles Standortmodell

2. Bewertung möglicher Sanierungsverfahren/Verfahrensvorauswahl

Tabellarisch:

- Kurzbeschreibung der Verfahren (auch der in Entwicklung befindlichen Verfahren), u. a. Angaben zu Entwicklungsstand, Verfügbarkeit
- Bewertung der grundsätzlichen Eignung (vollständig oder eingeschränkt) für den Sanierungsfall mit Begründung

3. Darstellung und Bewertung grundsätzlich geeigneter Sanierungsvarianten

(für Schadensherd und ggfs. Schadstofffahne getrennt)

Beschreibung der Sanierungsvariante mit jeweils:

1. Technischer Beschreibung mit Lageplan
2. Zeitaufwand und Wirkungsdauer
3. Nachsorge
4. Auswirkungen auf Umwelt und Dritte
5. Genehmigungen
6. Kosten und Risiken

4. Beurteilung nicht-monetärer Kriterien

5. Vergleichende Beurteilung und Ableitung Sanierungskonzept

6. Abschließender Vorschlag zu verbindlichen Sanierungszielen

Hinweis zur Berichtserstellung

Eine verkürzte Form der Berichtserstellung ist bei kleineren, fachlich einfachen Fällen möglich. Es wird hierbei auf die Anforderung verwiesen, dass die Inhalte von der zuständigen Behörde vollständig prüfbar sein müssen. Die zuständige Behörde muss in die Lage versetzt werden, ihre Abwägungs- und Entscheidungsprozesse vollumfänglich ausüben zu können.

11 Anlage I

Tabelle 11.1: Matrix Sanierungsverfahren (Verfahrensbeschreibungen, Stand der Technik, Wirkungsbereich, schadstoffspezifische Eignung)

Verfahren	Verfahrensbeschreibung	Eignung für folgende Schadstoffe	Wirkungsbereich Ungesättigte Zone (UZ), Gesättigte Zone (GZ)	Wirkungsort (Quelle = Q Fahne = F.)	Stand der Technik (ja/nein)
Airsparging	<p>Das Verfahren basiert auf dem Prinzip der Injektion atmosphärischer Luft in den Grundwasserleiter. Mit Hilfe eines Kompressors wird Luft über Injektionslanzen in die gesättigte Bodenzone injiziert. Durch den Luftertrag in den Grundwasserleiter erfolgt ein Phasenübergang der im Grundwasser vorhandenen leichtflüchtigen Verbindungen in die Gasphase. Die leichtflüchtigen Schadstoffe gehen somit aus der gesättigten Bodenzone/dem Aquifer in die ungesättigte Bodenzone über.</p> <p>Die Fassung der schadstoffhaltigen Bodenluft in der ungesättigten Bodenzone erfolgt über eine begleitende Bodenluftabsaugung. Für eine vollständige Erfassung des belasteten Bodenluftbereiches muss das Absaugvolumen größer sein als das Einblasvolumen.</p> <p>Das Einblasen der atmosphärischen Luft erfolgt in der Regel unterhalb des belasteten Tiefenniveaus. Das Erfordernis einer gleichzeitigen Sicherung des Grundwasserschadens ist abzuwägen.</p> <p>In Abhängigkeit der standortspezifischen Reichweiten des Verfahrens ist ein angepasstes Messnetz an Injektionslanzen und Absaugpegeln (Bodenluft) zu errichten.</p> <p>Mit Hilfe eines geeigneten Grundwasser- und Bodenluftmonitorings wird das Verfahren gesteuert und der Sanierungserfolg überwacht. Verfahrensgrenzen stellen Inhomogenitäten im Aquifer/ in der ungesättigten Zone dar sowie das Vorhandensein von organischen Leichtphasen (sog. LNAPL, Light Non-Aqueous Phase Liquids).</p>	Leichtflüchtige Schadstoffe	GZ	Q	ja
Alkoholspülung	<p>Eine Alkoholspülung basiert auf der Herabsetzung der Grenzflächenspannung zwischen Wasser und dem Phasenkörper. Hierzu wird eine Mischung aus Wasser und hydrophilem und lipophilem Alkohol (Alkohol-cocktail) in den Grundwasserleiter injiziert. Das entstandene Einphasengemisch aus Alkohol-Schadstoff-Wasser kann dann abgepumpt werden.</p> <p>Die Eingabe des Alkoholgemisches erfolgt über Brunnen oder Lanzen.</p> <p>Zur Kontrolle des Systems und um eine unkontrollierte Schadstoffverlagerung (insbesondere in die Tiefe) zu vermeiden sind vertikale oder horizontale Regelspülkreisläufe zu etablieren.</p> <p>Das geförderte Alkohol-Schadstoff-Wasser-Gemisch wird aufbereitet, wobei ein Großteil des Alkohols zurückgewonnen und erneut eingesetzt werden kann.</p> <p>Eine Steuerung der Maßnahme erfolgt über ein begleitendes Grundwassermonitoring.</p> <p>Technikumsversuche in verschiedenen Skalen liegen vor. Bisher – zumindest in Deutschland – wenige technische Anwendungen.</p>	Organische Leicht- und Schwerphasen (sog. LNAPL und DNAPL)	GZ	Q	Ja, in Erprobung
Bioventing	<p>Das Verfahren Bioventing beruht auf der Einbringung von Sauerstoff in die ungesättigte Bodenzone und dem dadurch stimulierten mikrobiologischen Abbau.</p> <p>Über Injektionslanzen wird mittels eines Kompressors Luft in die ungesättigte Bodenzone injiziert und so die Aktivität der vorhandenen Mikroorganismen gesteigert. Die Luftinjektion erfolgt in Kombination mit einer Bodenluftabsaugung. Es entsteht eine Durchströmung des Schadensbereichs. Die abgesaugte, schadstoffbelastete Bodenluft wird einer Abluftreinigung zugeführt. Gängige Abluftreinigungssysteme sind beispielsweise Luftaktivkohlefilter oder eine katalytische Oxidation.</p> <p>Die Effizienz der Maßnahme wird durch die Luftdurchlässigkeit der ungesättigten Zone, die vom Porenvolumen und dem Wassergehalt abhängig ist, gesteuert. In Abhängigkeit der standortspezifischen Reichweiten des Verfahrens ist ein angepasstes Messnetz an Injektionslanzen und Absaugpegeln zu errichten.</p> <p>Mit Hilfe eines geeigneten Bodenluftmonitorings wird das Verfahren gesteuert und der Sanierungserfolg überwacht.</p>	Organische Schadstoffe, biologisch abbaubare Schadstoffe, insbesondere Mineralölkohlenwasserstoffe und aromatische Kohlenwasserstoffe	UZ	Q	ja

