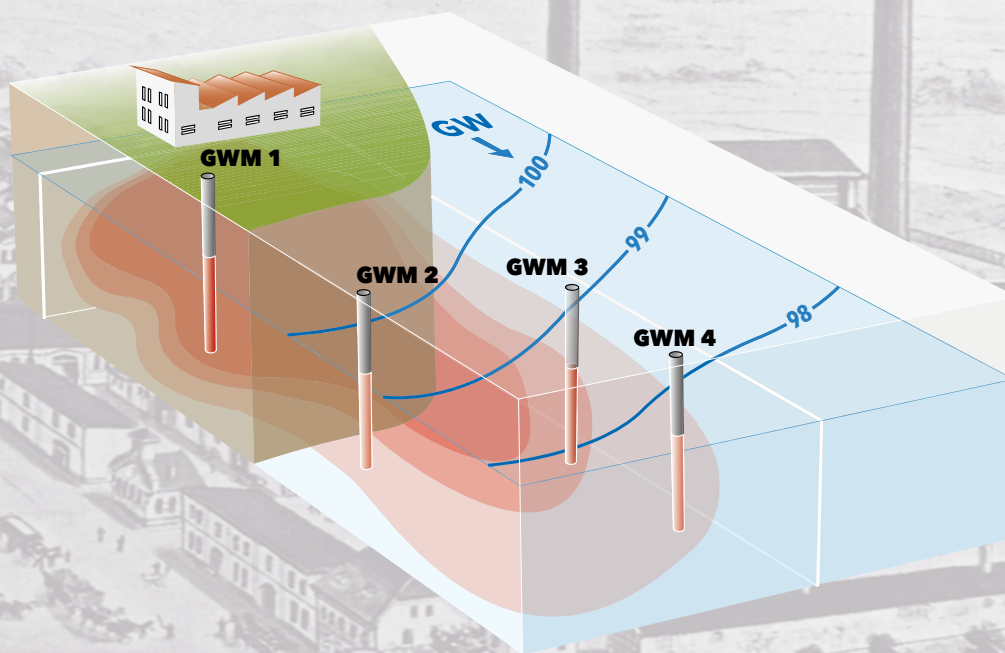


Handbuch Altlasten

Arbeitshilfe zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen

Band 3, Teil 7

4. aktualisierte Auflage



Handbuch Altlasten, Band 3, Teil 7

1. Auflage 2008
2. aktualisierte Auflage 2013
3. überarbeitete und ergänzte Auflage 2018
4. aktualisierte Auflage 2025

Arbeitshilfe zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen

Wiesbaden 2025

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Impressum

Handbuch Altlasten, Band 3, Teil 7
4. aktualisierte Auflage 2025

ISBN 978-3-89026-824-8

Arbeitshilfe zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen

Die Erarbeitung der Arbeitshilfe in der 1. Auflage wurde von einer Arbeitsgruppe begleitet, der folgende Mitglieder angehörten:

Wolfgang Bernhardt	Regierungspräsidium Darmstadt
Marie-Anne Feldmann	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Thomas Golla	Kreisausschuss des Hochtaunuskreises
Werner Görisch	Regierungspräsidium Darmstadt
Fritjof Grimm	Regierungspräsidium Darmstadt
Jörg Hartmann	Regierungspräsidium Kassel
Dr. Klaus Haeckel	Regierungspräsidium Darmstadt
Dr. Dieter Kämmerer	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Berthold Meise	Regierungspräsidium Darmstadt
Tilman Oerter	Regierungspräsidium Gießen
Holger Strömmer	Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz
Michael Wolf	Regierungspräsidium Darmstadt
Volker Zeisberger	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Obmann)

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

Mauricio Breitstadt	Hess. Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
Udo Geißler	Regierungspräsidium Gießen
Dieter Hülpiusch	Regierungspräsidium Darmstadt
Christoph Kludt	Hess. Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Dirk Krebs	Regierungspräsidium Darmstadt
Dr. Jörg Martin	Hess. Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
Berthold Meise	Regierungspräsidium Darmstadt (Obmann)
Sonja Schuster	Regierungspräsidium Darmstadt
Reinhard Sudhoff	Regierungspräsidium Kassel
Holger Strömmer	Hess. Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
Kristoffer Wentz	Regierungspräsidium Darmstadt
Volker Zeisberger	Hess. Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Die Erarbeitung der Arbeitshilfe in der 4. Auflage wurde von einer Arbeitsgruppe begleitet, der folgende Mitglieder angehörten:

Heiko Grosch	Regierungspräsidium Darmstadt
Dirk Krebs	Regierungspräsidium Darmstadt
Marion Peine	Regierungspräsidium Darmstadt
Florian Schaller	Hess. Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Michael Wolf	Regierungspräsidium Darmstadt
Volker Zeisberger	Hess. Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (Obmann)

Hintergrundbild: Heddernheimer Kupferwerk und Süddeutsche Kabelwerke AG
Bildnachweis: Denkmalamt Stadt Frankfurt am Main
Grafik: Schadstofffahne im Grundwasser mit Parametern zur Einstufung der Grundwasser-
verunreinigung
Idee: Michael Wolf; Umsetzung: Grafikdesign Julia Beltz

Herausgeber, © und Vertrieb:

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Rheingaustraße 186, 65203 Wiesbaden

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

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

Inhalt

Vorwort	6
1 Einleitung	7
2 Rechtsgrundlagen der Grundwassersanierung	9
3 Schädliche Grundwasserverunreinigung	10
3.1 Allgemeines	10
3.2 Bewertungskriterien	13
3.2.1 Gelöste Menge im Grundwasser	13
3.2.2 Fracht im Grundwasser	17
3.2.3 Bewertungsmatrix	20
3.3 Weitere Kriterien	21
3.4 Prüfschema als Entscheidungshilfe für Grundwassersanierungen	25
3.5 Anwendungsbeispiel	27
4 Sanierung von schädlichen Grundwasserverunreinigungen	32
4.1 Vorgaben der GWS-VwV	32
4.2 Sanierungsziel und Verhältnismäßigkeit	34
4.2.1 Allgemeines	34
4.2.2 Sanierungsziel	35
4.2.3 Verhältnismäßigkeitsprüfung	37
4.2.4 Behördliche Entscheidung über Art und Umfang der notwendigen Maßnahme	38
4.3 Anpassung, Optimierung und Beendigung von Grundwassersanierungen	40
4.3.1 Grenzen der Kostenbetrachtung in Hessen zur Bewertung der Angemessenheit von Sanierungsmaßnahmen	40
4.3.2 Algorithmus „Eintritt in die erneute Prüfung der Verhältnismäßigkeit“	41
4.3.3 Prüfbericht Verhältnismäßigkeit bei laufenden Pump&Treat-Maßnahmen	43
4.3.4 Optimierung von Grundwassersanierungen	46
5 Fallbeispiel	47
Anhänge	
Anhang 1 Kriterien zur Beurteilung einer schädlichen Grundwasserverunreinigung	55
Anhang 2 Geringfügigkeitsschwellenwerte der GWS-VwV	57
Anhang 3 EXCEL-Auswertetool „Mengen und Frachten“	62
Anhang 4 Erläuterungen zum EXCEL-Auswertetool „Mengen und Frachten“	63
Anhang 5 Hinweise zur Anordnung von Stromröhren	65
Anhang 6 Grafische Auswertung von 35 Praxisfällen	69
Anhang 7 EXCEL-Auswertetool „Sanierungsverlauf“	70
Anhang 8 Erläuterungen zum EXCEL-Auswertetool „Sanierungsverlauf“	72
Anhang 9 Datenauswertung von 38 Pump&Treat-Grundwassersanierungen	80
Anhang 10 Stand der Technik bei der Grundwasserreinigung	82
Anhang 11 Einleitung von Hilfsstoffen in das Grundwasser bei In-situ-Sanierungen	83
Anhang 12 Ableitung von Grundwasser - Wiederversickerung, Einleitung in Abwasseranlagen und oberirdische Gewässer	84
Anhang 13 Positionierung der Sanierungsbrunnen und Pumpversuchsmessstellen	88
Anhang 14 Dimensionierung von Pumpversuchsmessstellen und Sanierungsbrunnen	92
Anhang 15 Hinweise zur Festlegung der Sanierungsbereiche	97
Anhang 16 Fallkonstellationen zu Sanierungsbereichen	98
Literatur	102

Vorwort zur 4. Auflage



Bodenverunreinigungen, wie sie für Altstandorte und Altablagerungen typisch sind, führen häufig auch zu einer Verunreinigung des Grundwassers. Einerseits genießt der Schutz des Grundwassers in Deutschland einen sehr hohen Stellenwert. Andererseits ist die Sanierung von verunreinigtem Grundwasser oftmals sehr aufwändig und mit hohen Kosten verbunden. Den Behörden stellen sich daher zwei wichtige Fragen: Liegt eine schädliche Grundwasserverunreinigung vor und muss das Grundwasser aus diesem Grund saniert werden?

Bei der Beurteilung von Grundwasserschäden lag das Augenmerk in der Vergangenheit vor allem auf den Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser. Weitere wichtige Aspekte wie die abströmende Schadstofffracht und die im Grundwasser und Boden vorhandene Schadstoffmenge wurden oft nicht berücksichtigt, da hierzu keine konkreten Regelungen vorlagen.

Mit der vorliegenden Arbeitshilfe wurde dann ein neuer Weg beschritten, bei dem Schadstoffmenge und -fracht bei der Beurteilung eines Grundwasserschadens im Vordergrund stehen. Autoren der Arbeitshilfe waren das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, die Bodenschutzbehörden sowie das Hessische Landwirtschafts- und Umweltministerium. Seit der Erstauflage im Jahr 2008 hat sich die Arbeitshilfe vielfach bewährt, sie findet bei Ingenieurbüros und Behörden hohe Akzeptanz und Anwendung.

In der dritten Auflage von 2018 wurden einige Themen umfangreicher dargestellt und präzisiert: Wie können Sanierungsziele abgeleitet werden? Wie kann die Verhältnismäßigkeit einer Maßnahme ermittelt und dokumentiert werden? Unter welchen Voraussetzungen können langlaufende Grundwassersanierungen beendet werden? Hierzu nennt die Arbeitshilfe Kriterien und stellt Werkzeuge zur Verfügung.

Im Jahr 2025, also nach weiteren sieben Jahren Vollzugserfahrung, gilt: Die Konzeption der Arbeitshilfe ist nach wie vor gut geeignet, um bei Entscheidungen über Grundwassersanierungen vollzugstaugliche Hilfestellungen zu geben. Für die nun vorliegende 4. Auflage bestand deshalb kein grundlegender fachlicher Überarbeitungsbedarf, jedoch wurden Anpassungen hinsichtlich der aktualisierten Geringfügigkeitsschwellenwerte und der Kosten langlaufender Sanierungen vorgenommen.

Damit deckt die Arbeitshilfe die wichtigsten Fragestellungen bei Entscheidungen über Grundwassersanierungen ab, nämlich „ob“, „wie“ und „wie lange“ zu sanieren ist.

Auch für die 4. Auflage wurde der bewährte Weg fortgesetzt, eine Arbeitsgruppe aus Vertreterinnen und Vertretern der Bodenschutzbehörden und des HLNUG mit der Bearbeitung zu betrauen. Die Überarbeitung erfolgte in enger Abstimmung mit dem Hessischen Landwirtschafts- und Umweltministerium. Für die engagierte und kompetente Mitarbeit bei der Erstellung der 4. Auflage danke ich allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe.



Prof. Dr. Thomas Schmid
Präsident des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie

1 Einleitung

Grundwasserschutz	Ziel des Grundwasserschutzes ist die Reinhaltung des Grundwassers. Das Grundwasser ist als Bestandteil des Naturhaushalts und als Lebensraum für Tiere und Pflanzen zu sichern (§ 1 WHG). Nach einer Entscheidung des Bundesverfassungsgerichts hat das Grundwasser eine kaum zu überschätzende Bedeutung für die öffentliche Wasserversorgung, es ist als knappes Gut für die Allgemeinheit von lebenswichtiger Bedeutung. Auch die Europäische Wasserrahmenrichtlinie misst dem Schutz des Grundwassers Priorität bei. Grundwasser ist somit ein wichtiges Schutzgut.
Geltungsbereich der GWS-VwV	Wenn durch den unsachgemäßen Umgang mit wassergefährdenden Stoffen eine Grundwasserverunreinigung eingetreten ist, gelten für die Entscheidung über eine Grundwassersanierung die Vorgaben der Verwaltungsvorschrift zur Erfassung, Bewertung und Sanierung von Grundwasserverunreinigungen (GWS-VwV) [1].
Ziel der Arbeitshilfe	Ziel der vorliegenden Arbeitshilfe ist die Erläuterung und fachliche Konkretisierung der in der GWS-VwV genannten Ausführungen zu schädlichen Grundwasserverunreinigungen und Sanierungen bei Altlasten, schädlichen Bodenveränderungen und Grundwasserschadensfällen.
Inhalt	<p>Ein Schwerpunkt der Arbeitshilfe liegt bei den Fragestellungen, ob eine schädliche Grundwasserverunreinigung vorliegt und ob diese klein, mittel oder groß ist. Hierzu werden die folgenden Themen behandelt:</p> <ul style="list-style-type: none">• Gelöste Menge im Grundwasser• Fracht im Grundwasser• Bewertungsmatrix und Handlungsbedarf <p>In einem weiteren Schwerpunkt der Arbeitshilfe wird die Frage behandelt, wie eine schädliche Grundwasserverunreinigung zu sanieren ist. Dabei spielen die Festlegung des Sanierungsziels und die Verhältnismäßigkeit einer Sanierungsmaßnahme eine entscheidende Rolle.</p> <p>Weiterhin werden in der Arbeitshilfe kurz behandelt:</p> <ul style="list-style-type: none">• Einleitung von Hilfsstoffen in das Grundwasser bei In-situ-Sanierungen• Ableitung von Grundwasser in Abwasseranlagen und oberirdische Gewässer• Positionierung und Dimensionierung von Pumpversuchsmessstellen und Sanierungsbrunnen
Sanierungsziel	Bereits bei der Festlegung des Sanierungsziels kann die Behörde ein weniger strenges Sanierungsziel festlegen, wenn eine vollständige Gefahrenabwehr aus Gründen der Verhältnismäßigkeit nicht in Frage kommt. Die Anpassung des Sanierungsziels richtet sich im Einzelfall nach dem Gefährdungspotenzial und damit beispielsweise auch nach den betroffenen Schutzgütern.
Optimierung	Bei langlaufenden Sanierungen ist zu prüfen, ob die Maßnahme optimiert werden kann. Auch ist regelmäßig zu prüfen, ob die Maßnahme noch verhältnismäßig ist. Hierzu gibt die Arbeitshilfe umfangreiche Hilfestellungen.
Bewertungskriterien	Die in der Arbeitshilfe beschriebenen Bewertungsmaßstäbe für die Schadstoffmenge und -fracht sowie für die Prüfung der Verhältnismäßigkeit wurden anhand von mehr als 30 hessischen Schadensfällen auf Plausibilität geprüft. Die in dieser Arbeitshilfe genannten Preise zur Ermittlung eines angemessenen Verhältnisses von Kosten und

Wirksamkeit beruhen auf der Auswertung einer relativ geringen Fallzahl und können somit lediglich orientierend verwendet werden. Die endgültige Entscheidung über den Handlungsbedarf bleibt stets eine Einzelfallentscheidung.

Adressaten des Handbuchs

Die Arbeitshilfe richtet sich an die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in Behörden und Ingenieurbüros, die bei der Sanierung von schädlichen Grundwasserverunreinigungen beteiligt sind. Sie wurde von einer Arbeitsgruppe mit Vertretern des Umweltministeriums, der Regierungspräsidien und unteren Wasserbehörden sowie des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) erarbeitet.

Hinweise zum Anwendungsbereich

Bei aktuellen Schadensfällen, insbesondere Unfällen mit wassergefährdenden Stoffen, ist die Arbeitshilfe nicht anwendbar. In diesen Fällen ist eine rasche Prüfung erforderlich, ob die Entstehung einer schädlichen Boden- oder Grundwasserverunreinigung zu befürchten ist. Falls ja, sind Sanierungsmaßnahmen (beispielsweise Bodenaushub) durchzuführen, bevor eine schädliche Grundwasserverunreinigung eingetreten ist.

Bei Kluftgrundwasserleitern und in Porengrundwasserleitern mit kleinräumig wechselnden Durchlässigkeiten ist die Anwendung der in der Arbeitshilfe beschriebenen Bewertungskriterien oft nicht möglich, da wichtige Informationen nicht oder nur unter hohem Aufwand ermittelbar sind. In diesen Fällen hat die Einzelfallbetrachtung ein noch höheres Gewicht. Dies gilt auch für Fälle, bei denen der Wirkungspfad Grundwasser-Bodenluft-Raumluft relevant ist.

Hinweise zu den Auflagen 1 bis 4

Die 1. Auflage dieses Handbuchs wurde nach dem Erlass der GWS-VwV vom 30. September 2005 von einer Arbeitsgruppe erarbeitet und erschien 2008. Dabei beschäftigte sich die Arbeitshilfe insbesondere mit der Frage, ob eine schädliche Grundwasserverunreinigung vorliegt und ob diese klein, mittel oder groß ist. Insofern lag der Schwerpunkt in der fachlichen Konkretisierung der Nummer 4 der GWS-VwV.

Mit der 2. Auflage aus dem Jahr 2013 wurden zum einen die Bezüge zum Wasserrecht (WHG, HWG, GWS-VwV) aktualisiert und zum anderen der Anhang 8 „Ableitung von Grundwasser – Wiederversickerung, Einleitung in Abwasseranlagen und oberirdische Gewässer“ neu gefasst. Die 3. Auflage ging zusätzlich der Frage nach, wie eine schädliche Grundwasserverunreinigung zu sanieren und wie eine Prüfung der Verhältnismäßigkeit durchzuführen ist und konkretisiert die Nummer 5 der GWS-VwV.

Mit der vorliegenden 4. Auflage erfolgt die Anpassung an die geänderten Geringfügigkeitsschwellenwerte der Verwaltungsvorschrift zur Erfassung, Bewertung und Sanierung von Grundwasserverunreinigungen (GWS-VwV) vom 18. Juli 2021 [1], weiterhin wurden die Kosten langlaufender Grundwassersanierungen (Anhang 9) aktualisiert und Neuregelungen bei der Indirekteinleitung (Anhang 12) berücksichtigt.

2 Rechtsgrundlagen der Grundwassersanierung

Regelwerke

Die Rechtsgrundlagen für die Sanierung des Grundwassers ergeben sich aus dem Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG), der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV), dem Hessischen Altlasten- und Bodenschutzgesetz (HAltBodSchG), dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG), dem Hessischen Wassergesetz (HWG) und der Verwaltungsvorschrift zur Erfassung, Bewertung und Sanierung von Grundwasserverunreinigungen (GWS-VwV) [1–6].

Wirkungspfad Boden–Grundwasser

Zwischen Belastungen des Bodens und des Grundwassers besteht ein enger Zusammenhang. Vor In-Kraft-Treten des BBodSchG war die Bodensanierung im Wirkungspfad Boden–Grundwasser Teil des wasserrechtlichen Verfahrens, soweit es nicht nach § 13 Abs. 1 des früheren Hessischen Altlastengesetzes zur Altlastensanierung zählte. Seit In-Kraft-Treten des BBodSchG ist die Sanierung des Grundwassers Teil des bodenschutzrechtlichen Verfahrens. Das BBodSchG erweitert die Sanierung auf die Wirkungspfade Boden–Mensch und Boden–Nutzpflanze, die keine Bedeutung für das Grundwasser haben.

Abgrenzung von Bodenschutz- und Wasserrecht

Das BBodSchG ist nur auf den Boden (einschließlich der Bodenluft und der Bodenlösung) anwendbar, nicht aber auf das Grundwasser (§ 2 Abs. 1 BBodSchG). Für die Sanierung des Grundwassers gelten deshalb die Anforderungen des Wasserrechts (§ 4 Abs. 4 BBodSchG), in Hessen das HWG und die GWS-VwV. Die Anwendbarkeit der BBodSchV endet am Ort der Beurteilung (§ 2 Nr. 16 BBodSchV).

Wenn die Belastung des Grundwassers auf eine Verunreinigung des Bodens zurückzuführen ist (Bodenpassage), ergibt sich die Verpflichtung zur Sanierung aber aus dem BBodSchG (§ 4 Abs. 3 Satz 1: „... sind verpflichtet, den Boden und Altlasten sowie durch schädliche Bodenveränderungen oder Altlasten verursachte Verunreinigungen von Gewässern so zu sanieren, dass ...“). Das Sanierungsverfahren mit der orientierenden Untersuchung und der Detailuntersuchung, die Sanierungsplanung, die Sanierungspflicht und die Nachsorge sind im BBodSchG und in der BBodSchV geregelt. Deshalb ergibt sich nach § 57 HWG die Sanierungspflicht für die Sanierung des Grundwassers nur soweit aus dem Wasserrecht, wie diese nicht bereits im Bodenschutzrecht geregelt ist.

wasserrechtliche Anforderungen

Der § 57 HWG und die GWS-VwV bestimmen die wasserrechtlichen Anforderungen an die Grundwassersanierung (Nr. 1 GWS-VwV). Mit der GWS-VwV hat das Wasserrecht sich an das System der Prüfwerte des BBodSchG angelehnt (§ 8 BBodSchG, § 15 BBodSchV mit Anlage 2). Nach Nr. 2 GWS-VwV ist bei einer Überschreitung der Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS-Werte) eine Prüfung im Einzelfall durchzuführen, ob eine schädliche Grundwasserverunreinigung vorliegt. Eine bloße Überschreitung der GFS-Werte ist danach, anders als im Papier „Grundsätze des nachsorgenden Grundwasserschutzes bei punktuellen Schadstoffquellen“ der LAWA/LABO [8], noch nicht als schädliche Grundwasserverunreinigung anzusehen. Kriterien für diese im Einzelfall vorzunehmende Prüfung sind in Nr. 4 GWS-VwV genannt und werden in Anhang 1 dieser Arbeitshilfe kurz erläutert.

Umweltschadens- gesetz

Soweit eine Schädigung der Gewässer im Sinne des Umweltschadensgesetzes [7] vorliegt, ist § 90 WHG zu beachten.

3 Schädliche Grundwasserverunreinigung

3.1 Allgemeines

Anwendungsbereich der GWS-VwV

Die Kriterien, ob eine schädliche Grundwasserverunreinigung vorliegt, ergeben sich aus Nr. 4 der GWS-VwV [1]. Die Kriterien der GWS-VwV sind in Anhang 1 aufgeführt und kurz erläutert. In der GWS-VwV und in dieser Arbeitshilfe werden durch menschliche Tätigkeiten verursachte (anthropogene) Grundwasserbelastungen betrachtet. Die GWS-VwV gilt nach Nr. 1 Abs. 2 nicht für rein geogene Belastungen sowie Belastungen aus diffusen Quellen; ob und inwieweit in solchen Fällen Maßnahmen zu treffen sind, ist im Einzelfall zu entscheiden.

schädliche GW-Verunreinigung

Falls im Grundwasser der Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS-Wert) eines Schadstoffes überschritten wird, liegt eine Grundwasserverunreinigung vor. Dann ist im Einzelfall zu prüfen, ob die Grundwasserverunreinigung „schädlich“ oder nur „gering“ ist. Bei Vorliegen einer schädlichen Grundwasserverunreinigung besteht vom Grundsatz her Sanierungsbedarf. Bei der Entscheidung über Sanierungsmaßnahmen ist der Verhältnismäßigkeitsgrundsatz zu beachten (GWS-VwV Nr. 5 Abs. 1 sowie Kap. 4.2).

Die Einzelfallprüfung, ob eine schädliche Grundwasserverunreinigung vorliegt, soll sich nicht auf die Betrachtung der Schadstoffkonzentration im Grundwasser beschränken. Auch eine deutliche Überschreitung eines GFS-Wertes muss nicht zwingend als schädliche Grundwasserverunreinigung bewertet werden, beispielsweise wenn die Überschreitung nur in einem kleinen Volumen des Grundwassers auftritt.

Bewertungskriterien

Um ein aussagekräftiges Schadensbild zu erhalten, sind zwei Bewertungskriterien von besonderer Bedeutung:

- Gelöste Menge von Schadstoffen im Grundwasser (Kap. 3.2.1)
- Schadstofffracht im Grundwasser (Kap. 3.2.2).

Poren- und Kluftgrundwasserleiter

Bei Kluftgrundwasserleitern ist die Ermittlung der beiden Bewertungskriterien i. d. R. wesentlich schwieriger als bei Porengrundwasserleitern. Daher ist bei Kluftgrundwasserleitern die Vorgehensweise nach Kapitel 3 häufig nicht möglich. Die Beurteilung, ob eine schädliche Grundwasserverunreinigung vorliegt, muss bei Kluftgrundwasserleitern noch stärker auf einer Einzelfallbetrachtung beruhen.

Hinweise zur Anwendung der Bewertungskriterien

Metabolite

Die Bewertungskriterien „Gelöste Menge im Grundwasser“ und „Fracht im Grundwasser“ sind für jeden Stoff bzw. jede Stoffgruppe getrennt zu ermitteln. Dies gilt auch für Metabolite, die sich infolge eines unvollständigen biologischen Abbaus in der Fahne anreichern, beispielsweise Vinylchlorid (VC) bei der unvollständigen reduktiven Dechlorierung von Tetrachlorethen (PER) oder Trichlorethen (TRI).

In beide Bewertungskriterien fließen stoffspezifische und hydrogeologische Kenngrößen ein (Abb. 1).

direkte Kenngrößen

- Kenngrößen, die direkt in ein Bewertungskriterium einfließen:
Um das Bewertungskriterium anwenden zu können, müssen diese Kenngrößen ermittelt werden. Sie sind in Abbildung 1 als Kästchen mit durchgezogenem Rand dargestellt.

Beispiel: Für die Bewertung, ob die „Gelöste Menge im Grundwasser“ groß, mittel, klein oder sehr klein ist, müssen die mittlere Konzentration eines Schadstoffes in der Schadstofffahne, die Fahngeometrie, der GFS-Wert eines Schadstoffes und die nutzbare Porosität des Grundwasserleiters bekannt sein.

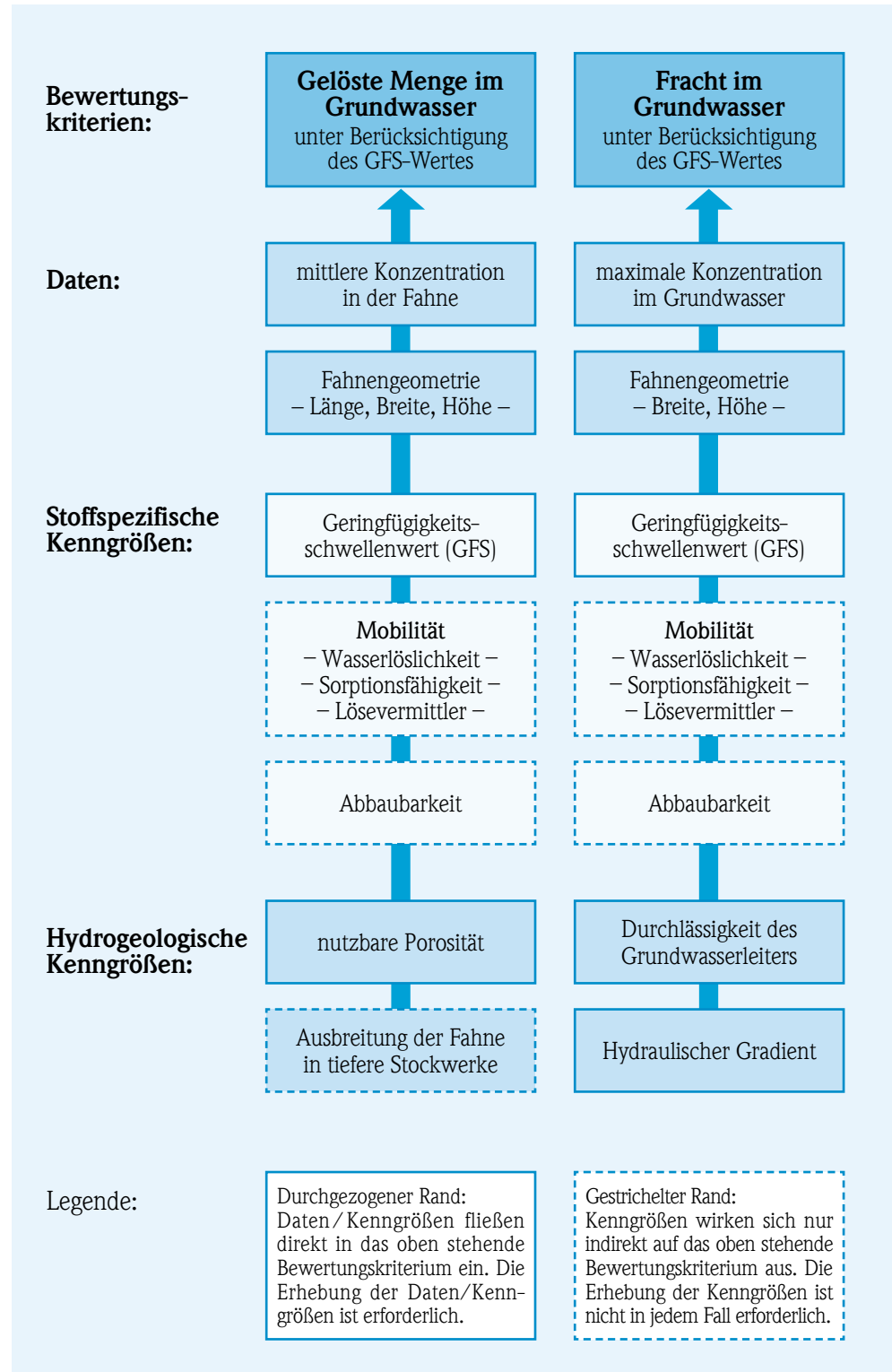


Abb. 1: Bewertungskriterien für die Fragestellung „Liegt eine schädliche Grundwasserverunreinigung vor?“ mit den dazugehörigen Daten und Kenngrößen.

indirekte Kenngrößen

- Kenngrößen, die nicht direkt in ein Bewertungskriterium einfließen, sondern über ihre Wirkung auf ein Bewertungskriterium berücksichtigt werden:
Diese Kenngrößen sind in Abbildung 1 als Kästchen mit gestricheltem Rand dargestellt. Erläuterungen zu diesen Kenngrößen gibt Kapitel 3.3. Die Erhebung dieser Kenngrößen ist für die Berechnung der „gelösten Menge“ und der „Fracht“ nicht erforderlich, sie sollte aber dennoch erfolgen, um ein abgerundetes Bild bei der Beurteilung einer Grundwasserverunreinigung zu erhalten.
Beispiel: Hat ein Schadstoff eine hohe Wasserlöslichkeit und eine geringe Neigung zur Sorption, ist zu erwarten, dass sowohl die „Gelöste Menge im Grundwasser“ als auch die „Fracht im Grundwasser“ vergleichsweise hoch sind.

Informationslücken

In der Regel müssen beide Bewertungskriterien (gelöste Menge, Fracht) bekannt sein, um die Entscheidung über den Sanierungsbedarf treffen zu können. Ansonsten sind weitere Untersuchungen erforderlich, um Informationslücken schließen zu können. Ist beispielsweise die Länge der Schadstofffahne nicht bekannt und nicht ausreichend abschätzbar, ist die Anwendung des Kriteriums „Gelöste Menge im Grundwasser“ nicht möglich. Dann sind Untersuchungen zur Ermittlung bzw. Abschätzung der Fahnenlänge durchzuführen¹.

erforderliche Daten und Kenngrößen

In Tabelle 1 sind alle Daten und Kenngrößen aufgeführt, die für die Ermittlung der beiden Bewertungskriterien benötigt werden. Nähere Erläuterungen geben die Kapitel 3.2.1 und 3.2.2.

Tab. 1: Daten/Kenngrößen zur Ermittlung der Bewertungskriterien „Gelöste Menge im Grundwasser“ und „Fracht im Grundwasser“

Daten/ Kenngrößen	Kürzel	Einheit	Erläuterung
mittlere Konzentration	c_{mittel}	$\mu\text{g/l}$	mittlere Konzentration eines Schadstoffes in der Fahne bzw. in einer Stromröhre
maximale Konzentration	c_{max}	$\mu\text{g/l}$	maximale Konzentration eines Schadstoffes in der Fahne bzw. in einer Stromröhre
Länge der Fahne/Stromröhre	L	m	erforderlich zur Berechnung des Fahnenvolumens
Breite der Fahne/Stromröhre	B	m	erforderlich zur Berechnung des Fahnenvolumens
Höhe der Fahne/Stromröhre	H	m	vertikale Ausdehnung, erforderlich zur Berechnung des Fahnenvolumens
Geringfügigkeitsschwelle	GFS	$\mu\text{g/l}$	GFS des Schadstoffes
nutzbare Porosität	P^*	%	nutzbare Porosität des Grundwasserleiters
Durchlässigkeitsbeiwert	k_f	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert im Bereich der Fahne bzw. Stromröhre
hydraulischer Gradient	I	–	hydraulischer Gradient (Grundwassergefälle) im Bereich der Fahne bzw. Stromröhre

¹ Bei Altlasten/Grundwasserschadensfällen, die in der Nähe eines oberirdischen Gewässers liegen, ist die Ermittlung und Anwendung des Bewertungskriteriums „Gelöste Menge im Grundwasser“ nicht sinnvoll, wenn die Schadstofffahne im Grundwasser durch das Gewässer „abgeschnitten“ wird.

EXCEL-Auswertetool

Für die Ermittlung und Einstufung der beiden Bewertungskriterien „Gelöste Menge im Grundwasser“ und „Fracht im Grundwasser“ steht ein EXCEL-Auswertetool zur Verfügung (Anhang 3). Dieses ist auf der Internetseite des HLNUG abrufbar:

<https://www.hlnug.de/themen/altlasten/arbeitshilfen/band-3-erkundung-von-altflaechen/teil-7> bzw. www.hlnug.de/?id=6448.

3.2 Bewertungskriterien**3.2.1 Gelöste Menge im Grundwasser****Ist-Zustand der Fahne**

Das Bewertungskriterium „Gelöste Menge im Grundwasser“ berücksichtigt das Volumen einer Schadstofffahne im Grundwasser und die mittlere Konzentration eines Schadstoffes innerhalb der Fahne. Es beschreibt somit den Ist-Zustand der Fahne. Das Bewertungskriterium kann dann angewendet werden, wenn die Fahne mittels Grundwassermessstellen ausreichend erkundet und abgegrenzt ist. Nur derjenige Anteil des Schadstoffes ist zu berücksichtigen, der im Grundwasser in gelöster Form vorliegt.

Stromröhren

Die Tabelle 2 zeigt die Daten und Kenngrößen, die für die Ermittlung und Bewertung des Kriteriums „Gelöste Menge im Grundwasser“ erforderlich sind. Bei einer ausreichenden Zahl von Messstellen ist die Unterteilung der Fahne in Stromröhren sinnvoll, die parallel zur Grundwasserfließrichtung angeordnet sind. Die Anordnung von Stromröhren ist in Anhang 5 anhand von Beispielen erläutert. Weitere Hinweise gibt [9]. Das EXCEL-Auswertetool „Mengen und Frachten“ in Anhang 3 bietet die Möglichkeit, bis zu drei Stromröhren zu bilden.

Tab. 2: Daten/Kenngrößen zur Ermittlung und Einstufung des Kriteriums „Gelöste Menge im Grundwasser ($M_{\text{gelöst}}$)“

Daten/ Kenngrößen	Kürzel	Einheit	Erläuterung
gelöste Menge im Grundwasser	$M_{\text{gelöst}}$	mg kg	Zielgröße in [mg] bzw. [kg] zu errechnen mittels Gleichung (1)
mittlere Konzentration	c_{mittel}	µg/l	mittlere Konzentration eines Schadstoffes in der Fahne bzw. in einer Stromröhre
Länge der Fahne/Stromröhre	L	m	erforderlich zur Berechnung des Fahnavolumens
Breite der Fahne/Stromröhre	B	m	erforderlich zur Berechnung des Fahnavolumens
Höhe der Fahne/Stromröhre	H	m	vertikale Ausdehnung, erforderlich zur Berechnung des Fahnavolumens
Geringfügigkeitsschwelle	GFS	µg/l	GFS des Schadstoffes
nutzbare Porosität	P^*	%	nutzbare Porosität des Grundwasserleiters

Berechnung der gelösten Menge

Die Berechnungsformel zur Bestimmung der gelösten Stoffmenge $M_{\text{gelöst}}$ in der Fahne bzw. in einer Stromröhre ist in Gleichung (1) dargestellt. Als Ergebnis erhält man die Stoffmenge in der Einheit [mg]. Nach Division durch 1 000 000 mg/kg ergibt sich die Stoffmenge in der praktikableren Einheit [kg]. Die Formelzeichen für die Gleichung sind in Tabelle 2 erläutert.

$$M_{\text{gelöst}} = c_{\text{mittel}} \cdot L \cdot B \cdot H \cdot P^* / 100 \quad \text{Gleichung (1)}$$

Herkunft und Qualität der Daten

Die Berechnung der gelösten Schadstoffmenge kann anhand des EXCEL-Auswertetools in Anhang 3 erfolgen. Dabei ist darauf zu achten, dass im Textfeld „Quelle der Daten“ Angaben zur Herkunft der Daten gemacht werden. Weiterhin soll im Textfeld „Gutachterliche Beurteilung des Sachverhaltes“ die Qualität der Eingangsdaten beurteilt und die Genauigkeit des Berechnungsergebnisses abgeschätzt werden. Auch Hinweise zur Homogenität des Grundwasserleiters können hier aufgenommen werden.

Beeinträchtigung tieferer GW-Stockwerke

Wenn Schadstoffe in tiefere Grundwasserstockwerke vorgedrungen sind und dort Schadstofffahnen ausbilden, ist dieser Sachverhalt gesondert zu betrachten. Hinweise zur Schadstoffverlagerung in tiefere Stockwerke gibt Kapitel 3.3.

Nachfolgend werden diejenigen Daten und Kenngrößen beschrieben, die einen direkten Einfluss auf das Kriterium „Gelöste Menge im Grundwasser“ haben.

Mittlere Konzentration eines Schadstoffes im Grundwasser

Erläuterungen zu Daten/Kenngrößen

Abzuschätzen ist die mittlere Konzentration c_{mittel} in der Fahne bzw. in einer Stromröhre. Die mittlere Konzentration fließt nach Gleichung (1) direkt in das Bewertungskriterium „Gelöste Menge im Grundwasser“ ein. Liegen in einer Fahne bzw. Stromröhre mehrere Messstellen vor, ist i. d. R. die Mittelwertbildung der Konzentrationen der einzelnen Messstellen sinnvoll (siehe Hinweise in Anhang 5).

Zur Ermittlung der Schadstoffkonzentration im Grundwasser sind geeignete Grundwassermessstellen, Probennahmetechniken und Analysenverfahren erforderlich. Der Parameterumfang bei einer Grundwasseruntersuchung muss so gewählt werden, dass die relevanten Schadstoffe erfasst werden. Hinweise für den Parameterumfang bei Boden- und Grundwasseruntersuchungen gibt das Handbuch Altlasten „Untersuchung von altlastverdächtigen Flächen und Schadensfällen“ [10], weiterhin sind Erkenntnisse aus der Historischen Erkundung und Erfahrungen aus vergleichbaren Schadensfällen heranzuziehen. Analysenverfahren sind in der GWS-VwV als Anlage 2.1 und 2.2 aufgeführt [1]. Gemäß der GWS-VwV Nr. 2 können auch gleichwertige Analysenverfahren eingesetzt werden. Hinweise hierzu gibt www.hlnug.de/?id=468.

Fahngeometrie

Die Fahngeometrie beschreibt das Volumen der Schadstofffahne; die Länge, Breite und Höhe der Fahne bzw. der Stromröhre fließen direkt in das Bewertungskriterium „Gelöste Menge im Grundwasser“ ein, siehe Gleichung (1). Hinweise zur Festlegung der Geometrie einer Fahne bzw. Stromröhre gibt Anhang 5.

Geringfügigkeitsschwellenwert

Das Gefährdungspotenzial eines Schadstoffes für den Menschen und das Ökosystem Grundwasser kann anhand des Geringfügigkeitsschwellenwertes (GFS-Wert) von 2016 (vgl. Anhang 2) beurteilt werden. Die GFS-Werte sind in Anlage 1 der GWS-VwV [1] sowie in Anhang 2 dieser Arbeitshilfe aufgeführt. Informationen zur Ableitung der GFS-Werte gibt eine Veröffentlichung der LAWA [15]. Je niedriger der GFS-Wert ist, desto höher ist das Gefährdungspotenzial eines Stoffes. Die GFS-Werte sind für die Einstufung relevant, ob die gelöst vorliegende Stoffmenge groß, mittel, klein oder

sehr klein ist, siehe Tabelle 4. Bei Stoffen, die in der GWS-VwV nicht aufgeführt sind, können die Umweltqualitätsnormen der Oberflächengewässerverordnung [30] oder vergleichbare Werte als GFS-Werte verwendet werden (GWS-VwV Nr. 2).

Die GWS-VwV führt die von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) im Jahr 2016 veröffentlichten Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS-Werte) in Hessen ein.

Nutzbare Porosität

Defintionen

Als Gesamtporosität (Hohlraumanteil) bezeichnet man den Quotienten aus dem Volumen aller Hohlräume eines Gesteinskörpers und dessen Gesamtvolumen. Die nutzbare Porosität (durchflusswirksamer Hohlraumanteil) beschreibt hingegen den Quotienten aus dem Volumen der vom Grundwasser durchfließbaren Hohlräume eines Gesteinskörpers und dessen Gesamtvolumen (DIN 4049, Teil 3) [27]. Damit Gesteinhohlräume vom Grundwasser durchflossen werden können, müssen sie miteinander in Verbindung stehen und zudem aufgrund ihrer Größe Grundwasserbewegungen erlauben. Bei sehr kleinen Hohlräumen, bzw. großen Kornoberflächen, wird der Grundwasserdurchfluss aufgrund hoher Adhäsionskräfte vermindert oder gar unterbunden. Daher ist die nutzbare Porosität immer kleiner als die Gesamtporosität eines Porengrundwasserleiters.

