



Altlasten und Grund-  
wasserschadensfälle 44

# Ermittlung fachtechnischer Grundlagen zur Vorbereitung der Verhältnismäßigkeitsprüfung von langlaufenden Pump-and-Treat-Maßnahmen

 Entwicklung einer standardisierten Vorgehensweise

**Fortschreibung 2020**





# Ermittlung fachtechnischer Grundlagen zur Vorbereitung der Verhältnismäßigkeitsprüfung von langlaufenden Pump-and-Treat-Maßnahmen

 Entwicklung einer standardisierten Vorgehensweise

**Fortschreibung 2020**

**FORTSCHREIBUNG DER HANDLUNGSHILFE**

<b>HERAUSGEBER</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, <a href="http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de">www.lubw.baden-wuerttemberg.de</a>
<b>BEARBEITUNG</b>	ARCADIS Germany GmbH Dr. Michael Reinhard, Sandra Rettermayer  LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Dr. Helena Salowsky, Jochen Stark, Michael Weiller Referat 22 – Boden, Altlasten
<b>REDAKTION</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Referat 22
<b>BEZUG</b>	Diese Broschüre ist als Download im pdf-Format erhältlich bei der LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe unter: <a href="http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de">http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de</a>
<b>ISSN</b>	1437-0158
<b>ISBN</b>	978-3-88251-405-6
<b>STAND</b>	März 2020
<b>GESTALTUNG</b>	Jürgen Dürr, dūsign-Grafik
<b>BILDNACHWEIS</b>	Titelbild: Andy Ridder Fotografie

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

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>6</b>
<b>1 MOTIVATION UND ANLASS</b>	<b>7</b>
<b>2 RECHTLICHER RAHMEN</b>	<b>7</b>
<b>3 ANWENDUNGSGRUNDSÄTZE DER HANDLUNGSHILFE</b>	<b>9</b>
<b>4 DAS KONZEPT</b>	<b>10</b>
<b>5 PRÜFUNG DES OPTIMIERUNGSPOTENZIALS UND ERMITTLUNG VON ALTERNATIVEN (ELEMENT A)</b>	<b>13</b>
5.1 Allgemeine Vorgehensweise	13
5.2 Arbeitsschritt 1: Datenerfassung	14
5.3 Arbeitsschritt 2: Überschlägige Prüfung der Gesamtbetriebskosten	14
5.4 Arbeitsschritt 3: Prüfung der technischen Effizienz	15
5.5 Arbeitsschritt 4: Prognose der Restlaufzeit und Gesamtkosten	17
5.6 Arbeitsschritt 5: Prüfung des Sanierungsziels	17
5.7 Arbeitsschritt 6: Prüfung sonstiger Hinweise auf Ineffizienz	18
5.8 Arbeitsschritt 7: Prüfung von alternativen Techniken und Konzepten	18
<b>6 DARSTELLUNG DER SANIERUNGSEFFIZIENZ (ELEMENT B)</b>	<b>19</b>
6.1 Allgemeine Vorgehensweise	19
6.2 Datenerhebung	20
6.3 Statistische Auswertung von Daten zur Sanierungseffizienz	21
6.4 Auswertungen für Bodenluftsanierungen	25
<b>7 PROGNOSE DER GEFÄHRDUNGSENTWICKLUNG NACH ABSCHALTEN DER ANLAGE (ELEMENT C)</b>	<b>26</b>
7.1 Allgemeine Vorgehensweise	26
7.2 Arbeitsschritt 1: Konzeptionelles Standortmodell	26
7.3 Arbeitsschritt 2: Prognose der Schadstoffausbreitung nach einer möglichen Beendigung der aktiven Sanierung	29
7.4 Arbeitsschritt 3: Prüfung der zukünftigen Beeinflussung von Schutzgütern und ggfs. Prüfung von Belangen betroffener Dritter	30
7.5 Arbeitsschritt 4: Vorschlag zu Kontrollmaßnahmen	31
7.6 Arbeitsschritt 5: Kriterien für die Wiederaufnahme der aktiven Sanierung	31
<b>8 SCHLUSSBEMERKUNG</b>	<b>31</b>
<b>ANHANG A ERLÄUTERUNGEN ZU DEN ANLAGENAUSLEGUNGEN</b>	<b>33</b>
<b>ANHANG B VEREINFACHTE AUSWERTUNG ZUR ABSCHÄTZUNG VON GESAMTLAUFZEITEN UND -KOSTEN</b>	<b>37</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>45</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>46</b>