Verfahren	Verfahrensbeschreibung	Eignung für folgende Schadstoffe	Wirkungsbereich Ungesättigte Zone (UZ), Gesättigte Zone (GZ)	Wirkungsort (Quelle = Q Fahne = F,)	Stand der Technik (ja/nein)
Bodenluftabsaugung (BLA)	<p>Mit Hilfe einer Bodenluftabsaugung können flüchtige Schadstoffe mit niedrigem Siedepunkt bzw. hohem Dampfdruck aus der ungesättigten Bodenzone entfernt werden. Hierzu erfolgt ein gezieltes Absaugen von Bodenluft an einem oder mehreren Absaugpegeln durch Anlegen eines Unterdrucks. Aufgrund des Nachströmens von unbelasteter Bodenluft in den belasteten Bodenbereich entsteht ein chemisch-physikalisches Ungleichgewicht. In dessen Folge erfolgt ein Phasenübergang von an die Bodenmatrix adsorbierten oder im Porenraum gelöst vorliegenden Schadstoffe in die Bodenluft. Der Unterdruck in den Absaugpegeln wird über Vakuumpumpen oder Seitenkanalverdichter erzeugt.</p> <p>Die abgesaugte, schadstoffbelastete Bodenluft wird einer Abluftreinigung zugeführt. Gängige Abluftreinigungssysteme sind beispielsweise Luftaktivkohlefilter oder eine katalytische Oxidation.</p> <p>Die Effizienz der Maßnahme wird durch die Luftdurchlässigkeit der ungesättigten Zone, die vom Porenvolumen und dem Wassergehalt abhängig ist, gesteuert. In Abhängigkeit der standortspezifischen Reichweiten des Verfahrens ist ein angepasstes Messnetz an Absaugpegeln zu errichten. Mit zunehmender Sanierungsdauer und abnehmendem Konzentrationsgradienten reduziert sich die Effizienz des Verfahrens. Dem kann durch einen intermittierenden Betrieb begegnet werden.</p> <p>Mit Hilfe eines geeigneten Bodenluftmonitorings wird das Verfahren gesteuert und der Sanierungserfolg überwacht.</p>	Leichtflüchtige Schadstoffe	UZ	Q	ja
Bodenspülung	<p>Austrag feststoffgebundener Kontaminationen in der ungesättigten Bodenzone durch die Spülung mit sauberem Wasser. Durch die Bodenspülung wird die Sickerwassermenge erhöht und eine vermehrte Lösung der feststoffgebundenen Schadstoffe bewirkt. Es erfolgt die Desorption, Mobilisierung und Verfrachtung der Schadstoffe aus der ungesättigten Bodenzone in das Grundwasser. Die in Lösung gegangenen mobilisierten Schadstoffe werden über eine abstromig des Schadenbereichs befindliche hydraulische Sicherungsmaßnahme durch Pump-and-Treat gefasst. Nach Abreinigung des geförderten Grundwassers wird das Wasser anschließend wieder für die Bodenspülung verwendet (Spülkreislauf).</p> <p>Die Bodenspülung kann entweder durch eine Beregnung erfolgen oder z. B. über Drainageleitungen in den Untergrund eingebracht werden. Das Verfahren ist geeignet für gut durchlässige Böden. Je nach Anwendung (Beregnung, Drainagen) ist ggf. der humose Oberboden aufgrund des starken Schadstoffrückhalts abzutragen. Die Wirksamkeit des Verfahrens setzt zeitversetzt und erst nach längerer Einwirkzeit ein.</p> <p>Das Verfahren ist durch ein Grundwassermonitoring zu überwachen und zu steuern. Mit Hilfe der Schadstoffkonzentrationen im Förderwasser kann die entnommene Schadstofffracht ermittelt werden.</p>	Leicht bis gut lösliche Schadstoffe	UZ	Q	nein
Dekontamination durch Bodenaustausch ohne Baugrubenverbau – offene Baugrube	<p>Bei der Dekontamination durch Bodenaustausch ohne Baugrubenverbau (offene Baugrube) wird der belastete Boden mit geeignetem Gerät gegen unbelasteten Boden ausgetauscht. In der ungesättigten Zone kann dies bei ausreichenden Platzverhältnissen durch eine freie Abböschung der resultierenden Baugrube erfolgen. Die Baugrubenböschungen können unter Beachtung der Vorgaben in DIN 4124:2012-1 unter einem Winkel $\leq 45^\circ$ und einer Böschungshöhe < 5 m frei geböschet werden. Die Baugrubenböschungen sind außerhalb des Sanierungsbereiches zu errichten. Mögliche Beeinträchtigungen der Standsicherheit der Baugrubenböschungen durch besondere Gegebenheiten, Witterungseinflüsse sowie den Baustellenbetrieb sind zu beachten. I. d. R. ist ein rechnerischer Nachweis der Standsicherheit der Böschung unter den Standortbedingungen erforderlich. Bei großen Grundwasserflurabständen, engen Standortbegebenheiten oder statischen Risiken bzgl. angrenzender Bebauungen sind ggf. auch bei einem Aushub in der ungesättigten Bodenzone Verbaumaßnahmen erforderlich.</p> <p>Der belastete Boden wird in der Regel deponiert oder Vor-Ort bzw. in einer Bodenbehandlungsanlage gereinigt. Das Verfüllmaterial hat umwelthygienischen und bodenmechanischen Anforderungen für die Nachnutzung zu genügen.</p> <p>Besondere Vorkehrungen mit Blick auf den Arbeits- und Emissionsschutz sind für flüchtige und partikelgebundene Schadstoffe zu treffen.</p>	Alle	UZ	Q	ja

Verfahren	Verfahrensbeschreibung	Eignung für folgende Schadstoffe	Wirkungsbereich Ungesättigte Zone (UZ), Gesättigte Zone (GZ)	Wirkungsort (Quelle = Q Fahne = F,)	Stand der Technik (ja/nein)
Dekontamination durch Bodenaustausch mit Baugrubenverbau – offene Baugrube	<p>Bei der Dekontamination durch Bodenaustausch mit Baugrubenverbau (offene Baugrube) wird der belastete Boden mit geeignetem Gerät gegen unbelasteten Boden ausgetauscht. Mit Hilfe eines Verbaus wird der umliegende Boden gestützt und der seitliche Zufluss des Grundwassers in Richtung Baugrube unterbunden. Es sind verschiedene Verbauarten möglich: Es gibt weiche Verbauplätze (Trägerbohlverbauten und Spundwände) und steife, verformungsarme Verbauplätze (z. B. Bohrpfahlwände und Schlitzwände). Der Verbau kann temporär erfolgen, d. h. nach Einsatz wieder rückgebaut bzw. aus dem Baugrund entfernt werden (z. B. Spundwände) oder dauerhaft im Untergrund verbleiben (z. B. Bohrpfahlwände) und eine Funktion in der Nachnutzung übernehmen. Die Auswirkungen der Herstellung des gewählten Verbaus auf Strukturen/Bebauung der Umgebung sind zu überprüfen.</p> <p>Während des Bodenaustauschs in der gesättigten Bodenzone ist eine Grundwasserhaltung erforderlich. In Abhängigkeit der Schadstoffbelastung ist das geförderte Grundwasser über eine Wasseraufbereitungsanlage vor der Ableitung in die Kanalisation/das Oberflächengewässer abzureinigen. Die Wasserhaltung ist gesondert zu dimensionieren und zu planen, ggf. vorhandene Störstoffe bei der Wasseraufbereitung (wie beispielsweise Eisen, Mangan, im Wasser enthaltene Feststoffe (absetzbare, abfiltrierbare Stoffe) sowie das Calcitabscheidungsvermögen) sind zu berücksichtigen. Im Vorfeld der Baumaßnahme ist eine wasserrechtliche Genehmigung zu erwirken. Der belastete Boden wird in der Regel deponiert oder Vor-Ort bzw. in einer Bodenbehandlungsanlage gereinigt. Das Verfüllmaterial hat umwelthygienischen und bodenmechanischen Anforderungen für die Nachnutzung zu genügen.</p> <p>Eine Kombination mit einer Dekontamination durch Bodenaustausch ohne Baugrubenverbau (offene Baugrube) in der ungesättigten Bodenzone ist zu prüfen.</p> <p>Besondere Vorkehrungen mit Blick auf den Arbeits- und Emissionsschutz sind für flüchtige Schadstoffe zu treffen.</p>	Alle Besondere Vorkehrungen für flüchtige (z. B. Monoaromatische Verbindungen) Schadstoffe	GZ und in besonderen Fällen UZ (beispielsweise bei enger Bebauung)	Q	ja
Dekontamination durch Bodenaustausch mit Verbauelementen – Spundwandkästen	<p>Bei der Dekontamination durch Bodenaustausch mit Verbauelementen (Spundwandkästen) wird der belastete Boden mit geeignetem Gerät gegen unbelasteten Boden ausgetauscht. Die Spundwandkästen bestehen aus einzelnen Stahlelementen und können in verschiedenen Größen hergestellt werden (z. B. 10 m × 10 m). Die einzelnen Stahlelemente werden mit einem Hochfrequenzrüttler in den Untergrund eingebracht. Der Bodenaustausch kann innerhalb der Spundwandkästen ohne Wasserhaltung (Nassbaggerung) erfolgen. Das ausgebagerte Bodenmaterial ist fachgerecht zu entwässern. Das Abtropfwasser ist in Abhängigkeit der Schadstoffbelastung ggf. vor der Ableitung in die Kanalisation/das Oberflächengewässer abzureinigen.</p> <p>Nach dem Aushub und vor der Rückverfüllung wird i. d. R. das belastete, sich im Spundwandkasten befindliche Grundwasser vollständig ausgetauscht. In Abhängigkeit der Schadstoffbelastung ist das geförderte Grundwasser sowie das Abtropfwasser über eine Wasseraufbereitungsanlage vor der Ableitung in die Kanalisation/das Oberflächengewässer abzureinigen. Die ggf. erforderliche Wasseraufbereitung ist unter Berücksichtigung von Störstoffen (wie beispielsweise Eisen, Mangan, im Wasser enthaltene Feststoffe (absetzbare, abfiltrierbare Stoffe) sowie das Calcitabscheidungsvermögen) zu dimensionieren und zu planen. Im Vorfeld der Baumaßnahme ist eine wasserrechtliche Genehmigung zu erwirken.</p> <p>Der belastete Boden wird in der Regel deponiert oder Vor-Ort bzw. in einer Bodenbehandlungsanlage gereinigt. Das Verfüllmaterial hat umwelthygienischen und bodenmechanischen Anforderungen für die Nachnutzung zu genügen.</p> <p>Nach Verdichtung des eingebauten Verfüllmaterials erfolgt das Ziehen der Verbauelemente und das Umsetzen des Spundwandkastens. Es kann mit mehreren Spundwandkästen parallel gearbeitet werden.</p> <p>Besondere Vorkehrungen mit Blick auf den Arbeits- und Emissionsschutz sind für flüchtige Schadstoffe zu treffen.</p>	Alle Besondere Vorkehrungen für flüchtige (z. B. Monoaromatische Verbindungen) Schadstoffe	UZ, GZ	Q	ja