Abschätzung der Porosität

In der Tabelle 3 sind die Größenordnungen von Gesamtporosität und nutzbarer Porosität für verschiedene Korngrößenklassen dargestellt. Es handelt sich hierbei um das zusammenfassende Ergebnis einer Literaturrecherche. In der Natur sind nur aus einer homogenen Korngrößenfraktion bestehende Lockergesteine die Ausnahme, meist sind Korngrößengemische anzutreffen.

Zudem wird die Porosität auch von der Kornform und der Kornanordnung beeinflusst. Die Angaben der Tabelle können daher nur zur groben Orientierung, bzw. zur Plausibilitätsprüfung von Angaben zur Porosität genutzt werden. Einen praxisbezogenen Überblick bietet Abbildung 2, aus der Angaben zur nutzbaren Porosität für Korngemische aus Ton, Schluff und Sand abgelesen werden können.

Tab. 3: Gesamtporositäten und nutzbare Porositäten [%] in Abhängigkeit der Korngrößen von Sedimenten

	Korngrößen	Gesamtporosität	nutzbare Porosität
Ton	≤ 0,002 mm	> 50 %	< 5 %
Schluff	0,002 – 0,063 mm	50 – 45 %	5 – 15 %
Sand	0,063 – 2,0 mm	45 – 40 %	15 – 35 %
Kies	2,0 – 63,0 mm	40 – 30 %	35 – 20 %
Steine	> 63,0 mm	< 30 %	< 20 %

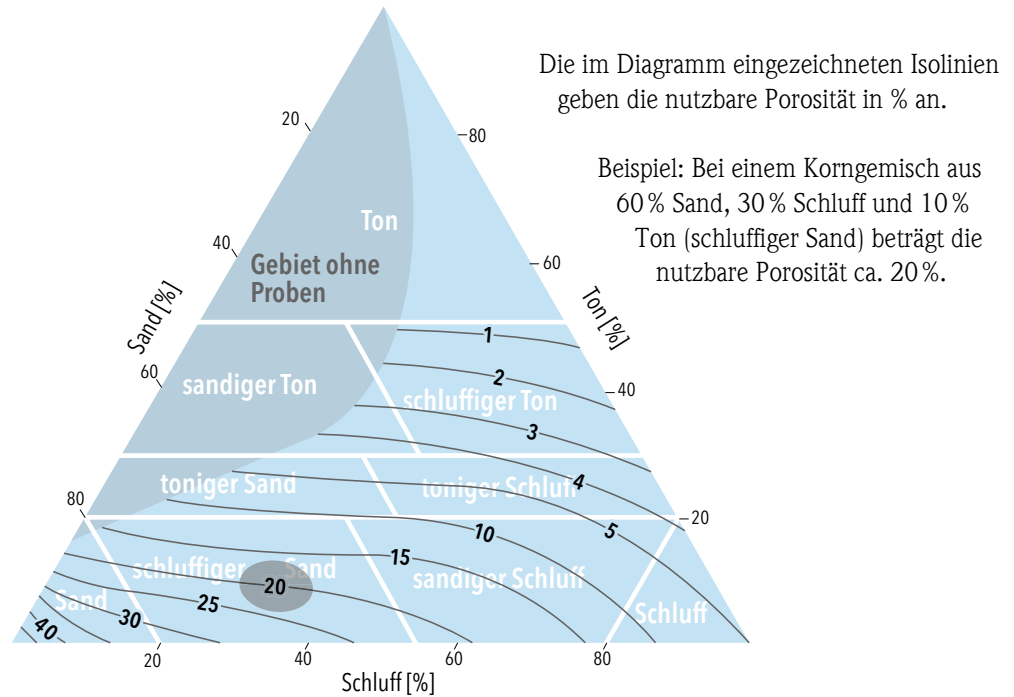


Abb. 2: Nutzbare Porosität [%] von Kornmischungen [28].

Einstufung der „Gelösten Menge im Grundwasser“

Berücksichtigung der GFS

Für die Einstufung der „Gelösten Menge im Grundwasser“ wird die im konkreten Schadensfall ermittelte gelöste Menge [kg] mit Kennzahlen verglichen. Die Kennzahlen für die Einstufung in groß, mittel, klein und sehr klein ergeben sich aus dem Zahlenwert des GFS-Wertes eines Schadstoffes und einem Faktor. Die Einstufungen sind in Tabelle 4 aufgeführt². Die Plausibilität der Einstufungen wurde anhand von 35 hessischen Praxisfällen überprüft.

Die „Gelöste Menge im Grundwasser“ kann als groß angesehen werden, wenn der Zahlenwert in der Einheit [kg] größer ist als der Zahlenwert des GFS-Wertes [$\mu\text{g/l}$] multipliziert mit dem Faktor 0,1. Die „Gelöste Menge im Grundwasser“ kann als sehr klein angesehen werden, wenn der Zahlenwert in der Einheit [kg] kleiner ist als der Zahlenwert des GFS-Wertes [$\mu\text{g/l}$] multipliziert mit 0,003.

Algorithmus	Einstufung
$M_{\text{gelöst}} \geq 0,1 \cdot \text{GFS}$	groß
$M_{\text{gelöst}} < 0,1 \cdot \text{GFS}$ und $\geq 0,03 \cdot \text{GFS}$	mittel
$M_{\text{gelöst}} < 0,03 \cdot \text{GFS}$ und $\geq 0,003 \cdot \text{GFS}$	klein
$M_{\text{gelöst}} < 0,003 \cdot \text{GFS}$	sehr klein

Tab. 4: Einstufung des Kriteriums „Gelöste Menge im Grundwasser“ ($M_{\text{gelöst}}$ [kg], GFS [$\mu\text{g/l}$])

² Die Multiplikation des GFS-Wertes mit einem Zahlenfaktor wurde anhand von 35 hessischen Praxisfällen hergeleitet und soll eine praktikable Einstufung ermöglichen.

Beispiele

Beispiel 1:

Der GFS-Wert von Benzol ist $1 \mu\text{g}/\text{l}$. Wenn die ermittelte „Gelöste Menge im Grundwasser“ größer als $0,1 * 1 = 0,1 \text{ [kg]}$ ist, erfolgt die Einstufung in **groß**. Bei Werten zwischen 0,1 und 0,03 kg erfolgt die Einstufung in **mittel**. Bei Werten zwischen 0,03 und 0,003 kg erfolgt die Einstufung in **klein**. Bei kleineren Werten als 0,003 kg ergibt sich die Einstufung sehr klein.

Beispiel 2:

Der GFS-Wert von leichtflüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen (LHKW) ist $20 \mu\text{g}/\text{l}$. Wenn die „Gelöste Menge im Grundwasser“ größer als $0,1 * 20 = 2 \text{ [kg]}$ ist, erfolgt die Einstufung in **groß**. Bei Werten zwischen 2 und 0,6 kg erfolgt die Einstufung in **mittel**. Bei Werten zwischen 0,6 und 0,06 kg erfolgt die Einstufung in klein. Bei kleineren Werten als 0,06 kg ergibt sich die Einstufung **sehr klein**.

Einstufung einer idealisierten Fahne

Die Einstufungen der „Gelösten Menge im Grundwasser“ in Tabelle 4 beruhen auf folgender Überlegung: Für die Unterscheidung, ob eine gelöste Menge groß oder mittel ist, wird eine idealisierte Fahne zugrunde gelegt. In dieser idealisierten Fahne beträgt die durchschnittliche Schadstoffkonzentration das 10fache des GFS-Wertes. Die Fahnengeometrie ist 100 m Länge, 40 m Breite und 10 m Höhe. Der Grundwasserleiter weist eine nutzbare Porosität von 25 % auf, dies ist ein typischer Wert für Grobsand. Die gelöste Schadstoffmenge in dieser idealisierten Fahne entspricht dann der Grenze zwischen groß und mittel.

3.2.2 Fracht im Grundwasser

Ausbreitung der Schadstoffe im GW

Als Fracht wird die im Grundwasser transportierte Schadstoffmasse pro Zeiteinheit bezeichnet. Die Fracht wird häufig in der Einheit Gramm pro Tag [g/d] angegeben. Das Bewertungskriterium „Fracht im Grundwasser“ beschreibt die Ausbreitung eines Schadstoffes mit dem fließenden Grundwasser. Das Bewertungskriterium kann dann angewendet werden, wenn geeignete Grundwassermessstellen vorhanden und die hydrogeologischen Standortgegebenheiten bekannt sind.

maximale Fracht

Die Schadstofffracht ist i. d. R. abhängig von der Entfernung zur Quelle. Am höchsten ist die Fracht innerhalb bzw. im nahen Abstrom der Schadstoffquelle. Im weiteren Abstrom nimmt die Schadstofffracht ab, da Abbau- und Rückhalteprozesse wirksam werden [9]. Für die in der Arbeitshilfe beschriebene Frachteinstufung soll die Fracht nach Möglichkeit im nahen Abstrom der Schadstoffquelle bestimmt werden, um die maximale Fracht ermitteln zu können.

Stromröhren

Die Tabelle 5 zeigt die erforderlichen Daten und Kenngrößen, die für die Ermittlung und Einstufung des Kriteriums „Fracht im Grundwasser“ erforderlich sind. Bei einer ausreichenden Zahl von Messstellen ist die Unterteilung der Fahne in Stromröhren sinnvoll, die parallel zur Grundwasserfließrichtung angeordnet sind. Die Anordnung von Stromröhren ist in Anhang 5 anhand von Beispielen erläutert. Weitere Hinweise gibt [9]. Das EXCEL-Auswertetool „Mengen und Frachten“ in Anhang 3 bietet die Möglichkeit, bis zu drei Stromröhren zu bearbeiten.

Tab. 5: Daten/Kenngrößen zur Ermittlung und Einstufung des Kriteriums „Fracht im Grundwasser (E)“

Daten/ Kenngrößen	Kürzel	Einheit	Erläuterung
Fracht im Grundwasser	E	mg/s g/s	Zielgröße in [mg/s] bzw. [g/s] zu errechnen mittels Gleichung (2)
maximale Konzentration	c_{\max}	$\mu\text{g/l}$	maximale Konzentration eines Schadstoffes in der Fahne bzw. in einer Stromröhre
Breite der Fahne/Stromröhre	B	m	Hinweise gibt Anhang 5
Höhe der Fahne/Stromröhre	H	m	vertikale Ausdehnung der Fahne/ Stromröhre
Geringfügigkeitsschwelle	GFS	$\mu\text{g/l}$	GFS des Schadstoffes
Durchlässigkeitsbeiwert	k_f	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert im Bereich der Fahne bzw. Stromröhre
hydraulischer Gradient	I	–	hydraulischer Gradient (Grundwassergefälle) im Bereich der Fahne bzw. Stromröhre

Berechnung der Fracht

Die Berechnung der Schadstofffracht erfolgt nach Gleichung (2). Die Formelzeichen sind in Tabelle 5 erläutert. Als Ergebnis erhält man die Fracht in der Einheit [mg/s]. Nach Multiplikation mit dem Faktor $86,4 \text{ (g*s)/(mg*d)}$ ergibt sich die Fracht in der praktikableren Einheit [g/d]. Eine Fracht von 1 mg/s entspricht einer Fracht von 86,4 g/d.

$$E = k_f \cdot I \cdot B \cdot H \cdot c_{\max} \quad \text{Gleichung (2)}$$

Herkunft und Qualität der Daten

Die Berechnung der Schadstofffracht kann anhand des EXCEL-Auswertetools in Anhang 3 erfolgen. Dabei ist darauf zu achten, dass im Textfeld „Quelle der Daten“ Angaben zur Herkunft der Daten gemacht werden. Weiterhin soll im Textfeld „Gutachterliche Beurteilung des Sachverhaltes“ die Qualität der Eingangsdaten beurteilt und die Genauigkeit des Berechnungsergebnisses abgeschätzt werden.

Erläuterungen zu Daten/Kenngrößen

Nachfolgend werden die Daten und Kenngrößen beschrieben, die einen direkten Einfluss auf das Kriterium „Fracht im Grundwasser“ haben.

Maximale Konzentration eines Schadstoffes im Grundwasser

Zur Ermittlung der Schadstofffracht, die aus der Quelle abströmt, wird die maximale Konzentration eines Schadstoffes in der Fahne bzw. in einer Stromröhre verwendet. Die maximale Konzentration eines Schadstoffes tritt i. d. R. an Messstellen auf, die dicht an der Schadstoffquelle positioniert sind (naher Abstrom). Hinweise hierzu gibt Anhang 5.

Die maximale Schadstoffkonzentration fließt nach Gleichung (2) direkt in das Bewertungskriterium „Fracht im Grundwasser“ ein. Hinweise zum Parameterumfang bei einer Grundwasseruntersuchung und zu Analysenverfahren gibt Kapitel 3.2.1.

Fahngeometrie

Die Breite und Höhe der Schadstofffahne bzw. Stromröhre beschreiben deren Querschnitt (vertikaler Schnitt) quer zur Grundwasserfließrichtung. Sie fließen direkt in das Bewertungskriterium „Fracht im Grundwasser“ ein, siehe Gleichung (2). Hinweise zur Festlegung der Geometrie einer Fahne bzw. Stromröhre gibt Anhang 5.

Geringfügigkeitsschwellenwert

Der GFS-Wert eines Schadstoffes ist für die Einstufung relevant, ob die Fracht groß, mittel, klein oder sehr klein ist (siehe Tabelle 6). Bei einem Schadstoff, der einen relativ hohen GFS-Wert aufweist, können höhere Frachten toleriert werden als bei einem Stoff mit niedrigem GFS-Wert. Weitere Hinweise zu den GFS-Werten gibt Kapitel 3.2.1.

Durchlässigkeit des Grundwasserleiters

Für den Grundwasserleiter bzw. jede Stromröhre ist der Durchlässigkeitsbeiwert k_f in [m/s] anzugeben. Die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwerts kann auf mehreren Wegen erfolgen. Empfohlen wird die Ermittlung mittels Pumpversuchen. Hinweise zu Pumpversuchen geben die Anhänge 13 und 14 dieses Handbuches sowie Anhang 6 des Handbuchs Altlasten „Ermittlung von Schadstofffrachten im Grund- und Sickerwasser“ [9]. Zusätzliche Informationen gibt das DVGW-Regelwerk W 111 [24], dort im Kapitel „Grundwasserleitertests“. Die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes durch Laborversuche ist dagegen weniger geeignet [16].

Hydraulischer Gradient des Grundwassers

Für den Grundwasserleiter bzw. jede Stromröhre ist der hydraulische Gradient (=Grundwassergefälle) anzugeben. Für die Ermittlung des Grundwassergefälles sind mindestens drei, möglichst in Form eines gleichseitigen Dreiecks angeordnete Messstellen erforderlich (Hydrologisches Dreieck). Mit Hilfe von Stichtagsmessungen der Grundwasserstände lassen sich über Grundwassergleichen das Grundwassergefälle und die Grundwasserfließrichtung bestimmen.

Abstands- geschwindigkeit

Bei Kenntnis des Durchlässigkeitsbeiwertes und des hydraulischen Gradienten sowie der nutzbaren Porosität (vgl. Kapitel 3.2.1) kann die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers (Grundwasserfließgeschwindigkeit) errechnet werden [16]. Die Abstandsgeschwindigkeit ist eine wichtige Information bei der Gefährdungsabschätzung, sie wird daher im EXCEL-Auswertetool in Anhang 3 angegeben. Je höher die Abstandsgeschwindigkeit ist, desto rascher können sich Schadstoffe mit dem Grundwasser ausbreiten.

Einstufung der „Fracht im Grundwasser“

Berücksichtigung der GFS

Für die Einstufung der „Fracht im Grundwasser“ wird die im konkreten Schadensfall ermittelte Fracht [g/d] mit Kennzahlen verglichen. Die Kennzahlen für die Einstufung in groß, mittel, klein und sehr klein ergeben sich aus dem Zahlenwert der GFS eines

Schadstoffes und einem Faktor. Die Einstufungen sind in Tabelle 6 aufgeführt. Die Plausibilität der Einstufungen wurde anhand von 35 hessischen Praxisfällen bestätigt.

Die „Fracht im Grundwasser“ kann als groß angesehen werden, wenn der Zahlenwert in der Einheit [g/d] größer ist als der Zahlenwert der GFS [$\mu\text{g/l}$] multipliziert mit dem Faktor 0,5. Die „Fracht im Grundwasser“ kann als sehr klein angesehen werden, wenn der Zahlenwert in der Einheit [g/d] kleiner ist als der Zahlenwert der GFS [$\mu\text{g/l}$] multipliziert mit 0,02.

Algorithmus	Einstufung
Fracht $\geq 0,5 \cdot \text{GFS}$	groß
Fracht $< 0,5 \cdot \text{GFS}$ und $\geq 0,2 \cdot \text{GFS}$	mittel
Fracht $< 0,2 \cdot \text{GFS}$ und $\geq 0,02 \cdot \text{GFS}$	klein
Fracht $< 0,02 \cdot \text{GFS}$	sehr klein

Tab. 6:
Einstufung des Kriteriums
„Fracht im Grundwasser“
(Fracht [g/d], GFS [$\mu\text{g/l}$])

Beispiel

Beispiel:

Der GFS-Wert von Benzol ist 1 $\mu\text{g/l}$. Wenn die ermittelte „Fracht im Grundwasser“ größer als $0,5 \cdot 1 = 0,5$ [g/d] ist, erfolgt die Einstufung in **groß**. Bei Werten zwischen 0,5 und 0,2 g/d erfolgt die Einstufung in **mittel**. Bei Werten zwischen 0,2 und 0,02 g/d erfolgt die Einstufung in **klein**. Bei kleineren Werten als 0,02 g/d ergibt sich die Einstufung **sehr klein**.

Einstufung einer idealisierten Fahne

Die Einstufung der „Fracht im Grundwasser“ in Tabelle 6 beruht auf folgender Überlegung: Für die Unterscheidung, ob eine Grundwasserfracht groß oder mittel ist, wird eine idealisierte Fahne zugrunde gelegt. In dieser Fahne – sie entspricht der idealisierten Fahne aus Kapitel 3.2.1 – beträgt die Schadstoffkonzentration das 10fache der GFS.

Die Fahngeometrie zur Ermittlung des Fahnenquerschnitts beträgt 40 m Breite und 10 m Höhe. Der Grundwasserleiter weist eine nutzbare Porosität von 25 % auf. Die Abstandsgeschwindigkeit beträgt 0,5 m/d, dies ist typisch für Porengrundwasserleiter im Hessischen Ried. Die Schadstofffracht in dieser idealisierten Fahne entspricht dann der Grenze zwischen groß und mittel.

3.2.3 Bewertungsmatrix

Die beiden Kriterien „Gelöste Menge im Grundwasser“ und „Fracht im Grundwasser“ können jeweils in groß, mittel, klein und sehr klein eingestuft werden (vgl. Kapitel 3.2.1 und 3.2.2).

Schädlichkeit der GW-Verunreinigung

Sind bei einem Schadensfall beide Bewertungskriterien bekannt, kann mittels einer Bewertungsmatrix abgeschätzt werden, ob keine schädliche Grundwasserverunreinigung oder ob eine geringe, mittlere oder große schädliche Grundwasserverunreinigung vorliegt. Der sich daraus ergebende Handlungsbedarf ist in der rechten Spalte der Tabelle 7 beschrieben.

Handlungsbedarf

Tab. 7: Bewertungsmatrix zur Einstufung einer schädlichen Grundwasserverunreinigung

Einstufung „Gelöste Menge im Grundwasser“ (Kap. 3.2.1)	Einstufung „Fracht im Grundwasser“ (Kap. 3.2.2)	schädliche Grundwasserverunreinigung	Handlungsbedarf
sehr klein	sehr klein	keine	Keine weiteren Maßnahmen erforderlich
sehr klein	klein		
klein	sehr klein		
klein	klein	geringe	Zwar liegt eine schädliche Grundwasserverunreinigung vor, jedoch sind Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen i.d.R. unverhältnismäßig
sehr klein	mittel		
mittel	sehr klein		
klein	mittel	mittlere	Weitere Prüfschritte sind erforderlich um entscheiden zu können, ob bzw. welche Maßnahmen erforderlich sind, z.B. – Sanierungsmaßnahmen, – Überwachungsmaßnahmen – Überwachung natürlicher Abbau- und Rückhalteprozesse (MNA) Nähere Hinweise gibt Kapitel 3.3.
mittel	klein		
mittel	mittel		
sehr klein	groß		
groß	sehr klein		
klein	groß		
groß	klein		
mittel	groß	große	I.d.R. sind Sanierungsmaßnahmen erforderlich.
groß	mittel		
groß	groß		

Im Falle der Einstufung „mittlere schädliche Grundwasserverunreinigung“ sind weitere Prüfschritte erforderlich, die in Kapitel 3.3 beschrieben sind. Bei der Entscheidung über Maßnahmen ist stets der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit zu berücksichtigen, wie in Kapitel 4.2 erläutert. In Abbildung 3 in Kapitel 3.4 wird die Anwendung der Bewertungsmatrix als Teil eines Fließbildes (Prüfschema) dargestellt.

3.3 Weitere Kriterien

Im vorangegangenen Kapitel 3.2.3 wird erläutert, wie man mit Hilfe der Bewertungskriterien „gelöste Menge“ und „Fracht“ die Schädlichkeit einer Grundwasserverunreinigung ermitteln kann. Insbesondere bei einer „mittleren schädlichen Grundwasserverunreinigung“ bedarf es weiterer Bewertungsschritte, um festzustellen, welche Maßnahmen angemessen sind. Hierbei können weitere Kriterien betrachtet werden, von denen die Wichtigsten nachfolgend näher beleuchtet werden.

Vorgehensweise bei mittelgroßer GW-Verunreinigung

Fahnenentwicklung

Beim Kriterium „Fahnenentwicklung“ ist relevant, wie eine Schadstofffahne im Grundwasser sich zukünftig verhalten wird. Die Einschätzung sollte auf einer langjährigen Grundwasseruntersuchung oder einer Prognose der Fahnenentwicklung basieren. Eine Prognose ist aufgrund von folgenden Kriterien möglich: Alter und Emissionsdauer der Quelle, Grundwasserfließgeschwindigkeit, Stärke der Rückhalte- und Abbauprozesse im Grundwasser.

Szenarien

Folgende Fahnenentwicklungen können unterschieden werden:

- **expandierende Fahne**
Die Freisetzungsprozesse aus der Schadstoffquelle überwiegen die Abbau- und Rückhalteprozesse im Grundwasser. Dies ist typischerweise der Fall, wenn die Schadstoffe gut löslich, nicht oder schwer abbaubar sind, die Quelle relativ jung ist und aufgrund einer hohen Schadstoffmenge in der Quelle eine lange Emissionsdauer zu erwarten ist.
- **quasi-stationäre Fahne**
Die Ausdehnung der Fahne erscheint stabil. Die Freisetzung von Schadstoffen aus der Quelle ist ähnlich groß wie der Abbau und Rückhalt im Grundwasser. Quasi-stationäre Fahnen treten vor allem bei gut abbaubaren Stoffen und lange emittierenden Quellen auf.
- **rückläufige Fahne**
Die Freisetzung aus der Schadstoffquelle ist geringer als der Abbau und Rückhalt im Grundwasser. Rückläufige Fahnen treten insbesondere auf, wenn die Schadstoffquelle weitgehend erschöpft ist.
- **abgerissene Fahne**
Wenn die Schadstoffquelle saniert wurde, nicht jedoch die Schadstofffahne, können sogenannte „abgerissene“ Fahnen auftreten. Dann steht die Fahne nicht mehr in direktem Kontakt mit der Quelle. Abgerissene Fahnen können expandierend, quasi-stationär oder rückläufig sein (siehe oben).

Bei expandierenden Fahnen sind Grundwasserbereiche gefährdet, die bisher noch unbelastet sind. Daher sind expandierende Fahnen wesentlich kritischer anzusehen als quasistationäre oder rückläufige Fahnen.

Mobilität eines Schadstoffes

chemisch-physikalische Stoffeigenschaften

Die Mobilität von Schadstoffen im Grundwasser hängt vor allem von den chemisch-physikalischen Stoffeigenschaften ab (Wasserlöslichkeit, Adsorbierbarkeit an organischem Kohlenstoff, Viskosität, Dichte). Generell erhöht sich die Beweglichkeit eines Stoffes bei steigender Wasserlöslichkeit und abnehmender Adsorbierbarkeit an organischem Kohlenstoff (K_{OC})³. Die Viskosität (Zähigkeit) und Dichte eines Stoffes spielen eine Rolle, wenn dieser Stoff als flüssige, mit Wasser nicht mischbare Phase vorliegt (non-aqueous-phase-liquid, NAPL). Je geringer die Viskosität und je höher die

³ Der K_{OC} ist definiert als Adsorptionskonstante, normiert auf den Kohlenstoffgehalt eines Bodens. Die Einheit ist [l/kg]. Der K_{OC} beschreibt die Fähigkeit zur Adsorption eines Stoffes insbesondere an Huminstoffe in Böden. Ein hoher K_{OC} bedeutet, dass der untersuchte Stoff in Böden bzw. Grundwasserleitern gut adsorbierbar ist und daher wenig mobil ist.

Lösevermittler

Dichte einer NAPL ist, desto höher ist die Mobilität. Lösevermittler können die Mobilität eines Stoffes deutlich erhöhen, beispielsweise können Leichtflüchtige Aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX) bei Teeröl-Schadensfällen zu einer verstärkten Freisetzung von PAK führen.

Einstufung der Mobilität

Nach Handbuch Altlasten „Untersuchung und Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser (Sickerwasserprognose)“ [12] kann die Mobilität einer Reihe von altlastentypischen Schadstoffen wie folgt eingeteilt werden:

- Hohe Mobilität: LHKW, MTBE, Benzol, Toluol
- Mittlere Mobilität: Kerosin, Diesel, Heizöl; C₂-Benzole (Xylole, Ethylbenzol), C₃-, C₄-Benzole; Naphthalin, 3-Ring-PAK
- Geringe Mobilität: PAK mit mehr als 3 Ringen, Schmieröl, PCB.

Stoffe mit hoher Mobilität sind ungünstiger zu beurteilen als Stoffe mit geringer Mobilität.

Biologische Abbaubarkeit eines Schadstoffes

Mineralölprodukte

Die mikrobiologische Abbaubarkeit ist bei vielen organischen Schadstoffen relevant, vor allem bei Mineralölprodukten wie Benzin, Diesel und Heizöl mit den Inhaltsstoffen BTEX und MKW (Mineralölkohlenwasserstoffe). Finden Abbauprozesse statt, hat dies Auswirkungen auf die Fahnenlänge, das Volumen der Fahne und die Schadstoffkonzentration in der Fahne. Zu beachten: Beim mikrobiologischen Abbau⁴ von Schadstoffen können toxische Metabolite auftreten, beispielsweise Vinylchlorid (VC) bei der reduktiven Dechlorierung von Tetrachlorethen (PER) und Trichlorethen (TRI).

toxische Metabolite

aerober/anaerober Abbau

Die Abbaubarkeit eines Schadstoffes hängt auch von dem Grundwassermilieu und von der Anwesenheit geeigneter Mikroorganismen ab. Unter aeroben Bedingungen (im Grundwasser liegt gelöster Sauerstoff vor) sind die meisten mineralölbürtigen Schadstoffe gut abbaubar, dagegen sind hochchlorierte Verbindungen unter aeroben Bedingungen oft stabil. Hinweise zur Abbaubarkeit von Schadstoffen unter anaeroben Milieubedingungen gibt das Handbuch Altlasten „Arbeitshilfe zu überwachten natürlichen Abbau- und Rückhalteprozessen im Grundwasser (Monitored Natural Attenuation MNA)“ [13]. Unter den vorherrschenden Milieubedingungen sind gut abbaubare Stoffe günstiger zu werten als schwer abbaubare Stoffe.

Hydrochemisches Milieu

Schwer- und Halbmetalle

Das hydrochemische Milieu im Grundwasser beeinflusst die Mobilität von Schadstoffen sowie die Abbau- und Rückhalteprozesse. Bei Schwer- und Halbmetallen ist die Wasserlöslichkeit vom pH-Wert abhängig. Bei Schwer- und Halbmetallen, die in verschiedenen Oxidationsstufen auftreten können, beeinflusst das Redoxpotenzial die Löslichkeit (beispielsweise bei Chrom und Arsen). Die Anwesenheit bestimmter Anionen (beispielsweise Sulfid S²⁻) kann die Löslichkeit von Schwer- und Halbmetallen stark vermindern, da schwerlösliche Schwer- und Halbmetallverbindungen entstehen.

⁴ Der vollständige Abbau eines Stoffes in anorganische Komponenten (CO₂, H₂O, Nitrat, ...) wird als Mineralisation bezeichnet. Der (unvollständige) Abbau zu organischen Metaboliten/Zwischenprodukten wird als Metabolisierung oder Teilabbau bezeichnet.

organische Stoffe

Bei organischen Stoffen ist von Bedeutung, ob geeignete Abbaubedingungen vorliegen. Beispielsweise müssen für den Abbau von MKW, BTEX und PAK geeignete Elektronenakzeptoren vorhanden sein (beispielsweise Sauerstoff, Nitrat, Sulfat). Dagegen müssen bei der reduktiven Dechlorierung von LHKW geeignete Elektronendonatoren (gut abbaubare organische Verbindungen) im Grundwasser vorhanden sein. Hinweise hierzu geben die beiden Handbücher „Arbeitshilfe zu überwachten natürlichen Abbau- und Rückhalteprozessen im Grundwasser (Monitored Natural Attenuation MNA)“ und „Arbeitshilfen zur Überwachung und Nachsorge von altlastverdächtigen Flächen und Altlasten“ [13,14].

Ausbreitung der Fahne in tiefere Grundwasserstockwerke

Folgen der Schadstoffverlagerung

Bei Grundwasserschadensfällen ist i. d. R. das oberste Grundwasserstockwerk am stärksten betroffen. Aus Sicht des Grundwasserschutzes ist eine Verlagerung von Schadstoffen in tiefere Grundwasserstockwerke im Hinblick auf die Schadensfolgen und den Sanierungsaufwand als sehr schwerwiegend zu beurteilen:

- Tiefere Grundwasserstockwerke sind häufig von besonderer wasserwirtschaftlicher Bedeutung. Bereits geringe Verunreinigungen können große Auswirkungen auf die Nutzbarkeit des Grundwassers haben.
- Die Erkundung tieferer Grundwasserstockwerke ist i. d. R. mit hohem Aufwand verbunden.
- Bei der Sanierung tieferer Grundwasserstockwerke sind häufig hohe Wassermengen mit relativ geringer Schadstoffkonzentration zu behandeln.

erhöhter Sanierungsbedarf

Bei einer Verschleppung von Schadstoffen in tiefere Grundwasserleiter erhöht sich die Sanierungsnotwendigkeit.

Hinweise zu ökotoxikologischen Untersuchungen

Schadstoffgemische, Metaboliten

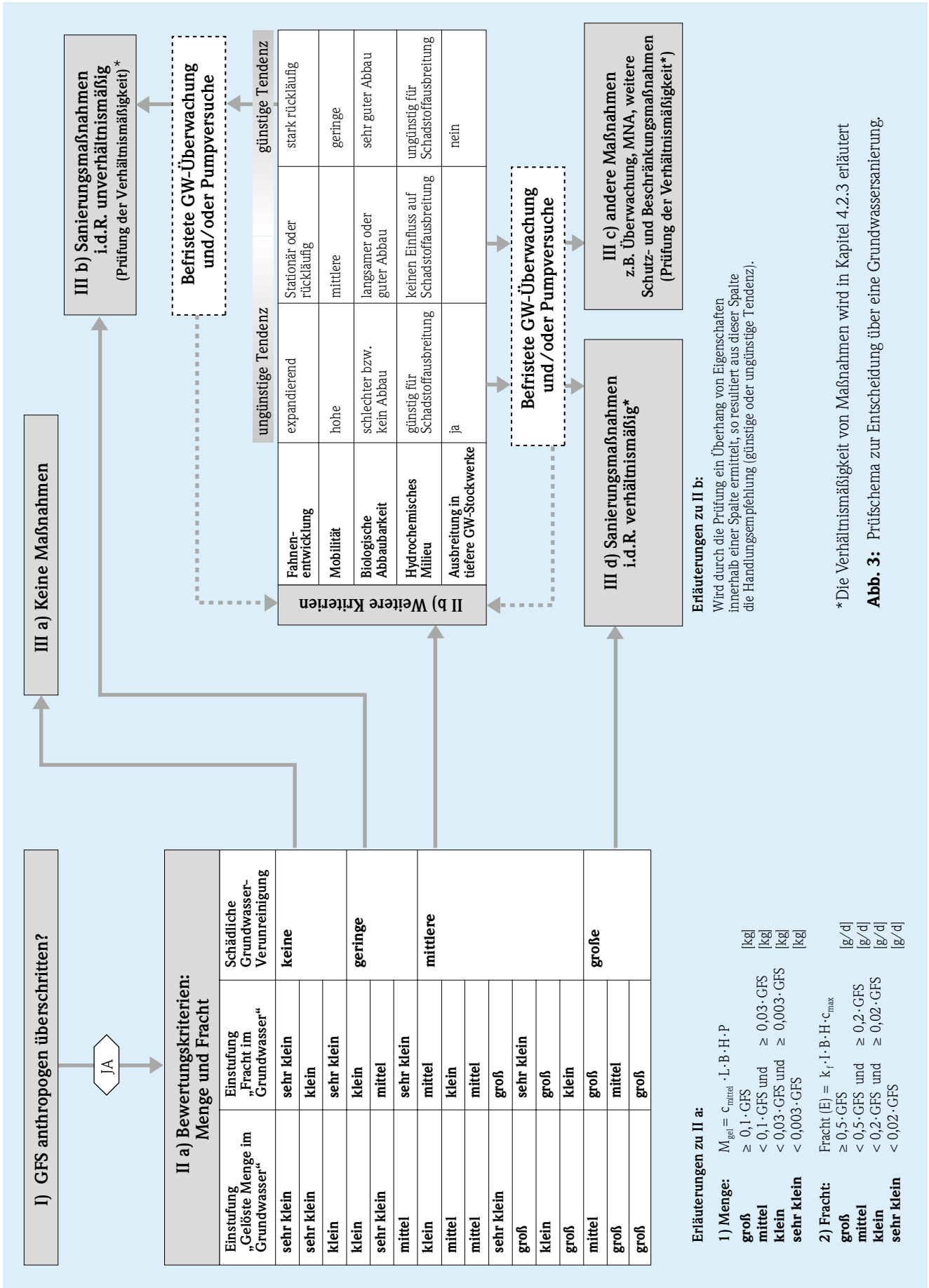
Insbesondere beim Vorliegen von Schadstoffgemischen kann es sinnvoll sein, zur Beurteilung des Gefährdungspotenzials ökotoxikologische Untersuchungen ergänzend anzuwenden. Ziel dieser Verfahren ist es zu prüfen, ob von einem Schadstoffgemisch oder von bislang unbekanntem Metaboliten toxische Wirkungen ausgehen. Damit kann auch die Entscheidung über den Abbruch oder die Weiterführung von Maßnahmen unterstützt werden. Eine Studie über die Anwendung ökotoxikologischer Testverfahren bei Altlastenverfahren ist im Handbuch Altlasten, Band 3, Teil 8 des HLNUG erschienen [11]; im Kapitel 7.2 „Einsatzmöglichkeiten und Grenzen von ökotoxikologischen Tests in der Altlastenbearbeitung“ wird die Anwendung als Entscheidungshilfe zur Sanierungsnotwendigkeit und zur Beendigung einer Sanierung beschrieben.

3.4 Prüfschema als Entscheidungshilfe für Grundwasser-sanierungen

Das folgende Prüfschema basiert auf den Ausführungen der vorangegangenen Kapitel 3.1 bis 3.3. Anhand der ersten Prüfschritte kann hier rasch abgeschätzt werden, ob eine schädliche Grundwasserverunreinigung vorliegt oder nicht. Weitere Prüfschritte sollen eine Entscheidungshilfe für die durchzuführenden Maßnahmen bei einer Grundwasserverunreinigung geben:

Prüfschritte

- I) Im ersten Schritt ist zu überprüfen, ob die **Überschreitung** eines **GFS-Wertes** durch eine **anthropogene** Beeinflussung des Grundwasserkörpers hervorgerufen wurde. Wenn die Überschreitung dagegen auf diffuse oder geogene Quellen zurückzuführen ist, findet die GWS-VwV keine Anwendung.
- II a) Bei Überschreitung eines GFS-Wertes sind die **gelöste Menge** und **Fracht** im Grundwasser zu berechnen und gemäß den Erläuterungen zu II a) einzustufen in **sehr klein, klein, mittel** oder **groß**. Aus der Kombination der beiden Kriterien ergibt sich, ob **keine**, eine **geringe**, eine **mittlere** oder eine **große schädliche Grundwasserverunreinigung** vorliegt (rechte Spalte).
- II b) Ergibt sich aus II a) **eine mittlere schädliche Grundwasserverunreinigung**, sind **weitere** Kriterien abzuprüfen, beispielsweise Fahnenentwicklung und Mobilität der Schadstoffe. In Abhängigkeit von diesen Kriterien ergibt sich die weitere Vorgehensweise. Grundsätzlich kann vor einer endgültigen Entscheidung noch eine **befristete Grundwasserüberwachung** und/oder ein **Pumpversuch** durchgeführt werden, um eine Prognose über die zukünftige Schadstoffentwicklung ableiten zu können.
- III a) Liegt nach II a) **keine schädliche Grundwasserverunreinigung** vor, so sind **keine Maßnahmen** zu ergreifen.
- III b) Liegt nach II a) nur **eine geringe schädliche Grundwasserverunreinigung** vor, so sind **Sanierungsmaßnahmen erfahrungsgemäß unverhältnismäßig**. Dies gilt ebenso, wenn die in der rechten Spalte von II b) genannten günstigen Gegebenheiten zutreffen, d. h. eine günstige Tendenz vorliegt.
- III c) Fällt die Tendenz nach II b) weder günstig noch ungünstig aus, so ist zu erwägen, ob eine alternative Methode zu Sanierungsmaßnahmen das geeignete Mittel ist (beispielsweise MNA, Grundwasserüberwachung, Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen).
- III d) Liegt nach II a) eine **große schädliche Grundwasserverunreinigung** vor oder nach II b) eine ungünstige Tendenz, so sind Sanierungsmaßnahmen erfahrungsgemäß verhältnismäßig.
- III b-d) Die **Verhältnismäßigkeit** einer konkreten Maßnahme ist grundsätzlich zu prüfen.



*Die Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen wird in Kapitel 4.2.3 erläutert
Abb. 3: Prüfschema zur Entscheidung über eine Grundwassersanierung.

3.5 Anwendungsbeispiel

Beispiel zur Anwendung des Prüfschemas

Die Anwendung des „Prüfschemas zur Entscheidung über eine Grundwassersanierung“ aus Kapitel 3.4 wird nachfolgend anhand eines Beispiels erläutert. Die fachlichen Grundlagen sind in den Kapiteln 3.2 und 3.3 beschrieben.

I) GFS-Wert anthropogen überschritten?

anthropogen/geogen verursachte GW-Verunreinigung

Das Anwendungsbeispiel ist ein LHKW-Schadensfall auf einem Altstandort. Im Grundwasser dominieren Tetrachlorethen (PER) und Trichlorethen (TRI), untergeordnet tritt cis-1,2-Dichlorethen (CIS) auf. Der GFS-Wert für die Summe aus PER und TRI beträgt $10 \mu\text{g/l}$. In der Schadstofffahne treten maximal $500 \mu\text{g/l}$ (Summe PER und TRI) auf, so dass der GFS-Wert deutlich überschritten wird. Die LHKW sind anthropogenen Ursprungs. Es geht weiter mit Schritt II a) des Prüfschemas.

II a) Bewertungskriterien Menge und Fracht

Ermittlung der Bewertungskriterien

Für die Ermittlung der Bewertungskriterien „Gelöste Menge im Grundwasser“ und „Fracht im Grundwasser“ ist keine Unterteilung der Fahne in mehrere Stromröhren erforderlich, d. h. eine Stromröhre ist ausreichend (vgl. Beispiel A in Anhang 5). Tabelle 8 zeigt die Daten und Kenngrößen des Anwendungsbeispiels:

Daten/Kenngrößen		
Bezeichnung des Schadensfalls		MUSTER-Werke
Schadstoff		$\sum \text{PER} + \text{TRI}$
Anzahl der Stromröhren		1
mittlere LHKW-Konzentration	c_{mittel}	$300 \mu\text{g/l}$
maximale LHKW-Konzentration	c_{max}	$500 \mu\text{g/l}$
Länge der Fahne	L	75 m
Breite der Fahne	B	10 m
Höhe der Fahne	H	4 m
Geringfügigkeitsschwelle	GFS	$10 \mu\text{g/l}$
nutzbare Porosität	P^*	30 %
Durchlässigkeitsbeiwert	k_f	$5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
hydraulischer Gradient	I	0,005

Tab. 8: Daten/Kenngrößen zur Ermittlung der Bewertungskriterien „Gelöste Menge im Grundwasser“ und „Fracht im Grundwasser“ für ein Anwendungsbeispiel.

Berechnungen

Die „gelöste Menge im Grundwasser“ ergibt sich aus Gleichung (1):

$$M_{\text{gelöst}} = c_{\text{mittel}} \cdot L \cdot B \cdot H \cdot P^* / 100$$

$$= 300 \mu\text{g/l} \cdot 75 \text{ m} \cdot 10 \text{ m} \cdot 4 \text{ m} \cdot 30 / 100 = 270\,000 \text{ mg} = 0,27 \text{ kg} \approx 0,3 \text{ kg}$$

Nach Tabelle 4 in Kapitel 3.2.1 ist die „gelöste Menge im Grundwasser“ klein, wenn sie zwischen $0,03 \cdot \text{GFS}$ und $0,003 \cdot \text{GFS}$ liegt. Für einen PER/TRI-Schadensfall mit einem GFS-Wert von $10 \mu\text{g/l}$ entspricht dies dem Bereich zwischen $0,3$ und $0,03 \text{ kg LHKW}$. Im Beispiel beträgt die gelöste Menge ca. $0,27 \text{ kg LHKW}$. Daher ist die Einstufung klein zutreffend, jedoch mit deutlicher Tendenz zu mittel.