# Zusammenfassung

Aus ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten ist bei langlaufenden Sanierungsmaßnahmen eine regelmäßige Überprüfung der Effizienz unter Berücksichtigung der Erkenntnisse und Erfahrungen aus dem bisherigen Sanierungsverlauf angezeigt. Die Handlungshilfe befasst sich daher mit der Überprüfung von langlaufenden Pump-and-Treat-Maßnahmen und langlaufenden Bodenluftabsaugungen zur Vorbereitung der Verhältnismäßigkeitsprüfung durch die Behörden.

Sie richtet sich vor allem an die zuständigen Behörden, aber auch an Sachverständige, Fachbüros und Sanierungspflichtige, die langlaufende Sanierungsmaßnahmen beurteilen müssen. Sie beschreibt die Vorgehensweise bei der Prüfung des technischen und konzeptionellen Optimierungspotenzials, gibt Unterstützung zur Einordnung der Sanierungseffizienz sowie Empfehlungen zur Prognose der Gefährdungsentwicklung nach dem möglichen Abschalten einer Sanierungsanlage.

Die Handlungshilfe ist wie folgt aufgebaut:

Die Kapitel 1, 2, 3 und 4 erläutern die Grundlagen und den Anwendungsbereich der Handlungshilfe. Das Konzept der Vorgehensweise wird beschrieben und Begriffe definiert.

Kapitel 5 ist in sieben Arbeitsschritte gegliedert, die notwendig sind, um das Optimierungspotenzial einer Sanierungsmaßnahme zu prüfen und ggf. Alternativen zum bestehenden Verfahren aufzuzeigen.

Kapitel 6 beschreibt die Datenerhebung und statistische Auswertung von erhobenen Sanierungsfällen zur Ermittlung von spezifischen Betriebsparametern. Da keine allgemeingültigen Grenzwerte oder Grenzbereiche zur Effizienzbewertung abgeleitet werden können, wird dem Nutzer der Handlungshilfe die Möglichkeit gegeben, die Werte seiner spezifischen Betriebsparameter anhand der Auswertungen einzuordnen.

Kapitel 7 befasst sich mit der Prognose der zukünftigen Gefährdungsentwicklung für den Zeitraum nach dem Abschalten einer Sanierungsanlage. Im Wesentlichen wird die Prüfung der zukünftigen Beeinflussung von Schutzgütern und der Belange Dritter, die beim Abschalten einer Sanierungsanlage betroffen sein können, näher erläutert.

Die Handlungshilfe 2012 entstand im Rahmen des EU LIFE+Projekts „MAGPlan“ (Management plan to prevent threats from point sources on the good chemical status of groundwater in urban areas), das die Landeshauptstadt Stuttgart mit der LUBW als assoziiertem Partner von 2010 bis 2014 bearbeitete.

Nach sieben Jahren fand planmäßig die Fortschreibung und Aktualisierung der Handlungshilfe statt. Die grundsätzliche Vorgehensweise hat sich in der Vergangenheit bewährt und wurde beibehalten. In der aktualisierten Handlungshilfe wurden textliche Anpassungen vorgenommen und die in Kapitel 6 dargestellten Daten zur Einschätzung der Sanierungseffizienz aktualisiert. Hierzu erfolgte eine neue Datenerhebung zu Sanierungsfällen und eine Hochrechnung älterer Daten auf das aktuelle Preisniveau. Die nun wesentlich größere Datenbasis wurde statistisch aufbereitet und neu bewertet. Im Vergleich zur Handlungshilfe 2012 wurden in der vorliegenden Fassung Sanierungen mit einer Laufzeit von unter fünf Jahren nicht berücksichtigt, weil diese nicht als langlaufend angesehen werden können. Darunter fallen in der Regel PFC-Sanierungen, die somit nicht in den ausgewerteten Datensätzen enthalten sind.