Verfahren	Verfahrensbeschreibung	Eignung für folgende Schadstoffe	Wirkungsbereich Ungesättigte Zone (UZ), Gesättigte Zone (GZ)	Wirkungsort (Quelle = Q Fahne = F,)	Stand der Technik (ja/nein)
Dekontamination durch Bodenaustausch mit Verbauelementen – Wabenverbau	<p>Bei der Dekontamination durch Bodenaustausch mit Verbauelementen (Wabenverbau) wird der belastete Boden mit geeignetem Gerät gegen unbelasteten Boden ausgetauscht. Das Prinzip eines Wabenverbauens beruht auf sechseckigen Stahlbohlelementen (Hexagonalwaben). Die Verbauelemente werden mittels Hochfrequenzrüttler im Wabenverbund unmittelbar aneinander in den Untergrund eingerammt bzw. -gerüttelt.</p> <p>Der Bodenaustausch kann innerhalb der Spundwandkästen ohne Wasserhaltung (Nassbaggerung) erfolgen. Das ausgebagerte Bodenmaterial ist fachgerecht zu entwässern. Das Abtropfwasser ist in Abhängigkeit der Schadstoffbelastung ggf. vor der Ableitung in die Kanalisation/das Oberflächengewässer abzureinigen.</p> <p>Nach dem Aushub und vor der Rückverfüllung wird i. d. R. das belastete, im Stahlbohlelement befindliche Grundwasser vollständig ausgetauscht. In Abhängigkeit der Schadstoffbelastung ist das geförderte Grundwasser sowie das Abtropfwasser über eine Wasseraufbereitungsanlage vor der Ableitung in die Kanalisation/das Oberflächengewässer abzureinigen. Die ggf. erforderliche Wasseraufbereitung ist unter Berücksichtigung von Störstoffgehalten zu dimensionieren und zu planen. Im Vorfeld der Baumaßnahme ist eine wasserrechtliche Genehmigung zu erwirken.</p> <p>Der belastete Boden wird in der Regel deponiert oder Vor-Ort bzw. in einer Bodenbehandlungsanlage gereinigt. Das Verfüllmaterial hat umwelthygienischen und bodenmechanischen Anforderungen für die Nachnutzung zu genügen.</p> <p>Nach Verdichtung des eingebauten Verfüllmaterials erfolgt das Ziehen und Umsetzen der Stahlbohlelemente. Es wird mit mehreren Stahlbohlelementen parallel gearbeitet.</p> <p>Das Verfahren ist insbesondere im Hinblick auf Arbeits- und Emissionsschutzaspekte für flüchtige Schadstoffe geeignet. Durch den geringen Querschnitt der Stahlbohlelemente tritt eine geringe Emission des Schadstoffs in die Umgebung auf. Des Weiteren ist eine Absaugung der austretenden Luft im Bohrloch und eine anschließende Abreinigung der abgesaugten Luft möglich.</p>	Alle	UZ, GZ	Q	ja
Dekontamination durch Bodenaustausch mit Großlochbohrungen	<p>Bei der Dekontamination durch Bodenaustausch mit Großlochbohrungen wird der belastete Boden mit Hilfe eines Bohrgerätes ausgebohrt und im Schutze der Verrohrung gegen unbelasteten Boden ausgetauscht. Bei Großlochbohrungen handelt es sich um großkalibrige Bohrungen, die drehend/rotierend in den Untergrund eingebracht werden. Durch die rotierende Ausführung ist das Verfahren erschütterungsarm. Nach Einbringen einer Schutzverrohrung erfolgt das Ausbohren des belasteten Bodens mittels Bohreimer/-schnecke.</p> <p>Der Bodenaustausch kann ohne Wasserhaltung erfolgen. Das ausgebohrte Bodenmaterial ist fachgerecht zu entwässern. Das Abtropfwasser ist in Abhängigkeit der Schadstoffbelastung ggf. vor der Ableitung in die Kanalisation/das Oberflächengewässer abzureinigen.</p> <p>Nach dem Aushub und vor der Rückverfüllung wird i. d. R. das belastete, in der Verrohrung befindliche Grundwasser vollständig ausgetauscht. In Abhängigkeit der Schadstoffbelastung ist das geförderte Grundwasser sowie das Abtropfwasser über eine Wasseraufbereitungsanlage vor der Ableitung in die Kanalisation/das Oberflächengewässer abzureinigen. Die ggf. erforderliche Wasseraufbereitung ist unter Berücksichtigung von ggf. vorhandenen Störstoffen zu dimensionieren und zu planen. Im Vorfeld der Baumaßnahme ist eine wasserrechtliche Genehmigung zu erwirken.</p> <p>Der belastete Boden wird in der Regel deponiert oder Vor-Ort bzw. in einer Bodenbehandlungsanlage gereinigt. Das Verfüllmaterial hat umwelthygienischen und bodenmechanischen Anforderungen für die Nachnutzung zu genügen. Aufgrund der überschnittenen Ausführung sind Mehrmengen bei der Entsorgung des belasteten Bodenmaterials und an unbelastetem Verfüllmaterial zu bedenken.</p> <p>Nach Rückverfüllung und Verdichtung von unbelastetem Bodenmaterial erfolgt das Ziehen der Schutzverrohrung. Das Verfahren ist insbesondere im Hinblick auf Arbeits- und Emissionsschutzaspekte für flüchtige Schadstoffe geeignet. Durch den geringen Querschnitt der Schutzverrohrung tritt eine geringe Emission des Schadstoffs in die Umgebung auf. Des Weiteren ist eine Absaugung der austretenden Luft im Bohrloch und eine anschließende Abreinigung der abgesaugten Luft möglich.</p>	Alle	UZ, GZ	Q	ja
Dual Phase Extraction (DPE) – Zwei-Phasen-Extraktion	<p>Bei dem Verfahren Dual Phase Extraction (DPE), auch als Zwei-Phasen-Extraktion bezeichnet wird ein hoher Unterdruck in einer speziell hierfür ausgebauten Grundwassermessstelle angelegt und gleichzeitig die Bodenluft und das Grundwasser oder das Grundwasser und organische Leichtphase (Dichte < 1g/l) abgesaugt/gefördert. Dabei werden i. d. R. mehrere Messstellen gleichzeitig betrieben.</p> <p>Hinsichtlich detaillierter Ausführungen zur Verfahrensbeschreibung wird auf das Verfahren Multi-Phase-Extraction (MPE) verwiesen.</p>	flüchtige organische Schadstoffe sowie LNAPL (Organische Phasen mit einer Dichte < 1g/L)	UZ/GZ (i. W. Grundwasserschwammungsreich)	Q	ja