Die „Fracht im Grundwasser“ ergibt sich aus Gleichung (2):

$$\text{Fracht (E)} = k_f \cdot I \cdot B \cdot H \cdot c_{\text{max}}$$

$$= 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} \cdot 0,005 \cdot 10 \text{ m} \cdot 4 \text{ m} \cdot 500 \mu\text{g/l} = 0,05 \text{ mg/s} = 4,3 \text{ g/d}$$

Nach Tabelle 6 in Kapitel 3.2.2 ist die „Fracht im Grundwasser“ mittel, wenn sie zwischen $0,5 \cdot \text{GFS}$ und $0,2 \cdot \text{GFS}$ liegt. Für einen PER/TRI-Schadensfall mit einem GFS-Wert von $10 \mu\text{g/l}$ entspricht dies dem Bereich zwischen 5 und 2 g/d LHKW . Im Beispiel beträgt die Fracht $4,3 \text{ g/d LHKW}$, daher ist die Einstufung in **mittel** zutreffend.

EXCEL-Auswertetool

Die Berechnung der „Gelösten Menge im Grundwasser“ und „Fracht im Grundwasser“ vereinfacht sich bei Anwendung des EXCEL-Auswertetools aus Anhang 3. Die Abbildung 4 zeigt das EXCEL-Auswertetool des Anwendungsbeispiels:

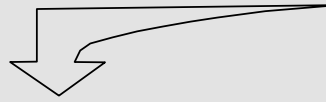
EXCEL-Auswertetool „Mengen und Frachten“

Anhang 3 des Handbuchs Altlasten „Arbeitshilfe zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen“, 4. Auflage 2025

Eingabedaten sind gelb hinterlegt

Wichtige Endergebnisse sind blau hinterlegt

Bezeichnung des Schadensfalls			Muster-Werke			
Schadstoff			PER, TRI			
Geringfügigkeitsschwellenwert	GFS	µg/l	10			
Stromröhre Nr.			①	②	③	
Bezeichnung der Stromröhre/Messstelle						Quelle der Daten
Mittlere Konzentration in der Stromröhre	C_{mittel}	µg/l	300			Gutachten Büro xy, 2.1.23, S. 23
Max.-Konzentration in der Stromröhre	C_{max}	µg/l	500			Gutachten Büro xy, 2.1.23, S. 23
Breite der Stromröhre / Fahne	B	m	10			Gutachten Büro xy, 2.1.23, S. 29
Höhe der Stromröhre / Fahne	H	m	4			Gutachten Büro xy, 2.1.23, S. 30
Länge der Stromröhre / Fahne	L	m	75			Gutachten Büro xy, 2.1.23, S. 31
Durchlässigkeitsbeiwert	k_f	m/s	5,0E-04			Gutachten Büro xy, 2.1.23, S. 31
hydraulischer Gradient	I	-	0,005			Gutachten Büro xy, 2.1.23, S. 32
nutzbare Porosität	P^*	%	30			Gutachten Büro xy, 2.1.23, S. 31
Abstandsgeschwindigkeit	v_a	m/d	0,7	0,0	0,0	
gelöste Menge im Grundwasser			$M_{\text{gelöst}}$	kg	0,3	klein (Einstufung nach Arbeitshilfe Kap. 3.2.1)
Fracht im Grundwasser			E_{ab}	g/d	4,3	mittel (Einstufung nach Arbeitshilfe Kap. 3.2.2)



Gutachterliche Beurteilung des Sachverhaltes

Die Qualität der vorliegenden Daten (Gutachten des Büros xy) ist ausreichend hoch, da mehrere Messreihen und ein Pumpversuch durchgeführt wurden. Die Ausdehnung der Schadstofffahne konnte durch insgesamt 7 Messstellen eingegrenzt werden.

Abb. 4: Anwendung des EXCEL-Auswertetools „Mengen und Frachten“ aus Anhang 3 mit dem Anwendungsbeispiel.

Anwendung der Bewertungsmatrix

Im nächsten Schritt wird die Bewertungsmatrix herangezogen, entweder Tabelle 7 in Kapitel 3.2.3 oder die gleichlautende Tabelle II a) in Abbildung 3. Die Kombination „kleine gelöste Menge im Grundwasser“ und „mittlere Fracht im Grundwasser“ ergibt, dass eine „mittlere schädliche Grundwasserverunreinigung“ vorliegt (Tab. 9).

II a) Bewertungskriterien: Menge und Fracht		
Einstufung „Gelöste Menge im Grundwasser“	Einstufung „Fracht im Grundwasser“	Schädliche Grundwasser- Verunreinigung
sehr klein	sehr klein	keine
sehr klein	klein	
klein	sehr klein	
klein	klein	geringe
sehr klein	mittel	
mittel	sehr klein	
klein	mittel	mittlere
mittel	klein	
mittel	mittel	
sehr klein	groß	
groß	sehr klein	
klein	groß	
groß	klein	
mittel	groß	
groß	mittel	große
groß	groß	

Tab. 9: Bewertungsmatrix II a) aus Abb. 3; blau hervorgehoben sind die für das Anwendungsbeispiel geltenden Einstufungen

II b) Weitere Kriterien

weitere Prüfkriterien

Aufgrund der Einstufung „mittlere schädliche Grundwasserverunreinigung“ sind weitere Prüfschritte erforderlich, um entscheiden zu können, ob bzw. welche Maßnahmen erforderlich sind. Hierzu werden die in Kapitel 3.3 genannten Kriterien geprüft.

Fahnenentwicklung:

Grundwassermessungen der letzten zwei Jahre haben keinen eindeutigen Trend gezeigt, ob die Fahne expandierend, quasistationär oder rückläufig ist. Da in der Schadstoffquelle noch größere Mengen an LHKW vorliegen (ca. 100 kg), ist von einer langen Emissionsdauer der Quelle auszugehen. Da die biologische Abbaubarkeit der LHKW unter den vorherrschenden Milieubedingungen gering ist, wird eine expandierende Fahnenentwicklung angenommen. Dies ist als ungünstig zu werten.

Mobilität der LHKW:

Bei LHKW wird von einer hohen Mobilität ausgegangen [12]. Dies ist als ungünstig zu werten.

Biologische Abbaubarkeit der LHKW und Hydrochemisches Milieu:

Da im Grundwasser Sauerstoff vorhanden ist, liegt ein aerobes Milieu vor. In der gesamten Fahne dominieren PER und TRI. Im weiteren Abstrom tritt zwar der Metabolit cis-1,2-Dichlorethen (CIS) auf, jedoch in wesentlich geringeren Konzentrationen als die Ausgangsstoffe PER und TRI. Die Abbaubarkeit von PER und TRI ist unter den vorherrschenden Milieubedingungen gering. Dies ist als ungünstig zu werten.

Verlagerung in tiefere Grundwasserstockwerke:

Aufgrund eines mächtigen Stauhorizontes besteht keine Gefahr für eine Schadstoffverlagerung in tiefere Grundwasserstockwerke. Dies ist als günstig zu werten.

III d) Grundwassersanierung i.d.R. verhältnismäßig

Aufgrund der überwiegend ungünstigen Tendenz der weiteren Kriterien nach II b) ist davon auszugehen, dass eine Grundwassersanierung verhältnismäßig ist. Die Prüfung der Verhältnismäßigkeit betrifft daher die Frage, welche Maßnahmen zu Sanierung des Grundwassers zu treffen sind (vgl. Kapitel 4.2). Ergänzend kann es sinnvoll sein, eine befristete Grundwasserüberwachung und/oder einen Pumpversuch durchzuführen (gestricheltes Kästchen zwischen III b) und III d) in Abbildung 3).

Entscheidung über Handlungsbedarf

4 Sanierung von schädlichen Grundwasserverunreinigungen

Sanierung, Dekontamination, Sicherung

Im Bodenschutzrecht umfasst die Sanierung Maßnahmen zur Dekontamination und zur Sicherung. Dekontamination bedeutet, dass die Schadstoffe mit dem Ziel der Gefahrenbeseitigung dauerhaft entfernt werden. Damit fallen unter den Begriff Dekontamination auch Maßnahmen, die nur eine Teil-Dekontamination zum Ziel haben. Sicherungsmaßnahmen sollen eine Ausbreitung der Schadstoffe verhindern; eine Schadstoffbeseitigung erfolgt nicht. Im Wasserrecht wird in der GWS-VwV der Begriff Sanierung analog verwendet. Die Herausnahme oder das Umwandeln der Schadstoffe wird dort mit „Beseitigung“ beschrieben. Ist die vollständige Beseitigung nicht möglich, besteht die Möglichkeit, das Sanierungsziel anzupassen (teilweise Beseitigung). Ist das Sanierungsziel in einem überschaubaren Zeitraum mit einem verhältnismäßigen Aufwand nicht erreichbar, können Sicherungsmaßnahmen zugelassen werden.

4.1 Vorgaben der GWS-VwV

Neben Altlasten oder schädlichen Bodenveränderungen sind nach § 4 Abs. 3 BBodSchG auch die hiervon ausgehenden Gewässerverunreinigungen zu sanieren. Das „Wie“ der Gewässersanierung regelt das Wasserrecht.

Die vom Wasserrecht zu bestimmenden Anforderungen an die Sanierung von Grundwasserverunreinigungen nach § 4 Abs. 4 Satz 3 des BBodSchG sind in Hessen in der GWS-VwV [1] festgelegt und werden dort in Nummer 5 präzisiert.

Umfang der Sanierung, Sanierungsziel

Die Sanierung des Schutzgutes „Grundwasser“ umfasst demnach „*alle unter Berücksichtigung des Verhältnismäßigkeitsgrundsatzes erforderlichen Maßnahmen zur Beseitigung der schädlichen Grundwasserverunreinigung, insbesondere durch Herausnehmen oder Umwandeln der Schadstoffe, und schließt die Beseitigung ihrer Ursache ein*“ ([1] Nr. 5 Abs. 1). Daher ist ein möglichst weitgehender Grundwasserschutz anzustreben, d. h. eine vollständige Gefahrenabwehr, bei der sowohl die Schadstoffquelle⁵ als auch die gesamte Schadstofffahne⁶ in den Blick genommen sowie entsprechende Sanierungsmaßnahmen geplant und durchgeführt werden. Die Behörde legt hierzu ein Sanierungsziel für das Grundwasser fest. Darunter ist sowohl die Festlegung des Umfangs der Sanierung (vollständige Sanierung, Teilsanierung oder Sicherung) sowie ggf. auch die Festlegung eines konkreten Sanierungszielwertes zu verstehen (vgl. Kapitel 4.2.2).

abweichendes Sanierungsziel

Wenn eine vollständige Gefahrenabwehr aus Gründen der Verhältnismäßigkeit nicht in Frage kommt, kann die Behörde ein abweichendes Sanierungsziel festlegen, so dass auch weniger wirkungsvolle bzw. weniger weitgehende Sanierungsmaßnahmen zum Einsatz kommen können:

„Ist aufgrund der örtlichen Verhältnisse eine Beseitigung der schädlichen Grundwasserverunreinigung nach Abs. 1 Satz 2 mit verhältnismäßigen Maßnahmen nicht zu erwarten, kann mit Zustimmung der zuständigen Behörde ein abweichendes Sanierungsziel bestimmt werden“ ([1] Nr. 5 Abs. 2).“

⁵ Schadstoffquellen sind Bodenbereiche, die deutlich erhöhte Gehalte mobiler bzw. mobilisierbarer Schadstoffe aufweisen. Schadstoffe können als Phase (beispielsweise als NAPL, non-aqueous-phase-liquids) vorliegen und/oder an der Bodenmatrix sorbiert sein.

⁶ Als Schadstofffahne wird das Grundwasservolumen im Abstrom einer Schadstoffquelle verstanden, in dem die Stoffkonzentrationen über dem jeweiligen GFS-Wert liegen [36].

Erläuterungen zur Festlegung abweichender Sanierungsziele geben Kapitel 4.2.2 und Anhang 16. Die örtlichen Verhältnisse sind „*vor allem durch die hydrogeologischen Gegebenheiten, die Schutzbedürftigkeit, eingetretene oder zu erwartende Beeinträchtigungen sowie andere dort möglicherweise bereits vorhandene Belastungen bestimmt*“ ([1] Nr. 4).

Sicherungsmaßnahmen

Weiterhin beschreibt die GWS-VwV die Möglichkeit, Sicherungsmaßnahmen anstelle von Sanierungsmaßnahmen durchzuführen ([1] Nr. 5 Abs. 2):

„Soweit das Sanierungsziel in einem überschaubaren Zeitraum mit verhältnismäßigem Aufwand nicht erreichbar ist, kann die zuständige Behörde Sicherungsmaßnahmen zulassen, wenn damit dauerhaft

- a. *eine Ausbreitung von Schadstoffen im Grundwasser verhindert wird,*
- b. *Schadstoffe aus dem Grundwasser in oberirdischen Gewässern keine Gefahren verursachen und*
- c. *durch die im Grundwasser verbleibenden Schadstoffe keine Gefahren, erheblichen Nachteile oder erheblichen Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit entstehen.“*

Demzufolge darf sich die Schadstofffahne weder weiter ausbreiten, noch darf eine Verlagerung von Schadstoffen in tiefere Grundwasserleiter oder andere Umweltmedien erfolgen (z.B. aus dem Grundwasser über die Bodenluft in die Raumluft).

Rangfolge von Sanierungsmaßnahmen

Damit ergibt sich aus der GWS-VwV folgende Rangfolge im Hinblick auf Grundwasser-sanierungsmaßnahmen:

1. Vollständige Beseitigung der schädlichen Grundwasserverunreinigung

Die Sanierungsmaßnahmen sollen bewirken, dass im gesamten betroffenen Grundwasser in absehbarer Zeit niedrige Konzentrationen (unterhalb der Gefahrenschwelle) eintreten.

2. Sanierungszielanpassung

Ist die vollständige Beseitigung aufgrund der örtlichen Verhältnisse durch verhältnismäßige Maßnahmen nicht möglich, ergeben sich prinzipiell drei Möglichkeiten für die Anpassung des Sanierungsziels (vgl. Kapitel 4.2.2):

- 2.1 die Erhöhung des Sanierungszielwertes
- 2.2 die räumliche Beschränkung des Sanierungsziels auf Teilbereiche der Schadstofffahne, in der Regel im nahen Abstrom der Quelle und/oder
- 2.3 die Unterteilung der Schadstofffahne in Bereiche mit unterschiedlichen Sanierungszielen.

3. Sicherung der Grundwasserverunreinigung

Maßnahmen zur Sicherung einer Grundwasserverunreinigung sind zum Beispiel hydraulische Maßnahmen (Pump&Treat), reaktive Wände und Dichtwände, die eine weitere Ausbreitung der Schadstofffahne verhindern sollen. Zur Kontrolle der Sicherungsmaßnahmen sind Maßnahmenziele festzulegen.

Monitored Natural Attenuation (MNA) sowie Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen

MNA

Sind auch Sicherungsmaßnahmen nicht verhältnismäßig, ist die Überwachung natürlicher Abbau- und Rückhalteprozesse (MNA) möglich, sofern die oben genannten Voraussetzungen für eine Sicherungsmaßnahme erfüllt sind (a. bis c.). Wie bei Sicherungsmaßnahmen sind auch bei MNA geeignete Maßnahmenziele festzulegen, um die Wirksamkeit der Maßnahme überprüfen zu können (vgl. Kapitel 4.2.2).

Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen

Zusätzlich zu Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen bzw. MNA können Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen (beispielsweise Nutzungsverbote) erforderlich sein. MNA sowie Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen werden in der GWS-VwV nicht explizit genannt. Sie sind in der Rangfolge unterhalb der Sicherung einzuordnen.

Sanierungsstrategien

Aus der oben genannten Rangfolge möglicher Sanierungsmaßnahmen (1. bis 3.) können sich im Einzelfall unterschiedliche Sanierungsstrategien ergeben und damit auch verschiedene Fallkonstellationen (siehe Anhang 16).

Lage der Sanierungsbereiche

Die Lage der Sanierungsbereiche (siehe Anhang 15) hängt damit unmittelbar vom Sanierungsziel ab. Wird eine vollständige Beseitigung des Schadens angestrebt, müssen die Sanierungsbereiche die gesamte Fahne in Länge und Breite sowie den Bereich der Quelle erfassen. Steht hingegen die größtmögliche Wirksamkeit einer Sanierung im Vordergrund, sollte der Sanierungsbereich die höchsten Schadstoffkonzentrationen erfassen. Bei einer hydraulischen Sicherung liegt der Sanierungsbereich hingegen meist im Bereich der Fahnen Spitze.

Positionierung von Sanierungsbrunnen

Hinweise zu der Positionierung von Sanierungsbrunnen enthält Anhang 13. Im Anhang 16 werden Fallbeispiele gezeigt, die für verschiedene Sanierungsziele die sich daraus ergebenden Sanierungsbereiche darstellen.

4.2 Sanierungsziel und Verhältnismäßigkeit

4.2.1 Allgemeines

Behörde nennt vorläufiges Sanierungsziel

Damit der Umfang der Sanierungsmaßnahme deutlich wird, hat die Behörde bei ihrer Ermessensentscheidung, ob und wie zu sanieren ist, dem Pflichtigen das Sanierungsziel zur vollständigen Beseitigung der schädlichen Grundwasserverunreinigung zu nennen. Für den Fall, dass hierfür keine verhältnismäßigen Maßnahmen zur Verfügung stehen, wird die Behörde das Sanierungsziel unter Berücksichtigung des Gefährdungspotenzials soweit anpassen, bis eine verhältnismäßige Maßnahme zur Verfügung steht. Daraus wird deutlich, dass „Sanierungsziel“ und „Verhältnismäßigkeit“ eng miteinander verknüpft sind, und eine iterative Vorgehensweise bei der Entscheidung über das Sanierungsverfahren notwendig sein kann.

Letztlich gilt es eine Maßnahme oder Maßnahmenkombination zu finden, die einerseits einen möglichst weitgehenden Schutz der betroffenen Schutzgüter (beispielsweise Mensch, Grundwasser, Oberflächengewässer, Ökosysteme) ermöglicht, andererseits aber verhältnismäßig ist.

Bestimmung des Sanierungsziels

Dazu sind in der Regel folgende Verfahrensschritte durchzuführen:

- Nach der behördlichen Einzelfallentscheidung, dass an einem Standort Sanierungsbedarf besteht, wird die Behörde dem Pflichtigen ein Sanierungsziel zur Gefahrenabwehr (zunächst die Einhaltung der GFS-Werte der GWS-VwV) nennen (vgl. Kapitel 4.2.2).
- Der vom Pflichtigen beauftragte Gutachter führt eine Sanierungsuntersuchung inklusive einer Variantenstudie durch. Dabei stellt der Gutachter dar, welche Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen [32] geeignet sind, um das Sanierungsziel zu erreichen und welche Sanierungsvariante aus Sicht des Gutachters die Vorzugsvariante ist.
- Zur Ermittlung geeigneter und effizienter Sanierungsverfahren sowie zur Festlegung von Sanierungsbereichen (Anhänge 15 und 16) sind im Rahmen der Sanierungsuntersuchung/Variantenstudie i. d. R. weitere Erkundungsmaßnahmen notwendig. Hierzu eignen sich insbesondere Immissionspumpversuche. Hinweise zu Immissionspumpversuchen gibt Anhang 13 dieses Handbuches, weitere Informationen enthält das Handbuch Altlasten „Ermittlung von Schadstofffrachten im Grund- und Sickerwasser“ [9].
- Die Behörde prüft insbesondere die vorgeschlagene Vorzugsvariante, ob diese geeignet, erforderlich und angemessen ist (Verhältnismäßigkeitsprüfung, Kapitel 4.2.3) oder ob das Sanierungsziel angepasst werden muss.

4.2.2 Sanierungsziel

Vorgabe des BBodSchG

Grundwasserverunreinigungen sind nach § 4 Abs. 3 S. 1 BBodSchG so zu sanieren, dass dauerhaft keine Gefahren, erheblichen Nachteile oder erheblichen Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit entstehen. Das Sanierungsziel ist somit gesetzlich abstrakt vorgegeben. Im Einzelfall ist es von der zuständigen Bodenschutzbehörde unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit zu definieren und zu begründen.

Gefahrenabwehr

Eine Gefahrenabwehr ist in jedem Fall sichergestellt, wenn überall im Grundwasser die in der GWS-VwV angeführten Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS-Werte) eingehalten werden. Somit sind die GFS-Werte als übergeordnetes Sanierungsziel anzusehen. Wenn eine vollständige Gefahrenabwehr aus Gründen der Verhältnismäßigkeit (vgl. Kapitel 4.2.3) nicht in Frage kommt, kann die Behörde ein abweichendes, d. h. weniger strenges Sanierungsziel festlegen (GWS-VwV Nr. 5 Abs. 2). Dabei wird die Behörde das Sanierungsziel soweit anpassen, bis eine Maßnahme verhältnismäßig wird.

Anpassung des Sanierungsziels

Die Anpassung des Sanierungszieles richtet sich insbesondere nach dem Gefährdungspotenzial; Bewertungskriterien können der Tabelle 10 entnommen werden.

Bei einem geringen Gefährdungspotenzial (beispielsweise rückläufiger Fahne, Quelle saniert) eröffnet sich ein relativ großer Spielraum für die Anpassung des Sanierungsziels durch

- die Erhöhung des Sanierungszielwertes,
- die Festlegung bevorzugter Sanierungsbereiche und/oder
- die Unterteilung der Schadstofffahne in Bereiche mit unterschiedlichen Sanierungszielen.

Ist das Gefährdungspotenzial „hoch“ (beispielsweise Trinkwassergewinnung oder Raumluft betroffen), können hohe Anforderungen gestellt werden. Als Sanierungsziel gilt i. d. R. die vollständige Beseitigung des Schadens, bis die GFS-Werte allerorts eingehalten werden.

Sicherung, MNA

Findet sich auch bei Anpassung des Sanierungszieles keine verhältnismäßige Maßnahme, können Sicherungsmaßnahmen und MNA zugelassen werden (vgl. Kapitel 4.1).

Tab. 10: Ableitung des Gefährdungspotenzials im Einzelfall (vgl. Abb. 3)

Kriterien	Gefährdungspotenzial		
	niedrig		hoch
Prognose Fahnenentwicklung	stark rückläufig	stationär oder rückläufig	expandierend
Mobilität	geringe	mittlere	hohe
Biologische Abbaubarkeit	sehr guter Abbau	langsamer oder guter Abbau	schlechter bzw. kein Abbau
Hydrochemisches Milieu	ungünstig für Schadstoffausbreitung	kein Einfluss auf Schadstoffausbreitung	günstig für Schadstoffausbreitung
Ausbreitung in tiefere GW-Stockwerke	nein		ja
Gefährdung weiterer Schutzgüter (beispielsweise Mensch, Grundwasser, Oberflächengewässer, Ökosysteme)	nein	teilweise	ja
Trinkwassergewinnung	nein		ja
Quellsanierung	erfolgt	teilweise	nein
	geringere Anforderungen		höhere Anforderungen

Sanierungszielwerte

In der Regel werden Sanierungsziele durch Sanierungszielwerte konkretisiert, beispielsweise als Konzentrations- oder als Frachtwerte, die dauerhaft zu unterschreiten sind.

Sanierungsbescheid

Beispiel für einen Sanierungsbescheid:

„Der Sanierungszielwert wird für die Summe der leichtflüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffe (LHKW) auf 50 µg/l festgelegt. Die Grundwassersanierung ist an den im Sanierungsplan bezeichneten Sanierungsbrunnen im bevorzugten Sanierungsbereich, dargestellt durch die rote Linie in der Anlage x des Sanierungsplans, solange zu betreiben, bis der Sanierungszielwert dauerhaft unterschritten

wird. Der Sanierungserfolg der dauerhaften Unterschreitung wird dabei an den im Sanierungsplan nachfolgend genannten Grundwasseraufschlüssen bestimmt. Eine dauerhafte Unterschreitung tritt ein, wenn der Sanierungszielwert an mindestens 3 aufeinanderfolgenden Messungen, welche ein hydraulisches Jahr widerspiegeln, unterschritten wird⁷.“

Wenn im Sanierungsverlauf der Sanierungszielwert nicht dauerhaft erreicht werden kann, stellt sich die Frage, ob die laufende Maßnahme noch verhältnismäßig ist. Die Beantwortung der Frage setzt eine Bewertung des bis dahin durchgeführten Sanierungsverlaufs voraus. Eine diesbezügliche Öffnungsklausel kann im Sanierungsbescheid mit aufgenommen werden:

Öffnungsklausel

Beispiel für eine Öffnungsklausel im Bescheid:

„Werden während des Sanierungsverlaufs neue relevante Erkenntnisse gewonnen oder tritt eine Stagnation ein, kann die Verhältnismäßigkeit der Maßnahmen erneut geprüft werden. Hierzu ist ein Prüfbericht zur Verhältnismäßigkeit, wie im Handbuch Altlasten, Band 3, Teil 7 (4. Auflage) unter Kapitel 4.3.3 beschrieben, der Behörde zur Prüfung vorzulegen.“

4.2.3 Verhältnismäßigkeitsprüfung

Grundsatz der Verhältnismäßigkeit

Der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit ist ein aus dem Verfassungsrecht abgeleiteter Maßstab, der besagt, dass ein Eingriff erforderlich, geeignet und angemessen sein muss. Er gilt für alle Eingriffe im öffentlichen Recht, so auch im Bodenschutz- und Wasserrecht. Bei der Sanierung von Grundwasserverunreinigungen ist die Verhältnismäßigkeit zu Beginn (Sanierungsziel), während (Betrieb) und am Ende der Maßnahme (bei Einstellung ohne Erreichung des Sanierungsziels) zu prüfen.

Verhältnismäßigkeit im BBodSchG

Verweise auf die Verhältnismäßigkeit finden sich im Bundes-Bodenschutzgesetz insbesondere in § 4 Abs. 3 S. 3 (Stufung der Maßnahme gestaffelt nach Verhältnismäßigkeit) und in § 4 Abs. 5 S.1 (Verhältnismäßigkeitsprinzip). Die amtliche Begründung zum Bodenschutzrecht zu § 4 Abs. 3 führt aus, dass die Abstufung der einzelnen Sanierungsmaßnahmen (Dekontaminations- und Sicherungsmaßnahmen sowie Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen, vgl. § 2 Abs. 7 und 8 BBodSchG) sicherstellt, dass die Kosten der Sanierung in einem vernünftigen Verhältnis zum Nutzen stehen [40].

Da weitere ermessenslenkende Regelungen fehlen, haben die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaften Wasser (LAWA) und Bodenschutz (LABO) [8] sowie die Verwaltungen einiger Bundesländer Entscheidungshilfen erstellt [33, 34, 37].

hessische Regelungen

In Hessen werden die Anforderungen zur Erfassung, Bewertung und Sanierung von Grundwasserverunreinigungen nach Wasserrecht in der gleichnamigen Verwaltungsvorschrift (GWS-VwV) konkretisiert [1]. Die Sanierung wird durch Nr. 5 der GWS-VwV ausdrücklich dahingehend eingeschränkt, dass die erforderlichen Maßnahmen verhältnismäßig sein müssen.

⁷ Das Monitoring der Nachsorge ist in einer weiteren Nebenbestimmung zu regeln.

drei Elemente der Verhältnismäßigkeit

Die Prüfung der Verhältnismäßigkeit umfasst drei Schritte:

- **Geeignetheit:**
Die Maßnahme ist geeignet, wenn sie erwarten lässt, dass damit das Ziel erreicht oder die Zielerreichung zumindest gefördert wird („Schritt in die richtige Richtung“).
- **Erforderlichkeit:**
Die Maßnahme ist erforderlich, wenn keine andere, ebenso wirksame, aber den Sanierungspflichtigen weniger belastende (mildere) Maßnahme zur Verfügung steht.
- **Angemessenheit:**
Die Angemessenheit (Verhältnismäßigkeit im engeren Sinne) verlangt, dass der ermittelte Aufwand einer Maßnahme in einem vertretbaren Verhältnis zum bezweckten Erfolg steht⁸. Die Kosten oder die sonstigen mit einer Sanierungsmaßnahme verbundenen Folgen dürfen den Sanierungspflichtigen im Verhältnis zu dem damit zu erreichenden Rechtsgüterschutz nicht unangemessen belasten. Für diese Abwägung kommt es auf die Wertigkeit des Rechtsgutes, das Ausmaß des eingetretenen oder drohenden Schadens, den Grad der Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts und den Zeit- und Problemdruck an. Ähnlich kostenintensive/aufwändige Grundwassersanierungsmaßnahmen können als Indiz für die Angemessenheit in vergleichbaren Fällen herangezogen werden.

finanzielle Aspekte

Zu welchem genauen Maß an (finanzieller) Anstrengung die Verantwortlichen verpflichtet sind, um den Schaden zu beheben bzw. um weitere Gefahren abzuwehren, ist bisher weder gesetzlich noch richterrechtlich vollständig bestimmt worden. Das Bundesverfassungsgericht hat jedoch die verfassungsrechtlichen Anforderungen an die Grenzen der Zustandsverantwortlichkeit des Grundstückseigentümers für Altlastensanierungen benannt⁹ [39].

4.2.4 Behördliche Entscheidung über Art und Umfang der notwendigen Maßnahme

Bei der Ermessensentscheidung der Behörde über Art und Umfang einer Grundwassersanierung, festgelegt durch das Sanierungsziel, ist der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit zu beachten.

In dieser Arbeitshilfe wird mit dem „Prüfschema zur Entscheidung über eine Grundwassersanierung“ (Abb. 3, Seite 26) eine Hilfestellung für die Entscheidung gegeben, „ob“ saniert werden muss.

Verhältnismäßigkeit bei mittleren GW-Verunreinigungen

Danach ist die Sanierung großer schädlicher Grundwasserverunreinigungen i. d. R. verhältnismäßig. Bei mittleren schädlichen Grundwasserverunreinigungen ist eine Sanierung i. d. R. dann verhältnismäßig, wenn eine „ungünstige Tendenz“ vorliegt, beispielsweise wenn eine Ausbreitung der Schadstoffe in tiefere Grundwasserleiter zu befürchten ist (Abb. 3). Eine Ausnahme von der Regel ist unter anderem gegeben, wenn der angestrebte Umweltnutzen (sauberes Grundwasser) in deutlichem Missverhältnis zum Aufwand (Kosten) für den Verantwortlichen steht.

Ausgangspunkt für die Festlegung, „wie“ zu sanieren ist (Bestimmung von Art und Umfang der Sanierungsmaßnahme), können folgende Aspekte sein:

⁸ Bei der Frage der Verhältnismäßigkeit im engeren Sinne räumt das Bundesverfassungsgericht staatlichen Organen dadurch einen Bewertungs- und Ermessensspielraum ein, dass es einen Verstoß gegen das Gebot der Verhältnismäßigkeit im engeren Sinne nur bei deutlicher Unangemessenheit annimmt [38].

⁹ Ist die Kostenbelastung wegen fehlender Zumutbarkeit von Verfassungen wegen begrenzt und stehen andere Verantwortliche für die Gefahrenabwehr nicht zur Verfügung, wird die Vollzugsbehörde über die Begrenzung der Kostenbelastung des Zustandsverantwortlichen entscheiden. Gegebenenfalls kann auch eine Übertragung der Maßnahme an den Träger der Altlastensanierung erfolgen (§ 12 Abs. 1 HAAltBodSchG).

Kosten bei Pump&Treat-Maßnahmen

Die hessischen Vollzugsbehörden beauftragen unter bestimmten Voraussetzungen die HIM-ASG als Trägerin der Altlastensanierung mit Grundwassersanierungsmaßnahmen (§ 12 HAltBodSchG), siehe Anhang 9.

Auswertung von Praxisfällen

Von 1990 bis Ende 2016 wurden vom Land Hessen bei 38 Grundwassersanierungsmaßnahmen (Pump&Treat) Mittel in Höhe von rund 83,4 Mio. € investiert. Bei diesen Maßnahmen wird regelmäßig von der Behörde geprüft, ob der Umweltnutzen den erwarteten finanziellen Aufwand rechtfertigt. Die ermittelten Preise geben eine Orientierung zum Verhältnis von Kosten und Wirksamkeit.

In der vorliegenden 4. Auflage wurden 36 Grundwassersanierungen zum Stand Jahresende 2022 ausgewertet.

Kosten pro kg Schadstoff

Für die Abreinigung eines Kilogramms Schadstoff liegt der Median bei rund 3 200 €/kg. Das 0,75-Quantil liegt bei rund 7 000 €/kg (siehe Anhang 9).

In der überwiegenden Zahl der ausgewerteten Fälle traten LHKW auf, so dass diese Schadstoffgruppe gesondert betrachtet wurde. Für die Abreinigung eines Kilogramms LHKW liegt der Median bei rund 3 500 €/kg. Das 0,75-Quantil liegt bei rund 7 900 €/kg (siehe Anhang 9).

Im Rahmen der Sanierungsuntersuchung können die vorgenannten Preise Gutachtern eine gewisse Orientierung bei der Auswahl und Darstellung der in Betracht kommenden Sanierungsmaßnahmen geben, zum Beispiel bei der Kostenschätzung sowie bei der Ermittlung des Verhältnisses von Kosten und Wirksamkeit nach § 16 Abs. 2 der BBodSchV.

Weitere Aspekte bei der Auswahlentscheidung

Kosten der vollständigen Schadensbeseitigung

Da nach der GWS-VwV zunächst immer die vollständige Beseitigung der schädlichen Grundwasserverunreinigung geboten ist, soll auch diese Variante im Rahmen der Sanierungsuntersuchung/Variantenstudie betrachtet und kostenmäßig abgeschätzt werden.

Sanierung von Fahnenbereichen

Bei nach dieser Arbeitshilfe als „groß“ eingestuften schädlichen Grundwasserverunreinigungen stellt sich häufig die Frage, in welchen Fahnenbereichen eine Sanierung verhältnismäßig ist. Es ist davon auszugehen, dass in Fahnenbereichen, in denen eine „große“ Fracht (s. Tab. 6, Seite 20) gefördert werden kann, eine Sanierung nahezu immer verhältnismäßig ist.

Wirtschaftliche Leistungsfähigkeit

Leistungsfähigkeit des Pflichtigen

Die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Verantwortlichen ist für die Festlegung des konkreten Sanierungsziels unbeachtlich. Das Sanierungsziel und der Umfang der Maßnahmen sind grundsätzlich ohne Ansehung der persönlichen Verhältnisse der Verantwortlichen zu bestimmen.

Solange das Kosten-Nutzen-Verhältnis nach Beurteilung der vorgenannten Aspekte „stimmt“, ist im Ergebnis eine Anordnung auch dann verhältnismäßig, wenn sie deutliche Einkommens- und Vermögenseinbußen für die Verantwortlichen zur Folge hat. Dies kann bedeuten, dass im Falle einer Vollstreckung lediglich die Pfändungsfreigrenzen zu beachten sind.

Störerauswahl

Die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit ist jedoch im Rahmen der Störerauswahl zu überprüfen, um festzustellen, ob der Adressat eines Verwaltungsaktes voraussichtlich in der Lage ist, die Gefahr effektiv, d. h. schnell und gründlich, abzuwehren. Bei mehreren Störern wird sich die Vollzugsbehörde oftmals an den leistungsfähigsten Verantwortlichen halten. Ist hingegen nur ein Verantwortlicher vorhanden, dann entbindet ihn sein wirtschaftliches Unvermögen nicht von seiner Verantwortlichkeit.

Ein gegen einen mittellosen Störer gerichteter Verwaltungsakt wäre weder nichtig im Sinne von § 44 HVwVfG noch unzumutbar und wäre deshalb nicht rechtswidrig. Es dürfte sich dabei nämlich nicht um einen Fall objektiver Unmöglichkeit handeln. Der Verwaltungsakt wäre aber gegebenenfalls unzweckmäßig, weswegen die Bodenschutzbehörde unter dem Gesichtspunkt der Opportunität von seinem Erlass absehen kann.

Im Hinblick auf eine nachträgliche Erstattung von Ersatzvornahmekosten sollte eine Grundverfügung aber auch dann erlassen werden, wenn die darin konkretisierte Pflicht vom Verantwortlichen nicht erfüllt werden kann.

vertragliche Abrede

In einer finanziellen Gesamtschau kann es sich für die zuständige Vollzugsbehörde als günstiger erweisen, anstelle eines pflichtenkonkretisierenden Verwaltungsaktes, für dessen Erfüllung im Vollstreckungsfall nur wenige Aktiva zur Verfügung stehen, eine vertragliche Abrede zu treffen, wenn dies zu einer höheren Deckung der Kosten gegenüber einer unmittelbaren Ausführung bzw. Ersatzvornahme führt. Mit einer vertraglichen Abrede können bestimmte Anteile vom Einkommen/Umsatz abgeschöpft werden.

Haftungsbegrenzung

Die Vermögenseinbuße ist von den Verantwortlichen nur dann nicht hinzunehmen, wenn sie sich, wie im Fall des zustandsverantwortlichen Grundstückseigentümers, auf eine Haftungsbegrenzung berufen können, die aus Art. 14 Abs. 1 GG abzuleiten ist [39].

4.3 Anpassung, Optimierung und Beendigung von Grundwassersanierungen

4.3.1 Grenzen der Kostenbetrachtung in Hessen zur Bewertung der Angemessenheit von Sanierungsmaßnahmen

Eine Grundwassersanierung kann i. d. R. beendet werden, wenn der Sanierungszielwert dauerhaft unterschritten wird. Jedoch zeigen langjährige Erfahrungen aus ca. 500 hessischen Grundwassersanierungen, dass oftmals die ursprünglich festgelegten Sanierungszielwerte in absehbarer Zeit nicht erreicht werden.

Kosten von vielen Faktoren abhängig

In Kapitel 4.2.4 werden Aspekte für die Festlegung des Sanierungsumfanges gegeben. Unter anderen werden Kosten für die Entfernung von Schadstoffen (Kosten/kg Schadstoff) genannt. Aufgrund der begrenzten Datengrundlage von nur 36 Fällen ist eine Differenzierung der Kosten nach weiteren relevanten Kriterien nicht sinnvoll möglich gewesen. Die gesonderte Betrachtung von LHKW zeigt jedoch bereits, dass die Kos-

ten vom betrachteten Schadstoff abhängen. Neben dem abzureinigenden Schadstoff können sich beispielsweise auch die geologische Situation sowie die betroffenen Gefährdungspfade auf die Kostenentwicklung eines Projektes auswirken. Eine pauschale Anwendung der genannten Preise zur Ermittlung eines angemessenen Verhältnisses von Kosten und Wirksamkeit ist somit nicht möglich.

Kostenschwankungen

Für die in Hessen durchgeführte Betrachtung wurden die Gesamtkosten für Erkundung, Planung, Ausschreibung und den Betrieb der jeweiligen Grundwassersanierung herangezogen (Anhang 9). Die Auswertung von Einzelfällen zeigt, dass die Kosten im Projektverlauf von 26 Jahren erheblich schwanken können. Beispielsweise können Anlagenertüchtigungen, Reparaturen oder Optimierungsmaßnahmen mit hohen Investitionskosten sich zeitweise auf das Verhältnis von Kosten und Wirksamkeit auswirken.

Die in dieser Arbeitshilfe angegebenen Kosten zur Abreinigung eines Kilogramms Schadstoff können somit nur orientierend zur Bewertung der Verhältnismäßigkeit einer Sanierung verwendet werden. Fachtechnische Fragen, weshalb ein ungünstiges Verhältnis zwischen Kosten und Wirksamkeit besteht, müssen bei der Prüfung beantwortet werden.

Kostenbetrachtung bei Sicherungen nicht anwendbar

Weiterhin bleibt zu berücksichtigen, dass die angegebenen Kosten nicht zur Bewertung für hydraulische Sicherungsmaßnahmen (ohne saniertes Schadenszentrum) herangezogen werden können. Das Ziel von Sicherungsmaßnahmen ist in der Regel die Verhinderung einer Schadstoffausbreitung, sodass hier nicht die Kosten, sondern die Folgen der Abschaltung auf andere Schutzgüter entscheidend die Verhältnismäßigkeit der Maßnahme bestimmen.

Offenlegung der Kosten

Damit von behördlicher Seite geprüft werden kann, ob die Kostenentwicklung tatsächlich als Indiz für die Unverhältnismäßigkeit einer Maßnahme heranzuziehen ist, sind eine umfassende und nachvollziehbare Kostenoffenlegung sowie Abschätzung zukünftiger Kosten durch den Sanierungspflichtigen notwendig. Trägt der Pflichtige diesen Anforderungen nicht angemessen Rechnung, so kann er sich auch nicht auf ein etwaiges Missverhältnis von Aufwand und Nutzen berufen. Das Gefährdungspotenzial (s. Tab. 10) der Grundwasserkontamination ist bei der Verhältnismäßigkeitsprüfung immer zu berücksichtigen.

4.3.2 Algorithmus „Eintritt in die erneute Prüfung der Verhältnismäßigkeit“

erneute Prüfung der Verhältnismäßigkeit

Wie in Kapitel 4.2.3 ausgeführt, gilt der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit nicht nur zu Beginn einer Grundwassersanierung. Für jede Grundwassersanierung stellt sich im fortschreitenden Betriebsverlauf die Frage, ob die Maßnahme noch verhältnismäßig ist. Für langlaufende Pump&Treat-Maßnahmen kann nach Auswertung bisheriger Erfahrungen (siehe Anhang 9) ein Algorithmus Anwendung finden, der erkennen lässt, ob eine erneute Prüfung der Verhältnismäßigkeit angezeigt ist.

Der Algorithmus basiert auf der Menge (=Masse) der Schadstoffe, die im zu prüfenden Sanierungsfall aus dem Grundwasser ausgetragen werden.