# 1 Motivation und Anlass

Die Zeitdauer der Sanierung von Grundwasserschäden durch Förderung und Behandlung des verunreinigten Grundwassers (Pump-and-Treat-Maßnahme) beträgt in der Regel viele Jahre bis Jahrzehnte. Bei vielen dieser Pump-and-Treat-Maßnahmen nimmt die Effizienz während der Betriebszeit deutlich ab, ohne dass das Sanierungsziel erreicht wird. Der Schadstoffaustrag wird mit der Zeit geringer, es steigen die spezifischen Energieeinsätze und Kosten. Gleichzeitig hat in einigen Fällen durch die lange Betriebsdauer eine Reduzierung der Quellstärke stattgefunden. Aus ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten ist bei langlaufenden Sanierungsmaßnahmen eine regelmäßige Überprüfung der Effizienz unter Berücksichtigung der Erkenntnisse und Erfahrungen aus

dem bisherigen Sanierungsverlauf angezeigt. Mit der Vorlage der ersten Fassung der Handlungshilfe im Jahre 2012 kam die LUBW der Aufforderung von Vertreterinnen und Vertretern der Bodenschutz- und Altlastenbehörden des Landes nach, qualifizierte Kriterien zusammenzustellen, die zur Überprüfung solcher langlaufender Maßnahmen geeignet sind und bei der Entscheidung helfen, ob die Maßnahme weiter optimiert werden sollte oder gegebenenfalls beendet werden kann.

Weil Pump-and-Treat-Maßnahmen mit Bodenluftabsaugungen kombiniert sein können, wurden ergänzend auch Hinweise zur Prüfung dieser aufgenommen.

## 2 Rechtlicher Rahmen

### **SANIERUNG, GEFAHRENABWEHR**

Nach dem Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) sind Sanierungsmaßnahmen

1. zur Beseitigung oder Verminderung der Schadstoffe (Dekontaminationsmaßnahmen)  
**oder**
2. die eine Ausbreitung der Schadstoffe langfristig verhindern oder vermindern, ohne die Schadstoffe zu beseitigen (Sicherungsmaßnahmen).

Sanieren bedeutet nach § 4 Abs. 3 BBodSchG, dass dauerhaft keine Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit entstehen.

### **ERMESSEN**

Ermessen bedeutet, dass die Behörde einen Handlungsspielraum besitzt, in dessen Rahmen sie ihre Entscheidung im Einzelfall trifft. Die Behörden haben bei ihrer

Entscheidung immer den Zweck der zur Ausübung des Ermessens ermächtigenden Vorschrift und die inhaltlichen Grenzen dieser Entscheidung zu beachten. Zudem sind die allgemeinen Rechtsgrundsätze, wie z.B. Angemessenheit der Mittel, Erforderlichkeit und Zumutbarkeit für den Betroffenen zu berücksichtigen.

Das verwaltungsrechtliche Handeln unterscheidet zwei Ermessensformen:

#### ■ **Entschließungsermessen**

Die Behörde hat pflichtgemäß zu entscheiden, ob sie Maßnahmen ergreift.

#### ■ **Auswahlermessen**

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

## ERLÄUTERUNGEN

### Grundsätzliches zur Prüfung der Verhältnismäßigkeit

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

Die Verhältnismäßigkeitsprüfung gliedert sich in drei Schritte:

#### ■ **Eignung der Maßnahme**

Ist die Art der Maßnahme, die ausgewählte Technik überhaupt geeignet, den gewünschten Zweck bzw. angestrebten Erfolg (Ziel) zu erreichen?

#### ■ **Erforderlichkeit der Maßnahme**

Eine Maßnahme ist erforderlich, wenn es keine andere, mildere, aber ebenso taugliche Maßnahme gibt, um das Ziel zu erreichen.

#### ■ **Angemessenheit der Maßnahme**

Steht die ausgewählte Maßnahme in einem zumutbaren Verhältnis von Aufwand und angestrebtem Erfolg?