Verfahren	Verfahrensbeschreibung	Eignung für folgende Schadstoffe	Wirkungsbereich Ungesättigte Zone (UZ), Gesättigte Zone (GZ)	Wirkungsort (Quelle = Q Fahne = F,)	Stand der Technik (ja/nein)
Durchströmte Reinigungswände	<p>In durchströmten Reinigungswänden werden reaktive Materialien vorgelegt, die die Schadstoffe bei der Passage durch physikalische, chemische und/oder biologische Prozesse umsetzen oder abbauen. Die Passage erfolgt passiv, d. h. ausschließlich auf Grund des natürlichen hydraulischen Potentialgefälles.</p> <p>Hinsichtlich der Bauart wird zwischen vollflächig durchströmten Reinigungswänden (sog. Continuous Reactive Barriers) und durchströmten Reinigungswänden mit gelenktem Grundwasserstrom, z. B. Funnel & Gate, Drain & Gate-Systeme unterschieden. Bei dem Verfahren Funnel & Gate wird das verunreinigte Grundwasser an Leitwänden (Dichtwänden), dem sogenannten „Funnel“ grundwasserhydraulisch gezielt auf einen oder mehrere besonders gestaltete Durchflussbereiche (Reaktoren, „Gates“) passiv zugeleitet. Bei dem Verfahren Drain & Gate wird das verunreinigte Grundwasser über Drainagen zu den entsprechenden „Gates“ geleitet. Zur Rückführung des abgereinigten Wassers in den Grundwasserleiter ist abstromig der Gates ein analoges Drainagesystem erforderlich.</p> <p>Die Überwachung der Sanierungsmaßnahme erfolgt über ein regelmäßiges Grundwasser- (insbesondere Grundwasserstände und -qualität) und Anlagenmonitoring.</p>	Im Wesentlichen LCKW, MKW, PAK, Chromat, Arsen In Abhängigkeit des eingesetzten reaktiven Materials jedoch auch weitere Schwermetalle	GZ	F	ja
Enhanced Natural Attenuation (ENA)	<p>Grundlage aller ENA-Verfahren ist die Stimulation und Forcierung des natürlicherweise vorhandenen Schadstoffabbau potentials im Untergrund. Hierzu werden dem Aquifer gezielt Substanzen oder Mikroorganismen zugeführt. Zur Forcierung der biologischen Oxidation werden Elektronenakzeptoren (Sauerstoff, Nitrat, Sulfat) genutzt, zur Forcierung der reduktiven Dehalogenierung werden Elektronendonatoren dem Untergrund zugeführt.</p> <p>Die Eingabe der Substrate kann über Grundwassermessstellen (vertikal und horizontal), Drainagegräben und Direct-push Sondierungen erfolgen.</p> <p>Die Eingabe der Substrate ist dabei derart zu gestalten, dass sich im Untergrund eine reaktive Zone ausbildet, in der die für den Schadstoffabbau optimalen geochemischen Bedingungen vorliegen.</p> <p>Die Verfahren können mit anderen Verfahren, beispielsweise hydraulischen Maßnahmen zur Verbesserung der Verteilung der Zusatzstoffe oder mit physikalischen Wasserreinigungstechniken kombiniert werden.</p> <p>Über ein geeignetes Grundwassermonitoring ist die Ausbreitung des Substrates, die Einstellung der optimalen geochemischen Bedingungen sowie der Sanierungserfolg zu überwachen.</p> <p>Zur Planung und Dimensionierung der Sanierungsmaßnahme sind verfahrensspezifische Labor- oder Feldversuche im Vorfeld empfehlenswert.</p>	LCKW, aliphatische chlorierte Kohlenwasserstoffe, BTEX, MKW, niedermolekulare PAK	GZ	F	ja
Elektrokinetische Verfahren	<p>Das Grundprinzip der Elektrokinetik basiert auf dem Einbringen von Elektroden in den Untergrund und dem Erzeugen eines elektrischen Feldes. Wasser und gelöste Ionen wandern unter dem Einfluss der Gleichspannung entsprechend ihrer Ladung zu den Elektroden. Dabei werden die elektro-chemischen Transportprozesse Elektroosmose (Transport des Porenwassers), Elektromigration (Ionenwanderung) und Elektrophorese (Wanderung von Kolloiden, z. B. Tonpartikel) genutzt. Die Schadstoffe werden im Bereich der Elektroden in Reservoirs angereichert und einer Grundwasserreinigungsanlage oder einer Entsorgung zugeführt.</p> <p>Durch die Wahl der Anzahl von Elektrodenpaaren, deren Abstand untereinander und durch die Wahl von Spannung und Stromstärke kann die Sanierung optimiert werden.</p> <p>Die Steuerung und Kontrolle der Sanierung erfolgt über ein entsprechend auszugestaltetes Messstellennetz und -monitoring (insb. Überwachung von Spannung und Stromstärke, Grundwasserqualität und Schadstoffaustragsmessungen). Der Abstand zwischen den Entnahme- und Monitoringmessstellen ist projektspezifisch zu ermitteln.</p> <p>Bei der Verfahrensabwägung ist insbesondere der erforderliche Energieeinsatz zu berücksichtigen.</p> <p>Das Verfahren kann noch nicht dem Stand der Technik zugeordnet werden. Es gibt Anwendungserfahrungen und -anbieter, allerdings nur in begrenztem Umfang.</p>	Anorganische und organische Schadstoffe, insbesondere Schwermetalle und polare Verbindungen	GZ, UZ nur bei hoher Wassersättigung	Q	Nein, in Erprobung

Verfahren	Verfahrensbeschreibung	Eignung für folgende Schadstoffe	Wirkungsbereich Ungesättigte Zone (UZ), Gesättigte Zone (GZ)	Wirkungsort (Quelle = Q Fahne = F,)	Stand der Technik (ja/nein)
Horizontale Sicherung	<p>Aufbringen einer Oberflächenabdichtung (z. B. Asphaltdecke mit geordnetem Entwässerungssystem) zur Verhinderung der Versickerung von Niederschlagswasser.</p> <p>Eine Oberflächenabdichtung ist als alleiniges Verfahren lediglich anwendbar, wenn sich der Schaden in der ungesättigten Bodenzone befindet. Erstrecken sich die Verunreinigungen bis in die gesättigte Bodenzone und liegt bereits eine erhebliche Verunreinigung des Grundwassers vor, erfüllt eine Sicherung durch Oberflächenabdichtung (als alleiniges Verfahren) nicht mehr den Zweck einer Sicherung, da ein weiteres Verfrachten der Schadstoffe in den Grundwasserleiter nicht unterbunden wird. Der Schadstoff verbleibt im Untergrund. Es ist mit Nutzungseinschränkungen zu rechnen.</p>	Alle, ausgenommen leichtflüchtige Schadstoffe	UZ	Q	ja
Hydroschockverfahren	<p>Bei dem Hydroschockverfahren handelt es sich um ein physikalisches Mobilisierungsverfahren, bei dem die Mobilisierung der Schadstoffe in der gesättigten Bodenzone durch das Einbringen mechanischer Energie erfolgt.</p> <p>Beim Hydroschockverfahren wird durch die eingebrachte Energie innerhalb einer Bohrung (z. B. durch Rüttler, Druckimpulse) das Grundwasser und Bodengerüst in Schwingung versetzt und so der Stofftransport erhöht. Durch die Schwingungen ist es möglich in sandig bis kiesig ausgebildeten Grundwasserleitern Umlagerungsprozesse innerhalb des Korngerüsts zu bewirken. Durch diese Umlagerungsprozesse können in anfangs schlecht wasserdurchlässigen Porenräume angereicherte Schadstoffe erfasst und aus dem Grundwasserleiter ausgetragen werden. Das Hydroschockverfahren kann u. a. ergänzend zu einer hydraulischen Sanierung (Pump-and-Treat) eingesetzt werden.</p> <p>Möglichen negativen Auswirkungen wie Setzungen oder Verdichtungen des Untergrundes ist im Vorfeld Rechnung zu tragen. Mit Hilfe eines entsprechend auszugestaltenden Überwachungsprogramms sind die Auswirkungen auf den Untergrund sowie die Sanierungsleistung zu überwachen.</p> <p>Das Verfahren befindet sich in der Erprobung und kann noch nicht als Stand der Technik bezeichnet werden.</p>	Organische und anorganische Schadstoffe	GZ	Q	nein
Immobilisierung	<p>Unter Immobilisierung werden alle mobilitätshemmenden Maßnahmen verstanden, die an den Schadstoffen selbst ansetzen und die Verfügbarkeit der Schadstoffe für Emissionsvorgänge herabsetzen.</p> <p>Es lassen sich folgende (grundsätzliche) Wirkungsmechanismen unterscheiden:</p> <p>Physikalische Immobilisierung (Verfestigung, Einbindung in die Matrix),</p> <p>Chemische Immobilisierung (Umwandlung der Schadstoffe z. B. durch Fällung, Oxidation, Reduktion),</p> <p>Chemisch-physikalische Immobilisierung (Kombination der beiden o. g. Verfahren)</p> <p>Immobilisierungsverfahren werden in der Regel als on-site Verfestigungsmaßnahmen durchgeführt. Dabei wird das Material ausgehoben und vorbehandelt, während parallel das Bindemittel und die Zuschlagstoffe aufbereitet werden. Anschließend werden die Materialien intensiv gemischt. Das Aushärten der Mischung erfolgt zum Teil vor, zum Teil nach dem Wiedereinbau.</p> <p>Dem Langzeitverhalten muss im Rahmen der Verfahrensvorauswahl und Sanierungsplanung besonderes Augenmerk gewidmet werden.</p>	i. W. Schwermetalle	UZ, GZ	Q	ja