Erläuterung des Algorithmus

Die Anwendung des Algorithmus erfolgt in drei Schritten: Zunächst wird für alle Betriebsjahre die jeweilige Austragsmenge ($\text{Austragsmenge}_{\text{jährlich}}$) ermittelt¹⁰. Im nächsten Schritt wird für alle Betriebsjahre die jeweilige kumulative Austragsmenge ($\text{Austragsmenge}_{\text{kumulativ}}$) bestimmt¹¹. Im dritten Schritt wird berechnet, um wieviel Prozent die kumulative Austragsmenge im Vergleich zum Vorjahr zugenommen hat ($\text{Austragsmenge}_{\text{kumulativ, Zunahme\%}}$).

$$\text{Austragsmenge}_{\text{kumulativ, Zunahme\%}} = \frac{\text{Austragsmenge}_{\text{kumulativ, jeweiliges Jahr}} - \text{Austragsmenge}_{\text{kumulativ, Vorjahr}}}{\text{Austragsmenge}_{\text{kumulativ, Vorjahr}}} * 100 \%$$

3%-Kriterium

Als Maßstab für den Eintritt in die erneute Prüfung der Verhältnismäßigkeit gilt: Unterschreitet die $\text{Austragsmenge}_{\text{kumulativ, Zunahme\%}}$ den Wert von 3%, so ist die erneute Prüfung der Verhältnismäßigkeit geboten. Dieser Wert wurde aus den Erfahrungen der mit Landesmitteln finanzierten Sanierungsfälle empirisch abgeleitet. Eine Unterschreitung des 3%-Kriteriums ist ein Indikator für die nachlassende Effizienz einer Sanierung.

Tab. 11: Algorithmus Prüfung der Verhältnismäßigkeit

Algorithmus	Einstufung
$\text{Austragsmenge}_{\text{kumulativ, Zunahme\%}} \geq 3 \%$	Prüfung der Verhältnismäßigkeit i. d. R. noch nicht geboten
$\text{Austragsmenge}_{\text{kumulativ, Zunahme\%}} < 3 \%$	Prüfung der Verhältnismäßigkeit i. d. R. geboten

Auswertetool „Sanierungsverlauf“

Für die erforderlichen Berechnungen steht das EXCEL-Auswertetool „Sanierungsverlauf“ zur Verfügung (Anhang 7). Als Eingangsdaten werden die Schadstoffkonzentrationen im Zulauf zur Sanierungsanlage (Jahresdurchschnitt) und die Wasserfördermenge (Jahresmenge) benötigt. Die nachfolgende Tabelle zeigt ein Berechnungsbeispiel:

Berechnung für Betriebsjahr 2017: $(752-735) / 735 * 100 \% = 2,3 \%$
 Der Wert von 2,3 ist kleiner als 3 %, daher sollte eine Prüfung der Verhältnismäßigkeit erfolgen. Es ist ein Prüfbericht zu erstellen, wie in Kapitel 4.3.3 dargelegt.

Tab. 12: Berechnungsbeispiel

Betriebsjahr	2001	...	2014	2015	2016	2017
kumulative Austragsmenge ($\text{Austragsmenge}_{\text{kumulativ}}$)	45 kg	...	690 kg	715 kg	735 kg	752 kg
Zunahme der Austragsmenge _{kumulativ} im Vergleich zum Vorjahr ($\text{Austragsmenge}_{\text{kumulativ, Zunahme\%}}$)	3,6 %	2,8 %	2,3 %

¹⁰ Die Austragsmenge_{jährlich} wird üblicherweise in der Einheit [kg/a] angegeben. Sie ist mit einer Schadstofffracht vergleichbar, die in Kapitel 3 dieses Handbuches in der Einheit [g/d] verwendet wird.

¹¹ Die kumulative Austragsmenge wird üblicherweise in der Einheit [kg] angegeben.

Ergebnis der Verhältnismäßig- keitsprüfung

Das Ergebnis der Prüfung kann dazu führen, dass die Sanierung

- unverändert weiter zu betreiben ist,
- zu optimieren ist,
- mit einer anderen Sanierungsmethode weiter zu führen ist,
- vorläufig beendet werden kann (beispielsweise Abschaltversuch) oder
- endgültig beendet werden kann.

4.3.3 Prüfbericht Verhältnismäßigkeit bei laufenden Pump&Treat-Maßnahmen

Nachfolgend wird ein Prüfungsablauf des Verhältnismäßigkeitsgrundsatzes beschrieben. Andere Abläufe sind denkbar. Zu prüfen sind immer Geeignetheit, Erforderlichkeit und Angemessenheit.

Aufbau des Prüfberichts

Unter den folgenden Punkten A und B werden relevante Daten zusammengestellt, die zur Prüfung und Bewertung der Verhältnismäßigkeit benötigt werden. Der Gutachter erarbeitet einen Vorschlag, welche Maßnahmen unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit aus seiner Sicht sinnvoll sind. Unter C erfolgt die eigentliche Verhältnismäßigkeitsprüfung, die Aufgabe der Bodenschutzbehörde ist. Sie trifft die abschließende Entscheidung. Unter D werden mögliche Konsequenzen aus der Prüfung aufgezeigt.

Auswertetool Sanierungsverlauf mit Diagrammen

Kommt eine Grundwassersanierung auf den Prüfstand, weil die Zunahme der kumulativen Austragsmenge im letzten Betriebsjahr nach Kapitel 4.3.2 kleiner als 3 % ist, sind die nachfolgenden Punkte abzuarbeiten. Bei Eingabe von Daten in das EXCEL-Auswertetool „Sanierungsverlauf“ werden automatisch die nachfolgend zitierten Diagramme 1 bis 9 erzeugt (vgl. Anhang 8)

A Bestandsaufnahme

A.1 Einleitung (Diagramme 1 und 2)

Anlass, Autor, Aktenzeichen, 3%-Kriterium

A.2 Sanierung von Boden und Grundwasser

Beschreibung der Boden- und Grundwassersanierung; Mengenbetrachtung; Darlegung, inwieweit die Schadstoffquelle ganz oder teilweise dekontaminiert und um welchen prozentualen Anteil die Schadstoffmasse reduziert wurde. Beschreibung der Pump&Treat-Maßnahme. Beschreibung des Sanierungsziels und Ausführungen, ob es sich um eine Sanierung oder eine Sicherung handelt. Darlegung und Kommentierung der angefallenen Kosten.

A.3 Gefährdungspotenzial

Textliche Ausführungen zur horizontalen und vertikalen Ausdehnung der Kontamination (Gehalte, Konzentrationen und Zusammensetzung) im Boden, in der Bodenluft und im Grundwasser. Ausführungen, ob und mit welchen Ergebnissen tiefere Grundwasserleiter erkundet wurden. Darstellung, ob alle Eintragsherde erkannt und die Sanierungsbrunnen richtig positioniert wurden.

A.4 Optimierungsmöglichkeiten
Darlegung der Optimierungsmaßnahmen während des bisherigen Betriebes. Die Sanierungseffizienz ist ein wichtiger Aspekt bei der Prüfung des Optimierungspotenzials. Beantwortung der Frage, ob die Sanierung mit optimaler Förderrate betrieben wurde. Erörterung, ob die gewählte Sanierungsmethode nach dem aktuellen Kenntnisstand noch geeignet ist. Beschreibung der geprüften alternativen Sanierungsmethoden.

A.5 Schutzgutbetrachtung, Gefahrenlage
Schutzgutbetrachtung; Beschreibung der besonderen aktuellen Gefahrenlage (beispielsweise unbelasteter GWL im Abstrom, biotische Umwelt in benachbarten Ökosystemen, Trinkwassergewinnung, Brauchwassergewinnung, Oberflächengewässer, unbelastete tiefere GWL, ...) und deren Veränderungen im Sanierungsverlauf (auch absehbare Änderungen).

Darlegung der Besonderheiten auf dem Standort (biologischer Abbau, Rückdiffusion von Schadstoffen aus bindigen Schichten, Mobilisierung infolge GW-Anstieg, ...) oder im Umfeld (beispielsweise geogene oder anthropogene Anstrombelastung).

Darlegung der Konsequenzen einer Einstellung der Sanierungs-/Sicherungsmaßnahme im Hinblick auf die betroffenen Schutzgüter (z.B. Vergrößerung der Schadstofffahne, Grundwassernutzungen, Anstieg von Innenraumluftkonzentrationen). Erörterung, ob bei Beendigung der Maßnahme Schutzgüter erneut gefährdet werden.

Bei Grundwasserverunreinigungen mit Schadstoffgemischen (beispielsweise Altablagerungen): Beschreibung ob und mit welchem Ergebnis ökotoxikologische Untersuchungen nach dem Handbuch Altlasten Band 3, Teil 8 „Ökotoxikologische Verfahren als Bewertungshilfe bei Altlastenverfahren“ [11] angewendet wurden.

B Auswertung des Sanierungsverlaufes

B.1 Konzentration, Tendenz (Diagramme 3 und 4)
Auswertung und Interpretation der Diagramme

B.2 Sanierungserfolg (Diagramm 5)
Auswertung und Interpretation des Diagramms

B.3 Jährliche Austragsmenge (Diagramme 6 und 7)
Auswertung und Interpretation der Diagramme

B.4 Kumulative Austragsmenge (Diagramm 8)
Auswertung und Interpretation des Diagramms

B.5 Kosten (Diagramm 9)
Auswertung und Interpretation des Diagramms

B.6 Restzeitprognose
Die Restzeitprognose kann auf mehreren Wegen erfolgen.

- *Die Restzeitprognose kann zeichnerisch durch Weiterführung der Austragskurve oder rechnerisch durch Bildung einer Trendlinie erfolgen (siehe Anhang 8 Diagramme 4, 7 und 8).*
- *Existiert ein Grundwasser- und Schadstofftransportmodell, kann dies zur Berechnung der Zeitdauer bis zum Erreichen des Sanierungsziels herangezogen werden.*
- *Weiterhin kann anhand einer Abschätzung des noch vorhandenen Schadstoffinventars (Menge im Boden und Grundwasser) und der jährlichen Austragsmenge eine Restlaufzeit prognostiziert werden.*

C Prüfung der Verhältnismäßigkeit

Im Rahmen der Verhältnismäßigkeitsprüfung erfolgen Prüfungen der Geeignetheit, Erforderlichkeit und Angemessenheit. Hierzu erfolgt eine Auswertung der unter A dargestellten Bestandsaufnahme und des in B bewerteten Sanierungsverlaufs.

- C.1 Geeignetheit und Erforderlichkeit (s. Kap. 4.2.3 und die beispielhafte Anwendung in Kap. 5)
- C.2 Angemessenheit: Hierzu erfolgt eine Abwägung hinsichtlich Aufwand und Erfolg auf der Grundlage der unter A und B durchgeführten Erhebungen. Unter Zuhilfenahme der Diagrammauswertungen nach Anhang 8 erfolgt eine Pro-Contra-Diskussion (siehe beispielhafte Anwendung in Kapitel 5). Dabei ist u. a. zu beachten:
- Sanierungsmaßnahmen sind i. d. R. unverhältnismäßig, wenn der Aufwand einer Maßnahme nicht mehr in einem vertretbaren Verhältnis zum bezweckten Erfolg steht (deutliche Unangemessenheit).
 - Sicherung
Führt der Pflichtige eine Abstromsicherung anstelle einer Bodendekontamination (Quellensanierung) durch, sind insbesondere die Ergebnisse der Restzeitprognose zu bewerten. Mit der Entscheidung zur Abstromsicherung statt der Quellensanierung ist der Pflichtige das Risiko höherer Gesamtkosten eingegangen.

D Ergebnisdarstellung

- D.1 Unveränderter Weiterbetrieb
Die Prüfung ergibt, dass ein Betrieb der Pump&Treat-Maßnahme ohne Änderung der Einstellungen weiterhin verhältnismäßig ist.
- D.2 Optimierung der Pump&Treat-Maßnahme
Die Prüfung ergibt, dass durch Optimierung der Pump&Treat-Maßnahme erreicht werden kann, dass diese wieder verhältnismäßig ist.
- D.3 Wechsel der Sanierungsmaßnahme
Die Prüfung ergibt, dass ein weiterer Betrieb der Pump&Treat-Maßnahme unverhältnismäßig ist und daher eingestellt wird. Die Prüfung hat weiterhin ergeben, dass eine Fortführung mit alternativen Technologien oder eine Überwachung der natürlichen Abbau- und Rückhalteprozessen im Grundwasser verhältnismäßig wäre.

D.4 Vorläufiges Abschalten

Die Prüfung ergibt, dass über die Verhältnismäßigkeit eines Weiterbetriebes noch nicht abschließend entschieden werden kann. Hierzu soll ein sogenannter Abschaltversuch durchgeführt werden, bei dem die Veränderung der Konzentrationen mindestens in einem hydrologischen Jahr und die Veränderung der Schadensausbreitung ermittelt und bewertet werden. Voraussetzung: Die Gefahrenlage, die sich durch ein Abschalten ergeben kann, muss geprüft und beherrschbar sein.

D.5 Einstellung der Pump&Treat-Maßnahme

Die Prüfung ergibt, dass ein weiterer Betrieb der Pump&Treat-Maßnahme unverhältnismäßig ist und daher eingestellt wird. Andere Sanierungsmaßnahmen sind ebenfalls unverhältnismäßig. Die verbleibende Gefahr ist zu beschreiben (Restrisiko). Die Nachkontrolle ist zu regeln.

4.3.4 Optimierung von Grundwassersanierungen

Wenn sich abzeichnet, dass eine laufende Grundwassersanierung in bisheriger Weise nicht sinnvoll weitergeführt werden kann, stellt sich die Frage ihrer Optimierung.

Optimierungsmöglichkeiten

In der Literatur gibt es Darstellungen zur Sanierungsoptimierung von Pump&Treat-Maßnahmen bei LHKW-Schadensfällen, vgl. [17]. Nachfolgend werden Beispiele und Hinweise über Möglichkeiten zur Optimierung gegeben:

- Ersatz des angewendeten Sanierungsverfahrens durch ein zum Prüfzeitpunkt besser geeignetes bzw. wirtschaftlicheres Sanierungsverfahren (beispielsweise Umstellung einer Pump&Treat-Maßnahme auf eine biologische In-situ-Sanierung bei organischen Schadstoffen),
- Ersatz von Anlagenkomponenten durch solche mit geringeren Betriebskosten (beispielsweise Austausch einer Strippanlage gegen einen Aktivkohlefilter),
- Optimierung von Anlagenkomponenten (beispielsweise Dosierung von Chemikalien, Luft-Wasser-Verhältnis bei Strippanlagen),
- Reduzierung der zu behandelnden Grundwassermenge (Optimierung der Grundwasserentnahme, beispielsweise auf Grundlage eines numerischen Strömungsmodells oder nach Auswertung von Pumpversuchen),
- Optimierung des begleitenden Monitoring-Programms zur Überwachung des Grundwassers (beispielsweise Probennahmestellen, Probennahmeintervalle, Analysenumfang).

5 Fallbeispiel

Beispiel einer langlaufenden GW-Sanierung

Das folgende Fallbeispiel „XYZ-Fabrik“ beschreibt die erneute Verhältnismäßigkeitsprüfung einer langlaufenden Pump&Treat-Maßnahme am Beispiel eines realen Verfahrens einer hessischen Bodenschutzbehörde. Zur Anwendung kommen der „Prüfbericht Verhältnismäßigkeit bei laufenden Pump&Treat-Maßnahmen“ (Kapitel 4.3.3) und das EXCEL-Auswertetool „Sanierungsverlauf“ (Anhang 7). Die im Folgenden genannten Diagramme 1 bis 9 sind im Anhang 8 dargestellt und erläutert.

Das Fallbeispiel wurde in der 3. Auflage (2018) erstmals beschrieben. Für die vorliegende 4. Auflage (2025), also nach weiteren sieben Jahren Vollzugserfahrung, gilt: Es besteht kein grundlegender Überarbeitungsbedarf, lediglich Anpassungen hinsichtlich der aktualisierten Geringfügigkeitsschwellenwerte und der Kosten langlaufender Sanierungen wurden durchgeführt. Die genannten Jahreszahlen der 3. Auflage bleiben unverändert.

Prüfbericht Verhältnismäßigkeit bei laufenden Pump&Treat-Maßnahmen

A Bestandsaufnahme

A.1 Einleitung (Diagramme 1 und 2)

Anlass der Erstellung des Prüfberichtes sind stagnierende Schadstoffkonzentrationen und Austragsmengen der langlaufenden Pump&Treat-Maßnahme. Die Anwendung des im Handbuch Altlasten Band 3 Teil 7 beschriebenen EXCEL-Auswertetools „Sanierungsverlauf“ zeigt, dass die prozentuale Zunahme der kumulativen Austragsmenge seit 2002 regelmäßig kleiner als 3% ist und für das Jahr 2016 nur noch 0,6% beträgt. Das im Kapitel 4.3.2 des Handbuchs beschriebene 3%-Kriterium ist somit deutlich unterschritten und eine erneute Prüfung der Verhältnismäßigkeit ist geboten.

3%-Kriterium unterschritten

A.2 Sanierung von Boden und Grundwasser

Bei der XYZ-Fabrik handelt es sich um einen metallverarbeitenden Betrieb, in dessen Betriebszeitraum (1952 bis 1989) Schleif-, Hydrauliköle und Entfettungsmittel in den Untergrund eingetragen wurden. Die Grundwasserverunreinigung wurde hauptsächlich durch leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW) verursacht.

LHKW

Zunächst wurde 1992 eine Bodensanierung durch Baggeraushub und Großlochbohrungen durchgeführt. Hierdurch wurden ca. 190 kg LHKW ausgetragen. Mittels Bodenluftabsaugung wurde ein weiterer Austrag in Höhe von 10 kg erreicht, so dass insgesamt ca. 200 kg LHKW aus dem Boden entfernt wurden.

Bodensanierung

Zur Grundwassersanierung wird eine Pump&Treat-Maßnahme (Wasserentnahme und Wasseraufbereitung durch eine Kombination aus Enteisung, Nassoxidation und Desorption) durchgeführt. Die Sanierung des Grundwassers startete 1993. Die Betriebszeit beträgt seither 8553 Tage oder rund 23 Jahre. In dieser Zeit sind insgesamt 1 939 000 m³ Grundwasser gefördert, aufbereitet und 703 kg LHKW entnommen worden. Zusätzlich wurden weitere 35 kg LHKW durch eine benachbarte Bauwasserhaltung mit hoher Entnahmemenge ausgetragen. Rechnet man die über die Boden- und Bodenluftsanierung ausgebrachten Schad-

Grundwasser- und Bodenluftsanierung

stoffmengen von 200 kg hinzu, ergibt sich insgesamt ein LHKW-Gesamtaustrag für Boden und Grundwasser von rund 938 kg.

Ausbreitung der Schadstofffahne

A.3 Gefährdungspotenzial

Das Sanierungsgebiet liegt im Bereich des Oberrheingrabens mit seinen grundwasserführenden quartären und pliozänen Lockergesteinen. Im Bereich der XYZ-Fabrik ist der oberflächennahe Grundwasserleiter mit LHKW verunreinigt, dagegen sind im darunter liegenden Grundwasserleiter LHKW nicht nachweisbar. Die Schadstofffahne hat sich also nicht vertikal ausgebreitet.

Die Grundwasseroberfläche des oberflächennahen Grundwasserstockwerkes liegt bei ca. 2–3 m unter Gelände und zeigt ein sehr geringes Gefälle von ca. 0,03 Prozent. Der Durchlässigkeitsbeiwert des oberflächennahen Grundwasserleiters beträgt ca. $8,8 \times 10^{-4}$ m/s. Aufgrund der niedrigen Abstandsgeschwindigkeit hat die schädliche Grundwasserverunreinigung eine nur geringe horizontale Ausdehnung und beschränkt sich weitgehend auf das ehemalige Werksgelände.

Einstufung der Schadstofffahne

Die Entwicklung der Fahne ist rückläufig. Zum jetzigen Zeitpunkt ist der vorliegende Grundwasserschaden nach Handbuch Altlasten Band Teil 3 Teil 7 als „große schädliche Grundwasserverunreinigung“ eingestuft (mittlere „gelöste Menge“ und große „Fracht“).

Raumluft nicht relevant

Die Bodenluftsanierung wurde im Vorfeld der Aushubmaßnahmen durchgeführt. Der Wirkungspfad Boden-Raumluft ist am Standort nicht relevant. Das nach der Bodensanierung verbliebene Gefährdungspotenzial wird unter B.6 im Rahmen der Restzeitprognose näher beschrieben.

A.4 Optimierungsmöglichkeiten

Optimierungsmöglichkeiten ausgeschöpft

Im Verlauf der Sanierung wurden verschiedene Optimierungsmaßnahmen zur Anpassung der Sanierung an geänderte Verhältnisse und zur Effizienzsteigerung durchgeführt, die in Sanierungsberichten beschrieben sind. Die Förderraten wurden jährlich optimiert.

A.5 Schutzgutbetrachtung, Gefahrenlage

keine Grundwassernutzung

Der Standort liegt außerhalb von Wasserschutzgebieten. Oberflächengewässer sind durch den Schadensfall ebenfalls nicht betroffen. Eine Nutzung des Grundwassers außerhalb des ehemaligen Werksgeländes ist nicht gefährdet, weil die horizontale Ausdehnung der Schadstofffahne kleiner als das ehemalige Werksgelände ist.

Für den Fall, dass die Grundwassersanierung beendet wird, ist aufgrund der langjährigen Konzentrationsentwicklung in den Förderbrunnen (s. A.1), der geringen Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers und der festgestellten biologischen Abbauprozesse zu erwarten, dass die LHKW-Fahne innerhalb des ehemaligen Betriebsgeländes bleiben wird. Eine Verunreinigung unbelasteter Grundwasserleiter im Abstrom ist nicht zu erwarten. Die biotische Umwelt in benachbarten Ökosystemen ist nicht gefährdet.

B Auswertung des Sanierungsverlaufes

B.1 Konzentration, Tendenz (Diagramme 3 und 4)

**LHKW-Konzentration
stagniert**

Diagramm 3 nach Anhang 8 gibt den Konzentrationsverlauf über die gesamte Laufzeit wieder. Zu Beginn der Sanierung betrug die LHKW-Konzentration im Jahresdurchschnitt ca. 2000 µg/l. In den ersten Betriebsjahren ist ein rascher Konzentrationsrückgang zu beobachten. Seit 1999 liegt die LHKW-Konzentration im Grundwasser kontinuierlich unter 250 µg/l und beträgt Ende 2016 noch 85 µg/l. Die Kurve nähert sich asymptotisch einer LHKW-Konzentration von ca. 70 µg/l an.

Mit 85 µg/l ist die Konzentration noch um den Faktor 3,5 höher als der Sanierungszielwert von 25 µg/l. Diagramm 4 zeigt den Sanierungsverlauf im Konzentrationsbereich unterhalb von 500 µg/l LHKW. Weiterhin ist der Sanierungszielwert von 25 µg/l dargestellt. Die Kurve zeigt den für Pump&Treat-Maßnahmen typischen asymptotischen Verlauf. Entsprechend der Verlaufsentwicklung ist im Fallbeispiel nicht zu erwarten, dass das Sanierungsziel in absehbarer Zeit erreicht wird.

B.2 Sanierungserfolg (Diagramm 5)

**Sanierungserfolg
über 95 %**

Im Jahr 2003 wird nach einer Betriebszeit von rund 10 Jahren ein Sanierungserfolg in Höhe von 90 % erreicht. Im Jahr 2016 beträgt der Sanierungserfolg nach rund 23 Jahren Betriebszeit 97 %.

B.3 Jährliche Austragsmenge (Diagramme 6 und 7)

**jährlicher LHKW-
Austrag noch hoch**

Die jährliche Austragsmenge ist von 22 kg/a auf 4,3 kg/a zurückgegangen (Diagramm 6) und stellt immer noch eine große Fracht dar (Tab. 6 in Kap. 3.2.2). Eine mittlere Fracht von 3,65 kg/a (dies entspricht 10 g/d) würde nach Diagramm 7 tendenziell erst im Jahr 2020 eintreten.

B.4 Kumulative Austragsmenge (Diagramm 8)

**bisher 700 kg LHKW
ausgetragen**

In Diagramm 8 ist die kumulative Austragsmenge im Sanierungsverlauf dargestellt. Ende 2016, nach rund 23 Betriebsjahren beträgt die kumulative LHKW-Austragsmenge aus dem Grundwasser insgesamt 703 kg. Der Verlauf der kumulativen Austragsmenge nähert sich asymptotisch dem Wertebereich von 730 bis 750 kg. Ein Großteil der Schadstoffe (703 kg) wurde bereits ausgetragen. Die Prognose der kumulativen Austragsmenge ergibt, dass auch bei einem langjährigen Weiterbetrieb der Sanierung kein weiterer maßgeblicher Austrag mehr erzielt werden kann.

B.5 Kosten (Diagramm 9)

**Kosten pro kg LHKW
in anderen Fällen
vergleichbar hoch**

Bei der Grundwassersanierung der XYZ-Fabrik wurden in den letzten 23 Jahren insgesamt rund 3,7 Mio. € aufgewendet, um 703 kg LHKW-Schadstoffe dem Grundwasser zu entnehmen. Über die Gesamtlaufzeit ergibt sich somit ein durchschnittlicher Betrag von ca. 5200 € pro kg LHKW.

Ein Vergleich mit den 25 LHKW-Grundwassersanierungen des Landes Hessen (s. Anhang 9) zeigt, dass sich die Kosten im Falle der XYZ-Fabrik unauffällig einfügen. Für diese LHKW-Grundwassersanierungen liegt der Median bei 3 500 €/kg und das 0,75-Quantil bei 7 900 €/kg. Hinweise auf unverhältnismäßig hohe Kosten pro kg Schadstoff sind im Falle der XYZ-Fabrik nicht erkennbar.

jährliche Kosten steigen langsam

Zusätzlich zeigt Diagramm 9 die Entwicklung der Gesamtkosten pro kg Schadstoff im jährlichen Sanierungsverlauf. Der allgemeine Trend über die gesamte Betriebslaufzeit ist steigend. In den letzten 5 Betriebsjahren betragen die Kosten pro kg Schadstoff im Fallbeispiel durchschnittlich 11 400 €/kg und sind in etwa konstant. Ein Indiz für eine unverhältnismäßige Sanierung wäre dann gegeben, wenn die Kosten stark angestiegen wären und somit die Kurve deutlich steiler geworden wäre. Dies wäre beispielsweise der Fall, wenn bei gleichbleibenden laufenden Kosten immer weniger Schadstoffe abgereinigt würden.

B.6 Restzeitprognose

Schlufflinse als Sekundärquelle

Restzeitprognose und Laufzeit: Die restliche Laufzeit wird im vorliegenden Fall anhand einer Abschätzung des noch vorhandenen Schadstoffinventars (Menge) und der jährlichen Austragsmenge prognostiziert. Dabei wirken Teile der trotz Bodensanierung verbliebenen Schlufflinse weiterhin als Schadstoffquelle; Schadstoffe werden hauptsächlich durch Diffusionsprozesse in das Grundwasser abgegeben.

In einem Gutachten ist ausführlich beschrieben, dass in der verbliebenen Schlufflinse grob abgeschätzt 30 kg Schadstoff zu erwarten sind. Vergleicht man die Abschätzung des Schadstoffinventars von 30 kg mit der bisher ausgetragenen Schadstoffmenge im Grundwasser von 703 kg, dann zeigt sich, dass das verbliebene Schadstoffinventar nur noch einen Anteil von ca. 5 % der Gesamtmenge einnimmt. Es ist zu erwarten, dass das Schadstoffinventar der Schlufflinse diffusionskontrolliert nur langsam in den Aquifer abgegeben werden wird. Bei Annahme einer jährlichen Austragsmenge von ca. 3 kg pro Jahr wäre dafür eine Restzeit von mindestens 10 Jahren zu prognostizieren.

Gefährdung nimmt ab

Restzeitprognose und Gefährdung: Zu prüfen ist, inwieweit die angenommene Fracht von 3 kg/a das Schutzgut Grundwasser gefährdet. Hierfür wird der Algorithmus des Handbuchs Altlasten Band 3 Teil 7 zur Einstufung der „Fracht im Grundwasser“ herangezogen. Die Grenze zwischen einer mittleren und einer großen jährlichen Fracht liegt bei 3,65 kg/a bzw. 10 g/d. Die prognostizierte jährliche Fracht von 3 kg entspricht somit einer „mittleren“ Fracht. Weitere Beurteilungskriterien nach Abbildung 3 des Handbuchs weisen eine „günstige Tendenz“ aus: Die Fahnenentwicklung ist rückläufig, am Standort sind die Milieubedingungen für einen biologischen LHKW-Abbau vergleichsweise günstig, und es findet keine Ausbreitung in tiefere Grundwasserleiter statt. Eine prognostizierte Schadstofffracht dieser Größenordnung bei vergleichbarer Schutzgutbetroffenheit würde in einem „Neufall“ keinen Sanierungsbedarf auslösen.

Sanierungsziel erst in 10 Jahren erreichbar

Restzeitprognose und Sanierungserfolg: Um den Sanierungserfolg von 97 % auf 100 % zu steigern, also das Sanierungsziel zu erreichen, wäre die bisherige Betriebslaufzeit von 23 Jahren um mindestens 10 Jahre zu verlängern.

hohe Kosten bis zum Erreichen des Sanierungsziels

Restzeitprognose und Kosten: In den letzten 5 Jahren lagen die jährlichen Kosten der Sanierung bei durchschnittlich 57 000 €, bei einem 10-jährigen Weiterbetriebes somit bei 570 000 €. Bisher wurden für die Sanierung rund 3,2 Mio. € ausgegeben. Die Steigerung des Sanierungserfolges von 97 % auf 100 % würde mithin einen monetären Mehraufwand von 17% erfordern.

C Prüfung der Verhältnismäßigkeit

Im Rahmen der Verhältnismäßigkeitsprüfung erfolgen Prüfungen der Geeignetheit, Erforderlichkeit und Angemessenheit (s. Kap. 4.2.3). Hierzu erfolgt eine Auswertung der unter A dargestellten Bestandsaufnahme und des in B bewerteten Sanierungsverlaufs.

C.1 Geeignetheit und Erforderlichkeit

Sanierungsverfahren immer noch geeignet

Bei dieser Pump&Treat-Maßnahme werden immer noch relevante Mengen LHKW ausgetragen (tägliche Fracht 12 Gramm). Auch bei einem Weiterbetrieb ist davon auszugehen, dass weitere relevante Mengen ausgetragen werden können. Die Maßnahme ist daher nach wie vor geeignet, da sie erwarten lässt, dass damit das Sanierungsziel erreicht oder die Zielerreichung zumindest gefördert wird.

Wechsel des Sanierungsverfahrens nicht sinnvoll

Ein Wechsel auf ein anderes Sanierungsverfahren ist nicht sinnvoll. Einerseits ist die Infrastruktur der Pump&Treat-Maßnahme vorhanden. Andererseits wurde im Zuge der unter A.4 beschriebenen Optimierungsmaßnahmen ermittelt, dass alternative Sanierungsverfahren nicht erfolgsversprechender sind. Damit steht auch keine andere, ebenso wirksame, aber den Sanierungspflichtigen weniger belastende (mildere) Maßnahme zur Verfügung. Die Pump&Treat-Maßnahme ist daher immer noch erforderlich.

C.2 Angemessenheit

Pro-Contra-Diskussion

Hierzu erfolgt eine Abwägung hinsichtlich Aufwand und Erfolg auf der Grundlage der unter A und B durchgeführten Erhebungen. Unter Zuhilfenahme der Diagrammauswertungen nach Anhang 8 erfolgt eine Pro-Contra-Diskussion.

Argumente für die Beendigung der Maßnahme

Hinweise, dass ein Weiterbetrieb der beschriebenen Sanierungsmaßnahme **unverhältnismäßig** ist, sind:

- A.1 Die prozentuale Zunahme der kumulativen Austragsmenge liegt seit 2002 und damit seit vielen Jahren unter dem 3%-Kriterium (Diagramm 2).
- A.3 Die Schadstofffahne ist abgegrenzt, beschränkt sich auf den oberen Grundwasserleiter und ist tendenziell rückläufig.
- A.4 Im Verlauf der Sanierung wurden verschiedene Optimierungsmaßnahmen zur Anpassung der Sanierung an geänderte Verhältnisse und zur Effizienzsteigerung durchgeführt; die Förderraten wurden jährlich optimiert. Weitere Optimierungsmaßnahmen erscheinen nicht sinnvoll.

- A.5 Schutzgutbetrachtung: Weder Wasserschutzgebiete noch Oberflächengewässer sind betroffen. Eine Nutzung des Grundwassers ist außerhalb des ehemaligen Werksgeländes nicht gefährdet. Die biotische Umwelt benachbarter Ökosysteme ist nicht gefährdet. Eine Verunreinigung von Grundwasserleitern im Abstrom ist nicht zu besorgen.

Prognose Betriebseinstellung: Für den Fall, dass die Wasseraufbereitung abgeschaltet werden würde, ist aufgrund der langjährigen Konzentrationsentwicklung in den Förderbrunnen kein signifikanter Wiederanstieg außerhalb des ehemaligen Betriebsgeländes zu erwarten.

- B.1 In den letzten vier Betriebsjahren ist die Abnahme der LHKW-Konzentrationen gering. Die Kurve nähert sich asymptotisch einem Wert von 80 µg/l an (Diagramm 4). Mit 85 µg/l ist die Konzentration um den Faktor 3,5 höher als der Sanierungszielwert von 25 µg/l; im Vergleich zu anderen Fällen ist dieser Faktor als moderat anzusehen.
- B.2 Im Jahr 2016 beträgt der Sanierungserfolg nach rund 23 Jahren Betriebszeit bereits 97 % (Diagramm 5).
- B.3 Die jährliche Austragsmenge im letzten Betriebsjahr liegt bei 4,3 kg/a (Diagramm 6) und wird in „absehbarer Zeit“ den Wert von 3,65 kg/a bzw. 10 g/d voraussichtlich unterschreiten, so dass gemäß Kapitel 3.2.2 eine mittlere Fracht vorliegen würde. Die Tendenz der Austragsmenge ist langsam fallend.
- B.4 Der Verlauf der kumulativen Austragsmenge nähert sich asymptotisch dem Wertebereich von 730 bis 750 kg an. Ein Großteil der Schadstoffe (703 kg) wurde bereits ausgetragen (Diagramm 8). Die Prognose der kumulativen Austragsmenge ergibt, dass auch bei einem langjährigen Weiterbetrieb der Sanierung kein weiterer maßgeblicher Austrag mehr erzielt werden kann.
- B.6 Die Schadstoffquelle ist weitgehend saniert, mittels Boden-, Bodenluft- und Grundwassersanierung wurden 938 kg LHKW entfernt. Das restliche Schadstoffinventar im Boden wurde mit ca. 30 Kilogramm LHKW abgeschätzt. Die LHKW würden in den nächsten 10 bis 20 Jahren bei jährlichen Frachten von rund 3 kg in das Schutzgut Wasser diffundieren. Ein Schadstoffinventar dieser Größenordnung bei vergleichbarer Schutzgutbetroffenheit würde in einem „Neufall“ keinen Sanierungsbedarf auslösen.

Restzeitprognose und Sanierungserfolg: Um den Sanierungserfolg von 97 % auf 100 % zu steigern, wäre die bisherige Betriebslaufzeit von 23 Jahren um weitere 43 % (10 Jahre) bzw. 85 % (20 Jahre) zu verlängern.

Restzeitprognose und Kosten: Die Kosten eines 10-jährigen Weiterbetriebes lägen somit bei 570 000 €, die eines 20-jährigen Weiterbetriebes bei 1 140 000 €. Bisher wurden für die Sanierung rund 3,2 Mio. € verausgabt. Die Steigerung des Sanierungserfolges von 97% auf 100 % würde einen monetären Mehraufwand von 17 % bis 35 % erfordern.

Argumente für die Weiterführung der Maßnahme

Hinweise, dass die beschriebene Sanierungsmaßnahme noch immer **verhältnismäßig** ist, sind:

B.5 Die Kosten pro kg Schadstoff (Gesamtlaufzeit) liegen zwischen dem 0,75-Quantil und dem Median der ausgewerteten hessischen LHKW-Fälle, also im Rahmen des Üblichen (Diagramm 9).

Die Kosten pro kg Schadstoff waren in den letzten fünf Betriebsjahren etwa gleichbleibend.

Im Falle der XYZ-Fabrik kostete die Sanierung von einem Kubikmeter Grundwasser (3,7 Mio. € / 1 939 000 m³) insgesamt 1,90 €.

D Ergebnisdarstellung

Einstellung des Pumpbetriebes

Argumente für die Beendigung der Maßnahme überwiegen

Die Angemessenheit verlangt, dass der ermittelte Aufwand einer Maßnahme in einem vertretbaren Verhältnis zum bezweckten Erfolg steht. Bei der XYZ-Fabrik überwiegen die Hinweise, dass der Aufwand für einen Weiterbetrieb der Wasseraufbereitungsanlage in keinem vertretbaren Verhältnis zum bezweckten Sanierungserfolg steht. Die Schutzgutbetrachtung A.5 zeigt, dass Wasserschutzgebiete, Oberflächengewässer, der zweite Grundwasserleiter und sonstige Grundwassernutzungen nicht betroffen sind und die Entwicklung der Schadstofffahne darüber hinaus rückläufig ist. Das verbliebene Schadstoffinventar und die Schadstoffkonzentrationen würde bei vergleichbarer Schutzgutbetroffenheit in einem „Neufall“ keinen Sanierungsbedarf auslösen. In Anbetracht einer solchen Gefahrenlage stünde der Aufwand für die Steigerung des Sanierungserfolges von 97 % auf 100 % mit einem monetären Mehraufwand von 17 %–35 % in keinem vertretbaren Verhältnis zum bezweckten Erfolg.

Beendigung der Sanierung unter Auflagen

Es wird vorgeschlagen, den Betrieb der Wasseraufbereitung einzustellen und die Anlage für weitere 12 Monate betriebsbereit zu halten, damit bei einem Anstieg der Schadstoffkonzentrationen die Grundwassersanierung wieder aufgenommen werden kann.

Weiterhin wird vorgeschlagen, das bisherige jährliche Monitoringprogramm für 3 weitere Jahre fortzuführen. Dabei sollte das monatliche Programm durch ein vierteljährliches Programm ersetzt werden und nach Vorlage der Überwachungsergebnisse des ersten Jahres sollte entschieden werden, ob die Wasseraufbereitungsanlage weiterhin betriebsbereit gehalten werden muss.

Anhänge

- Anhang 1 Kriterien zur Beurteilung einer schädlichen Grundwasserverunreinigung
- Anhang 2 Geringfügigkeitsschwellenwerte der GWS-VwV
- Anhang 3 EXCEL-Auswertetool „Mengen und Frachten“
- Anhang 4 Erläuterungen zum EXCEL-Auswertetool „Mengen und Frachten“
- Anhang 5 Hinweise zur Anordnung von Stromröhren
- Anhang 6 Grafische Auswertung von 35 Praxisfällen
- Anhang 7 EXCEL-Auswertetool „Sanierungsverlauf“
- Anhang 8 Erläuterungen zum EXCEL-Auswertetool „Sanierungsverlauf“
- Anhang 9 Datenauswertung von 38 Pump&Treat-Grundwasserverunreinigungen
- Anhang 10 Stand der Technik bei der Grundwasserreinigung
- Anhang 11 Einleitung von Hilfsstoffen in das Grundwasser bei In-situ-Sanierungen
- Anhang 12 Ableitung von Grundwasser - Wiederversickerung, Einleitung in Abwasseranlagen und oberirdische Gewässer

- Anhang 13 Positionierung der Sanierungsbrunnen und Pumpversuchsmessstellen
- Anhang 14 Dimensionierung von Pumpversuchsmessstellen und Sanierungsbrunnen
- Anhang 15 Hinweise zur Festlegung der Sanierungsbereiche
- Anhang 16 Fallkonstellationen zu Sanierungsbereichen

Anhang 1 Kriterien zur Beurteilung einer schädlichen Grundwasserverunreinigung

Für die Beurteilung, ob eine schädliche Grundwasserverunreinigung vorliegt, gelten die Kriterien nach Nr. 4 der GWS-VwV. In der nachfolgenden Tabelle sind diese Kriterien aufgeführt und erläutert. Querverweise auf die vorliegende Arbeitshilfe stehen in der rechten Spalte. Die Tabelle bildet damit das Bindeglied zwischen der GWS-VwV und der vorliegenden Arbeitshilfe.