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

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

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

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

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

Im Anhang „Sanierungsuntersuchung“ der BBodSchV heißt es: „Mit Sanierungsuntersuchungen bei Altlasten sind die zur Erfüllung der Pflichten nach § Abs.3 des BBodSchG geeigneten, erforderlichen und angemessenen Maßnahmen zu ermitteln.“

# 3 Anwendungsgrundsätze der Handlungshilfe

Die Handlungshilfe bezieht sich auf Maßnahmen des nachsorgenden Bodenschutzes, die von schädlichen Bodenveränderungen oder Altlasten verursachte Grundwasserunreinigungen bzw. nachteilige Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit betreffen. Langlaufende Pump-and-Treat-Maßnahmen haben in einigen Fällen durch den langen Betrieb zu einer Reduzierung der Quellstärke geführt. Wegen der dadurch veränderten Grundlage der Gefährdungsabschätzung ist es im Rahmen des nachsorgenden Bodenschutzes grundsätzlich zulässig, bei diesen Maßnahmen die Verhältnismäßigkeit zu prüfen.

Mit dieser Handlungshilfe wird ein standardisiertes Vorgehen zur fachtechnischen Grundlagenermittlung zur Vorbereitung der Verhältnismäßigkeitsprüfung von Pump-and-Treat-Maßnahmen und Bodenluftsanierungen vorgestellt. Die Verhältnismäßigkeitsprüfung selbst ist immer eine Einzelfallentscheidung, die ausschließlich von der zuständigen Behörde durchgeführt wird. Sie ist nicht Gegenstand der Handlungshilfe.

Durch das im Folgenden beschriebene Vorgehen darf die Einzelfallbeurteilung nicht ersetzt, vielmehr sollen fachlich fundierte und reproduzierbare Grundlagen geliefert werden, um eine fundierte, nachvollziehbare Einzelfallentscheidung durch die zuständige Behörde zu ermöglichen.

Die Entscheidung über den weiteren, eventuell geänderten Fortgang der Sanierung trifft die zuständige Bodenschutz- und Altlastenbehörde. Dazu gehört im Falle einer unanfechtbaren Sanierungsanordnung auch die vorgreifliche Entscheidung darüber, ob das Verfahren, etwa nach § 51 Absatz 1 LVwVfG wegen geänderter Sachlage oder neuer Erkenntnismittel, wiederaufgegriffen werden muss oder sonst nach pflichtgemäßem Ermessen der Behörde wiederaufgegriffen werden soll oder ob im Falle eines öffentlich-rechtlichen Sanierungsvertrages dessen Änderung, etwa nach § 60 LVwVfG, in Betracht kommt.

Die Änderung oder Beendigung einer Sanierungsmaßnahme kommt insbesondere in Frage, wenn die Behörde im Rahmen einer Verhältnismäßigkeitsprüfung die Eignung, Erforderlichkeit und Angemessenheit der Maßnahme prüft und als nicht mehr verhältnismäßig einstuft. Sanie-

rungsentscheidungen sind Einzelfallentscheidungen. Vorbereitende standardisierte Methoden sind bisher nur in geringem Umfang verfügbar. Diese Handlungshilfe enthält Hinweise zu einer standardisierten, fachtechnischen Grundlagenermittlung, die der Vorbereitung einer Verhältnismäßigkeitsprüfung im Einzelfall dienen sollen.

Als Grundlage für eine Überprüfung der Sanierungsmaßnahme ist es in der Regel erforderlich, dass der bodenschutz- und wasserrechtliche Handlungsbedarf in den technischen Untersuchungsstufen umfänglich untersucht und bewertet wurde und eine Sanierungsuntersuchung der Sanierungsentscheidung vorausgegangen ist.

Abweichungen von der systematischen Vorgehensweise sind dann möglich, wenn eine Pump-and-Treat-Maßnahme bei Gefahr im Verzug als Sicherungsmaßnahme eingesetzt wird.

Bei Pump-and-Treat-Maßnahmen, insbesondere in Wasserschutz- oder Heilquellenschutzgebieten, in denen sich Schadstoffe im Grundwasser weiter ausbreiten können und damit eine Gefahr für die Wassernutzung besteht, ist in aller Regel nicht zu prüfen „ob“ die Sanierung fortzuführen ist, sondern „wie“ effizient die Sanierung oder Sicherung weitergeführt werden kann.