Verfahren	Verfahrensbeschreibung	Eignung für folgende Schadstoffe	Wirkungsbereich Ungesättigte Zone (UZ), Gesättigte Zone (GZ)	Wirkungsort (Quelle = Q Fahne = F,)	Stand der Technik (ja/nein)
In-situ Chemische Oxidation (ISCO)	<p>Bei der In-situ-chemischen Oxidation (ISCO) werden Schadstoffe in der gesättigten Zone durch Einleitung eines chemischen Oxidationsmittels nach dem Prinzip einer „kalten Verbrennung“ abiotisch zerstört, wobei eine vollständige Umsetzung zu umweltneutralen Stoffen wie Kohlendioxid und Wasser sowie bei chlorierten Verbindungen zu Chlorid erfolgt.</p> <p>Die Injizierbarkeit der Substrate wird von der hydraulischen Durchlässigkeit des Grundwasserleiters gesteuert. Die Eingabe des Oxidationsmittels kann in Abhängigkeit der Standorteigenschaften und der Eigenschaften des Oxidationsmittels über permanente Grundwassermessstellen (bzw. -galerien) oder über temporäre Injektions-Lanzen erfolgen. Die Eingabe und Verteilung kann durch verschiedenste Maßnahmen unterstützt und verbessert werden, u. a. mit Hilfe des Druckpuls-Verfahrens, der Anwendung von Grundwasserzirkulationssystemen bis hin zu Hochdruckverfahren und Fracturing. Die Planung des Eingabeverfahrens sollte entsprechend durch Infiltrationsversuche unterstützt und geleitet werden.</p> <p>Grundsätzlich können alle organischen Schadstoffe durch Oxidationsmittel umgesetzt werden, jedoch ist im Vorfeld der Maßnahme das unter den gegebenen Standortbedingungen am besten geeignete Oxidationsmittel zu ermitteln. Praxiserprobte Oxidationsmittel sind insbesondere Fentons Reagenz, Ozon, Persulfat und Permanganat.</p> <p>Die Injektion der Substrate ist mit Nebenreaktionen verbunden. Beispielsweise können Feststoffpartikeln oder Gasblasen entstehen und sich im Porenraum ablagern. Die Eingabe des Oxidationsmittels sowie die Ausbreitung des Oxidationsmittels ist durch ein entsprechendes ausgestaltetes Grundwassermessstellennetz und -monitoring zu überwachen, um gegebenenfalls gegensteuern zu können.</p> <p>Häufig ist ein sogenannter Rebound, d. h. ein Wiederanstieg der Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser nach Eingabe des Oxidationsmittels zu beobachten. Dies ist auf eine Rückdiffusion von Schadstoffen aus geringdurchlässigen Bereichen des Grundwasserleiters zurückzuführen. Dem kann durch wiederholte Eingaben des Oxidationsmittels entgegengewirkt werden.</p> <p>Bestimmend für den Oxidationsmittelverbrauch sind nicht die gelösten Schadstoffkonzentrationen, sondern der sogenannte Matrixbedarf des Grundwasserleiters. Dieser ist im Rahmen der Planung experimentell zu bestimmen. Da der Matrixbedarf in Böden mit geringen Gehalten an organischem Kohlenstoff bereits erheblich sein kann, ist die In-situ Chemische Oxidation in der Regel nur in begrenzten Hochlastbereichen wirtschaftlich durchführbar.</p> <p>Zur Planung und Dimensionierung der Sanierungsmaßnahme sind verfahrensspezifische Labor- oder Feldversuche im Vorfeld empfehlenswert.</p>	In Abhängigkeit des Oxidationsmittels (niedermolekulare halogenierte und nicht halogenierte organische Verbindungen, Mineralölkohlenwasserstoffe, Cyanide)	GZ	Q; (F)	ja
In-situ Chemische Reduktion (ISCR)	<p>Bei der In-situ-chemischen Reduktion (ISCR) werden durch Einleiten eines Reduktionsmittels in die gesättigte Zone organische Schadstoffe im Grundwasser in nicht-toxische oder weniger toxische Verbindungen umgesetzt und Metalle über Adsorption oder Fällung immobilisiert.</p> <p>Die Injizierbarkeit der Substrate wird von der hydraulischen Durchlässigkeit der gesättigten Zone gesteuert. Die Eingabe des Reduktionsmittels kann in Abhängigkeit der Standorteigenschaften und der Eigenschaften des Reduktionsmittels über permanente Grundwassermessstellen (bzw. -galerien) oder über temporäre Injektionslanzen erfolgen. Die Eingabe und Verteilung kann durch verschiedenste Maßnahmen unterstützt und verbessert werden, u. a. mit Hilfe des Druckpuls-Verfahrens, der Anwendung von Grundwasserzirkulationssystemen bis hin zu Hochdruckverfahren und Fracturing. Die Planung des Eingabeverfahrens sollte entsprechend durch Infiltrationsversuche unterstützt und geleitet werden.</p> <p>Praxiserprobte Reduktionsmittel sind Eisen(II)sulfat, Natriumdithionit, Kaliumdisulfid und Eisen(0). Die Reduktionsmittel Eisen(II)sulfat, Natriumdithionit und Kaliumdisulfid werden in wässriger Lösung in den Grundwasserleiter eingebracht. Elementares Eisen (Fe(0)) wird als kolloidale Suspension in den Untergrund eingebracht. Im Falle von Eisen(II)sulfat, Natriumdithionit, Kaliumdisulfid erfolgt i. d. R. eine unterstützende Infiltration von organischen Kohlenstoffquellen (z. B. Melasse, Dextrose, Ethanol) um die Reduktionsmittel in sauerstoffhaltigen Grundwässern zu stabilisieren. Im Vorfeld der Maßnahme ist das unter den gegebenen Standortbedingungen am besten geeignete Reduktionsmittel zu ermitteln.</p> <p>Die Injektion der Substrate ist mit Nebenreaktionen verbunden. Die Eingabe des Reduktionsmittels sowie dessen Ausbreitung ist durch ein entsprechend ausgestaltetes Grundwassermessstellennetz und -monitoring zu überwachen.</p> <p>Zur Planung und Dimensionierung der Sanierungsmaßnahme sind verfahrensspezifische Labor- oder Feldversuche im Vorfeld empfehlenswert.</p>	Leicht- und schwerflüchtige halogenierte organische Schadstoffe, Nitroaromaten, Perchlorate sowie Schwermetalle, Sprengstofftypische Verbindungen, einzelne Pestizide	GZ	Q; (F)	ja