Kriterien nach Nr. 4 der GWS-VwV	Erläuterungen	Verweis auf Arbeitshilfe
Gefährlichkeit der Schadstoffe		
Geringfügigkeits-schwellenwert (GFS)	<p>Je geringer der GFS eines Schadstoffes ist, desto höher ist die Gefährlichkeit des Stoffes für das Grundwasser.</p> <p>Die Höhe des GFS hat Auswirkungen auf die Bewertung der</p> <ul style="list-style-type: none"> – im Grundwasser vorhandenen Schadstoffmenge – Schadstofffracht im Grundwasser. <p>Zur Bewertung von Schadstoffmenge und -fracht werden diese mit dem Zahlenwert der GFS verglichen. Damit können Schadensfälle mit unterschiedlichen Schadstoffen (und unterschiedlichen GFS) vergleichbar bewertet werden.</p>	<p>Kap. 3.2.1</p> <p>Kap. 3.2.2</p>
Abbaubarkeit	<p>Schadstoffe, die unter den im Grundwasser vorliegenden Milieubedingungen gut und vollständig abbaubar sind, verursachen eine vergleichsweise geringe Grundwassergefährdung.</p> <p>Die Abbaubarkeit eines Schadstoffes hat Auswirkungen insbesondere auf die</p> <ul style="list-style-type: none"> – im Grundwasser vorhandene Schadstoffmenge – Schadstofffracht im Grundwasser (im weiteren Abstrom) – Fahnenlänge und -entwicklung. 	<p>Kap. 3.2.1</p> <p>Kap. 3.2.2</p> <p>Kap. 3.3</p>
Beweglichkeit (Mobilität)	<p>Je mobiler ein Schadstoff ist, desto leichter erfolgen die Schadstofffreisetzung aus der Quelle und die Ausbreitung im Grundwasser.</p> <p>Die Mobilität eines Schadstoffes ist abhängig insbesondere von der <i>Wasserlöslichkeit</i> und <i>Sorptionsfähigkeit</i> des Stoffes. <i>Lösevermittler</i> können die Beweglichkeit erhöhen.</p> <p>Die Mobilität eines Schadstoffes hat Auswirkungen insbesondere auf die</p> <ul style="list-style-type: none"> – im Grundwasser vorhandene Schadstoffmenge – Schadstofffracht im Grundwasser – Fahnenlänge und -entwicklung 	<p>Kap. 3.2.1</p> <p>Kap. 3.2.2</p> <p>Kap. 3.3</p>

Kriterien nach Nr. 4 der GWS-VwV	Erläuterungen	Verweis auf Arbeitshilfe
----------------------------------	---------------	--------------------------

Räumliche Verteilung und Menge der Schadstoffe

im Grundwasser vorhandene Schadstoffmenge	Je höher die zum aktuellen Zeitpunkt im Grundwasser gelöste Schadstoffmenge ist, desto eher liegt eine schädliche Grundwasserverunreinigung vor.	Kap. 3.2.1
im Boden vorhandene Schadstoffmenge	<p>Kontaminierte Böden stellen eine Schadstoffquelle dar und können eine lang anhaltende Schadstofffreisetzung in das Grundwasser verursachen.</p> <p>Die Schadstoffmenge im Boden ist bei der Verhältnismäßigkeitsprüfung einer Sanierungsmaßnahme relevant, nicht jedoch bei der Bewertung, ob aktuell eine schädliche Grundwasserverunreinigung vorliegt.</p> <p>Hinweis: Wenn bei einer Grundwassersanierung die Konzentrationswerte sich einer Asymptote annähern und diese deutlich über den Oberstrombelastungen liegen, ist die Ursache in der Boden- und Bodenluftbelastung zu suchen. Eine wirtschaftliche Grundwassersanierung setzt immer die Kenntnis der Boden- und Bodenluftbelastungen voraus. Die Schadstoffentfernung aus diesen Medien ist fast immer kostengünstiger als die Entfernung der Schadstoffe aus dem Grundwasser.</p>	Kap. 4
Schadstofffracht im Grundwasser	Je höher die Schadstofffracht im Abstrom einer Schadstoffquelle ist, desto eher liegt eine schädliche Grundwasserverunreinigung vor. Eine etwaige Schadstofffracht im Zustrom ist zu berücksichtigen (Fracht aus Schadensherd = Fracht im Abstrom minus Fracht im Zustrom)	Kap. 3.2.2

Örtliche Verhältnisse

hydrogeologische Gegebenheiten	<p>Zu den hydrogeologischen Gegebenheiten zählen insbesondere die Durchlässigkeit des Grundwasserleiters, der hydraulische Gradient, die Porosität sowie der Ton- und C_{org}-Gehalt des Grundwasserleiters.</p> <p>Die hydrogeologischen Gegebenheiten sind zu berücksichtigen bei den Kriterien</p> <ul style="list-style-type: none"> - im Grundwasser vorhandene Schadstoffmenge - Schadstofffracht im Grundwasser. 	Kap. 3.2.1 Kap. 3.2.2
Schutzbedürftigkeit	<p>Grundwasser ist grundsätzlich schutzbedürftig.</p> <p>Eine besondere Schutzbedürftigkeit des Grundwassers liegt insbesondere bei der Nutzung von Grundwasser vor.</p> <p>Die Schutzbedürftigkeit des Grundwassers ist relevant für die Eilbedürftigkeit bzw. Prioritätensetzung von evtl. erforderlichen Sanierungen, nicht jedoch bei der Bewertung, ob aktuell eine schädliche Grundwasserverunreinigung vorliegt.</p>	
eingetretene oder zu erwartende Beeinträchtigungen	<p>Liegt im Grundwasser eine Schadstofffahne vor, ist eine Beeinträchtigung des Grundwassers als Lebensraum und Ressource eingetreten.</p> <p>Die zukünftige Entwicklung der Fahne (expandierend/stationär/rückläufig) hat Auswirkungen auf die zu erwartende Beeinträchtigung des Grundwassers. Bei expandierender Fahne werden bislang unbelastete Grundwasserbereiche beeinträchtigt.</p>	Kap. 3.3
bereits vorhandene Belastungen	<p>Bei geogenen Vorbelastungen können die GFS entsprechend erhöht werden.</p> <p>Anthropogene Vorbelastungen sind bei der Entscheidung, ob eine schädliche Grundwasserverunreinigung verursacht wurde, zu berücksichtigen.</p>	

Anhang 2 Geringfügigkeitsschwellenwerte der GWS-VwV

Die LAWA hat im Jahr 2016 ihren Bericht aus dem Jahr 2004 überarbeitet und dabei auch die GFS-Werte einiger Stoffe aktualisiert. In der 3. Auflage fanden jedoch noch die bisherigen GFS-Werte aus 2004 Anwendung, da den neuen GFS-Werten (2016) eine teilweise veränderte Ableitungsmethodik zu Grunde liegt. Vor einer Verknüpfung dieser Arbeitshilfe mit den neuen GFS sollten zunächst Folgen und Kompatibilität umfassend geprüft werden.

Der Aktualisierung der GWS-VwV (2021) mit den LAWA Geringfügigkeitsschwellenwerten (2016) ging daher eine umfangreiche Prüfung und intensive fachliche Diskussion voraus. U.a. haben das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) und die Regierungspräsidien bestätigt, dass sich für den größten Teil der hessischen Altlastenfälle keine bzw. keine wesentlichen Änderungen infolge der neuen GFS ergeben werden (HMUKLV, 17. Dezember 2020, III8 – 89a 14 –GWS-VwV). Daher erfolgt mit dieser 4. Auflage nun gleichzeitig auch eine Anpassung an die neuen GFS-Werte.

Die nachfolgenden Tabellen mit Geringfügigkeitsschwellenwerten für örtlich begrenzte Grundwasserverunreinigungen sind der GWS-VwV (2021) Anhang 1, Teil 1 bis 7 entnommen:

Teil 1: Anorganische Parameter

Anorganische Parameter	Geringfügigkeitsschwellenwert [$\mu\text{g/l}$]
Antimon (Sb)	5
Arsen (As)	3,2
Barium (Ba)	175
Blei (Pb)	1,2
Bor (B)	180
Cadmium (Cd)	0,3
Chrom (Cr)	3,4
Kobalt (Co)	2,0
Kupfer (Cu)	5,4
Molybdän (Mo)	35
Nickel (Ni)	7
Quecksilber (Hg)	0,1
Selen (Se)	3
Thallium (Tl)	0,2
Vanadium (V)	4
Zink (Zn)	60
Cyanid (CN ⁻) ¹	10
Fluorid (F ⁻)	900

¹ Liegt kein freies Cyanid vor, gilt als Geringfügigkeitsschwellenwert der Wert der Trinkwasserverordnung von 50 $\mu\text{g/l}$

Teil 2: Organische Parameter

Organische Parameter	Geringfügigkeitsschwellenwert [$\mu\text{g/l}$]
PAK, gesamt ¹	0,2
Anthracen	0,1
Benzo[a]pyren, Dibenzo[a,h]anthracen	jeweils 0,01
Summe Benzo[b]fluoranthen und Benzo[k]fluoranthen	0,03
Summe Benzo[ghi]perylen und Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,002
Fluoranthen	0,1
Summe Naphthalin und Methylnaphthaline	2
LHKW, gesamt ²	20
Summe Tri- und Tetrachlorethen	10
1,2-Dibromethan	0,02
1,2-Dichlorethan	3
Trichlormethan	2,5
Chlorethen (Vinylchlorid)	0,5
Polychlorierte Biphenyle (PCB), gesamt ³	0,01 (0,0005 jeweils für PCB-28, -52, -101, -138, -153, -180)
Kohlenwasserstoffe	100
Benzol und alkylierte Benzole, gesamt ⁴ (BTEX)	20
Benzol	1
Etheroxygenate (insb. MTBE, ETBE und TAME), gesamt	5, davon max. 2,5 $\mu\text{g/l}$ ETBE
Phenol	8
Nonylphenol	0,3
Chlorphenole, gesamt	1
Pentachlorphenol	0,1
Chlorbenzole, gesamt	1
Trichlorbenzole	0,4
Pentachlorbenzol	0,007
Hexachlorbenzol	0,01
Epichlorhydrin	0,1

¹ PAK, gesamt: Summe von 15 Einzelsubstanzen gemäß Liste der US Environmental Protection Agency (EPA) ohne Naphthalin; gegebenenfalls unter Berücksichtigung weiterer maßgebender PAK (zum Beispiel aromatische Heterozyklen wie Chinoline).

² LHKW, gesamt: Leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe, das heißt Summe der halogenierten C1- und C2-Kohlenwasserstoffe; einschließlich Trihalogenmethane. Die Geringfügigkeitsschwellenwerte zu Tri- und Tetrachlorethen, Dichlorethan und Chlorethen sind zusätzlich einzuhalten.

³ PCB, gesamt: Summe der 6 Kongenere (PCB-28, -52, -101, -138, -153, -180) multipliziert mit Faktor 5.

⁴ Einkernige Aromaten (BTEX), gesamt: Summe der Aromaten mit kurzer Seitenkette bis C3.

Teil 3: Pflanzenschutzmittel, Biozide Wirkstoffe

Pflanzenschutzmittel und Biozidprodukte (PSMBP)	Geringfügigkeitsschwellenwert [$\mu\text{g/l}$]
PSMBP, gesamt	0,5
PSMBP Einzelstoff	jeweils 0,1
Azinphos-methyl	0,01
Chlordan	0,003
Cyclodien-pestizide, gesamt (Aldrin, Dieldrin, Endrin und Isodrin)	0,01
Dichlorvos	0,0006
Disulfoton	0,004
Diuron	0,1
Endosulfan	0,005
Etrimfos	0,004
Fenitrothion	0,009
Fenthion	0,004
Heptachlor, Heptachlorepoxyd	jeweils 0,03
Hexazinon	0,07
Malathion, Parathion-methyl	jeweils 0,02
Mevinphos	0,0002
Parathion-ethyl	0,005
Pentachlorphenol	0,1
Phoxim	0,008
Triazophos, Trifluralin	jeweils 0,03
Trichlorphon	0,002

Teil 4: Zinnorganische Verbindungen

Zinnorganische Verbindungen	Geringfügigkeitsschwellenwert [$\mu\text{g/l}$]
Dibutylzinn-Kation	0,01
Tributylzinn-Kation ¹	0,0002
Triphenylzinn-Kation ¹	0,0005

¹ Derzeit steht kein genormtes Verfahren zur Verfügung, dessen untere Anwendungsgrenze niedriger oder gleich dem Geringfügigkeitsschwellenwert ist. Es muss daher auf nicht genormte Verfahren zurückgegriffen werden, die nach den einschlägigen Regeln für Analysenverfahren zu validieren sind.

Teil 5: Sprengstofftypische Verbindungen

Sprengstofftypische Verbindungen	Geringfügigkeitsschwellenwert [$\mu\text{g/l}$]
Nitropenta (PETN)	10
2-Nitrotoluol	1
3-Nitrotoluol	10
4-Nitrotoluol	3
2-Amino-4,6-Dinitrotoluol	0,2
4-Amino-2,6-Dinitrotoluol	0,2
2,4-Dinitrotoluol	0,05
2,6-Dinitrotoluol	0,05
2,4,6-Trinitrotoluol	0,2
Hexogen	1
2,4,6-Trinitrophenol (Pikrinsäure)	0,2
Nitrobenzol	0,1
1,3,5-Trinitrobenzol	8
1,3-Dinitrobenzol	0,3
Hexanitrodiphenylamin (Hexyl)	2
Tetryl	5
Octogen	175

Teil 6: NSO-Heterozyklen

NSO-Heterozyklen	Geringfügigkeitsschwellenwert [$\mu\text{g/l}$]
Acridin	0,08
Benzo[b]thiopen	0,3
Benzofuran	1,8
Benzotriazol und Methylbenzoltriazole	40
Carbazol	0,2
Chinolin	0,01
Cumarin	4,7
Dibenzofuran	0,4
Furan	0,35
2-Hydroxybiphenyl	0,7
Pyridin	0,5
2,3-Dimethylbenzofuran	0,3

Teil 7: Per- und polyfluorierte Chemikalien/Alkylsubstanzen (PFC/PFAS)

Per- und polyfluorierte Chemikalien/Alkylsubstanzen	Geringfügigkeitsschwellenwert [$\mu\text{g}/\text{l}$]
Perfluorbutansäure, PFBA	10
Perfluorhexansäure, PFHxA	6
Perfluoroktansäure, PFOA	0,1
Perfluornonansäure, PFNA	0,06
Perfluorbutansulfonsäure, PFBS	6
Perfluorhexansulfonsäure, PFHxS	0,1
Perfluoroktansulfonsäure, PFOS	0,1

Anhang 3 EXCEL-Auswertetool „Mengen und Frachten“

Dieses EXCEL-Auswertetool ermöglicht die Bestimmung der beiden Bewertungskriterien „Gelöste Menge im Grundwasser“ und „Fracht im Grundwasser“ nach Kapitel 3.2 des Handbuchs.

EXCEL-Auswertetool „Mengen und Frachten“
 Anhang 3 des Handbuchs Altlasten „Arbeitshilfe zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen“, 4. Auflage 2025

Eingabedaten sind gelb hinterlegt
Wichtige Endergebnisse sind blau hinterlegt

Bezeichnung des Schadensfalls					
Schadstoff					
Geringfügigkeitsschwellenwert	GFS	µg/l			
Stromröhre Nr.			①	②	③
Bezeichnung der Stromröhre/Messstelle					Quelle der Daten
Mittlere Konzentration in der Stromröhre	C_{mittel}	µg/l			
Max.-Konzentration in der Stromröhre	C_{max}	µg/l			
Breite der Stromröhre / Fahne	B	m			
Höhe der Stromröhre / Fahne	H	m			
Länge der Stromröhre / Fahne	L	m			
Durchlässigkeitsbeiwert	k_f	m/s			
hydraulischer Gradient	I	-			
nutzbare Porosität	P^*	%			
Abstandsgeschwindigkeit	v_a	m/d	0,0	0,0	0,0

↓

gelöste Menge im Grundwasser	$M_{\text{gelöst}}$	kg	0,00	groß	(Einstufung nach Arbeitshilfe Kap. 3.2.1)
Fracht im Grundwasser	E_{ab}	g/d	0,00	groß	(Einstufung nach Arbeitshilfe Kap. 3.2.2)

Gutachterliche Beurteilung des Sachverhaltes

Das EXCEL-Auswertetool ist unter folgender Adresse abrufbar:

www.hlnug.de/?id=6419

Anhang 4 Erläuterungen zum EXCEL-Auswertetool „Mengen und Frachten“

Die Berechnung der Schadstoffmenge und -fracht mit dem EXCEL-Auswertetool von Anhang 3 basiert auf der Modellvorstellung, dass eine Schadstofffahne in verschiedene Bereiche unterteilt werden kann, die als Stromröhren bezeichnet werden. Das EXCEL-Auswertetool bietet die Möglichkeit, bis zu drei Stromröhren zu berechnen. Hinweise zur Anordnung von Stromröhren gibt Anhang 5.

Bei der Dateneingabe sind die gelb hinterlegten Felder auszufüllen. Mittels der **Tab-Taste** kann das jeweils nächste gelbe Eingabefeld angesteuert werden. Eingabefelder sind:

Bezeichnung des Schadensfalls	Hier sollte ein griffiger Name gewählt werden, um den Wiedererkennungseffekt zu erhöhen.
Schadstoff	beispielsweise „LHKW“ oder „Arsen“
GFS	Geringfügigkeitsschwellenwert der GWS-VwV in der Einheit $\mu\text{g/l}$ (die GFS-Werte sind in Anhang 2 aufgeführt)
Quelle der Daten	Angaben zur Herkunft der Daten, wie beispielsweise Name des Gutachters, Datum, Seite im Gutachten
Gutachterliche Beurteilung des Sachverhaltes	Hier sollte die Qualität der Eingangsdaten beurteilt und die Genauigkeit des Berechnungsergebnisses abgeschätzt werden.

Bei den weiteren Eingabefeldern können bis zu drei Stromröhren gebildet werden. Ist nur eine Stromröhre notwendig (nur eine Messstelle im „nahen Abstrom“ vorhanden, siehe Beispiele A und C in Anhang 5), bleiben die Felder der beiden anderen Stromröhren leer.

Bezeichnung der Stromröhre / Messstelle	Hier kann die Bezeichnung einer Messstelle, die sich „im nahen Abstrom“ befindet, eingegeben werden. In Beispiel B des Anhangs 5 ist es beispielsweise sinnvoll, bei Stromröhre 1 die Bezeichnung „GWM 11“ einzutragen.
Mittlere Konzentration in der Stromröhre	Die mittlere Konzentration [$\mu\text{g/l}$] in der Stromröhre ist anzugeben. Hierzu wird i. d. R. das arithmetische Mittel aus den Messwerten der einzelnen Messstellen einer Stromröhre gebildet. In Beispiel A des Anhangs 5 wird in GWM 1 eine Konzentration von $500 \mu\text{g/l}$ gemessen, in GWM 2 eine Konzentration von $100 \mu\text{g/l}$. Als mittlere Konzentration wird bei Anwendung des arithmetischen Mittels eine mittlere Konzentration von $(500 + 100)/2 = 300 \mu\text{g/l}$ abgeschätzt. Ist in einer Stromröhre nur eine Messstelle vorhanden, ist die Konzentration in dieser Messstelle als mittlere Konzentration anzugeben.
Maximale Konzentration in der Stromröhre	Innerhalb einer Stromröhre ist die Messstelle mit der höchsten Konzentration [$\mu\text{g/l}$] auszuwählen. In Beispiel A des Anhangs 5 ist dies die Konzentration in der GWM 1, also $500 \mu\text{g/l}$.
Breite der Stromröhre / Fahne	Die Breite der Stromröhre richtet sich i. d. R. nach der Breite der Schadstoffquelle und -fahne. Weitere Erläuterungen gibt Anhang 5.

Höhe der Stromröhre / Fahne	Die Höhe einer Stromröhre richtet sich einerseits nach der Grundwassermächtigkeit, andererseits nach der Verfilterung der Messstelle. Weitere Erläuterungen gibt Anhang 5.
Länge der Stromröhre / Fahne	Die Länge einer Stromröhre entspricht der Fahnenlänge. Weitere Erläuterungen gibt Anhang 5.
Durchlässigkeitsbeiwert	Für jede Stromröhre ist der Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s] anzugeben. In Gutachten wird k_f meist in der Exponentialform angegeben, beispielsweise $5 \cdot 10^{-4}$ m/s. Die Schreibweise für die Eingabe in das EXCEL-Blatt ist dann wahlweise 5,0E-04 oder 0,0005.
Hydraulischer Gradient	Für jede Stromröhre ist der hydraulische Gradient (=Grundwassergefälle) anzugeben. Der hydraulische Gradient I hat keine Einheit, er ist als Dezimalzahl anzugeben. Wenn in einem Gutachten das Gefälle in Prozent angegeben ist, muss dieser Wert durch 100 geteilt und in das EXCEL-Blatt eingetragen werden. Beispiel: Ein Gefälle von 0,2 % entspricht 0,002. Wenn in einem Gutachten das Gefälle in Promille (‰) angegeben ist, muss dieser Wert durch 1000 geteilt und in das EXCEL-Blatt eingetragen werden. Beispiel: Ein Gefälle von 3 ‰ entspricht 0,003.
Nutzbare Porosität	Die nutzbare Porosität P^* wird im EXCEL-Blatt in Prozent angegeben. Wenn in einem Gutachten die Porosität als Dezimalzahl, d. h. ohne Einheit, angegeben ist, muss dieser Wert mit 100 multipliziert werden. Beispiel: Eine Porosität von 0,3 entspricht 30 %. Hinweise zur Höhe der nutzbaren Porosität bei Kiesen und Sanden gibt Kapitel 3.2.1.
Abstandsgeschwindigkeit	Die Abstandsgeschwindigkeit v_a ist die Geschwindigkeit des strömenden Grundwassers, sie entspricht der Geschwindigkeit eines idealen Tracers im Grundwasser. Die Abstandsgeschwindigkeit dient als zusätzliche Information, sie wird aus den eingegebenen Daten nach folgender Gleichung errechnet: $v_a = k_f \cdot I \cdot 100 / P^*$. Im EXCEL-Blatt wird v_a in der Einheit m/d angegeben.

Die Berechnungsergebnisse von „gelöste Menge im Grundwasser“ und „Fracht im Grundwasser“ erscheinen in den blau hinterlegten Feldern:

Gelöste Menge im Grundwasser

Die gelösten Mengen [kg] der einzelnen Stromröhren werden addiert.

Fracht im Grundwasser

Die Frachten [g/d] der einzelnen Stromröhren werden addiert.

Die **Einstufung** der berechneten Frachten und Mengen in **groß**, **mittel**, **klein** und **sehr klein** erfolgt automatisch und erscheint im EXCEL-Auswertetool rechts neben den beiden Berechnungsergebnissen. Die fachlichen Grundlagen für die Einstufung sind in den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 näher beschrieben.

Hinweis zur **Genauigkeit** der Ergebnisse: Die mittels des EXCEL-Auswertetools errechnete „gelöste Menge“ und „Fracht“ wird mit ein oder zwei Dezimalstellen hinter dem Komma angegeben. Dies bedeutet nicht, dass die Ermittlung von Menge und Fracht mit dieser Genauigkeit in jedem Fall möglich ist. Die erreichbare Genauigkeit soll im EXCEL-Auswertetool im Eingabefeld „Gutachterliche Beurteilung des Sachverhalts“ diskutiert werden.

Anhang 5 Hinweise zur Anordnung von Stromröhren

Die Berechnung der Schadstoffmenge und -fracht mit dem EXCEL-Auswertetool „Mengen und Frachten“ von Anhang 3 basiert auf der Modellvorstellung, dass eine Schadstofffahne in verschiedene Bereiche unterteilt werden kann, die als Stromröhren¹² bezeichnet werden. In dieser Arbeitshilfe verlaufen die Stromröhren parallel zur GW-Fließrichtung und besitzen einen rechteckigen Querschnitt. Die Stromröhren können sowohl nebeneinander als auch untereinander liegen.

Das EXCEL-Auswertetool (Anhang 3) bietet die Möglichkeit, bis zu drei Stromröhren zu berechnen.

Hinweise zur Anordnung von Stromröhren:

Um die Lage und Abmessungen der Stromröhren festlegen zu können, muss die Schadstofffahne abgegrenzt sein. Hierzu ist eine ausreichende Anzahl von Grundwassermessstellen erforderlich, von denen einige innerhalb und einige außerhalb der Fahne liegen. In den Beispielen A bis D dieses Anhangs sind i. d. R. nur diejenigen Grundwassermessstellen dargestellt, die innerhalb der Fahne liegen.

Unter den vorhandenen Messstellen werden diejenigen ausgewählt (eine oder mehrere), die nahe an der vermuteten Schadensquelle (Ort des Schadstoffeintrags) liegen. Dort ist die Schadstoffkonzentration i. d. R. am höchsten. Die Messstellen können entweder direkt in der vermuteten Schadensquelle liegen oder im Abstrom der Schadensquelle. In dieser Arbeitshilfe werden die beiden Möglichkeiten unter dem Begriff „naher Abstrom“ zusammengefasst.

In Beispiel A liegt GWM 1 im nahen Abstrom, in Beispiel B sind es GWM 11 und GWM 12. Im Beispiel C liegt GWM 21 im nahen Abstrom, in Beispiel D sind es GWM 31 und GWM 32.

Anzahl der Stromröhren: Jede im nahen Abstrom liegende Messstelle ist Ausgangspunkt einer Stromröhre. Gibt es mehrere Messstellen im nahen Abstrom, werden ebenso viele parallel verlaufende Stromröhren gebildet. In den Beispielen B und D liegen jeweils zwei Messstellen im nahen Abstrom, so dass auch zwei Stromröhren gebildet werden.

Die **Breite** der Stromröhre richtet sich i. d. R. nach der Breite der Schadstoffquelle und -fahne. In Beispiel A entspricht die Stromröhren-Breite der vermuteten Fahnenbreite. In Beispiel B liegen zwei Stromröhren vor, so dass die Stromröhren-Breite etwa der halben Fahnenbreite entspricht.

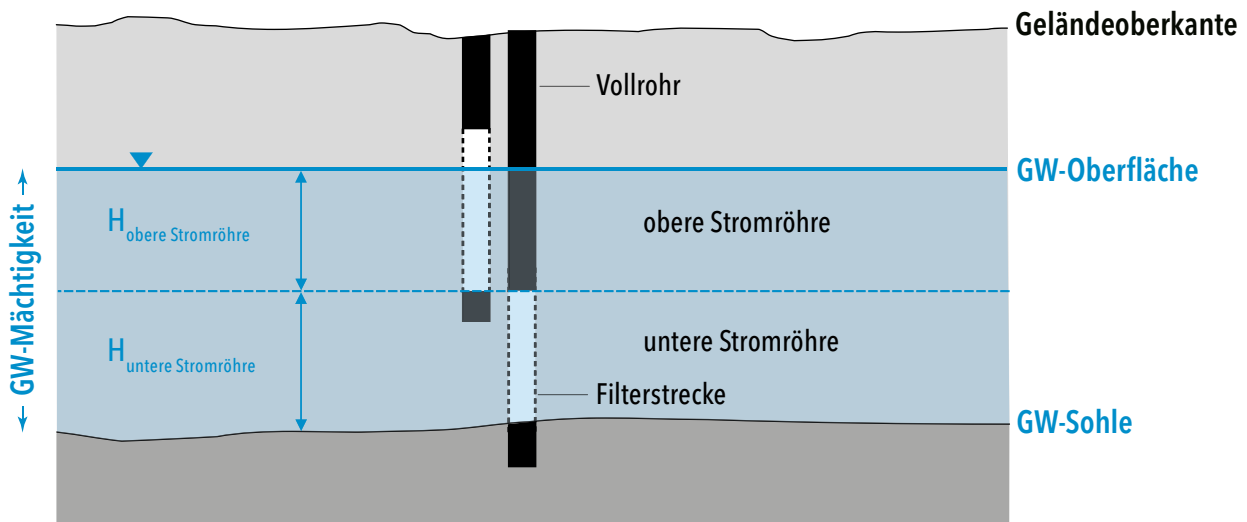
Die **Länge** einer Stromröhre entspricht der Fahnenlänge. Die Fahnenlänge wird anhand vorhandener Messstellen abgeschätzt. In Beispiel A liegt GWM 2 noch innerhalb der Fahne, dagegen liegt GWM 3 außerhalb der Fahne. Die Fahne bzw. Stromröhre endet daher zwischen den beiden Messstellen GWM 2 und GWM 3.

Die **Höhe H** einer Stromröhre richtet sich einerseits nach der Grundwassermächtigkeit, andererseits nach der Verfilterung der Messstelle. Folgende Fallkonstellationen sind möglich:

- a) Die Messstelle im nahen Abstrom ist eine vollkommene Messstelle, d. h. die Filterrohrstrecke reicht von der Grundwassersohle bis mindestens zur Grundwasseroberfläche. Dann ist als „Höhe der Stromröhre“ die Grundwassermächtigkeit anzugeben.
- b) Die Messstelle ist unvollkommen (siehe Abbildung). Dann ist als „Höhe der Stromröhre“ die Länge der Filterstrecke einer Messstelle anzugeben. Bei Messstellen, die im oberen Bereich des Grundwasserleiters ver-

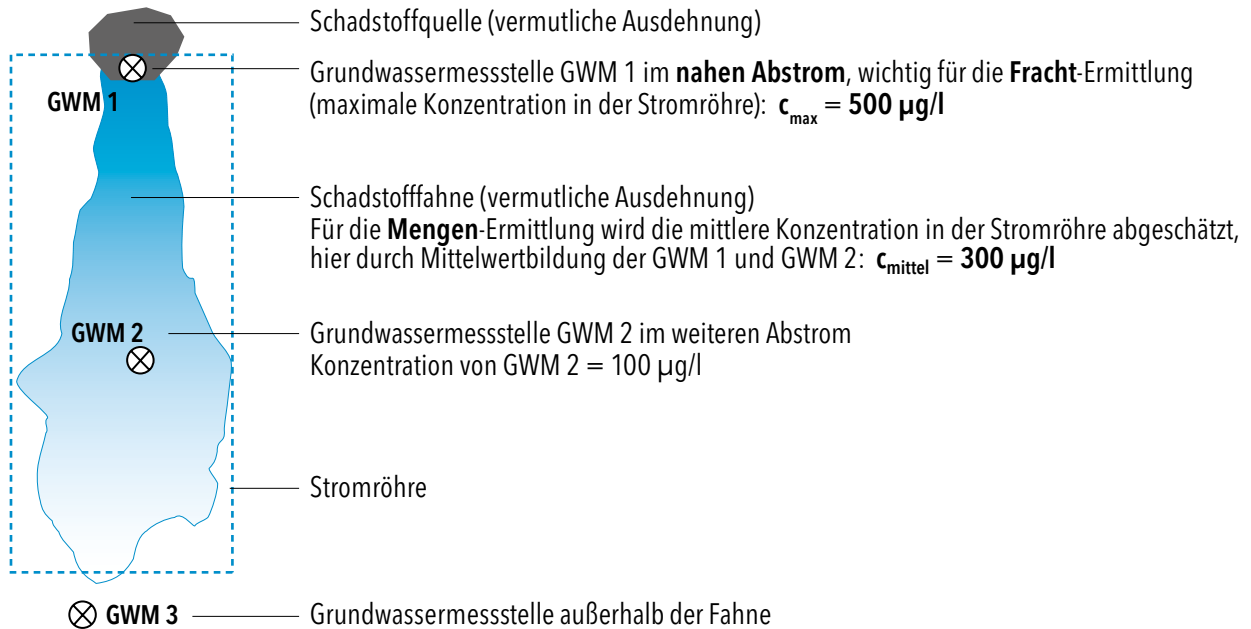
¹² Der Begriff „Stromröhre“ ist in der Geohydraulik/Hydrodynamik verbreitet [23], die dortige Definition unterscheidet sich jedoch von der Definition in dieser Arbeitshilfe. Die hier angewandte Modellvorstellung ist an [18] angelehnt.

filtriert sind, ist nur der grundwassererfüllte Bereich der Filterstrecke anzugeben. Ausnahme: Liegen Schadstoffphasen vor, die schwerer als Wasser sind (dense-non-aqueous-phase-liquid DNAPL wie LHKW- oder Teeröl-Phasen), können diese bis zur Sohle des Grundwasserleiters vorgedrungen sein. Bei unvollkommenen Messstellen, die im oberen Bereich des Grundwasserleiters verfiltert sind, wird die Schadstofffahne möglicherweise nur teilweise erfasst. Daher sollte bei Schadensfällen mit DNAPL die gesamte Grundwassermächtigkeit als „Höhe der Stromröhre“ angesetzt werden.

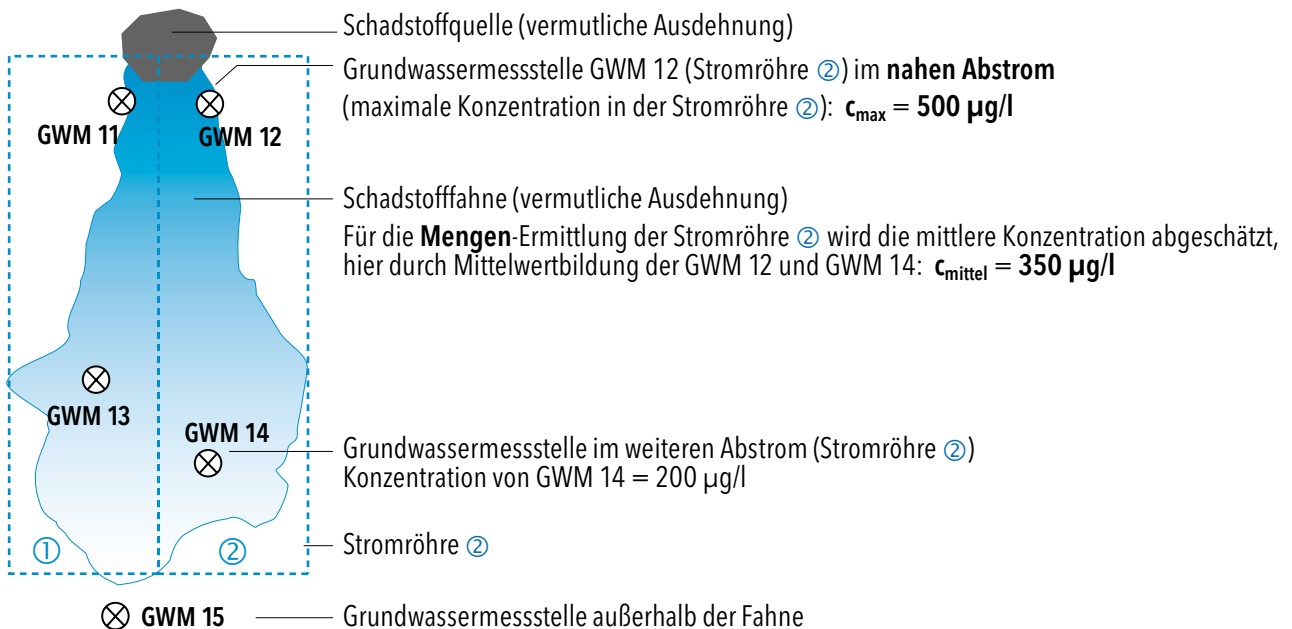


Beispiele für Stromröhren

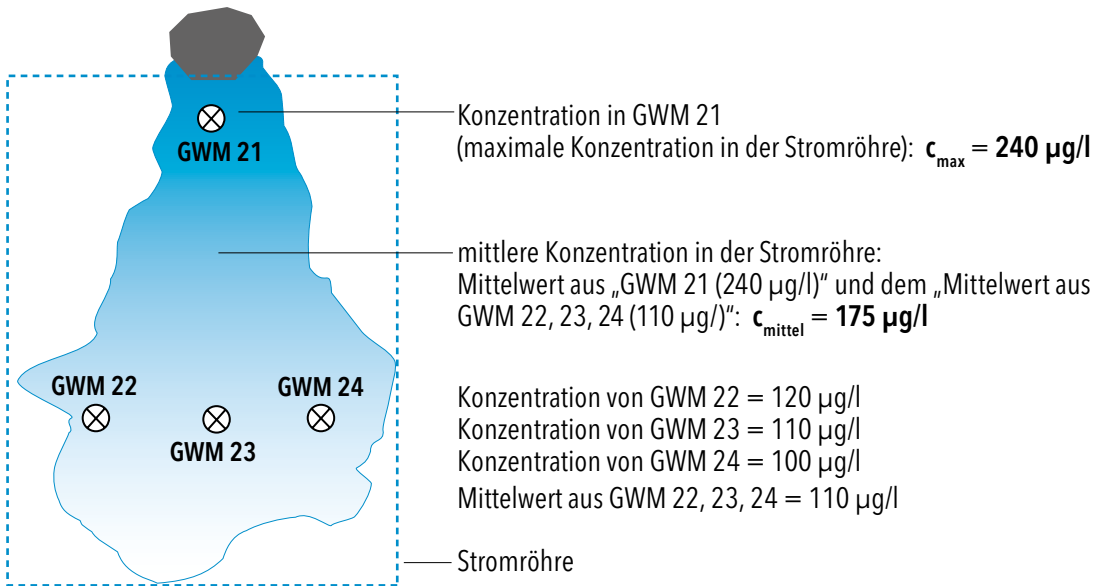
Beispiel A: eine Stromröhre



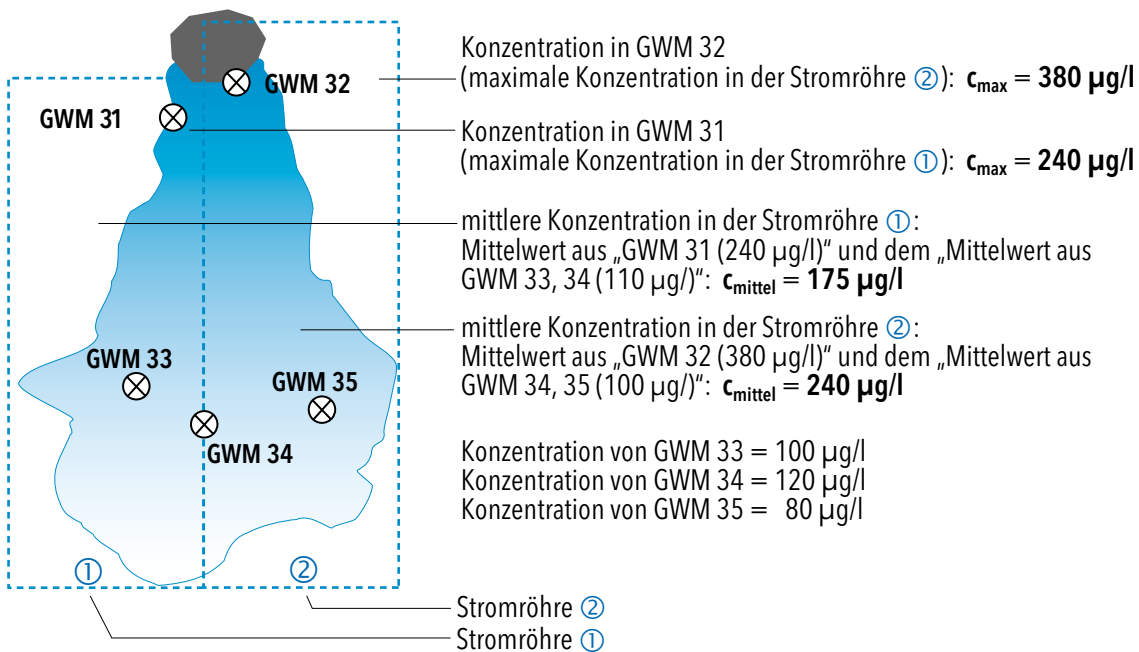
Beispiel B: zwei Stromröhren



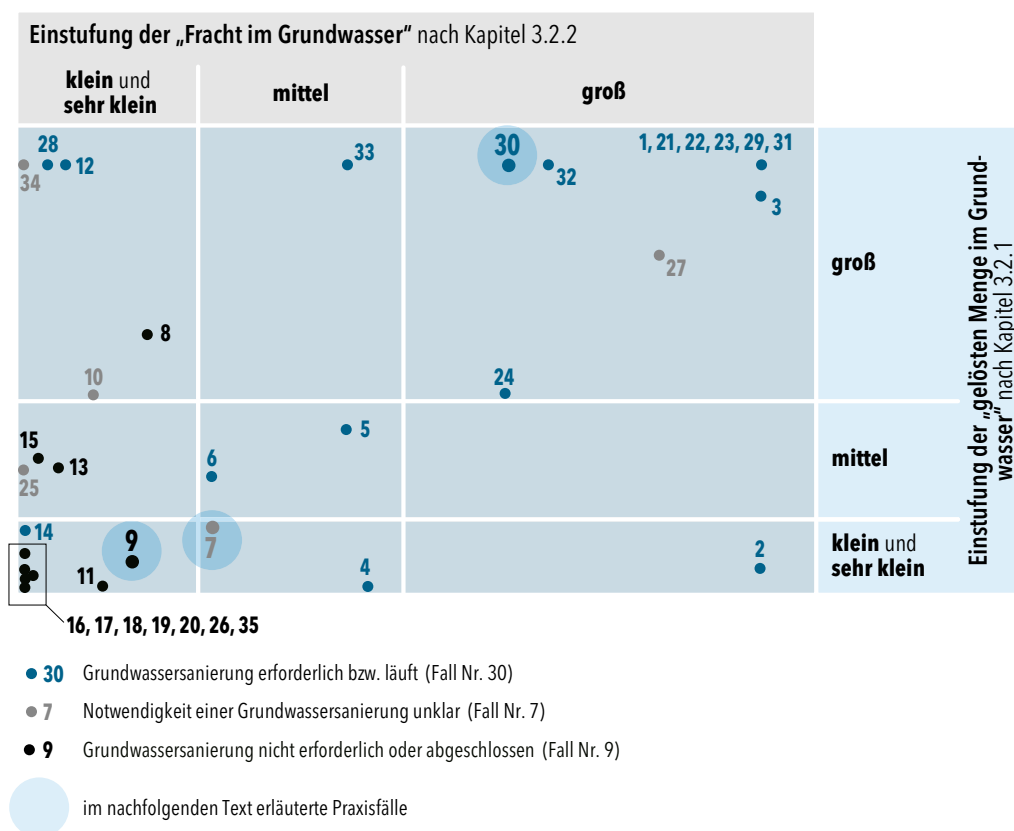
Beispiel C: eine Stromröhre



Beispiel D: zwei Stromröhren



Anhang 6 Grafische Auswertung von 35 Praxisfällen



Erläuterungen:

Zur Plausibilitätsprüfung der in Kapitel 3 beschriebenen Vorgehensweise wurden 35 hessische Praxisfälle ausgewertet. Überwiegend handelte es sich um Schadensfälle mit LHKW, weiterhin um PAK- und BTEX-Schadensfälle sowie um Schadensfälle mit Schwer- und Halbmetallen (Chrom, Zink und Arsen). Es zeigte sich, dass die Anwendung dieser Arbeitshilfe in den Fällen zu plausiblen Ergebnissen führte. Dies soll an folgenden Beispielen erläutert werden.

- Praxisfall 30: Es handelt sich um einen Chrom-VI-Schadensfall, der zurzeit saniert wird. Sowohl die „gelöste Menge im Grundwasser“ als auch die „Fracht im Grundwasser“ sind nach wie vor groß. Nach Tabelle 7 in Kapitel 3.2.3 bzw. dem Prüfschema aus Kapitel 3.4 ergibt sich, dass eine „große schädliche Grundwasserverunreinigung“ vorliegt. Der Weiterbetrieb der Sanierung ist also erforderlich, was auch der damaligen behördlichen Entscheidung entspricht.
- Praxisfall 7: Es handelt sich um einen LHKW-Schadensfall. Die „gelöste Menge im Grundwasser“ ist klein, die „Fracht im Grundwasser“ ist mittel. Nach Tabelle 7 in Kapitel 3.2.3 ergibt sich eine „mittlere schädliche Grundwasserverunreinigung“. Ein Pumpversuch hat stattgefunden. Die Entscheidung der Bodenschutzbehörde, ob eine Sanierung erfolgen soll, ist noch nicht getroffen.
- Praxisfall 9: Es handelt sich um einen LHKW-Schadensfall mit einer laufenden Grundwassersanierung (Pump&Treat). Zum jetzigen Zeitpunkt sind sowohl die verbliebene „gelöste Menge im Grundwasser“ als auch die entnommene „Fracht im Grundwasser“ klein. Nach Tabelle 7 in Kapitel 3.2.3 ergibt sich, dass zum jetzigen Zeitpunkt nur noch eine „geringe schädliche Grundwasserverunreinigung“ vorliegt. Die Sanierung kann beendet werden, was auch der behördlichen Entscheidung entspricht.

Die Fälle 16 bis 20, 26 und 35 sind sehr kleine Schadensfälle, die „links unten“ in der Abbildung liegen.

Anhang 7 EXCEL-Auswertetool „Sanierungsverlauf“

Dieses EXCEL-Auswertetool ist einsetzbar bei langlaufenden Pump&Treat-Maßnahmen, wie in Kapitel 4.3 „Anpassung, Optimierung und Beendigung von Grundwassersanierungen“ beschrieben.

Bei der Dateneingabe sind die gelb hinterlegten Felder auszufüllen. Mittels der **Tab-Taste** kann das jeweils nächste gelbe Eingabefeld angesteuert werden. Eingabefelder sind:

Name des Projektes	Hier sollte ein griffiger Name gewählt werden
Schadstoff	beispielsweise „LHKW“ oder „Arsen“
Sanierungszielwert	In der Einheit µg/l
GFS	Geringfügigkeitsschwelle der GWS-VwV in der Einheit µg/l (die GFS-Werte sind in Anhang 2 aufgeführt)
Beginn der Sanierung	Format: tt.mm.jjjj
Konzentration Zulauf Sanierungsanlage	Mittlere Konzentration des Schadstoffes (Jahresdurchschnitt) in der Einheit µg/l
Wasserfördermenge	Im jeweiligen Betriebsjahr abgereinigte Wassermenge in der Einheit m ³ /a.
Gesamtkosten	Im jeweiligen Betriebsjahr (netto) in der Einheit € (Summe aus Investitionskosten, Betriebskosten, Ingenieurleistungen, Erkundungskosten, Analytikkosten)

Die Berechnungsergebnisse erscheinen in den blauen Feldern. Automatisch erzeugte Diagramme zeigen u.a.:

- jährliche bzw. kumulative Austragsmenge
- prozentuale Zunahme der kumulierten Austragsmenge
- Konzentrationsverlauf
- Sanierungserfolg
- Gesamtkosten pro kg Schadstoff

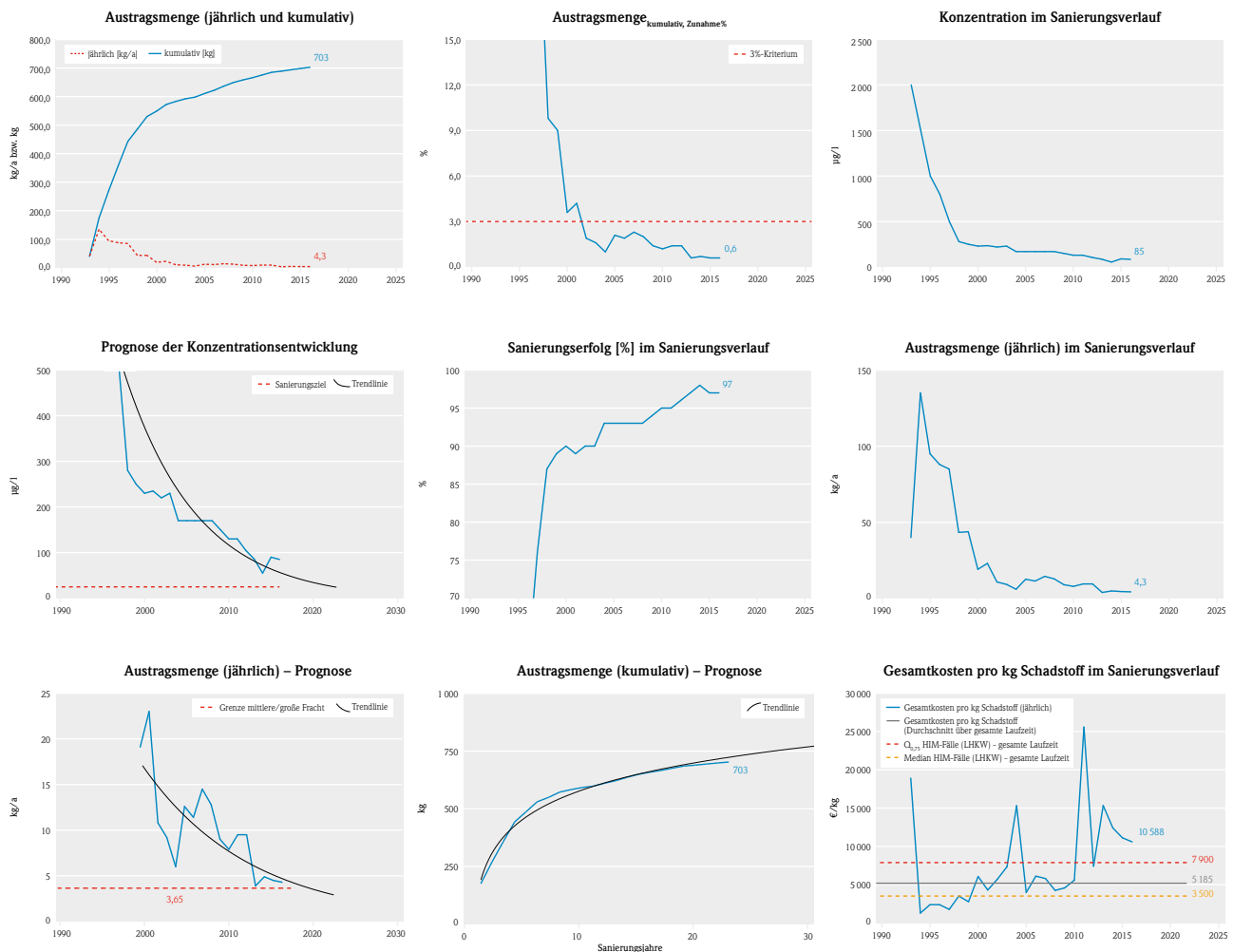
Die Diagramme erscheinen einerseits unterhalb der Eingabemaske. Zusätzlich sind sie in einzelnen Blättern („Dia-1“ bis „Dia-9“) des EXCEL-Tools abgebildet. Die Diagramme sind in Anhang 8 anhand des Fallbeispiels „XYZ-Fabrik“ erläutert.

EXCEL-Auswertetool "Sanierungsverlauf" Stand 2024
 Anhang 7 des Handbuches Altlasten "Arbeitshilfe zur Sanierung von Grundwasserunreinigungen"

Eingabedaten sind gelb hinterlegt
 Berechnungsergebnisse sind blau hinterlegt

Name des Projektes Fallbeispiel "XYZ-Fabrik"
Schadstoff LHKW
Sanierungszielwert (Bescheidsauflage) µg/L 25
Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS) µg/L 20
Beginn der Sanierung Datum 01.08.93

	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Konzentration (Zulauf Sanierungsanlage) µg/L		2.000	1.500	1.000	800	500	280	250	230	235	220	230	170	170	170	170	170	150	130	130	105	86	55	90	85
Wasserfördermenge m³/a		20.000	90.000	95.000	110.000	170.000	155.000	175.000	83.000	98.000	49.000	40.000	35.000	74.000	67.000	85.000	75.000	60.000	61.000	73.000	90.000	45.000	89.000	50.000	50.000
Gesamtkosten €	550.000	756.226	172.894	226.384	209.352	150.358	152.201	120.922	115.777	98.884	61.468	67.499	91.975	50.001	69.523	83.788	54.138	41.169	44.239	242.719	69.969	69.337	60.729	50.000	45.000
Sanierungserfolg %	0	25	51	61	76	87	89	90	89	90	90	93	93	93	93	94	95	95	96	96	97	98	97	97	97
Austragsmenge jährlich [kg]	40,0	135,0	95,0	88,0	85,0	43,4	43,8	19,1	23,0	10,8	9,2	6,0	12,6	11,4	14,5	12,8	9,0	7,9	9,5	9,5	3,9	4,9	4,5	4,3	
Austragsmenge kumulativ [kg]	40,0	175,0	270,0	358,0	443,0	486,4	530,2	549,2	572,3	583,1	592,3	598,2	610,8	622,2	636,6	649,4	658,4	666,3	675,8	685,2	689,1	694,0	698,5	702,8	
Austragsmenge kumulativ, Zunahme-% [%]	54,3	32,6	23,7	9,8	9,0	3,6	4,2	1,9	1,6	1,0	2,1	1,9	2,3	2,0	1,4	1,2	1,4	1,4	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6		
Gesamtkosten pro kg Schadstoff [€/kg]	18.906	1.281	2.383	2.379	1.769	3.507	2.764	6.065	4.294	5.702	7.337	15.307	3.975	6.104	5.799	4.246	4.574	5.579	25.576	7.404	15.333	12.406	11.111	10.588	



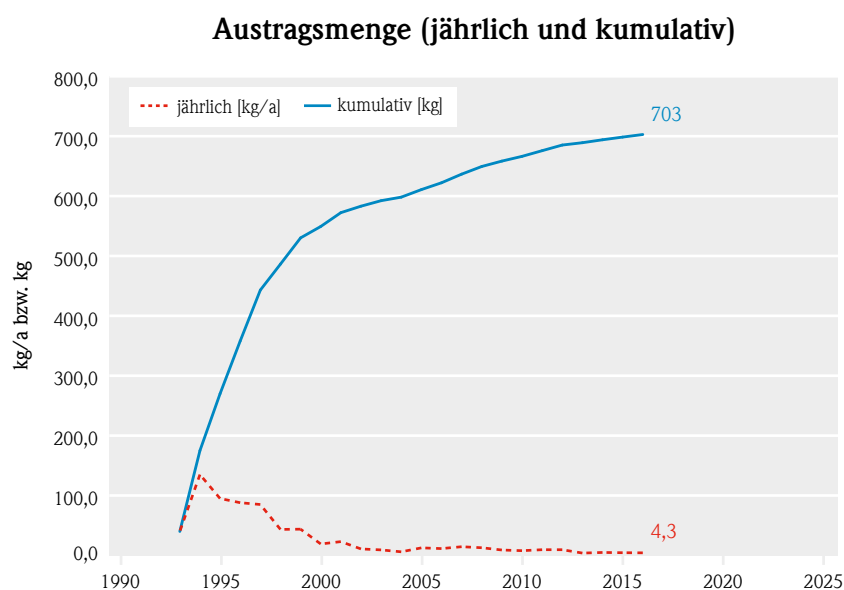
Das EXCEL-Auswertetool „Sanierungsverlauf“ ist unter folgender Adresse abrufbar: www.hlnug.de/?id=6419

Anhang 8 Erläuterungen zum EXCEL-Auswertetool „Sanierungsverlauf“

Anhand des in Kapitel 5 beschriebenen realen Fallbeispiels wird im Folgenden erläutert, wie die Diagramme des EXCEL-Auswertetools „Sanierungsverlauf“ (siehe Anhang 7) interpretiert werden können. Es handelt sich um einen LHKW-Schaden, der über einen Zeitraum von 23 Jahren (1993 bis 2016) mittels Pump&Treat saniert wurde. Wasserschutzgebiete waren nicht betroffen.

Hierzu werden zu den jeweiligen Diagrammen Auswertekriterien genannt und interpretiert. Die Diagramme und deren Interpretation sind in ihrer Gesamtheit hinsichtlich Aufwand und Erfolg zu bewerten (siehe „Pro-Contra-Diskussion der Diagrammauswertungen hinsichtlich Verhältnismäßigkeit / Unverhältnismäßigkeit“ am Ende des Anhangs).

Diagramm 1: Jährliche Austragsmenge [kg/a] und kumulative Austragsmenge [kg]



Zunächst ist zu prüfen, ob bei einer laufenden Pump&Treat-Maßnahme eine erneute Prüfung der Verhältnismäßigkeit geboten ist. Eingangsgrößen sind die jährliche Austragsmenge [kg/a] und die kumulative Austragsmenge [kg], die in Diagramm 1 dargestellt sind.

Beobachtung:

Die jährliche Austragsmenge betrug 4,3 kg/a im Jahr 2016, die kumulative Austragsmenge im Zeitraum 1993 bis 2016 insgesamt 703 kg.

Interpretation:

Der Algorithmus, ob eine erneute Prüfung der Verhältnismäßigkeit geboten ist, wird in Zusammenhang mit Diagramm 2 erläutert.

Diagramm 2: Zunahme der kumulativen Austragsmenge [%] im Vergleich zum Vorjahr

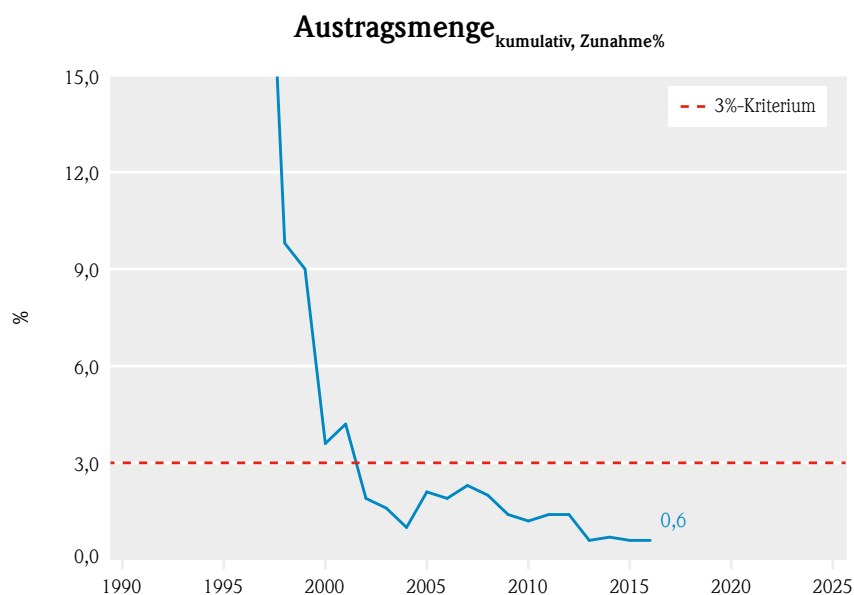


Diagramm 2 zeigt, um wieviel Prozent die kumulative Austragsmenge im Vergleich zum Vorjahr zugenommen hat (Austragsmenge_{kumulativ, Zunahme%}).

Auswertekriterium:

Unterschreitet die Austragsmenge_{kumulativ, Zunahme%} den Wert von 3%, so ist die erneute Prüfung der Verhältnismäßigkeit geboten.

Beobachtung:

Die Austragsmenge_{kumulativ, Zunahme%} beträgt 0,6% im Jahr 2016. Das 3%-Kriterium ist deutlich unterschritten.

Interpretation:

Da das Auswertekriterium (<3%) bereits seit dem Jahr 2002 zutrifft, ist die erneute Prüfung der Verhältnismäßigkeit geboten. Hierzu werden die nachfolgenden Diagramme ausgewertet.

Diagramm 3: Konzentration im Sanierungsverlauf

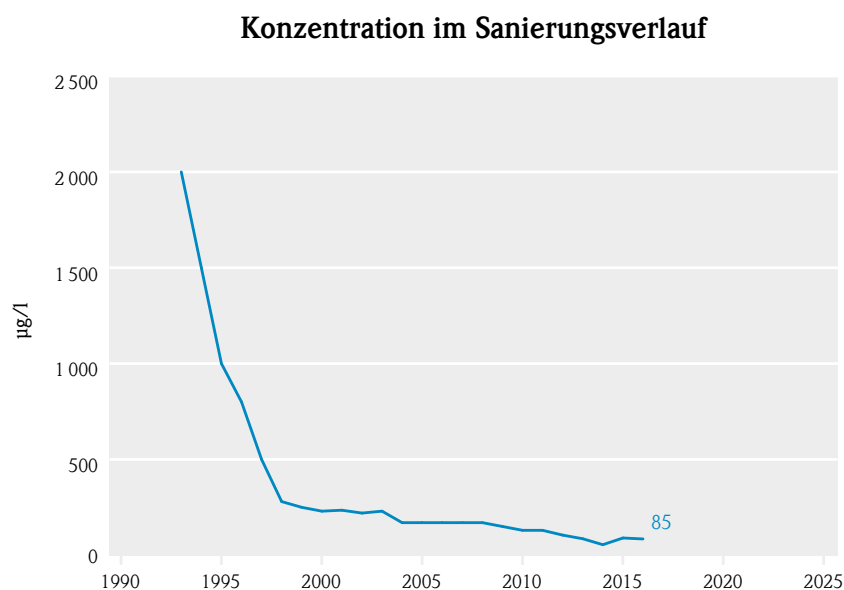
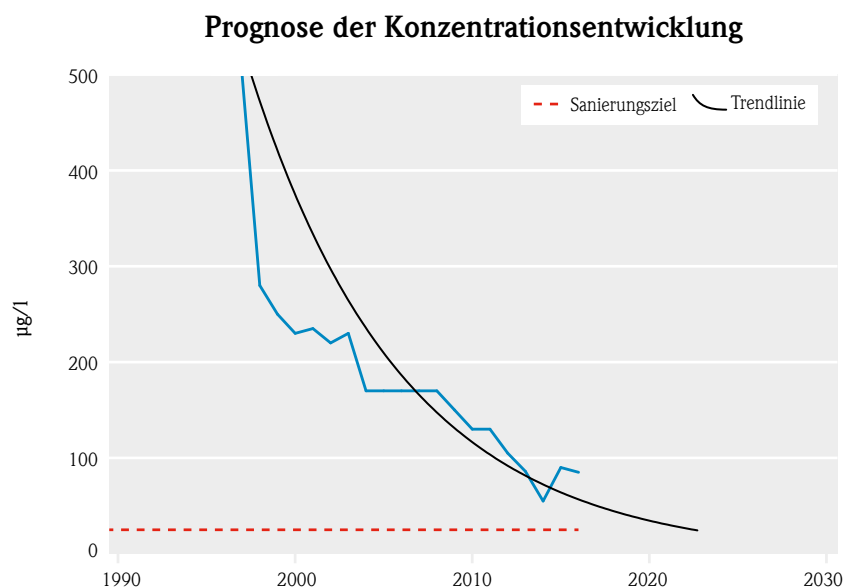


Diagramm 4: Konzentration im Sanierungsverlauf, Trendlinie und Sanierungszielwert

Die Diagramme 3 und 4 geben den Konzentrationsverlauf über die gesamte Laufzeit wieder. In Diagramm 4 ist die senkrechte Achse (Konzentration) im Vergleich zu Diagramm 3 gestreckt, um die Konzentrationsentwicklung in den letzten Betriebsjahren zu verdeutlichen. Zusätzlich ist eine EXCEL-basierte Trendlinie (exponentiell) dargestellt, die 5 Jahre in die Zukunft reicht (im Einzelfall kann es sinnvoll sein, ein komplexeres Prognoseinstrument zu verwenden). Weiterhin ist der Sanierungszielwert von 25 µg/l dargestellt.

Auswertekriterien (Diagramme 3 und 4):

- Verläuft die Kurve in den letzten Sanierungsjahren annähernd asymptotisch (jährliche Konzentrationsabnahmen streben gegen Null)?
- Welchem Wert nähert sich die Kurve an?
- Um welchen Faktor liegt dieser Wert über dem Sanierungszielwert?
- Wann würde das Sanierungsziel voraussichtlich erreicht werden?

Beobachtung:

Zu Beginn der Sanierung betrug die LHKW-Konzentration ca. 2000 µg/l, derzeit beträgt die Konzentration 85 µg/l. In den ersten Betriebsjahren war ein rascher Konzentrationsrückgang zu beobachten, seit 1998 sinken die Konzentrationen vergleichsweise langsam. Im Jahr 2014 lag die Konzentration aufgrund einer benachbarten Bauwasserhaltung mit 55 µg/l niedriger. Diese Besonderheit trat einmalig auf und ist nicht mehr von Relevanz. In den letzten drei Betriebsjahren ist die Abnahme gering, die Kurve nähert sich asymptotisch einer Konzentration von ca. 70 µg/l an. Mit derzeit 85 µg/l ist die Konzentration um den Faktor 3,5 höher als der Sanierungszielwert.

Interpretation:

Die Kurve zeigt den für Pump&Treat-Maßnahmen typischen asymptotischen Verlauf. Derzeit wird der Sanierungszielwert um den Faktor 3,5 überschritten; im Vergleich zu anderen Sanierungsfällen ist die Überschreitung als moderat anzusehen. Voraussichtlich wird das Sanierungsziel in absehbarer Zeit nicht erreicht.

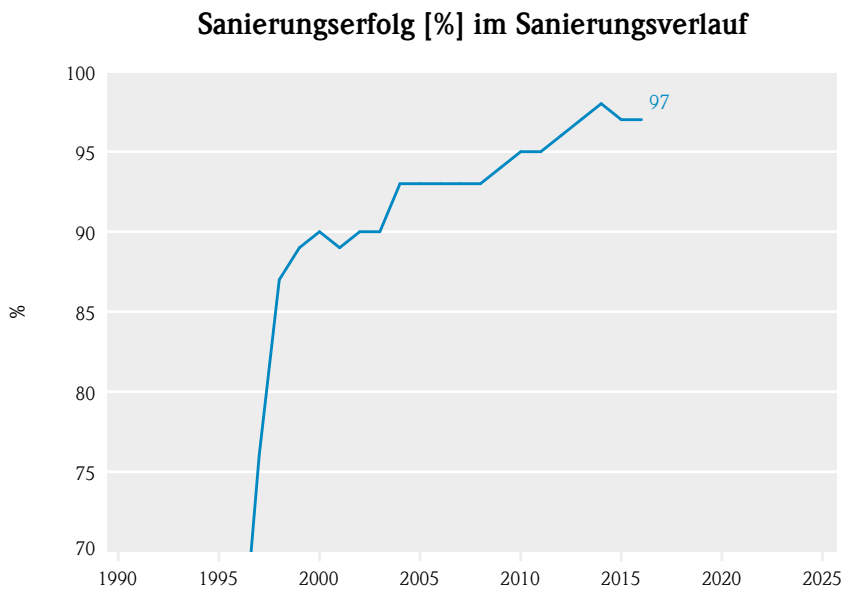
Diagramm 5: Sanierungserfolg [%] im Sanierungsverlauf

Diagramm 5 zeigt den Sanierungserfolg im Sanierungsverlauf; dieser wird nach folgender Formel berechnet [41]:

$$\text{Sanierungserfolg (SE)} = \frac{[(AK-IK)/(AK-SZ)] \cdot 100 \%}{}$$

Ausgangskonzentration (AK)

IST-Konzentration (IK)

Sanierungszielwert (SZ)

Sanierungserfolg (SE)

Sanierungserfolg (SE)

Bei Sanierungsbeginn beträgt der Sanierungserfolg 0 %. Ein 100 %iger Sanierungserfolg würde bedeuten, dass das Sanierungsziel erreicht ist.

Auswertekriterium:

Ist der Sanierungserfolg größer 90 bzw. 95 %?

Beobachtung:

Im Jahr 2016 beträgt der Sanierungserfolg 97 %.

Interpretation:

Werte über 90 % sind ein Hinweis, dass ein Fortführen der Maßnahme unverhältnismäßig sein kann. Werte über 95 % sind ein deutliches Indiz, dass ein Fortführen der Maßnahme unverhältnismäßig sein kann; dies ist hier der Fall.

Diagramm 6: Jährliche Austragsmenge [kg/a] im Sanierungsverlauf

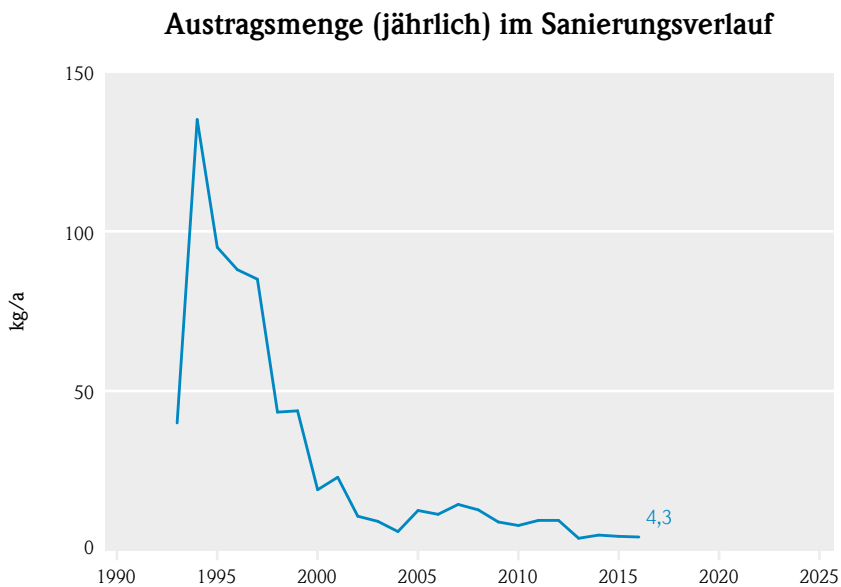


Diagramm 6 zeigt die jährlichen Austragsmengen, die Kurve entspricht der unteren Kurve aus Diagramm 1. Jedoch ist die senkrechte Achse (Austragsmenge) im Vergleich zu Diagramm 1 gestreckt, um die Entwicklung in den letzten Betriebsjahren zu verdeutlichen.

Diagramm 7: Prognose der jährlichen Austragsmenge [kg/a]

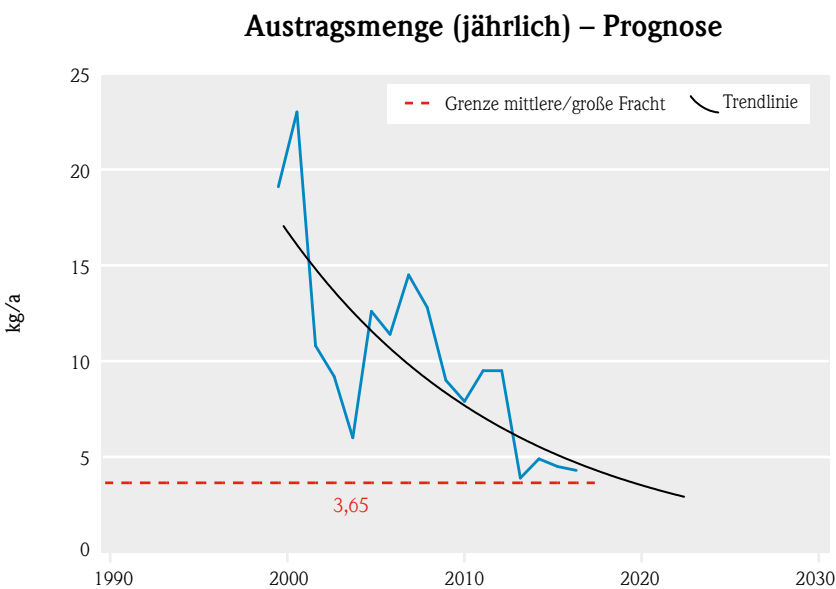


Diagramm 7 zeigt die Austragsmengen seit dem Jahr 2000. Im Vergleich zu Diagramm 6 ist die senkrechte Achse gestreckt.

Zusätzlich ist eine EXCEL basierte Trendlinie (exponentiell) dargestellt, die 5 Jahre in die Zukunft reicht; die EXCEL-Trendlinie gibt nur einen möglichen Trendverlauf wieder. Daher kam im vorliegenden Fallbeispiel ein weiteres Prognoseinstrument zum Einsatz. Weiterhin ist die Grenze zwischen einer großen und einer mittleren Fracht

dargestellt (vgl. Kapitel 3.2.2); bei einem GFS-Wert von $20 \mu\text{g}/\text{l}$ liegt die Grenze bei $3,65 \text{ kg}/\text{a}$. Hierbei ist zu beachten: Frachten nach Kapitel 3.2.2 werden in der Einheit g/d angegeben, Austragsmengen in der Einheit kg/a . Eine Austragsmenge von $3,65 \text{ kg}/\text{a}$ entspricht einer Fracht von $10 \text{ g}/\text{d}$.

Auswertekriterien:

- Ist die jährliche Austragsmenge „groß“ im Sinne von Kapitel 3.2.2?
- Wie ist der Trend der jährlichen Austragsmenge?

Beobachtung:

Die zuletzt beobachtete jährliche Austragsmenge ($4,3 \text{ kg}/\text{a}$) liegt bereits nahe bei dem Wert von $3,65 \text{ kg}/\text{a}$. Somit liegt noch eine große Fracht gemäß Kapitel 3.2.2 vor. Die Tendenz der Austragsmenge ist fallend.

Interpretation:

Aufgrund der zuletzt fallenden Werte ist davon auszugehen, dass die Austragsmenge in absehbarer Zeit den Wert von $3,65 \text{ kg}/\text{a}$ unterschreiten wird. Ein Zeitpunkt, wann dies der Fall ist, ist nach derzeitigem Kenntnisstand nicht prognostizierbar. Bei einer Unterschreitung von $3,65 \text{ kg}/\text{a}$ würde gemäß Kapitel 3.2.2 eine mittlere Fracht vorliegen. Bei langlaufenden Sanierungen wäre dies ein Indiz, dass die Sanierungsmaßnahme mittlerweile unverhältnismäßig ist.

Diagramm 8: Kumulative Austragsmenge [kg] im Sanierungsverlauf inkl. Prognose

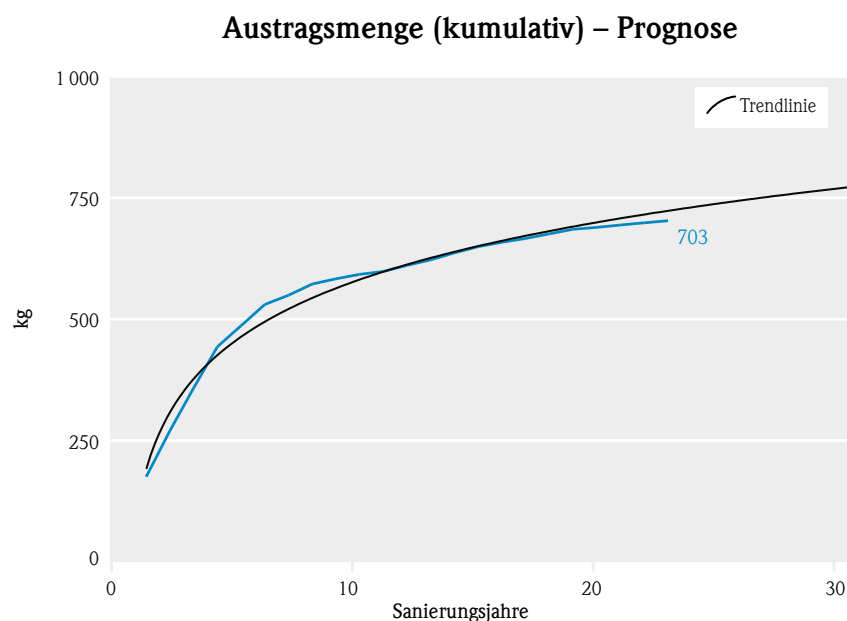


Diagramm 8 entspricht der oberen Kurve aus Diagramm 1 und stellt die kumulative Austragsmenge dar. Zusätzlich ist eine Trendlinie dargestellt, die 5 Jahre in die Zukunft reicht.

Auswertekriterien:

- Ist absehbar, dass die kumulative Austragsmenge in den nächsten Jahren einen Maximalwert erreichen wird (flacher Kurvenverlauf in den letzten Betriebsjahren)?
- Ist erkennbar, dass zum aktuellen Zeitpunkt ein Großteil der Schadstoffe (>90%) bereits ausgetragen wurde und das Nachlieferungspotenzial also deutlich zurückgegangen ist?

Beobachtung:

Zum jetzigen Zeitpunkt (nach 23 Betriebsjahren) beträgt die kumulative Austragsmenge ca. 703 kg. Die kumulative Schadstoffmenge, die im Laufe der Sanierung entnommen wurde und zukünftig entnommen werden kann, wird voraussichtlich 750 kg nicht erreichen. Im Einzelfall kann es sinnvoll sein, zur Erstellung einer Trendlinie anstelle der hier verwendeten EXCEL-Funktion ein komplexeres Prognoseinstrument zu verwenden, oder die Trendlinie „per Hand“ zu erstellen.

Interpretation:

Die Prognose für die kumulative Schadstoffmenge, die im Laufe der Sanierung entnommen wurde und zukünftig entnommen wird, beträgt maximal 750 kg. Ein Großteil der Schadstoffe (703 kg) wurde also bereits ausgetragen, dies entspricht ca. 94%. Dies ist ein Hinweis, dass die Maßnahme mittlerweile unverhältnismäßig sein kann.

Diagramm 9: Gesamtkosten pro kg Schadstoff[€/kg] im Sanierungsverlauf

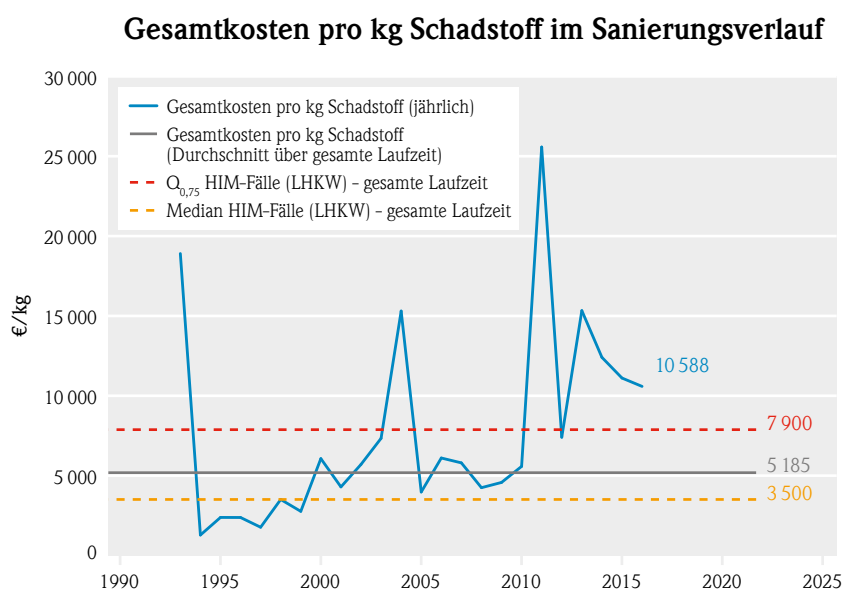


Diagramm 9 nimmt Bezug auf Kapitel 4.2.4 „Behördliche Entscheidung über Art und Umfang der notwendigen Maßnahme“ sowie auf Anhang 9. Dort wird erläutert, dass 36 hessische Grundwassersanierungen ausgewertet wurden, um repräsentative Vergleichswerte für die Kennzahl „Kosten pro kg Schadstoff“ zu erhalten. Von den 36 Fällen waren 25 Fälle LHKW-Sanierungen.

Aufgetragen sind die angefallenen Kosten pro kg Schadstoff für die einzelnen Betriebsjahre. Weiterhin sind der Durchschnittswert (gesamte Laufzeit) dargestellt (graue Gerade) sowie das 0,75-Quantil ($Q_{0,75}$) und der Median der ausgewerteten hessischen LHKW-Fälle.

Auswertekriterien:

- Wird die Kurve in den letzten Betriebsjahren tendenziell steiler?
- Wie sind die durchschnittlichen Kosten (Gesamtlaufzeit) einzuordnen im Vergleich zu anderen hessischen Grundwassersanierungen?

Beobachtung:

In den letzten Betriebsjahren betragen die Kosten pro kg Schadstoff ca. 11 000 €/kg. Über die Gesamtlaufzeit ergibt sich ein durchschnittlicher Wert von ca. 5 200 €/kg.

Im Vergleich: Das 0,75-Quantil der ausgewerteten hessischen LHKW-Fälle (Gesamtlaufzeit) beträgt ca. 7 900 €/kg, der Median ca. 3 500 €/kg. Im vorliegenden Fall liegt der Wert von ca. 5 200 €/kg zwischen dem 0,75-Quantil (Q0,75) und dem Median der ausgewerteten hessischen LHKW-Fälle (Gesamtlaufzeit).

Interpretation:

In den letzten drei Betriebsjahren sind die Kosten pro kg Schadstoff in etwa konstant. Ein Indiz für eine unverhältnismäßige Sanierung wäre nur dann gegeben, wenn die Werte stark ansteigen würden und somit die Kurve deutlich steiler werden würde. Dies wäre beispielsweise der Fall, wenn bei gleichbleibenden laufenden Kosten immer weniger Schadstoffe abgereinigt werden. Im Fallbeispiel trifft dies jedoch nicht zu. Wären die Kosten pro kg Schadstoff im Fallbeispiel deutlich höher als bei den 25 LHKW-Vergleichsfällen, wäre dies ein Indiz, dass die Maßnahme mittlerweile unverhältnismäßig ist. Der Durchschnittswert der Kosten (gesamte Laufzeit) bewegt sich jedoch im Rahmen des Üblichen.

Pro-Contra-Diskussion der Diagrammauswertungen hinsichtlich Verhältnismäßigkeit / Unverhältnismäßigkeit

In Kapitel 5 wird das obige Fallbeispiel anhand des „Prüfberichts Verhältnismäßigkeit“ bewertet. Die Argumente, die für bzw. gegen die Verhältnismäßigkeit dieser Maßnahme sprechen, werden dort unter C.2 „Abwägung hinsichtlich Aufwand und Erfolg“ aufgezählt. Die Bodenschutzbehörde kommt in diesem Fallbeispiel zu dem Ergebnis, dass ein Weiterbetrieb unverhältnismäßig wäre und die Sanierung zu beenden ist.

Anhang 9 Datenauswertung von Pump&Treat-Grundwassersanierungen

Die HIM-ASG ist Trägerin der gewerblichen Altlastensanierung in Hessen. Die hessischen Vollzugsbehörden beauftragen sie seit 1990 bis heute unter bestimmten Voraussetzungen mit Grundwassersanierungsmaßnahmen (§ 12 Abs. 1 HAltBodSchG). Die HIM-ASG erfasst die Kosten der Grundwassersanierung in Form von Kostenansatz-Positionen (KA). Die Ausgaben werden sachlich und zeitlich geordnet erfasst, auf Konten gebucht und dokumentiert. Die Datenqualität ist hoch.

Im Jahr 2013 wurden die Projektdaten der HIM-ASG erstmalig erfasst, um Einsparmöglichkeiten bei den mit Landesmitteln geförderten Grundwassersanierungen in der gewerblichen Altlastensanierung in Hessen benennen zu können. Die Ergebnisse der Analyse wurden 2014 in dem Artikel „Kostenreduzierung bei Grundwassersanierungen – Auf der Suche nach Einsparmöglichkeiten“ veröffentlicht [41].

Im April 2015 beauftragte das Hessische Umweltministerium eine Arbeitsgruppe mit der Erarbeitung von Lösungen, die bei der Vereinheitlichung der Ermessensentscheidungen der Behörden bei Grundwassersanierungen dienlich sein können. Dazu sollten die Projektdaten der HIM-ASG aus dem Zeitraum 1990–2012 in Anlehnung an eine baden-württembergische Veröffentlichung [33] ausgewertet und nutzbar gemacht werden.

Zeitgleich wurden weitere Grundwassersanierungen erfasst und die Projektdaten bis Ende 2014 aktualisiert. Im April 2017 wurden die Projektdaten erneut auf den Stand Ende 2016 aktualisiert, validiert und für die Verwendung in der Arbeitsgruppe ausgewertet.

Für die Datenauswertung wurden Datensätze von 38 laufenden und abgeschlossenen Grundwassersanierungen aus der Zeit von 1990 bis 2016 berücksichtigt. Bei den 38 Grundwassersanierungen wurden Schadstoffe mit einer Austragsmenge (alle Parameter) von rund 47 Tonnen dem Grundwasser entnommen. Die Gesamtkosten (netto) dafür beliefen sich auf 83,4 Mio. €. In 27 von 38 laufenden und abgeschlossenen Grundwassersanierungen war das Grundwasser mit LHKW belastet, dabei wurden insgesamt 13 Tonnen LHKW ausgetragen. Die Gesamtkosten (netto) dafür beliefen sich auf 35,8 Mio. €. Die Auswertung ist in der dritten Auflage des vorliegenden Handbuchs Altlasten (Stand 2018) detailliert beschrieben.

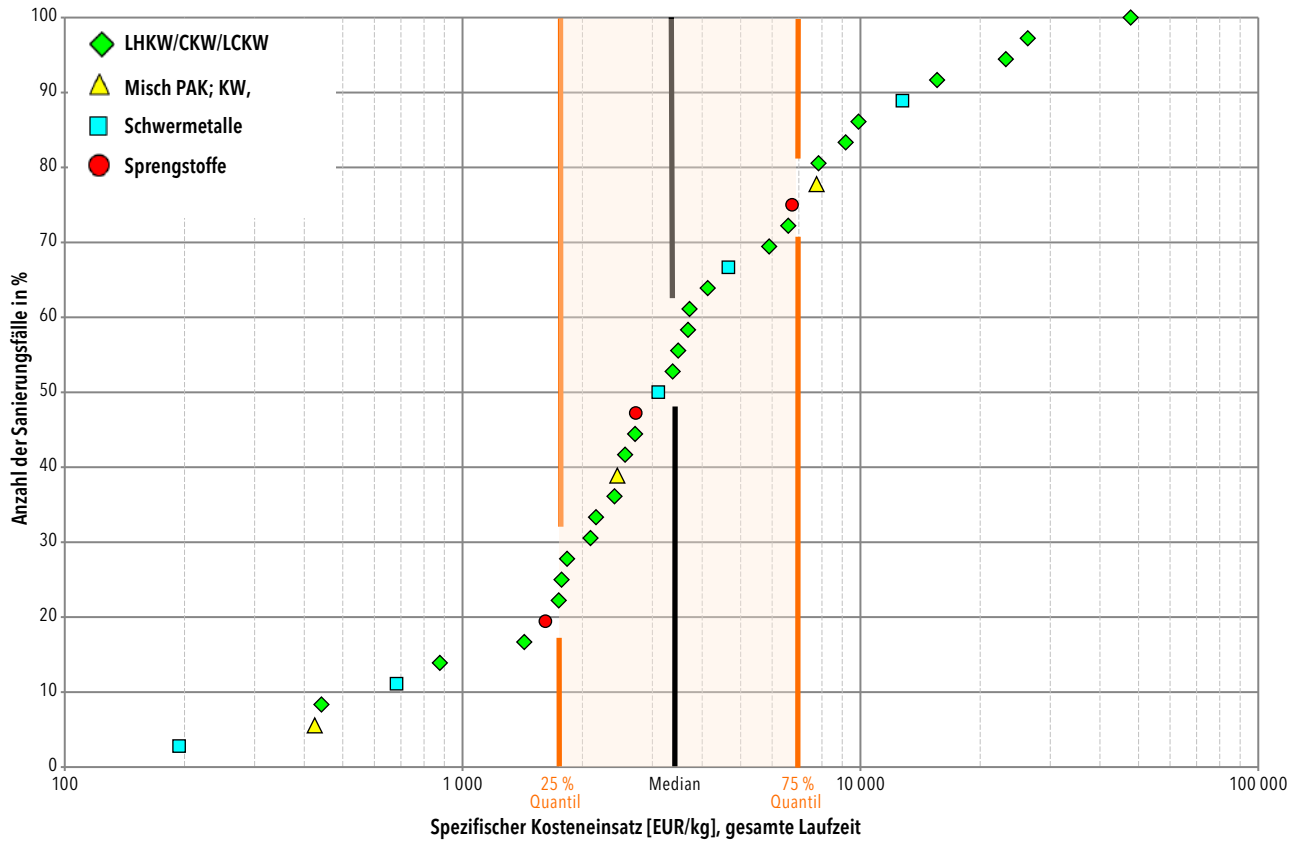
Für die vorliegende 4. Auflage des Handbuchs Altlasten wurden die Projektdaten nochmals aktualisiert (Stand Jahresende 2022). Da mehr Sanierungen abgeschlossen wurden als hinzugekommen sind, verringerte sich die Fallzahl von 38 auf 36 Fälle, davon waren 25 Fälle LHKW-Sanierungen.