Verfahren	Verfahrensbeschreibung	Eignung für folgende Schadstoffe	Wirkungsbereich Ungesättigte Zone (UZ), Gesättigte Zone (GZ)	Wirkungsort (Quelle = Q Fahne = F,)	Stand der Technik (ja/nein)
Multi-phase Extraction (MPE) – Mehr-Phasen-Extraction	<p>Multi Phase Extraction (MPE) wird auch als Mehr-Phasen-Extraktion bezeichnet. Hierbei wird ein hoher Unterdruck in einer speziell hierfür ausgebauten Grundwassermessstelle angelegt und gleichzeitig die Bodenluft, das Grundwasser und ggf. vorhandene organische Phase (Dichte < 1g/l) abgesaugt/gefördert. Dabei werden i. d. R. mehrere Messstellen gleichzeitig betrieben. Die geförderten Flüssigkeiten werden über einen Flüssigkeitsabscheider getrennt. Die schadstoffbelastete Grundwasser werden aufbereitet. Die Leichtphase wird gesammelt und nach Abschluss der Maßnahme einer Entsorgung zugeführt.</p> <p>Sanierbar sind flüchtige organische Schadstoffe sowie organische Leichtphasen (Dichte < 1 g/L). Das Verfahren eignet sich insbesondere für Standorte mit mäßiger Durchlässigkeit.</p> <p>Die Steuerung und Kontrolle der Sanierung erfolgt über ein entsprechend auszugestaltetes Bodenluft-/Grundwassermessstellennetz und -monitoring (insb. Druckmessungen und Schadstoffaustragsmessungen). Der Abstand zwischen den Entnahme- und Monitoringmessstellen ist projektspezifisch zu ermitteln.</p> <p>Zum Teil werden bei diesem Verfahren sehr hohe Schadstoffgehalte in der abgesaugten Bodenluft erreicht, welche die Explosionsgrenze überschreiten können. Dies ist bei der Planung und beim Betrieb der MPE-Anlagen besonders zu berücksichtigen.</p>	flüchtige organische Schadstoffe sowie LNAPL (Organische Phasen mit einer Dichte < 1g/L)	UZ/GZ (i. W. Grundwasserschwankungsbereich)	Q	ja
Pump-and-Treat	<p>Das Prinzip von „Pump-and-Treat“ beruht auf der Entnahme von kontaminiertem Grundwasser über Förderbrunnen und der anschließend oberirdischen Abreinigung. Die Abreinigung kann mittels chemisch-physikalischen oder biologischen Reinigungsverfahren erfolgen. Das gereinigte Grundwasser wird in ein Oberflächengewässer oder in die Kanalisation eingeleitet oder in den Aquifer reinfiltriert. In Abhängigkeit der Lage der Förderbrunnen steht der Dekontaminations- (Förderbrunnen im Bereich der Schadstoffquelle) oder die Sicherheitsaspekt im Vordergrund der Maßnahme (Förderbrunnen im Bereich der Schadstofffahne).</p> <p>Aufgrund der Tatsache, dass Pump-and-Treat-Maßnahmen in Ihrer klassischen Form auf einer Förderung des Grundwassers beruhen, ergeben sich Limitationen durch die Eigenschaften des zu entfernenden Schadstoffs (insbesondere Löslichkeit, Retardationsverhalten), Eigenschaften des Aquifers (insbesondere Durchlässigkeit, Fließgeschwindigkeit, Sorptionseigenschaften) und der Existenz von Schadstoffen in Phase.</p> <p>Hinsichtlich des Schadstoffaustrages über die Zeit können zwei Phasen unterschieden werden. In der ersten Phase werden verstärkt die advektiv zugänglichen Schadstoffe dem Aquifer entzogen. Es sind zumeist große Mengenreduzierung möglich. In der zweiten Phase erfolgt der Schadstofftransport vorwiegend diffusionslimitiert. Die Mengenreduzierungen sind entsprechend i. d. R. nur noch gering. Diese Tatsache sollte unter Berücksichtigung der jeweiligen Rahmenbedingungen des Einzelfalls bereits im Vorfeld der Sanierung berücksichtigt werden. Hierbei ist insbesondere der Entwicklung eines entsprechenden Maßnahmenkonzeptes nach Erreichen der zweiten Phase und einer entsprechenden Sanierungszielwertgestaltung besonderes Augenmerk zuzumessen.</p> <p>Die Überwachung der Sanierungsmaßnahme erfolgt über ein regelmäßiges Grundwasser- (insbesondere Grundwasserstände und -qualität) und Anlagenmonitoring.</p>	Wasserlösliche organische und anorganische Schadstoffe mit geringer Sorptionsneigung	GZ	Q, F	ja
Skimming für organische Phasen	<p>Unter Skimming (engl. Abschöpfen) werden Verfahren zusammengefasst bei denen die dem Grundwasserleiter aufschwimmende oder abgesunkene organische Phase getrennt vom Grundwasser gesammelt und dem Grundwasserleiter entzogen wird. Dabei sind im Wesentlichen drei Prozesse zu unterscheiden. Im einfachsten Fall wird die organische Phase (ohne Grundwasser) mittels Pumpen unter Nutzung des natürlichen Dichteeffektes gefördert. Weitere Verfahren beruhen auf der Nutzung von speziell konstruierten Filtern, die für oliophile organische Substanzen durchlässig sind, für Wasser jedoch nicht (sog. Semipermeable Membranen). Letztlich kann auch unter Nutzung der Adhäsion, d. h. durch das Anhaften von organischen Substanzen an verschiedenen Medien (Stahlbändern oder textiltähnliche Stoffe) organische Phase selektiv aus dem Grundwasserleiter entfernt werden. Die gesammelte Phase bzw. die Stahl-/Textilbänder werden oberirdisch gesammelt und entsorgt.</p>	Organische Leichtphasen (leichter als Wasser, sog. LNAPL)	GZ	Q	ja

Verfahren	Verfahrensbeschreibung	Eignung für folgende Schadstoffe	Wirkungsbereich Ungesättigte Zone (UZ), Gesättigte Zone (GZ)	Wirkungsort (Quelle = Q Fahne = F,)	Stand der Technik (ja/nein)
Tensidspülung	<p>Mit Hilfe einer Injektion von Tensiden in das Grundwasser werden die Grenzflächenspannungen zwischen Schadstoff und Bodenmatrix und damit die kapillare Adhäsion erheblich verringert. Hierdurch können im Falle von LNAPL im Grundwasser in disperser Produktphase vorliegende Schadstoffe (Schadstoffquellen) wieder fließfähig werden (Mobilisierung) und hydraulisch gefördert werden. Bei höheren Tensidkonzentrationen (0,5 – 2 % je nach Tensid) wird die (scheinbare) Löslichkeit der Schadstoffe um mehrere Zehnerpotenzen erhöht (Solubilisierung). Dabei werden hydrophobe Schadstoffe in Mizellen eingeschlossen. Der Schadstoff wird dadurch im Wasser aufgenommen (gelöst) und kann als mizellare Lösung direkt mit dem Grundwasser abgepumpt werden. Das Einbringen der Tensidlösung erfolgt i. d. R. über Injektionsbrunnen. Im Abstrom wird die Schadstoffphase bzw. das Schadstoff-Tensid-Wassergemisches über Extraktionsbrunnen gefördert. Das geförderte Grundwasser wird on-site speziell aufbereitet und die Phasen getrennt.</p> <p>Zur Kontrolle des Systems und um eine unkontrollierte Schadstoffverlagerung (insbesondere in die Tiefe) zu vermeiden sind vertikale und/oder horizontale Regelspülkreisläufe zu etablieren.</p> <p>In Vorversuchen ist die Auswahl und Eignung der Tenside für die zu entfernenden Schadstoffe sowie die Wirkkonzentration des Tensides zu ermitteln.</p> <p>Eine Steuerung der Maßnahme erfolgt über ein begleitendes Grundwassermonitoring.</p> <p>Technikumsversuche in verschiedenen Skalen liegen vor. Bisher – zumindest in Deutschland – wenige technische Anwendungen.</p>	Organische Schadstoffe wie z. B. MKW, LCKW in Phase/als Residualsättigung vorliegend	GZ	Q	Ja, in Erprobung
Thermisch unterstützte Boden-Luft-Absaugung (mittels Dampf-(Luft-) Injektion) – TUBA	<p>Bei der thermisch unterstützten Boden-Luft-Absaugung erfolgt eine Erwärmung der ungesättigten Bodenzone mit dem Ziel, die vorhandenen Schadstoffe in die Gasphase zu überführen und das Gasgemisch über eine Bodenluftabsaugung aus dem Untergrund zu entfernen. Die Erwärmung des Untergrundes bis auf die Gemischsiedetemperatur erfolgt beim TUBA-Verfahren über die Injektion von Dampf (für organische Schadstoffe mit Dichten < 1 kg/L) oder eines Dampf-(Luft-)Gemisches (für organische Schadstoffe mit Dichten > 1 kg/L). Sanierbar sind leicht- und schwerflüchtige Schadstoffe wie LCKW, BTEX und kurzkettige MKW-Komponenten. Die abgesaugte, schadstoffbelastete Bodenluft wird einer Abluftreinigung zugeführt. Gängige Abluftreinigungssysteme sind beispielsweise Luftaktivkohlefilter oder eine katalytische Oxidation.</p> <p>Das TUBA-Verfahren ist für gut durchlässige Horizonte (schluffiger Sand/sandiger Schluff bis Kies) geeignet. In Abhängigkeit der Standorteigenschaften können Verfahrenskombinationen aus dem TUBA und THERIS-Verfahren (s. u.) eingesetzt werden.</p> <p>Die thermisch unterstützte Boden-Luft-Absaugung besteht aus einem Dampferzeuger und einem Kompressor zur Erzeugung und Injektion des Dampf-Luft-Gemisches und einer Bodenluftabsaugung, die einen Wärmetauscher mit Kondensatabscheider und einen Verdichter umfasst.</p> <p>Die Steuerung und Kontrolle der Sanierung erfolgt über ein entsprechend auszugestaltetes Bodenluftmessstellennetz und -monitoring (insb. Temperatur- und Schadstoffaustragsmessungen).</p> <p>Bei Sanierungen unmittelbar oberhalb des Grundwasserspiegels ist das Erfordernis eines gleichzeitigen Betriebes einer Grundwasser-sicherung zu prüfen. Der Abstand der Injektions- und Absaugpegel ist projektspezifisch zu ermitteln.</p>	leicht- und schwerflüchtige organische Schadstoffe	UZ	Q	ja
Thermische In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen – THERIS	<p>Bei thermischen Verfahren erfolgt eine Erwärmung des Untergrundes mit dem Ziel, die vorhandenen Schadstoffe in die Gasphase zu überführen und das Gasgemisch über eine Bodenluftabsaugung aus dem Untergrund zu entfernen. Die Erwärmung des Untergrundes erfolgt beim THERIS-Verfahren über einen konduktiven Wärmeeintrag durch feste Wärmequellen in Form von elektrisch betriebenen Heizlanzen.</p> <p>Das THERIS-Verfahren ist für gering durchlässige Bereiche (Schluffe bis Tone) geeignet. Einschränkend ist die Möglichkeit eines effizienten Betriebes einer Bodenluftabsaugung zu prüfen.</p> <p>Sanierbar sind leicht- und schwerflüchtige Schadstoffe wie LCKW, BTEX und kurzkettige MKW-Komponenten. Die abgesaugte, schadstoffbelastete Bodenluft wird einer Abluftreinigung zugeführt. Gängige Abluftreinigungssysteme sind beispielsweise Luftaktivkohlefilter oder eine katalytische Oxidation.</p> <p>Die Steuerung und Kontrolle der Sanierung erfolgt über ein entsprechend auszugestaltetes Bodenluftmessstellennetz und -monitoring (insb. Temperatur- und Schadstoffaustragsmessungen). Der Abstand der Heizelemente und Absaugpegel ist projektspezifisch zu ermitteln.</p>	leicht- und schwerflüchtige organische Schadstoffe	UG (GZ bei geringen Durchlässigkeiten unter bestimmten Bedingungen möglich)	Q	ja

Verfahren	Verfahrensbeschreibung	Eignung für folgende Schadstoffe	Wirkungsbereich Ungesättigte Zone (UZ), Gesättigte Zone (GZ)	Wirkungsort (Quelle = Q Fahne = F,)	Stand der Technik (ja/nein)
Vertikale Sicherung	Der Schadensherd wird mittels einer Dichtwand oder Spundwand umschlossen. Aus der Einkapselung wird Grundwasser zur Erzeugung eines nach innen gerichteten hydraulischen Gradienten entnommen und entsprechend abgereinigt. Die einzukapselnde Fläche wird i. d. R. aus Gründen der Wirtschaftlichkeit mit einer Oberflächenabdichtung versehen. Der Schadstoff verbleibt im Untergrund. Es ist mit Nutzungseinschränkungen zu rechnen.	Alle, ausgenommen leichtflüchtige Schadstoffe	GZ	Q	ja
Verschmelzung von Schadstoffen (STAR)	Beim STAR-Verfahren werden brennbare Substanzen im Untergrund gezielt verschwelt. Die organischen Schadstoffe werden im Untergrund über eine in speziell ausgestalteten Lanzen vorhandene Zündquelle entzündet. Nach der Zündung erhält sich der Prozess von selbst (STAR = Self-sustaining Treatment for Active Remediation). Die Steuerung des Schwelvorgangs erfolgt durch gezielte Sauerstoffdosierung über einen in Stahl ausgebauten Air-Sparging-Pegel. Um die Verbrennungsfreund in ihrer Ausdehnung zu begrenzen, können Stickstoff oder große Mengen an Wasser am Rand des zu verschwelenden Bereiches in lokalisierte Brunnen eingegeben werden. Alternativ kann die Schwelfront durch Dichtwände begrenzt werden. Die Verschmelzung schreitet voran, solange brennbares Material und Sauerstoff vorhanden sind. Der Gefahr der Bildung von Schrumpfungsrissen (insbesondere in ggf. vorhandenen bindigen Grundwasserstauern) durch hohe Verbrennungs- und Schweltemperaturen (ca. 400 – 600 °C) mit der Gefahr der Schadstoffverlagerung in die Tiefe ist im Zuge der Planung Rechnung zu tragen. Die Steuerung und Überwachung der Maßnahme erfolgt über ein entsprechendes Monitoring der Temperatur und der Verbrennungsprodukte (CO, CO ₂). Das Verfahren befindet sich in der Erprobung. Bisher beschriebene Anwendungen im Pilotmaßstab erfolgten in Nordamerika.	Organische Leicht- oder Schwerphasen	UG, GZ	Q	nein, in Erprobung

12 Anlage II

Tabelle 12.1: Matrix Beweisniveau/Handlungsbedarf mit Kriterium

Handlungsbedarf	Kriterium	Beweisniveaus																								Kürzel						
		BN 1						BN 2						BN 3						BN 4							BN 5					
		GW	OG	M	P	G	S	GW	OG	M	P	G	S	GW	OG	M	P	G	S	GW	OG	M	P	G	S		GW	OG	M	P	G	S
A	ohne	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	A
A nach Kontrolle	ohne													x						x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	A n K
A nach Sanierung	ohne																									x	x	x	x	x	x	A n S
B	Anhaltspunkte; derzeit keine Exposition	x	x	x	x	x	x																									B Aex
B	Entsorgungsrelevanz	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	B Ent
B	Neubewertung bei Nutzungsänderung							x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	B Neu
B	Neubewertung bei Änderung der Exposition							x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	B Nex
B	Empfehlung zu Nutzungsbeschränkungen													x	x											x	x					B EN
B	Empfehlung zu Bewirtschaftungsauflagen													x	x											x	x					B EB
B	Gefahrenlage hinnehmbar																			x						x						B Gh
B nach Kontrolle	Entsorgungsrelevanz													x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							B Ent
B nach Kontrolle	Neubewertung bei Nutzungsänderung													x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							B Neu
B nach Kontrolle	Neubewertung bei Änderung der Exposition													x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							B Nex
B nach Kontrolle	Empfehlung zu Nutzungsbeschränkungen													x	x											x	x					B EN
B nach Kontrolle	Empfehlung zu Bewirtschaftungsauflagen													x	x											x	x					B EB
B nach Kontrolle	Gefahrenlage hinnehmbar																			x						x						B Gh
B nach Sanierung	Entsorgungsrelevanz																									x	x	x	x	x	x	B Ent
B nach Sanierung	Neubewertung bei Nutzungsänderung																									x	x	x	x	x	x	B Neu
B nach Sanierung	Neubewertung bei Änderung der Exposition																									x	x	x	x	x	x	B Nex
B nach Sanierung	Empfehlung zu Nutzungsbeschränkungen																												x		x	B EN
B nach Sanierung	Empfehlung zu Bewirtschaftungsauflagen																												x		x	B EB
B nach Sanierung	Gefahrenlage hinnehm																									x						B Gh
K	Gefahrenlage derzeit hinnehmbar													x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	K Gdh
K	Überwachung des hinzunehmenden Schadens																			x						x						K Schaden

■ = kein Verdacht ■ = Verdacht ■ = Altlast
 GW = Wirkungspfad Boden – Grundwasser M = Wirkungspfad Boden – Mensch P = Wirkungspfad Boden – Pflanze
 OG = Wirkungspfad Boden – Oberflächengewässer G = Gefahren durch Deponiegas S = Sonstige Gefahren

46 | Sanierungsuntersuchungen von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen © LUBW



13 Abbildungen und Tabellen

13.1 Abbildungen

Abbildung 2.1: Stufenweise Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg [LUBW 2020]	10
Abbildung 2.2: Schema zu Emission und Immission (Abb. verändert aus „Leitfaden KORA-Themenverbund 4 „Deponien, Altablagerungen“, Teil B 3.3.2 Feststellung von Schäden und Gefahren, 2008“)	12
Abbildung 2.3: Darstellung der Bewertungsgrundsätze bei der Gefahrenabwehr zum Schutz des Grundwassers	16
Abbildung 2.4: Darstellung der Bewertungsgrundsätze zur Störungsbeseitigung bei Schadstofffahnen	17
Abbildung 3.1: Ablaufdiagramm zur systematischen Vorgehensweise bei Sanierungsuntersuchungen	20
Abbildung 4.1: Bausteine des konzeptionellen Standortmodells [Quelle: LUBW 2008]	21

13.2 Tabellen

Tabelle 5.1: Übersichtstabelle Dekontaminationsverfahren für die gesättigte und ungesättigte Zone	25
Tabelle 5.2: Übersichtstabelle Sicherungsverfahren für die gesättigte und ungesättigte Zone	26
Tabelle 11.1: Matrix Sanierungsverfahren (Verfahrensbeschreibungen, Stand der Technik, Wirkungsbereich, schadstoffspezifische Eignung)	34
Tabelle 12.1: Matrix Beweinsniveau/Handlungsbedarf mit Kriterium	44