Kosten und Wirksamkeit können hier durch das Verhältnis von Kosten zur entnommenen Menge Schadstoff ausgedrückt und für alle 36 bzw. 25 Grundwassersanierungen berechnet werden. Werden die Werte der 36 bzw. 25 Grundwassersanierungen dann nach Größe sortiert, so ist der Median der Wert, der die 36 bzw. 25 Grundwassersanierungen in zwei Hälften teilt. Das Ergebnis dieser Auswertung stellt ein von der Behörde in Hessen allgemein akzeptiertes Verhältnis von Kosten und Wirksamkeit dar.

Für die Abreinigung eines Kilogramms Schadstoff (alle Parameter, Gesamtlaufzeit) liegt der Median bei rund 3200 €/kg. Das 0,75-Quantil liegt bei rund 7000 €/kg. Für die Abreinigung eines Kilogramms LHKW (Gesamtlaufzeit) liegt der Median bei rund 3500 €/kg. Das 0,75-Quantil liegt bei rund 7900 €/kg.

Die Auswertung der Verfahrenskosten bis 2022 hat gezeigt, dass die Auswirkungen der Kostenentwicklung seit 2016 (Stand 3. Auflage) bei langlaufenden Sanierungsverfahren über den Sanierungszeitraum moderat ausgefallen sind. Demnach hat sich Stand 2022 das 0,75-Quantil um ca. 10% erhöht, während der Median um ca. 10% (alle Fälle) bzw. ca. 20% (LHKW-Fälle) gesunken ist.

Anhänge



Anhang 10 Stand der Technik bei der Grundwasserreinigung

In der GWS-VwV wird der Stand der Technik in Nr. 5 Abs. 1 Satz 3 „Sanierungsmaßnahmen müssen dem Stand der Technik ... entsprechen“ und Nr. 6 Abs. 2 „Vor dem Einleiten ... ist belastetes Grundwasser nach dem Stand der Technik zu reinigen ...“ benannt.

Der „Stand der Technik“ ist eine Technik Klausel und stellt die technischen Möglichkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt, basierend auf gesicherten Erkenntnissen von Wissenschaft und Technik dar. Es handelt sich hier um einen dynamik- und fortschrittsorientierten Rechtsbegriff. Stand der Technik ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung der Maßnahme im Hinblick auf die angestrebten Ziele insgesamt gesichert erscheinen lässt.

Die Dynamikorientierung des „Standes der Technik“ lässt sich durch einen Vergleich mit den anderen deutschen Technikstandards „allgemein anerkannte Regeln der Technik“ und „Stand von Wissenschaft und Technik“ als mittleres Anforderungsprofil kennzeichnen. Der europäische Standard „beste verfügbare Techniken“ weicht trotz seines divergierenden Wortlauts inhaltlich nicht wesentlich vom „Stand der Technik“ ab.

Da der Stand der Technik ständig fortschreitet, ist es sinnvoll, sich die Kriterien, nach denen dieser zu beurteilen ist, in Erinnerung zu rufen. Eine grundsätzliche Regelung, auf die im Umweltbereich immer wieder Bezug genommen wird, findet sich im WHG [6].

Kriterien zur Bestimmung des Standes der Technik nach Anlage 1 des WHG [6]

„Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit zwischen Aufwand und Nutzen möglicher Maßnahmen sowie des Grundsatzes der Vorsorge und der Vorbeugung, jeweils bezogen auf Anlagen einer bestimmten Art, insbesondere folgende Kriterien zu berücksichtigen:

1. Einsatz abfallarmer Technologie,
2. Einsatz weniger gefährlicher Stoffe,
3. Förderung der Rückgewinnung und Wiederverwertung der bei den einzelnen Verfahren erzeugten und verwendeten Stoffe und gegebenenfalls der Abfälle,
4. vergleichbare Verfahren, Vorrichtungen und Betriebsmethoden, die mit Erfolg im Betrieb erprobt wurden,
5. Fortschritte in der Technologie und in den wissenschaftlichen Erkenntnissen,
6. Art, Auswirkungen und Menge der jeweiligen Emissionen,
7. Zeitpunkte der Inbetriebnahme der neuen oder der bestehenden Anlagen,
8. die für die Einführung einer besseren verfügbaren Technik erforderliche Zeit,
9. Verbrauch an Rohstoffen und Art der bei den einzelnen Verfahren verwendeten Rohstoffe (einschließlich Wasser) sowie Energieeffizienz,
10. Notwendigkeit, die Gesamtwirkung der Emissionen und die Gefahren für den Menschen und die Umwelt soweit wie möglich zu vermeiden oder zu verringern,
11. Notwendigkeit, Unfällen vorzubeugen und deren Folgen für den Menschen und die Umwelt zu verringern,
12. Informationen, die von internationalen Organisationen veröffentlicht werden,
13. Informationen, die in BVT-Merkblättern enthalten sind.“

Anhang 11 Einleitung von Hilfsstoffen in das Grundwasser bei In-situ-Sanierungen

Nach der GWS-VwV Nr. 5 Absatz 1 ist der Einsatz „neuartiger Verfahren“ möglich, die nicht dem Stand der Technik entsprechen. Hierzu zählen biologische und chemische In-situ-Sanierungsverfahren, bei denen Hilfsstoffe wie Nitrat, Melasse oder Wasserstoffperoxid in das Grundwasser eingeleitet werden. Eine Auswahl von In-situ-Sanierungsverfahren wird im Handbuch Altlasten „Arbeitshilfen zur Überwachung und Nachsorge von altlastenverdächtigen Flächen und Altlasten“ beschrieben [14].

Die Einleitung von Stoffen ins Grundwasser ist nach § 9 Abs. 1 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) eine Gewässerbenutzung, die nach § 8 Abs. 1 WHG einer Erlaubnis bedarf [6]. Nach § 12 Abs. 1 WHG darf eine solche Erlaubnis nur erteilt werden, wenn schädliche Gewässeränderungen nicht zu erwarten sind.

Für die Beurteilung, ob durch die Einleitung von Hilfsstoffen eine schädliche Gewässeränderung zu erwarten ist, gilt die räumliche und zeitliche Einbindung in den Vorgang der Sanierung insgesamt und deren Ergebnis. Dies bedeutet, dass im zeitlichen und räumlichen Verlauf der Sanierung erhöhte Belastungen des Grundwassers zugelassen werden können, wenn in der Summe ein Sanierungserfolg eintritt. Im Endergebnis darf jedoch kein neuer Sanierungsbedarf durch die eingebrachten Stoffe oder deren Abbauprodukte entstehen. Um dem Besorgnisgrundsatz insoweit gerecht zu werden, muss nach menschlichem Ermessen eine nachteilige Veränderung des Grundwassers außerhalb des Reaktionsraumes der In-situ-Sanierung ausgeschlossen werden können.

Die Geeignetheit eines In-situ-Verfahrens kann insbesondere mit folgenden Mitteln geprüft werden:

- Nachweis von Abbauprozessen
- Untersuchung hydrogeologischer Verhältnisse
- Machbarkeitsstudie
- Pilot-, Feldversuch.

Für die Genehmigungsfähigkeit sind außerdem weitere Gesichtspunkte relevant, wie beispielsweise:

- Abwägung der Vor- und Nachteile der Maßnahme ggf. auch im Hinblick auf Sanierungs-Alternativen
- Bisherige und zukünftige Nutzung, Inwertsetzung des Grundstückes.

Wenn die Geeignetheit der Methode nachgewiesen wurde und die weiteren Zulassungsvoraussetzungen vorliegen, kann grundsätzlich eine Erlaubnis zur Einleitung erteilt werden. Folgende Maßgaben sollten durch Nebenbestimmungen in der Zulassungsentscheidung festgelegt werden:

- Ein Notfallplan ist zu erstellen, mit Eingriffsszenarien für Abwehrmaßnahmen im Falle des Abströmens einer Schadstofffahne (z. B. Vorhandensein von Abwehrbrunnen).
- Detaillierte Organisationspläne für Überwachung und Monitoring in den relevanten Bereichen sind festzulegen.
- Die Kontrollierbarkeit der Gesamtmaßnahme muss stets gewährleistet sein.
- Es ist ein Aktionsrahmen zu definieren, d. h. der zeitliche und räumliche Rahmen der Sanierung (Reaktionsraum) ist festzulegen. Hinweis: Der Reaktionsraum kann größer sein als die aktuelle Belastung.

Sofern die Zugabe von Stoffen über eine Bodenpassage erfolgt, müssen auch eventuell verbleibende Bodenbelastungen in die Betrachtung einbezogen werden.

Anhang 12 Ableitung von Grundwasser - Wiederversickerung, Einleitung in Abwasseranlagen und oberirdische Gewässer

In diesem Anhang werden Hinweise zur Behandlung und Ableitung des bei der Sanierung entnommenen Grundwassers gegeben (Nr. 6 GWS-VwV). Die Wiederversickerung von gereinigtem Grundwasser hat Vorrang vor dem Einleiten in Abwasseranlagen und oberirdische Gewässer. Wenn die Wiederversickerung nicht sinnvoll oder möglich ist, kann der Einleitung in Abwasseranlagen oder oberirdische Gewässer zugestimmt werden, ggf. mit entsprechenden Auflagen.

- Anhang 12.1 Wiederversickerung von gereinigtem Grundwasser
- Anhang 12.2 Einleitung von gereinigtem Grundwasser in öffentliche Abwasseranlagen
- Anhang 12.3 Behandlung von verunreinigtem Grundwasser bei Einleitung in oberirdische Gewässer

12.1 Wiederversickerung von gereinigtem Grundwasser

Schadstoffbelastetes Grundwasser, das bei einer Sanierungsmaßnahme gefördert wird, soll zunächst aufbereitet und im Regelfall im Oberstrom der Grundwasserverunreinigung versickert werden, so dass großräumig Grundwasserstand und Grundwasserfließrichtung nicht beeinträchtigt werden (Nr. 6 Abs. 1 GWS-VwV). Damit hat die Versickerung von gefördertem Grundwasser Vorrang vor dem Einleiten in Abwasseranlagen oder oberirdische Gewässer. Die Einleitung in das Grundwasser ist eine erlaubnispflichtige Gewässerbenutzung, die einer Vorbehandlung nach dem Stand der Technik bedarf. Die Reinhaltung des Grundwassers nach § 48 WHG in Verbindung mit den Bewirtschaftungszielen nach § 47 WHG sind dabei zu beachten [6]. Soweit die GFS-Werte eingehalten werden, ist diese Voraussetzung gegeben. Im Einzelfall können die Grenzwerte für die Einleitung im Oberstrom schrittweise dem Sanierungsfortschritt angepasst werden.

Bei einer Versickerung im Unterstrom der Grundwasserverunreinigung sind die Einleitungsgrenzwerte an die Grundwasserbelastung des aufnehmenden Grundwasserkörpers anzupassen. Dabei können höhere Anforderungen zur Unterschreitung der GFS-Werte erforderlich werden, um dem Bewirtschaftungsziel nach § 47 Abs. 1 WHG (Verschlechterungsverbot) gerecht zu werden.

12.2 Einleitung von gereinigtem Grundwasser in öffentliche Abwasseranlagen

Nach § 38 Abs. 1 HWG gelten die Bestimmungen des WHG und des HWG über die Indirekteinleitung für das Einleiten von Grundwasser in öffentliche Abwasseranlagen (Indirekteinleitung), sofern es Stoffe enthält, die in der Abwasserverordnung begrenzt sind. Daher bedarf die Indirekteinleitung verunreinigten Grundwassers grundsätzlich einer Genehmigung durch die zuständige Wasserbehörde. Zuständige Wasserbehörde wäre in diesen Fällen zwar an sich die untere Wasserbehörde (UWB), doch wird meist die Schwerpunkt-Regelung nach § 65 Abs. 2 Satz 3 HWG die Zuständigkeit der oberen Wasserbehörde (OWB) begründen, da nicht nur die Einleitung wasserrechtlich erlaubt wird, sondern auch die Entnahme des Grundwassers zum Zwecke der Sanierung.

Nach § 38 Abs. 3 HWG kann durch Rechtsverordnung bestimmt werden, dass das Einleiten von Stoffen in geringen Mengen, die durch die Anforderungen für den Ort des Anfalls oder vor seiner Vermischung in der Abwasserverordnung begrenzt sind, anstatt einer Genehmigung einer Anzeige bedarf.

Für das Einleiten von verunreinigtem Grundwasser in öffentliche Abwasseranlagen wird diese Anzeigemöglichkeit als Ausnahme von der Genehmigungspflicht in § 2 Abs. 1 Satz 3 der auf § 38 Abs. 3 HWG gestützten Indirekteinleiterverordnung (IndV) [21] konkretisiert. Danach ist von einer geringen Menge, und damit von der Möglichkeit einer Anzeige, dann auszugehen, wenn entweder die Einleitmenge von 1 m³ je Stunde in die öffentliche Abwasseranlage nicht überschritten wird und keine sanierungspflichtige Boden- oder Grundwasserverunreinigung bekannt sind oder bei der Einleitung in die öffentliche Abwasseranlage die in der Anlage 1 zur IndV genannten

Schwellenwerte für die Fracht (in Ausnahmefällen die Schwellenwerte für die Konzentration) im unbehandelten Grundwasser nicht überschritten werden. Wird einer der Parameter hinsichtlich der Fracht (in Ausnahmefällen der Konzentration) im unbehandelten Grundwasser überschritten, ist eine Einleitung nur mit wasserrechtlicher Genehmigung zulässig.

Im Fall einer Anzeige oder Genehmigung für die Indirekteinleitung schließt der Bescheid zur Grundwassersanierung gemäß § 57 Abs. 2 Satz 3 HWG i. V. m. § 2 Abs. 1 Satz 3 IndV die Anzeige bzw. die Genehmigung ein. Die Anzeige oder Genehmigung kann auch in einer bodenschutzrechtlichen Entscheidung nach § 13 Abs. 6, oder § 10 Abs. 1 BBodSchG i. V. m. § 2 Abs. 1 Satz 3 IndV eingeschlossen werden (siehe Nr. 3.2 IndirekteinleiterVwV [37]). Das folgt aus der Konzentrationswirkung der Anordnung nach § 10 Abs. 1 BBodSchG (vgl. § 16 Abs. 2 BBodSchG) und der Verbindlichkeitserklärung für den Sanierungsplan (§ 13 Abs. 6 S.2 BBodSchG). In beiden Fällen ist/sind die für die öffentliche Abwasseranlage sowie die für die Abwassereinleitung in die öffentliche Abwasseranlage zuständige(n) Wasserbehörde(n) zu beteiligen. Im Fall einer Anordnung ist im Vorfeld der Entscheidung die Zustimmung des Betreibers der öffentlichen Kanalisation einzuholen.

Im Fall einer bodenschutzrechtlichen Zustimmung nach § 11 Abs. 2 HAltBodSchG liegt keine Konzentrationswirkung in Bezug auf weitere behördliche Entscheidungen vor (vgl. Hess. Landtag, Drucks. 16/7240, § 12 Abs. 3, S. 21). Daher kann die Anzeige oder Genehmigung für die Indirekteinleitung in die Entscheidung nach § 11 Abs. 2 HAltBodSchG nicht eingeschlossen werden.

Ungeachtet dessen gelten nach § 11 Abs. 3 HAltBodSchG alle erforderlichen behördlichen Zulassungen mit der Vorlage der Unterlagen als beantragt. Entsprechend sind die erforderlichen Unterlagen zur Anzeige gemäß IndV bzw. die erforderlichen Unterlagen für die Genehmigung der Indirekteinleitung den bei der Bodenschutzbehörde vorzulegenden Antragsunterlagen beizufügen (vgl. Hess. Landtag, Drucks. 16/7240, § 12 Abs. 3, S. 21). Da die Bodenschutzbehörde mangels Konzentrationswirkung des § 11 Abs. 2 HAltBodSchG nicht für eine Entscheidung nach der IndV bzw. eine Genehmigung nach § 58 WHG zuständig ist, leitet sie die Unterlagen an die für die Abwassereinleitung in die öffentliche Abwasseranlage zuständige Wasserbehörde zur eigenständigen Bearbeitung weiter. Im bodenschutzrechtlichen Bescheid ist ein entsprechender Hinweis auf die für die Indirekteinleitung erforderliche Anzeige gemäß IndV bzw. Genehmigung nach § 58 Abs. 1 Satz 1 WHG i. V. m. § 38 Abs. 1 HWG und die erfolgte Weiterleitung der Unterlagen an die zuständige Wasserbehörde aufzunehmen.

Verunreinigtes Grundwasser ist gemäß Nr. 6 Abs. 2 Satz 1 GWS-VwV nach dem Stand der Technik zu reinigen. Die Einleitwerte sind im Einzelfall festzulegen. Diese Anforderungen der GWS-VwV gelten für Grundwassersanierungen unabhängig von den Schwellenwerten der IndV, welche ausschließlich der wasserrechtlichen Abgrenzung zwischen Anzeige- und Genehmigungspflicht dienen bzw. einen aus der Abwasserverordnung (AbwV) [29] abgeleiteten Mindeststandard, nicht aber den Stand der Technik gemäß GWS-VwV, darstellen (siehe Nr. 2.3 IndirekteinleiterVwV und Kapitel 12.3 dieses Handbuchs).

Die Leistungsfähigkeit der Abwasserbehandlungsanlage kann nach Maßgabe von Nr. 6 Abs. 3 GWS-VwV berücksichtigt werden. Daneben sind die Vorgaben der kommunalen Abwassersatzung zu beachten.

12.3 Behandlung von verunreinigtem Grundwasser bei Einleitung in oberirdische Gewässer

Die Einleitung von Grundwasser in ein oberirdisches Gewässer ist eine Gewässerbenutzung im Sinne des § 9 Abs. 1 Nr. 4 WHG.

Kontaminiertes Grundwasser ist vor dem Einleiten in oberirdische Gewässer nach dem Stand der Technik zu reinigen, es sei denn, dass nach der Art, den Abflussverhältnissen und der Vorbelastung des aufnehmenden Gewässers weitergehende Anforderungen zu stellen sind. Anforderungen bzw. die dem Stand der Technik entsprechenden Grenzwerte sind im Einzelfall festzulegen (Nr. 6.2 GWS-VwV).

Die Anforderungen richten sich nach wasserrechtlichen Vorschriften. Dabei ist eine zweistufige Prüfung erforderlich. In der ersten Stufe ist eine Emissionsbetrachtung durchzuführen. Hierbei ist zu prüfen, welche Reinigungsverfahren in Bezug auf die jeweilige Kontamination dem Stand der Technik entsprechen und welche Ablaufwerte mit diesen Verfahren erreichbar sind. In der zweiten Stufe ist in einer Immissionsbetrachtung zu ermitteln, ob und in welchem Umfang das oberirdische Gewässer durch die Einleitung beeinträchtigt werden kann.

Eine Emissionsbetrachtung im Hinblick auf die bodenschutzrechtlich zu fordernde Abreinigung des belasteten Grundwassers richtet sich nach dem Stand der Technik gemäß Nr. 6 Abs. 2 GWS VwV und wird insoweit im bodenschutzrechtlichen Verfahren festgelegt. Im Rahmen der Erteilung der Einleiterlaubnis können von der Wasserbehörde unter wasserwirtschaftlichen Gesichtspunkten weitergehende Anforderungen gestellt werden, beispielsweise wegen der höheren Schutzwürdigkeit des aufnehmenden Gewässers (Immissionsbetrachtung).

Emissionsbetrachtung

Für die Emissionsbetrachtung ist der Stand der Technik relevant. Kriterien zum Stand der Technik sind in Anlage 1 des WHG sowie in Anhang 10 dieses Handbuchs genannt.

Die Nennung verschiedener Kriterien macht deutlich, dass der Stand der Technik nicht allein mit dem technisch Machbaren gleichgesetzt werden darf, sondern diese Kriterien im Einzelfall konkretisiert und bewertet werden müssen. Dabei sind insbesondere folgende Kriterien von Bedeutung: „Vergleichbare Verfahren, Vorrichtungen und Betriebsmethoden, die mit Erfolg im Betrieb erprobt sind“ und „Verbrauch an Rohstoffen und Art der bei den einzelnen Verfahren verwendeten Rohstoffe (einschließlich Wasser) sowie Energieeffizienz“.

Für die Emissionsbetrachtung können – im Hinblick auf die allgemeinen wasserwirtschaftlichen Anforderungen (§§ 1, 2, 5 und 6 WHG) an die Einleitung von verunreinigtem Grundwasser in Oberflächengewässer – die Regelungen in der AbwV entsprechend herangezogen werden. Insbesondere können die Reinigungsverfahren genutzt werden, mit denen die Anforderungen an das Abwasser für die Einleitungsstelle (Ablaufkonzentrationen) erreicht werden.

Die in den Anhängen der AbwV genannten Anforderungen an das Abwasser für die Einleitungsstelle (Ablaufkonzentrationen) stellen den Stand der Technik gemäß AbwV dar. Dabei wird allerdings von Voraussetzungen ausgegangen, die für belastetes Grundwasser nicht zutreffen. Beispielsweise gehen die Regelungen von höheren Schadstoffkonzentrationen im Zulauf, dem Einsatz wassersparender Produktionsverfahren und der Verwendung weniger gefährlicher Stoffe bei der Produktion aus. Die Ablaufwerte der Abwasserverordnung können deshalb nicht 1 : 1 übernommen werden, d. h. der Stand der Technik zur Abreinigung von Abwasser gemäß AbwV ist von dem Stand der Technik zur Abreinigung von Grundwasser gemäß GWS-VwV zu unterscheiden (siehe auch Nr. 2.3 IndirekteinleiterVwV). Entsprechend sind die dem Stand der Technik gemäß Nr. 6 Abs. 2 GWS VwV entsprechenden Emissionswerte somit im Einzelfall festzulegen.

Als erste Orientierung bzw. Mindestanforderung für die Festlegung von Emissionswerten aus Grundwasseraufbereitungsanlagen können die Schwellenwerte der IndV (ausgenommen Mineralölkohlenwasserstoffe und PAK) angewendet werden, siehe Tabelle 12-1. Ergänzend können die Werte der Tabelle 12-2 ebenfalls orientierend herangezogen werden. Für die in der Tabelle 12-2 aufgeführten Parameter sind in der IndV entweder keine Schwellenwerte aufgeführt oder die aus der AbwV abgeleiteten Schwellenwerte sind um ein Vielfaches höher als die in der hessischen Verwaltungspraxis für die Abreinigung von Grundwasserverunreinigungen etablierten Werte.

Bei der Ableitung der u. g. Emissionswerte wurden insbesondere mögliche Verlagerungen von nachteiligen Auswirkungen von einem Schutzgut auf ein anderes sowie die Reinigungsleistungen der für den jeweiligen Schadstoff einsetzbaren Verfahren berücksichtigt. Mit diesen Werten ist grundsätzlich sichergestellt, dass die Reinigung des verunreinigten Grundwassers nach dem Stand der Technik erfolgt und die in Anlage 1 WHG genannten Kriterien für die Bestimmung des Standes der Technik eingehalten werden.

Parameter	Emissionswert [$\mu\text{g}/\text{l}$]
Summe LHKW	60
Summe alkylierte Benzole (BTEX)	50
Arsen (As)	30
Chrom (Cr)	30
Nickel (Ni)	30
Cyanid, leicht freisetzbar	40

Tab. 12-1:

Orientierungswerte für Emissionswerte ausgewählter Stoffe basierend auf den Schwellenwerten der IndV (Anpassung im Einzelfall möglich)

Parameter	Emissionswert [$\mu\text{g}/\text{l}$]
Summe PAK (ohne Naphthalin)	1
Naphthalin u. Methylnaphthaline	5
Chlorethen (Vinylchlorid)	2
Summe Tri- und Tetrachlorethen	20
Mineralölkohlenwasserstoffe	1000
Benzol	10

Tab. 12-2:

Weitere Orientierungswerte für Emissionswerte in Ergänzung zu den in Tabelle 12-1 genannten Schwellenwerten (Anpassung im Einzelfall möglich)

Immissionsbetrachtung

In der zweiten Stufe, der Immissionsbetrachtung, ist zu prüfen, ob sich weitergehende Anforderungen zum Schutz eines oberirdischen Gewässers ergeben, die über den Stand der Technik hinausgehen. Sehr häufig wird diese Prüfung ohne nennenswerten Verwaltungs- und Prüfaufwand erfolgen können, da es sich um eine eindeutige Fallkonstellation handelt. In solchen Fällen genügt eine kurze (verbal-argumentative) Beschreibung der maßgeblichen Umstände.

Bei Fließgewässern sind insbesondere die Abfluss- und damit Verdünnungsverhältnisse von Bedeutung. Bei Kenntnis der Stoffkonzentration im behandelten Grundwasser, des anfallenden Grundwasservolumenstroms und des Niedrigwasserabflusses des Vorfluters kann errechnet werden, welche Konzentration eines Stoffes bei Niedrigwasserabfluss zu erwarten ist.

Maßgebend für die Beurteilung der Einleitung ist die Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung - OGewV) [30]. Insbesondere sind die in dieser Verordnung genannten Umweltqualitätsnormen (UQN) zu beachten. Besondere Bedeutung haben dabei die in Anlage 6 OGewV aufgeführten UQN zur Beurteilung des ökologischen Zustandes und die in Anlage 8 OGewV aufgeführten UQN zur Beurteilung des chemischen Zustandes eines Oberflächengewässers. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Einleitungen bereits signifikant sind, wenn die halbe UQN überschritten wird. In diesen Fällen sind unter Berücksichtigung der sonstigen Einleitungen beispielsweise aus kommunalen und gewerblichen Abwassereinleitungen sowie der Nutzungen des Gewässers die zulässigen Belastungen zu ermitteln.

Anhang 13 Positionierung der Sanierungsbrunnen und Pumpversuchsmessstellen

Im Folgenden wird zwischen Sanierungsbrunnen und Pumpversuchsmessstellen unterschieden. Sowohl bei Sanierungsbrunnen als auch bei Pumpversuchsmessstellen handelt es sich um Förderbrunnen, mit denen die von einer Schadstoffquelle emittierten Schadstoffe erfasst werden.

Als Sanierungsbrunnen kommen Förderbrunnen in Frage, mit denen sich das Sanierungsziel möglichst effizient erreichen lässt. Ziel ist i. d. R. eine möglichst hohe Schadstofffracht zu fördern oder eine weitere Ausbreitung des Schadstoffes zu verhindern.

Pumpversuchsmessstellen können u. a. genutzt werden, um die von der Schadstoffquelle unter normalen hydraulischen Bedingungen abströmende Schadstofffracht zu ermitteln. Ziel ist es dabei, mit dem Pumpversuch die gesamte Breite der Schadstofffahne zu erfassen, ohne die hydraulischen Bedingungen im Umfeld des Schadensfalls signifikant zu beeinflussen.

Positionierung von Sanierungsbrunnen

Zur Positionierung von Sanierungsbrunnen sind zwei Fragen zu klären:

- Steht eine möglichst effiziente Förderung der Schadstoffe (Sanierung im engeren Sinn) im Vordergrund, oder soll vor allem eine weitere Ausbreitung der Schadstoffe verhindert werden (Sicherung)?

Steht die Effizienz der Sanierung im Vordergrund, wird der oder werden die Sanierungsbrunnen im Bereich der höchsten Schadstoffkonzentrationen positioniert, im Allgemeinen also im Bereich der Schadensquelle oder in deren unmittelbaren Abstrom. Nachteilig ist hierbei, dass Schadstoffe, die sich nicht mehr im Einzugsgebiet des Brunnens befinden (außerhalb der Trennstromlinie bzw. im Abstrom des Kulminationspunktes), ungehindert abströmen.

Steht im Vordergrund, dass eine weitere Schadstoffausbreitung unterbunden werden soll, ist der Brunnen so auszulegen, dass die gesamte Breite der Schadstofffahne erfasst wird. Bei breiten Schadstofffahnen kann es erforderlich sein, mehrere nebeneinanderliegende Brunnen (Brunnengalerie) entlang einer Transekte zu positionieren.

Sind beide Ziele zu erreichen (Sanierung und Sicherung), werden mehrere Brunnen / Brunnengalerien entlang der Schadstofffahne positioniert (beispielsweise im nahen Abstrom, im mittleren Abstrom und im Bereich der Fahnenpitze).

- Ist eine Grundwasserabsenkung im Bereich der Schadensquelle vorteilhaft oder nachteilig?

Dieser Punkt ist wichtig für die Entscheidung, ob ein Sanierungsbrunnen im Bereich der Schadensquelle oder im nahen Abstrom der Schadensquelle positioniert werden soll. Bei einer Positionierung im Bereich der Schadensquelle tritt dort eine Grundwasserabsenkung ein, da sich die Schadstoffquelle innerhalb der Reichweite des Brunnens befindet. Eine Grundwasserabsenkung im Bereich der Schadensquelle tritt dagegen nicht ein, wenn sich der oder die Sanierungsbrunnen ausreichend weit im Abstrom befinden und die Schadensquelle somit außerhalb der Reichweite des Sanierungsbrunnens liegt (s. Abb. 13-1).

Vorteilhaft kann eine Grundwasserabsenkung sein, wenn gleichzeitig eine Bodenluftsanierung erfolgt; infolge der Grundwasserabsenkung können so leichtflüchtige Schadstoffe, die sich zuvor im Bereich des Kapillarsaums und im oberen Grundwasserbereich befanden, nun mittels Bodenluftabsaugung saniert werden.

Nachteilig kann eine Grundwasserabsenkung sein, wenn schadstoffbelastete Bereiche im oberen Grundwasserbereich infolge der Grundwasserabsenkung nicht mehr durchströmt werden würden. Sofern dort Schadstoffe verbleiben, werden diese nach Beendigung der hydraulischen Sanierung infolge des Wiederanstiegs des Grundwassers freigesetzt; auch kann durch den Wiederanstieg ein Verschmieren der Schadstoffe erfolgen, so dass eine schwer zu entfernende residuale Phase im Sediment oder am Brunnenfilter entsteht [22].

Zum Absaugen /Abschöpfen aufschwimmender Phasen (MKW- und BTEX-Schadensfälle) sollte im Bereich der Schadstoffquelle ein flacher Absenktrichter erzeugt werden. In diesem Bereich sammelt sich die aufschwimmende Phase an und kann mittels einer separaten Pumpe entfernt werden.

Positionierung von Pumpversuchsmessstellen

Bei der Positionierung von Pumpversuchsmessstellen ist entscheidend, welches Ziel mit dem Pumpversuch verfolgt werden soll:

- Gilt es, die hydraulischen Kennwerte (Durchlässigkeit, Transmissivität) zu bestimmen?
- Soll geprüft werden, ob die Schadstoffkonzentrationen rasch absinken (Bagatellschaden) oder über einen längeren Zeitraum weitgehend konstant bleiben?
- Soll geprüft werden, wie hoch die abströmenden Schadstofffrachten [g/d] im nahen Umfeld der Pumpversuchsmessstelle sind?
- Soll geprüft werden, ob die Pumpversuchsmessstelle in der Fahnenachse liegt oder eher im Randbereich der Schadstofffahne (im letzteren Fall würden die Schadstoffkonzentrationen während des Pumpversuchs ansteigen)?

In diesen Fällen werden Pumpversuche i. d. R. dort durchgeführt, wo die Sanierungsbrunnen installiert werden sollen.

Zur Bestimmung von Schadstofffrachten, die unter natürlichen Standortbedingungen (ohne Beeinflussung durch den Pumpbetrieb) abströmen, können Immissionspumpversuche durchgeführt werden ([9], dort Kapitel 4.5). Die Pumpversuchsmessstelle sollte in diesem Fall in ausreichendem Abstand zur Schadensquelle positioniert sein, um zu verhindern, dass durch den erzeugten Absenktrichter (Reichweite der Absenkung, Abb. 13-1) die Grundwasserfließgeschwindigkeit und Schadstofffreisetzung an der Quelle und somit die Schadstofffracht beeinflusst wird.

Da die Lage der Schadstofffahne meist nicht genau bekannt ist, ist es oft schwierig einen einzelnen Brunnen so zu positionieren, dass der Schadensfall mit nur einem Pumpversuch hinreichend erfasst wird. Bei großen Abständen zum Schadensfall oder der Nutzung mehrerer Brunnen ergeben sich oft sehr lange Pumpzeiten, um einen quasistationären Zustand zu erreichen. Die Schadstofffracht lässt sich in solchen Fällen auf Grundlage von Konzentrationsganglinien mit instationären Immissionspumpversuchen bestimmen (siehe [9], dort Kapitel 4.5.3).

Positionierung unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Standortbedingungen

Die richtige Positionierung von Sanierungsbrunnen und Pumpversuchsmessstellen setzt eine detaillierte hydrogeologische Modellvorstellung im Bereich des Schadensfalls voraus.

Hydrogeologische Modellvorstellungen sind idealerweise in ein numerisches Grundwassermodell zu übertragen. Numerische Grundwassermodelle haben sich seit vielen Jahren als Standardwerkzeug zur Beschreibung dieser Modellvorstellungen etabliert, da sie analytischen Ansätzen aufgrund ihrer Flexibilität deutlich überlegen sind. Dabei ist immer eine genaue Dokumentation der Modelle zur Bewertung der Kalibration und Prognosefähigkeit nötig.

Analytische Ansätze stellen hingegen immer eine starke Vereinfachung dar und können die in der Praxis auftretenden Fälle i. d. R. nur unzureichend beschreiben. Allerdings können diese vereinfachten Ansätze zur Gewinnung eines allgemeinen Verständnisses bzw. in einigen Fällen für eine Plausibilitätsbetrachtung dienen.

Analytischer Ansatz zur Plausibilitätsbetrachtung – Abschätzung der Reichweite und des Einzugsgebiets von Förderbrunnen in Porengrundwasserleitern

Die Reichweite (R) einer Absenkung lässt sich, unter der stark vereinfachten Annahme eines homogenen und isotropen Porengrundwasserleiters, nach Gleichung 1 anhand der Absenkung des Wasserspiegels (s) und der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters (k_f) abschätzen [43].

$$R = 3000 \cdot s \cdot \sqrt{k_f}$$

Gleichung 1

R = Reichweite der Absenkung [m]

s = Absenkung des Brunnenwasserspiegels [m]

k_f = Durchlässigkeitsbeiwert [s^2]

Zur Sicherung von Altlasten oder zur Durchführung von Immissionspumpversuchen ist die Pumprate (Entnahmemenge Q) so zu wählen, dass die Schadstoffquelle bzw. -fahne vollständig von der Trennstromlinie (Grenze des Einzugsgebiets) erfasst wird (Abb. 13-1).

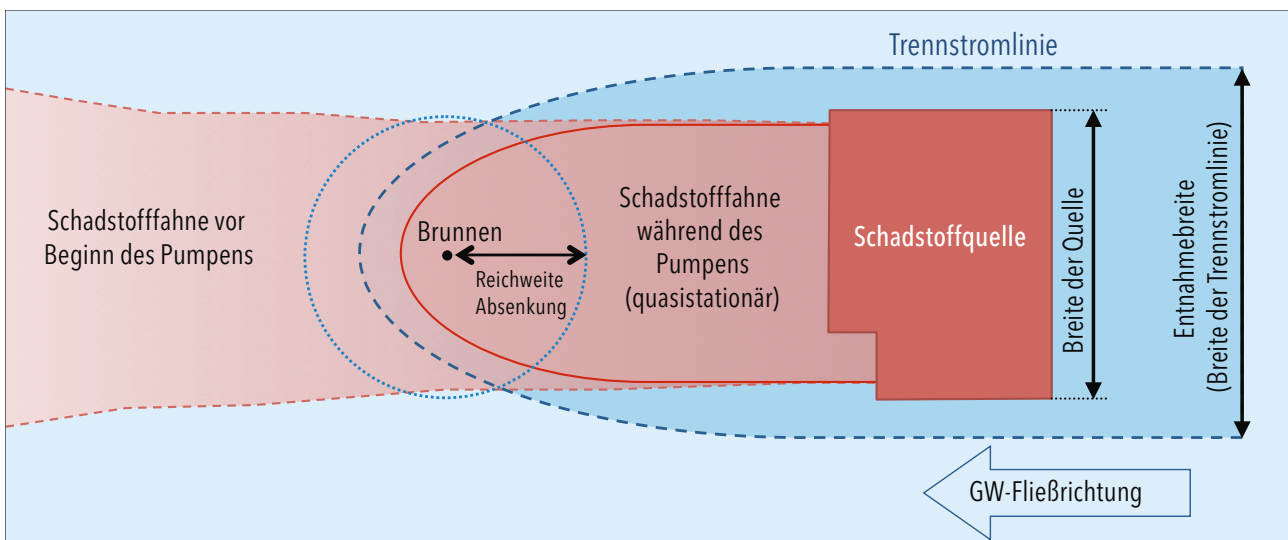


Abb. 13-1: Aufsicht auf einen Schadensfall mit Brunnen im Abstrom vor und nach dem Beginn des Pumpens sowie der dabei erzeugten Trennstromlinie (Grenze des Einzugsgebiets des Brunnen), der Reichweite der Grundwasserabsenkung sowie der Entnahmebreite und Breite der Schadstoffquelle

Die Entnahmebreite (B) lässt sich unter den o. g. vereinfachten Annahmen nach Gleichung 2 abschätzen.

$$B = \frac{Q}{M \cdot k_f \cdot I}$$

Gleichung 2

B = Entnahmebreite (Breite der Schadstofffahne) [m]
 Q = Entnahmemenge [$\frac{m^3}{s}$]
 M = Mächtigkeit des Grundwasserleiters (gesättigte Zone) [m]
 k_f = Durchlässigkeitsbeiwert [$\frac{m}{s}$]
 I = Grundwassergefälle [-]

Bei vergleichsweise breiten Schadstofffahnen sind i. d. R. mehrere nebeneinanderliegende Brunnen / Messstellen erforderlich, um den gesamten Schadensfall zu erfassen. Dabei ist zu beachten, dass der Abstand zwischen den Brunnen nicht zu groß wird. Der maximale bzw. kritische Abstand (a_{krit}) ergibt sich für identische Brunnen mit gleicher Förderrate nach Gleichung 3 (siehe auch Abb. 13-2).

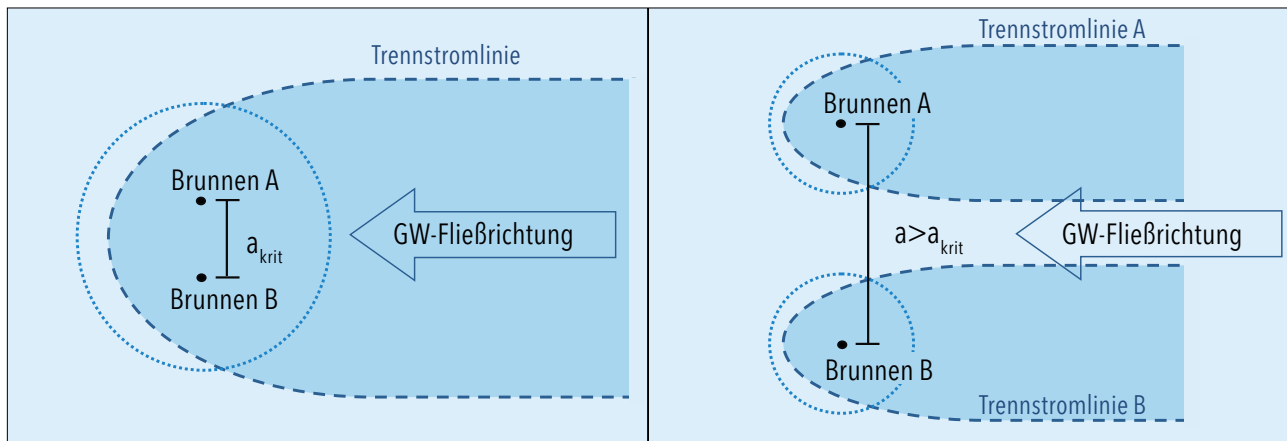


Abb. 13-2: Aufsicht auf eine Schadstoffquelle mit zwei Brunnen im Abstrom mit Abstand a , links: gemeinsame Trennstromlinie bei Einhaltung des kritischen Abstand (a_{krit}), rechts: getrennte Trennstromlinien bei zu großem Abstand

$$a_{krit} = \frac{Q}{\pi \cdot k_f \cdot I \cdot M}$$

Gleichung 3

a_{krit} = max. Abstand zwischen den Brunnen [m]
 I = Grundwassergefälle im Anstrom [-]
 k_f = Durchlässigkeitsbeiwert [$\frac{m}{s}$]
 Q = Entnahmemenge [$\frac{m^3}{s}$]
 M = Mächtigkeit des Grundwasserleiters (gesättigte Zone) [m]

Anhang 14 Dimensionierung von Pumpversuchsmessstellen und Sanierungsbrunnen

In diesem Anhang werden Überlegungen zur Dimensionierung von Sanierungsbrunnen und Pumpversuchen dargestellt.