14 Literatur und weitere Verweise

- Altlastenforum Baden-Württemberg e. V. (2020):
HELD, T., BOHNERT, B., DÖRR, H., FINKEL, M., HEKEL, U., HIESL, E., KOSCHITZKY, H.-P., LEVEN, C. D`AFFONSECA, F., MOHRLOCK, U., PTAK, T., REHNER, G., SALOWSKY, H. WEISSER, A.: Sanierungsvorbereitende Untersuchungen zur Ermittlung der Schadstoffsituation in Poren-Grundwasserleitern Schriftenreihe altlastenforum Baden-Württemberg, Heft 19, ISBN 978-3-510-39019-9.
- BAFU (2016):
BURMEIER, H., POGGENDORF, C., BETTINGER E. (2016): In-situ-Sanierung – Ein Modul der Vollzugshilfe „Sanierung von Altlasten“, Hrsg: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Schweizerische Eidgenossenschaft.
- BBodSchG (1998):
Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz) vom 17. März 1998 (BGBl. I Nr. 16 S. 502), zuletzt geändert durch Artikel 7 des Gesetzes vom 25. Februar 2021 (BGBl. I S. 306).
- BBodSchV (1999):
Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I Nr. 36 S. 1554), zuletzt geändert durch Artikel 126 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328).
- BBodSchV (2021):
Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I Teil Nr. 43 S. 2598 und insbes. ab S. 2716).
- BodSchASUVO (2011):
Verordnung des Umweltministeriums Baden-Württemberg über Sachverständige und Untersuchungsstellen für Bodenschutz und Altlasten (BodSchASUVO) vom 13. April 2011, (GBl. Nr. 7 vom 26.04.2011 S. 169; 25.01.2012 S. 65).
- DIN 276:2018-12: Kosten im Bauwesen, Hrsg: Deutsches Institut für Normung e. V.
- ErsatzbaustoffV (2021):
Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung vom 09.07.2021, (BGbl. Nr. 43 vom 16.07.2021, S. 2598).
- FRAUENSTEIN, J., MAHRLE, S. (2020):
Stationäre Bodenbehandlungsanlagen in Deutschland – Bedarfsbelegung versus Anlagensterben?; altlasten spektrum, 5/2020.
- GrwV (2010):
Grundwasserverordnung (GrwV) vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1513), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 4. Mai 2017 (BGBl. I S. 1044) geändert worden ist.
- HELD, T. (2014):
In-situ-Verfahren zur Boden- und Grundwassersanierung, Wiley-VCH, 1. Auflage 2014, ISBN 978-3-527-33389-9.
- HIPP, L., RECH, B., TURIAN, G. (2000):
Das Bundes-Bodenschutzgesetz mit Bodenschutz- und Altlastenverordnung: Leitfaden; Verlag Jehle Rehm, München, ISBN 3-8073-1427-X.
- ITVA (2018):
Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e. V. (2018): WEINDL J., ALTENBOCKUM, M., DANNWOLF, U., KOSCHITZKY, H.-P., SCHELLE, K., ZEISBERGER, V.: ITVA-Arbeitshilfe H1-16, Verhältnismäßigkeit bei der Sanierungsuntersuchung.
- ITVA (2010):
Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e. V. (2010): ALTENBOCKUM, M., BIRKE, V., BLUM, P., CORNELSEN, M., FEIGE-MUNZIG, A., GIER, S. HINTZEN, U., HOFFMANN, E.-W., JACOBS, P., KOSCHITZKY, H.-P., MELZER, R., NERGER, M., SCHROERS, S. WEINDL, J., WILLERSHAUSEN H.: Arbeitshilfe H1-13, Innovative In-situ-Sanierungsverfahren.
- KommissionsVO (2010):
Verordnung des Umweltministeriums über Bewertungskommissionen für Bodenschutz und Altlasten (KommissionsVO) vom 19.07.2010.
- KORA (2008):
LUCKNER, T. (2008): Teil B3 Einzelfallbearbeitung/Empfehlungen zur systematischen Vorgehensweise in: Leitfaden des KORA-Themenverbund 4 „Deponien und Altlagerungen“. Hrsg: Dresdner Grundwasserforschungszentrum e. V.
- LABO/LAWA (2006):
Grundsätze des nachsorgenden Grundwasserschutzes bei punktuellen Schadstoffquellen, Homepage der LABO.
- LABO (2015):
Länderarbeitsgemeinschaft Boden: Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung, Homepage der LABO.
- LABO (2016):
Länderarbeitsgemeinschaft Boden: Verhältnis von Bodenschutzrecht und Wasserrecht, Stand 22.07.2016, Homepage der LABO.
- LABO (2017):
Länderarbeitsgemeinschaft Boden: Leistungsbuch Altlasten und Flächenentwicklung, Homepage der LABO.
- LBodSchAG (2004):
Gesetz zur Ausführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes (Landes-Bodenschutz- und Altlastengesetz – LBodSchAG) vom 14.12.2004 (GBl. Nr. 17 vom 28.12.2004 S. 908), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 17. Dezember 2020 (GBl. S. 1233, 1247).
- Landtag von Baden-Württemberg (1988):
Stufenplan zur Altlastensanierung mit der Konzeption zur Behandlung von altlastverdächtigen Flächen und Altlasten in Baden-Württemberg (Stufenplan) vom September 1988, Drucksache 10/831 vom 29.11.1988.
- LANUV (abgerufen 2021):
Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Zusammenstellung verschiedener Sanierungstechniken, Homepage des LANUV.
- LAWA (2012):
Länderarbeitsgemeinschaft Wasser: Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien). Hrsg. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- LAWA (2017):
Länderarbeitsgemeinschaft Wasser: Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser – Aktualisierte und überarbeitete Fassung von 2016. Homepage der LAW A.

- LfU BW (1994):
Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1994): Eingehende Erkundung für Sanierungsmaßnahmen/Sanierungsvorplanung (E3-4), LUBW-Homepage Publikationen.
- LfU BW (1997):
Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1997): Statusbericht Altlasten – 10 Jahre Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg, Materialien zur Altlastenbearbeitung, Bd. 27, LUBW-Homepage Publikationen.
- LfU BW (1998):
Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1998):
Verwaltungsvorschrift über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen mit ausführlichen Hinweisen zur Anwendung, LUBW-Homepage Publikationen.
- LfULG (2007):
Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Referat Grundwasser und Altlasten (2007): Materialien zur Altlastenbehandlung
Entscheidungshilfe Grundwassersanierung: Effizienz von Pump and Treat-Sanierungen.
- LfULG (2007):
Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Referat Grundwasser und Altlasten (2007): Materialien zur Altlastenbehandlung In situ – Sanierungsverfahren.
- LfULG (2020):
Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Freistaat Sachsen (2020): Handbuch zur Altlastenbearbeitung Teil 8 – Sanierungsuntersuchung.
- LUBW (2008):
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2008): Untersuchungsstrategie Grundwasser – Leitfaden zur Untersuchung bei belasteten Standorten (Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Bd. 42), LUBW-Homepage Publikationen.
- LUBW (2016):
Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2016): Altlastenbewertung – Priorisierungs- und Bewertungsverfahren Baden-Württemberg, Karlsruhe, LUBW-Homepage Publikationen.
- LUBW (2021):
Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2021): Altlastenstatistik 2020 – Zahlen und Fakten zum Stand der Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg. LUBW-Homepage Publikationen.
- OGewV (2016):
Oberflächengewässerverordnung vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373), die zuletzt durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873) geändert worden ist.
- ÖVA (2010):
Österreichischer Verein für Altlastenmanagement (2010): DÖRRIE, T., LÄNGERT-MÜHLEGGGER, H. (2010): Technologiequicksan In-situ-Sanierungstechnologien.
- TrinkwV (2001):
Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV) vom 21.05.2001, Neugefasst durch Bek. v. 10.3.2016, zuletzt geändert durch Art. 99 V v. 19.6.2020.
- REIERSLOH, D., REINHARD M. (2010):
Altlastenratgeber für die Praxis, Vulkan-Verlag, 1. Auflage 2010, ISBN 978-3-8027-2847-1.
- RUF, J. (1998):
Baden-Württemberg: Fortschreibung der Verwaltungsvorschrift über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen; altlasten spektrum, 1998, S 158 – 160.
- WHG (2009):
Wasserhaushaltsgesetz (Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts), Artikel 1 des Gesetzes vom 31.07.2009 (BGBl. I S. 2585), in Kraft getreten am 07.08.2009 bzw. 01.03.2010, zuletzt geändert durch Gesetz vom 02.06.2021 (BGBl. I S. 1295) m. W. v. 09.06.2021.
- ZEDDEL, A., QUADFLIEG, A., UTERMANN, J., WILHELM, F. (2016):
Grundsätze für die Anwendung der aktualisierten Geringfügigkeitsschwellen der LAWA von 2015 in der Altlastenbearbeitung, Altlasten Spektrum 2/2016, S. 56 – 63.