Die u. g. Gleichungen stellen starke Vereinfachungen dar und sind daher lediglich für eine Abschätzung bzw. Plausibilitätsbetrachtung in Porengrundwasserleitern geeignet.

In der Praxis gibt es viele weitere Faktoren, die einen Einfluss auf die maximal mögliche Entnahme haben und durch die u. g. Gleichungen nicht berücksichtigt werden. Neben den Strömungen im Grundwasserleiter, welche durch Inhomogenität/Anisotropie der Sedimente und verschiedene Randbedingungen (z. B. Oberflächengewässer oder undurchlässigere Schichten) beeinflusst werden, spielen Strömungen im Brunnen und Ringraum eine wesentliche Rolle.

Die Dimensionierung eines Brunnens hängt in erster Linie von der benötigten Entnahmemenge (Q) ab. Wie bei der Positionierung, ist auch für die Ermittlung der Entnahmemenge eine detaillierte hydrogeologische Modellvorstellung notwendig, welche im Idealfall durch ein numerisches Grundwassermodell beschrieben wird.

Unter der stark vereinfachten Annahme eines homogenen und isotropen Porengrundwasserleiters kann die benötigte Entnahme anhand der Breite der Schadstofffahne (entspricht der notwendigen Entnahmbreite B), der Mächtigkeit (M) und der Durchlässigkeit (k_f) des Grundwasserleiters sowie dem natürlichen Grundwassergefälle (I) für einen Brunnen abgeschätzt werden (s. Abb. 14-1). Ziel der Dimensionierung ist es zu ermitteln, welchen Durchmesser/Radius das Filterrohr eines Brunnens aufweisen muss, um die benötigte Entnahmemenge fördern zu können. Die Dimensionierung kann ergeben, dass mehr als ein Brunnen zu errichten ist, um die gesamte Fahnenbreite zu erfassen. Es existieren auch analytische Ansätze zur Dimensionierung von Mehrbrunnenanlagen (Ersatzradius mehrerer identischer Brunnen). Allerdings ist deren Anwendung durch weitere Vereinfachungen stark eingeschränkt, so dass numerische Grundwassermodelle für diesen Zweck besser geeignet sind.

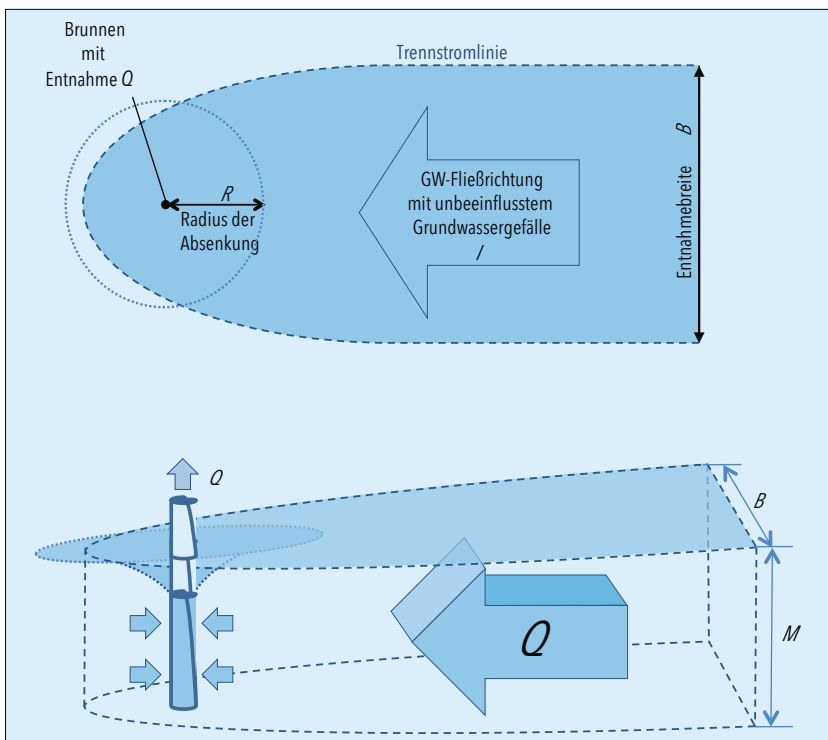


Abb. 14-1: Aufsicht und Seitenansicht eines im Grundwasserstrom befindlichen Brunnens mit Entnahmemenge Q , Radius der Absenkung R , Trennstromlinie, Entnahmbreite B und Mächtigkeit des Grundwasserleiters M

Unter den o. g. vereinfachten Annahmen kann die Entnahmemenge (Q) für einen Einzelbrunnen durch einfache Umstellung der Gleichung zur Abschätzung der Entnahmebreite (Gleichung 2 aus Anhang 13 „Positionierung der Sanierungsbrunnen und Pumpversuchsmessstellen“) abgeschätzt werden (vgl. Abb. 14-1).

Der für eine bestimmte Entnahmemenge notwendige Brunnenausbau ergibt sich aus der **Ergiebigkeit** (Wasserandrang) und dem **Fassungsvermögen des Brunnens**.

Für den einfachsten Fall eines näherungsweise homogenen, isotropen und unbegrenzten Porengrundwasserleiters mit gleichbleibender Mächtigkeit sowie horizontaler und laminarer Strömung kann die Dimensionierung eines Brunnens mit den u. g. Formeln abgeschätzt werden. Die in den folgenden Berechnungen und Erläuterungen verwendeten Begriffe sind in Abbildung 14-2 dargestellt.

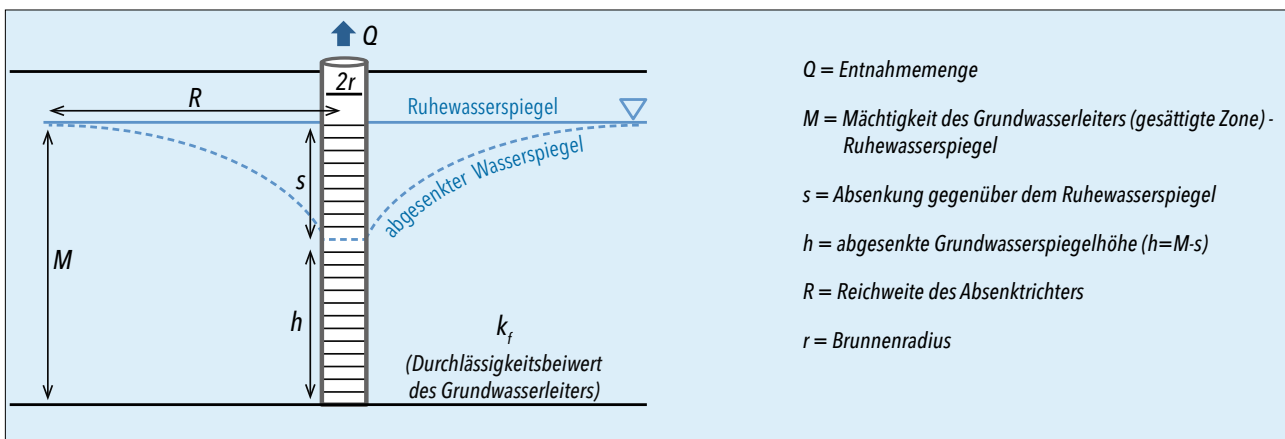


Abb. 14-2: Profilschnitt im Bereich eines Brunnens mit abgesenktem Wasserspiegel, Begriffe zur Anwendung in Gleichung 1 bis Gleichung 5

Die nachfolgenden Formeln gelten allerdings nur für vollkommene Messstellen, d. h. die Filterlänge des Brunnens entspricht der Mächtigkeit des zu untersuchenden Grundwasserleiters (M). In der Altlastenpraxis ist es jedoch häufig sinnvoll, **unvollkommene** Brunnen (die Filterstrecke erfasst dann nur einen Teil des Grundwasserleiters) anstelle von vollkommenen Brunnen zu errichten.

Abschätzung der Ergiebigkeit (Q_E)

Die Ergiebigkeit (Wasserandrang) hängt in erster Linie von der Mächtigkeit und Durchlässigkeit des Grundwasserleiters sowie der Absenkung im Brunnen ab. Dabei gilt, dass die maximale Ergiebigkeit (Wasserandrang) bei maximaler Absenkung eintritt, da hier der höchste Gradient zwischen Ruhe- und Brunnenwasserspiegel besteht. Nach der Brunnenformel von Dupuit & Thiem (Gleichung 1) kann für einen vollkommenen Brunnen (Filterlänge = M) mit einem gegebenen Brunnenradius (r) die Ergiebigkeit (Q_E) in Abhängigkeit vom Wasserstand im Brunnen (h) abgeschätzt werden [44,45].

$$Q_E = \frac{k_f \cdot \pi (M^2 - h^2)}{(\ln R - \ln r)}$$

Gleichung 1

Q_E = Ergiebigkeit (Wasserandrang) [$\frac{m^3}{s}$]

k_f = Durchlässigkeitsbeiwert [$\frac{m}{s}$]

M = Mächtigkeit des Grundwasserleiters (gesättigte Zone) – Ruhewasserspiegel [m]

h = abgesenkte Mächtigkeit Grundwassers [m]

R = Reichweite des Absenktrichters [m]

r = Brunnenradius [m]

Abschätzung des Fassungsvermögens (Q_F)

Das maximal mögliche Fassungsvermögen eines Brunnens ist vom Brunnenradius sowie der Länge der angeströmten Filterstrecke abhängig und kann in zwei Schritten abgeschätzt werden.

Zunächst ist die Grenzgeschwindigkeit (v_{max}) zu ermitteln. Diese ist die maximal mögliche Eintrittsgeschwindigkeit des Grundwassers an einem Brunnen und kann nach der empirischen Gleichung 2 anhand der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters (k_f) abgeschätzt werden [43].

$$v_{max} = \frac{\sqrt{k_f}}{15}$$

Gleichung 2

v_{max} = Grenzgeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]

k_f = Durchlässigkeitsbeiwert [$\frac{m}{s}$]

Das maximale Fassungsvermögen (Q_F) ergibt sich dann aus der Grenzgeschwindigkeit multipliziert mit der Brunneneintrittsfläche. Die Brunneneintrittsfläche wird aus der angeströmten Filterlänge (h) und dem Brunnen- bzw. Bohrlochradius nach Gleichung 3 ermittelt.

$$Q_F = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \cdot v_{max}$$

Gleichung 3

Q_F = maximales Fassungsvermögen des Brunnens [$\frac{m^3}{s}$]

r = Brunnenradius [m]

h = Filterstrecke unterhalb des Grundwasserspiegels [m]

v_{max} = Grenzgeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]

Da während des Pumpens eine Absenkung des Wasserspiegels im Brunnen erfolgt, nehmen mit steigender Entnahme die Brunneneintrittsfläche und somit auch das Fassungsvermögen (Q_F) ab.

Dimensionierung anhand der Ergiebigkeit Q_E und des Fassungsvermögens Q_F

Da die Ergiebigkeit (Q_E) mit steigender Absenkung zunimmt, aber das Fassungsvermögen des Brunnens (Q_F) mit steigender Absenkung abnimmt, kann die maximal mögliche Entnahmemenge (Q) grafisch durch Schnittpunkt-bildung beider Werte abgeschätzt werden (Abb. 14-3).

Der Wasserstand im Brunnen wird sowohl gegen die Ergiebigkeit (schwarze Kurven) als auch gegen das Fassungsvermögen (rote Geraden) aufgetragen. Der Schnittpunkt zwischen der Ergiebigkeit (Q_E nach Gleichung 1) und dem maximalen Fassungsvermögen (Q_F nach Gleichung 3) entspricht der gesuchten Entnahmemenge (Q). In Abbildung 14-3 ist die Abhängigkeit zwischen Ergiebigkeit, Fassungsvermögen und der möglichen Entnahmemenge für drei verschiedene Brunnenradien dargestellt (die Schnittpunkte wurden jeweils als Brunnenradius A, B und C bezeichnet).

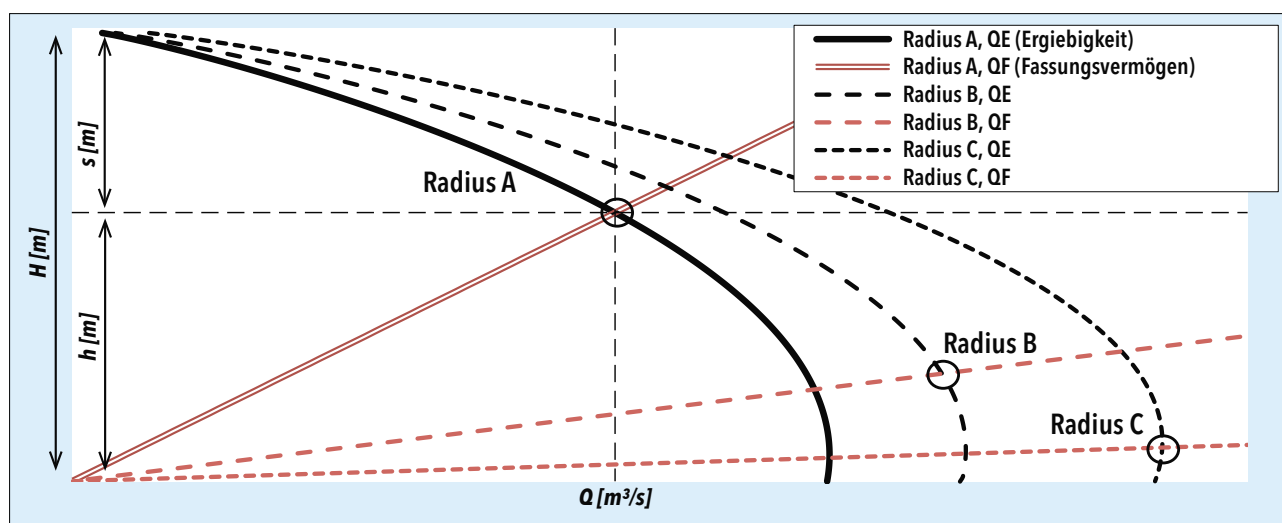


Abb. 14-3: Wasserentnahme (Q) bei verschiedenen Brunnenradien (Radius A < Radius B < Radius C), ermittelt aus dem Schnittpunkt zwischen Ergiebigkeit (Q_E) und Fassungsvermögen (Q_F) in Abhängigkeit vom Wasserstand (h) bzw. Absenkung (s)

Mit steigendem Brunnenradius erhöhen sich bei konstanter Absenkung die Eintrittsfläche und das Fassungsvermögen des Brunnenfilters, weiterhin steigt die Ergiebigkeit. Somit ist bei höheren Radien eine Erhöhung der Wasserentnahme und damit eine Vergrößerung des Einzugsgebiets des Brunnens möglich. Der für eine bestimmte Entnahme (Q) benötigte Brunnenradius lässt sich, bei Anwendung der oben gezeigten Gleichungen 1 bis 3, durch schrittweise Näherung (Iteration der Berechnungsschritte) ermitteln.

Hinweis zu Brunneneintrittsverlusten und dem wirksamen Brunnenradius

Brunneneintrittsverluste werden im Wesentlichen durch den Brunnenausbau (Filter / Ringraum / Filterkies) beeinflusst und können durch Alterungsprozesse (Verockerung, Versinterung) verstärkt werden. Des Weiteren spielen auch die Filteranordnung, die Position der Pumpe sowie deren Betriebsweise eine Rolle.

Die Eintrittsverluste entstehen hauptsächlich durch vertikale und/oder turbulente Strömungen an der Grenze zwischen Grundwasserleiter und Filterkies und an der Grenze zwischen Filterkies und Brunnenfilter. Brunneneintrittsverluste führen somit zu einer stärkeren Absenkung im Brunnen als im umgebenden Grundwasserleiter.

Die Differenz zwischen Brunnen- und Grundwasserspiegel ergibt sich aus der Sickerstrecke und dem Gradienten im Filterkies (Abb. 14-4).

Die Brunnenformel nach Dupuit & Thiem (Gleichung 1) sowie die anderen Gleichungen setzen laminare und horizontale Strömungen voraus. Eintrittsverluste werden nicht berücksichtigt, so dass die berechnete Absenkung der Grundwasseroberfläche, insbesondere im Nahbereich des Brunnens, nicht mit der gemessenen übereinstimmt (Abb. 14-4).

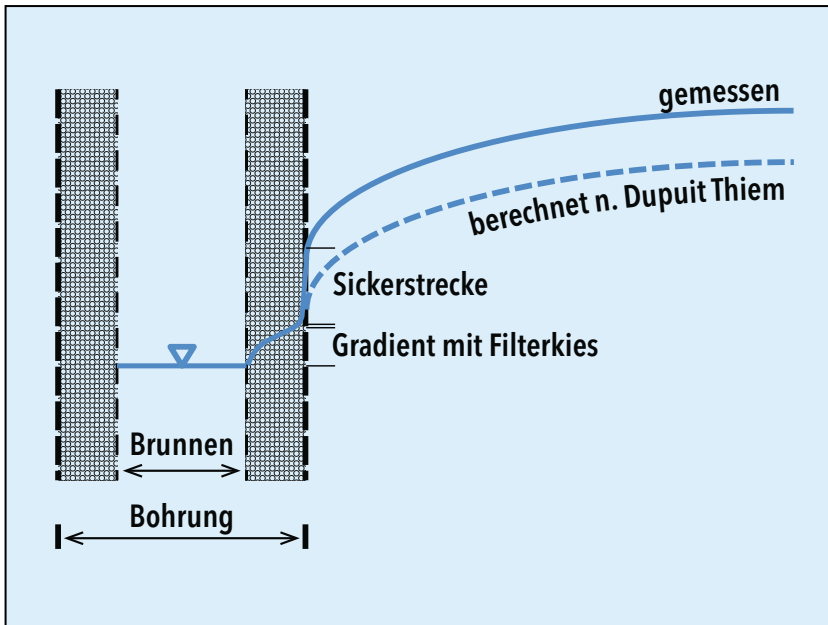
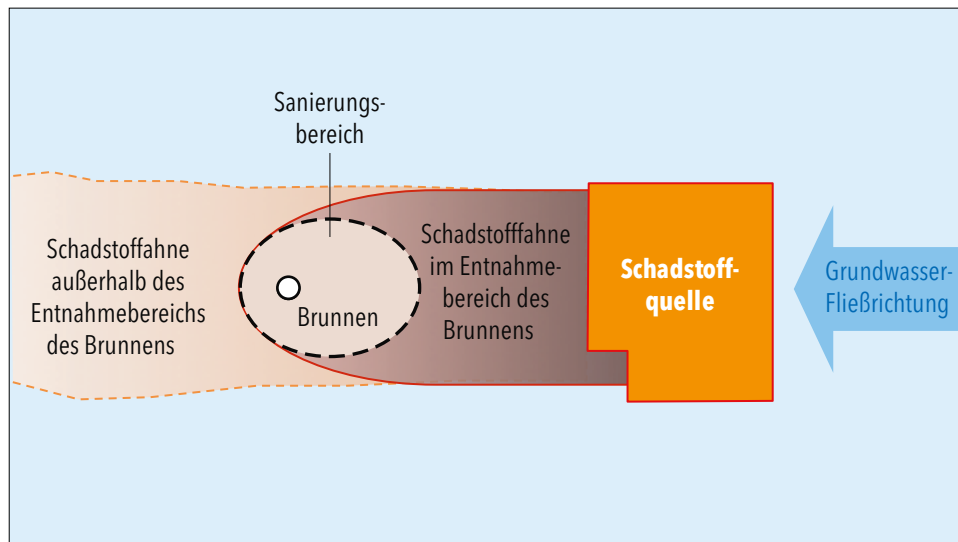


Abb. 14-4: Brunneneintrittsverluste „Sickerstrecke“ an der Grenzfläche zwischen Grundwasserleiter und Filterkiesschüttung (Bohrlochwand).

Der Bereich um den Brunnen, in dem die o. g. Strömungen und Eintrittsverluste auftreten, wird als **wirksamer Brunnenradius** bezeichnet. Jenseits des wirksamen Brunnenradius ist demnach von laminaren horizontalen Strömungen auszugehen, so dass sich dort die berechnete Grundwasseroberfläche einstellt. Da sich der wirksame Brunnenradius in der Praxis nur schwer bestimmen lässt, wird dieser meist mit dem Radius der Bohrung gleichgesetzt.

Anhang 15 Hinweise zur Festlegung der Sanierungsbereiche

Im Kapitel 4 und Anhang 16 wird auf verschiedene Sanierungsbereiche innerhalb einer Schadstofffahne eingegangen. Als Sanierungsbereich wird hier der Bereich innerhalb der Schadstofffahne bezeichnet, in dem eine Sanierungs-/Sicherungsmaßnahme direkt wirkt. Bei Pump&Treat-Maßnahmen entspricht der Sanierungsbereich dem Entnahmebereich des Brunnens (siehe Abbildung). Bei In-situ-Maßnahmen ist der Sanierungsbereich dort, wo die zugegebenen Hilfsstoffe die gewünschte Wirkung entfalten.



In der Abbildung ist beispielhaft eine Grundwasserverunreinigung dargestellt, die mittels Pump&Treat saniert wird. Von einer Schadstoffquelle geht eine Schadstofffahne aus. Der Bereich der Schadstofffahne zwischen Quelle und Brunnen liegt im Einzugsbereich des Brunnens; die dort vorhandenen Schadstoffe (Sanierungsbereich und dunkler Bereich der Fahne) werden vollständig vom Brunnen erfasst. Auf Schadstoffe, die außerhalb des Einzugsbereichs des Brunnens liegen (heller Bereich der Fahne), hat der Brunnen keinen Einfluss, sie strömen weiter ab.




Nach der oben gezeigten Abbildung kann die Schadstofffahne in drei Bereiche eingeteilt werden:

1. **Sanierungsbereich:**
Hier entfaltet die Grundwasserentnahme am Sanierungsbrunnen eine direkte Wirkung, d. h. die dort vorhandenen Schadstoffe strömen in kurzer Zeit dem Brunnen zu und werden aus dem Grundwasser entfernt.
2. **Bereich zwischen Schadstoffquelle und Sanierungsbereich:**
Die dort vorhandenen Schadstoffe werden im Laufe der Zeit vom Brunnen erfasst, jedoch hat der Brunnen nur einen geringen Einfluss auf die Schadstoffkonzentration in diesem Fahnenbereich.
3. **Bereich im Abstrom des Sanierungsbereichs:**
In diesem Fahnenbereich können die Schadstoffe vom Brunnen nicht erfasst werden. Allerdings verhindert der Brunnen das Nachströmen von Schadstoffen, so dass die Schadstoffkonzentration im Laufe der Zeit sinkt bzw. die Schadstofffahne „abreißen“ wird.

Anhang 16 Fallkonstellationen zu Sanierungsbereichen

Zur Erläuterung des Kapitels 4.1 zeigt dieser Anhang typische Fallkonstellationen für die Lage von Sanierungsbereichen innerhalb einer Schadstofffahne, auch unter Berücksichtigung des vorgegebenen Sanierungsziels (vgl. Kapitel 4.2.2).

Die Sanierung bzw. Sicherung erfolgt in den dargestellten Beispielen mittels Pump&Treat-Maßnahmen mit Sanierungsbrunnen. Die Vorgehensweise gilt jedoch sinngemäß auch für andere Sanierungs-/Sicherungsverfahren wie in-situ-Sanierungen. Dargestellt sind

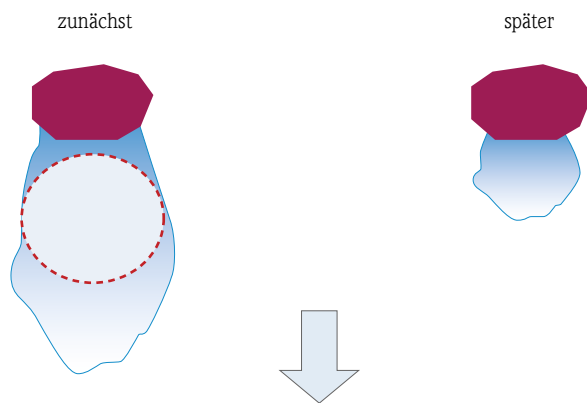
- Schadstoffquelle 
- Schadstofffahne 
- Sanierungsbereich (siehe Anhang 15) 

Hinweise: Die Fallbeschreibungen in der linken Spalte beziehen sich auf die Rangfolge der Sanierungsmaßnahmen in Kapitel 4.1 (vollständige Sanierung; Sanierungszielanpassung; Sicherung). Die GW-Fließrichtung ist in den folgenden Abbildungen von oben nach unten.

Fallbeispiel 1

„Vollständige Beseitigung der schädlichen Grundwasserverunreinigung“

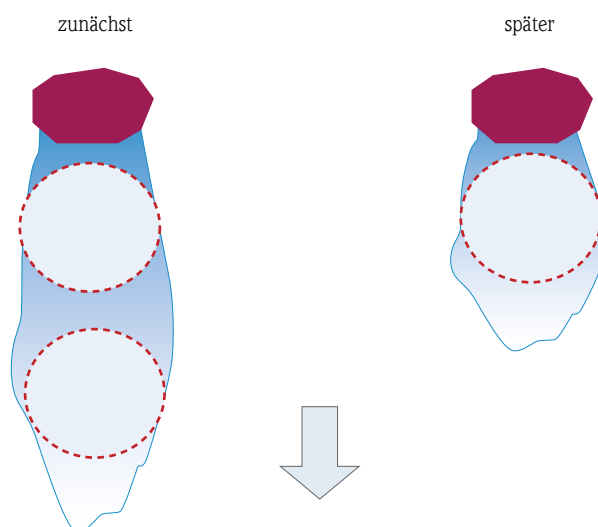
- Die Quelle ist weitgehend saniert.
- Der Sanierungsbrunnen erfasst die gesamte Fahnenbreite.
- Das Sanierungsziel gilt für die gesamte Fahne.
- Der Sanierungsbereich erfasst die Fahne nahezu vollständig.
- Später: Nach Erreichen des Sanierungsziels wird die Sanierungsmaßnahme beendet.



Fallbeispiel 2

„Vollständige Beseitigung der schädlichen Grundwasserverunreinigung“

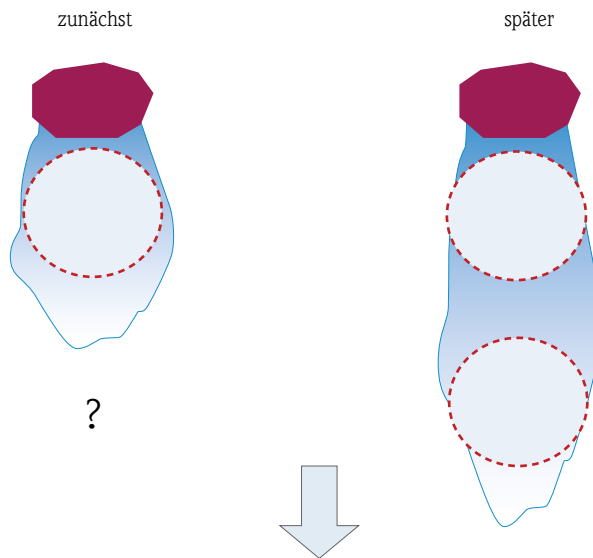
- Die Quelle ist weitgehend saniert.
- Die Sanierungsbereiche erfassen die Fahne nahezu vollständig.
- Später: Fahne ist rückläufig, daher entfällt ein Sanierungsbereich.



Fallbeispiel 3

„Vollständige Beseitigung der schädlichen Grundwasserunreinigung“

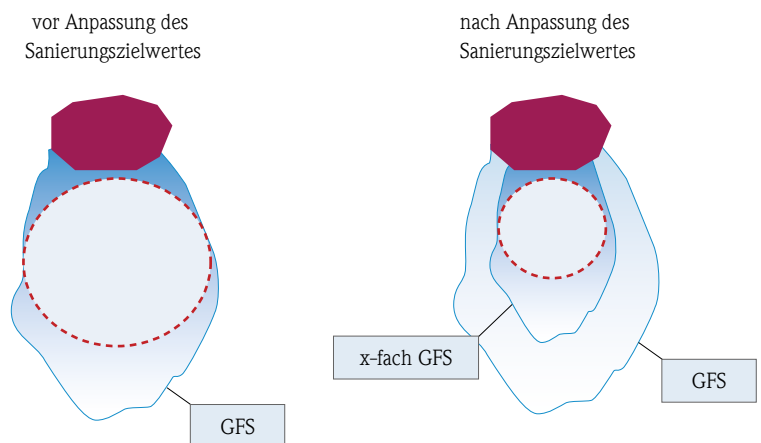
- Die Fahne ist noch nicht ausreichend erkundet.
- Es besteht dringender Handlungsbedarf; zunächst wird ein Sanierungsbereich im nahen Abstrom der Quelle eingerichtet und die Fahne parallel dazu weiter erkundet.
- Später: Nachdem die Fahne ausreichend erkundet ist, kommt ein weiterer Sanierungsbereich hinzu.



Fallbeispiel 4

„Sanierungszielanpassung“
(Erhöhung des Sanierungszielwertes)

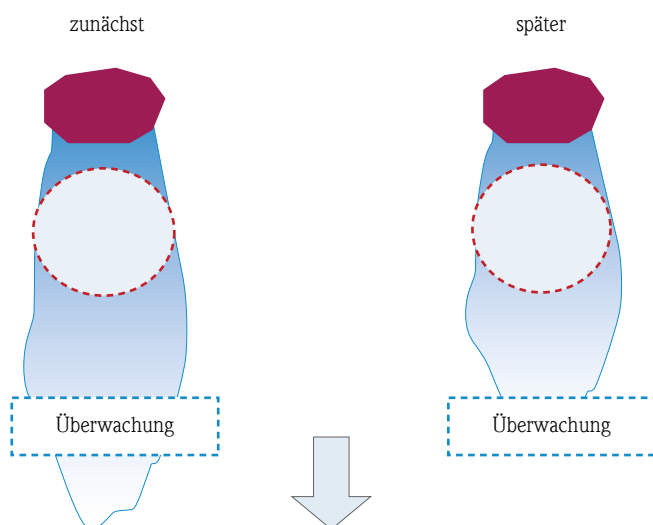
- Die vollständige Beseitigung der Schadstofffahne ist unverhältnismäßig.
- Infolge der Erhöhung des Sanierungszielwertes von „GFS“ auf „x-fach GFS“ wird der sanierungsbedürftige Bereich der Schadstofffahne kleiner.



Fallbeispiel 5

„Sanierungszielanpassung“
(räumliche Beschränkung)

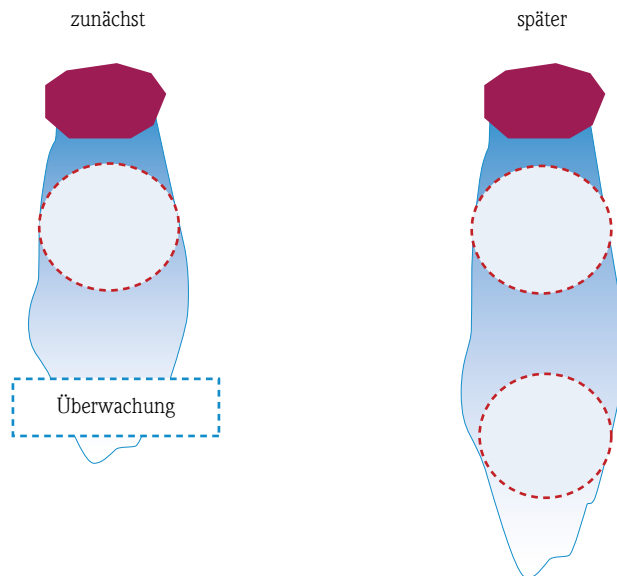
- Die vollständige Beseitigung der Schadstofffahne ist unverhältnismäßig.
- Daher wird ein Sanierungsbereich nur im nahen Abstrom eingerichtet und der restliche Fahnenbereich überwacht.
- Später: Die Fahne ist signifikant rückläufig, deshalb ist die vollständige Beseitigung weiterhin unverhältnismäßig.



Fallbeispiel 6

„Sanierungszielanpassung“
(räumliche Beschränkung)

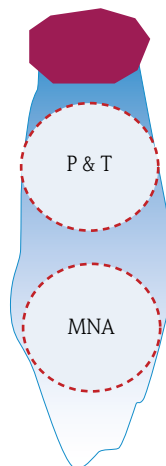
- Die vollständige Beseitigung der Schadstofffahne ist zu Beginn unverhältnismäßig.
- Daher wird ein Sanierungsbereich nur im nahen Abstrom eingerichtet und der restliche Fahnenbereich überwacht.
- Später: Da sich die Fahne trotz einer Grundwassersanierung im nahen Abstrom weiter ausbreitet, wird geprüft, ob weitere Maßnahmen doch verhältnismäßig sind. Im Ergebnis wird ein weiterer Sanierungsbereich eingerichtet.



Fallbeispiel 7

„Sanierungszielanpassung“
(Bereiche mit unterschiedlichen Sanierungszielen)

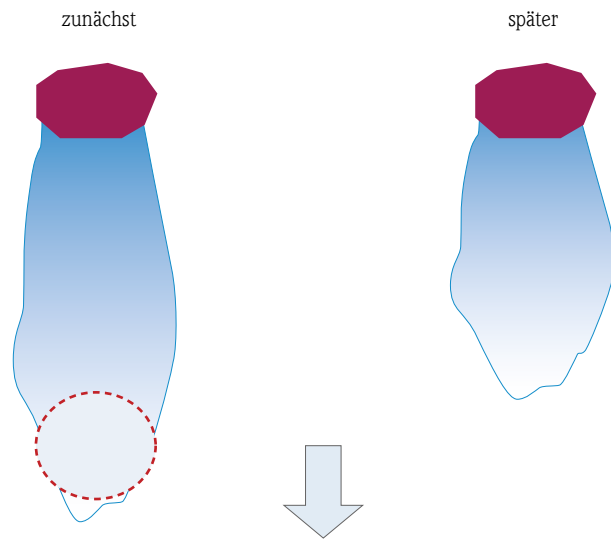
- Die vollständige Beseitigung der Schadstofffahne ist unverhältnismäßig.
- Es werden Bereiche mit unterschiedlichen Sanierungszielen und Sanierungsmethoden eingerichtet.
- Im nahen Abstrom findet eine Pump&Treat-Grundwassersanierung statt.
- Im Bereich der Fahnen Spitze findet MNA statt.



Fallbeispiel 8

„Sicherung der Grundwasserverunreinigung“

- Weder die vollständige Beseitigung der Schadstofffahne noch eine Sanierungszielanpassung sind verhältnismäßig.
- Die Quelle ist saniert.
- Durch die Maßnahme wird sichergestellt, dass eine weitere Ausbreitung der Schadstoffe verhindert wird.
- Später: Die Fahne ist signifikant rückläufig; deshalb wird die Maßnahme beendet.



Literatur

- [1] Verwaltungsvorschrift zur Erfassung, Bewertung und Sanierung von Grundwasserverunreinigungen (GWS-VwV) vom 18. Juli 2021 (StAnz. 32/2021 S. 1046)
- [2] Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), zuletzt geändert durch Artikel 7 des Gesetzes vom 25. Februar 2021 (BGBl. I S. 306)
- [3] Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716)
- [4] Hessisches Gesetz zur Ausführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes und zur Altlastensanierung (HAlt-BodSchG) vom 28. September 2007, zuletzt geändert durch Artikel 5 des Gesetzes vom 30. September 2021 (GVBl. S. 602)
- [5] Hessisches Wassergesetz (HWG), vom 14. Dezember 2010 (GVBl. I S. 548), zuletzt geändert durch Artikel 9 des Gesetzes vom 9. Dezember 2022 (GVBl. S. 764, 766)
- [6] Wasserhaushaltsgesetz (WHG) vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 04. Januar 2023 (BGBl. I Nr. 5)
- [7] Gesetz über die Vermeidung und Sanierung von Umweltschäden (Umweltschadensgesetz - USchadG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 5. März 2021 (BGBl. I S. 346)
- [8] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO): Grundsätze des nachsorgenden Grundwasserschutzes bei punktuellen Schadstoffquellen, 2006, https://www.lawa.de/documents/grundsaeetze_nachsorge_1552302463.pdf
- [9] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG): Handbuch Altlasten Band 3 Teil 6, Ermittlung von Schadstofffrachten im Grund- und Sickerwasser, 2008
- [10] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG): Handbuch Altlasten Band 3 Teil 2, Untersuchung von altlastverdächtigen Flächen und Schadensfällen, 2. überarbeitete Auflage 2014
- [11] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG): Handbuch Altlasten Band 3, Teil 8, Ökotoxikologische Verfahren als Bewertungshilfe bei Altlastenverfahren, 2014
- [12] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG): Handbuch Altlasten Band 3 Teil 3, Untersuchung und Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser (Sickerwasserprognose), 2. Auflage, 2002
- [13] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG): Handbuch Altlasten Band 8 Teil 1, Arbeitshilfe zu überwachten natürlichen Abbau- und Rückhalteprozessen im Grundwasser (Monitored Natural Attenuation MNA), 2. Auflage 2005
- [14] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG): Handbuch Altlasten Band 8 Teil 2, Arbeitshilfen zur Überwachung und Nachsorge von altlastverdächtigen Flächen und Altlasten, Teil „Biologische in-situ-Sanierungen“, 2005
- [15] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, aktualisierte und überarbeitete Fassung 2016

- [16] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, aktualisierte und überarbeitete Fassung 2016
- [17] STUPP, H. D., BAKENHUS, A., STAUFFER, R., LORENZ, D.: Sanierungsoptimierung von CKW-Grundwasserschäden – Möglichkeiten zur Reduzierung der Sanierungskosten, altlasten spektrum 6/2005
- [18] Sozial- und Umweltministerium Baden-Württemberg, Verwaltungsvorschrift über Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen einschließlich Erläuterungen (BW-VwV), Erlass vom 16. September 1993, Fassung vom 01. März 1998 (BW-VwV)
- [19] Grundwasserverordnung (GrwV) vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1513), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 12. Oktober 2022 (BGBl. I S. 1802)
- [20] Richtlinie 2006/118/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 2006 zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung – EG-Grundwasserrichtlinie (GWRL) – (ABl. L 372/19), geändert durch Richtlinie 2014/80/EU der Kommission vom 20. Juni 2014 (ABl. L 182/52)
- [21] Verordnung über das Einleiten von Grundwasser und Abwasser in öffentliche Abwasseranlagen (Indirekteinleiterverordnung – IndV) vom 20. Juni 2023 (GVBl. S. 484)
- [22] LANGGUTH H.-R., VOIGT, R.: Hydrogeologische Methoden, 2. Auflage 2004, Springer
- [23] BUSCH, K.-F., LUCKNER, L., TIEMER, K.: Lehrbuch der Hydrologie Band 3, Geohydraulik, 3. Auflage 1993, Gebrüder Borntraeger
- [24] DVGW-Arbeitsblatt W 111: Pumpversuche bei der Wassererschließung, 3/2015
- [25] Richtlinie 2008/105/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16.12.2008 über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik, (ABl. L 348/84), geändert durch Richtlinie 2013/39/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. August 2013 (ABl. L 226/1)
- [26] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie in Hessen, Bewirtschaftungsplan Hessen 2015-2021 (2015)
- [27] DIN 4049 Hydrologie Teil 3, Begriffe zur quantitativen Hydrologie, 1994
- [28] JOHNSON, A. I.: Specific yield – Compilation of specific yields for various materials, Geol. Survey Water-Supply Paper 1662-D, Washington D.C., 1967
- [29] Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung – AbwV) in der Fassung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 20. Januar 2022 (BGBl. I S. 87)
- [30] Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung – OGewV) vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873)
- [31] Bund/Länder Arbeitsgemeinschaften Bodenschutz und Wasser, Verhältnis von Bodenschutzrecht und Wasserrecht, Stand 22.07.2016
www.labo-deutschland.de/documents/Verhaeltnis_Bodenschutz-_u-_Wasserrecht_22-07-2016_2_2.pdf

- [32] HELD, T.: In-situ-Verfahren zur Boden- und Grundwassersanierung - Verfahren, Planung und Sanierungskontrolle, 1. Auflage 2014, Wiley-VCH
- [33] Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Baden-Württemberg (LUBW), Altlasten und Grundwasserschadensfälle 44, Ermittlung fachtechnischer Grundlagen zur Vorbereitung der Verhältnismäßigkeitsprüfung von langlaufenden Pump-and-Treat-Maßnahmen, Karlsruhe, Stand September 2015
- [34] Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Sachsen, Grundwasser und Altlasten (SMUL), Entscheidungshilfe Grundwassersanierung: Effizienz von Pump and Treat-Sanierungen, Dresden 2007
- [35] DRANGMEISTER, J., GROSSMANN, J., WILLAND, A.: GWKON - Eine Auswertung von durchgeführten Grundwassersanierungen der Länder und Ansätze zur Optimierung zukünftiger Maßnahmen, UBA-Texte 20/07.
- [36] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO): Natürliche Schadstoffminderung, Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung, Positionspapier, Stand 15.09.2015,
www.labo-deutschland.de/documents/2015_09_15-Endf_LABO-Pos-papier_Natuerl-Schadst.pdf
- [37] Verwaltungsvorschrift zur Indirekteinleiterverordnung (IndirekteinleiterVwV) vom 29.07.2023, StAnz. 2023, S. 1032
- [38] BVerfGE 50, 217 ff. (227); 80, 103 ff. (107); 99, 202 ff. (212 ff.)
- [39] BVerfG Beschluss vom 16. Februar 2000 - 1 BvR 242/91 - Rn. (1-69) zu den Grenzen der Zustandsverantwortlichkeit, www.bverfg.de/e/rs20000216_1bvr024291.html
- [40] Deutscher Bundestag: Drucksache 13/6701 vom 14.01.1997, Amtliche Begründung zum BBodSchG
- [41] MEISE, B.: Kostenreduzierung bei Grundwassersanierungen – Auf der Suche nach Einsparmöglichkeiten; in: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), altlasten annual 2014
- [42] Statistisches Bundesamt, Pressemitteilung vom 21. März 2014 – 110/14.
- [43] SICHARDT, W.: Das Fassungsvermögen von Rohrbrunnen und seine Bedeutung für die Grundwasserabsenkung, insbesondere für größere Absenkungstiefen, 1928, Springer
- [44] DUPUIT, J.: Etudes théoriques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables, 2. Auflage 1863, Dunod
- [45] THIEM, G.: Hydrologische Methoden, 1906, JM GEBHARDT'S