Die Prüfung der Verhältnismäßigkeit erfolgt durch die zuständige Behörde, die über die Weiterführung, Änderung oder Beendigung der Sanierungsmaßnahme entscheidet. 

Bei der Prüfung der Verhältnismäßigkeit, insbesondere der Angemessenheit, muss die Behörde erforderlichenfalls auch Kriterien berücksichtigen und bewerten, die nicht in dieser Handlungshilfe genannt sind. 

Diese Handlungshilfe ist kein Rechtskommentar, sondern lediglich eine Arbeitshilfe zur standardisierten, fachtechnischen Grundlagenermittlung zur Vorbereitung der Verhältnismäßigkeitsprüfung. 

# 4 Das Konzept

Bei der Prüfung der Verhältnismäßigkeit sind die Kriterien „Eignung“, „Erforderlichkeit“ und „Angemessenheit“ zu berücksichtigen (siehe auch Kapitel 2 „Rechtlicher Rahmen“).

Es ist sinnvoll, für die laufende Maßnahme zunächst mögliche technische bzw. konzeptionelle Optimierungsmöglichkeiten zu überprüfen sowie anschließend einen Variantenvergleich im Sinne einer Sanierungsuntersuchung nach Altlasten- und Bodenschutzrecht durchzuführen. Bei dem Variantenvergleich wird die aktuelle Maßnahme mit alternativen Techniken oder Konzepten verglichen. Die Prüfung des technischen Optimierungspotentials und die Ermittlung von Alternativen werden in Kapitel 5 der Handlungshilfe beschrieben.

Regelmäßig zu berücksichtigende Aspekte sind die Sanierungseffizienz und die zukünftige Gefährdungsentwicklung im Falle des Abschaltens der Pump-and-Treat-Maßnahme. Für diese beiden Elemente wird in der vorliegenden Handlungshilfe eine Vorgehensweise zur Grundlagenermittlung beschrieben (Kapitel 6 und 7).

Weitere in der Handlungshilfe nicht genannte und zu berücksichtigende Aspekte können sich im Einzelfall ergeben.



Zusammenfassend gliedert sich die in dieser Handlungshilfe vorgestellte fachtechnische Grundlagenermittlung zur Verhältnismäßigkeitsprüfung im Wesentlichen in die drei Elemente:

**A (Kapitel 5):** Prüfung des technischen/konzeptionellen Optimierungspotenzials und Ermittlung von weiteren, besseren Alternativen

**B (Kapitel 6):** Darstellung der Sanierungseffizienz

**C (Kapitel 7):** Zukünftige Gefährdungsentwicklung für den Fall der Außerbetriebnahme der Sanierung

In Abb. 1 ist in einem Ablaufschema die fachtechnische Grundlagenermittlung dargestellt, wie diese erfahrungsgemäß ablaufen wird und ob Optimierungspotential besteht.

Die Prüfung, ob es sich bei der Pump-and-Treat-Maßnahme tatsächlich um die einzig mögliche Variante ohne bessere Alternative handelt, erfolgt meist in einem ersten Schritt getrennt und unabhängig von den beiden anderen Elementen. Zeigt sich dabei eine bessere Alternative oder ein Optimierungspotenzial, erfolgt eine Anpassung der Sanierung. Ist im Ergebnis keine Alternative vorhanden bzw. keine Optimierung möglich, folgen danach die Effizienzdarstellung und die Prognose der Gefährdungsentwicklung.

Auf Basis der Ergebnisse der Grundlagenermittlung, die durch den Sanierungspflichtigen zu leisten sind, prüft die zuständige Behörde und ggfs. die Bewertungskommission für Bodenschutz und Altlasten die fachliche Richtigkeit.

Die Prüfung der Verhältnismäßigkeit wird ausschließlich durch die zuständige Behörde, die über die Weiterführung bzw. Beendigung der Sanierungsmaßnahme entscheidet, durchgeführt (nicht Gegenstand der Handlungshilfe).

Die einzelnen Elemente A, B und C der fachtechnischen Grundlagenermittlung zur Verhältnismäßigkeitsprüfung werden nachfolgend beschrieben.

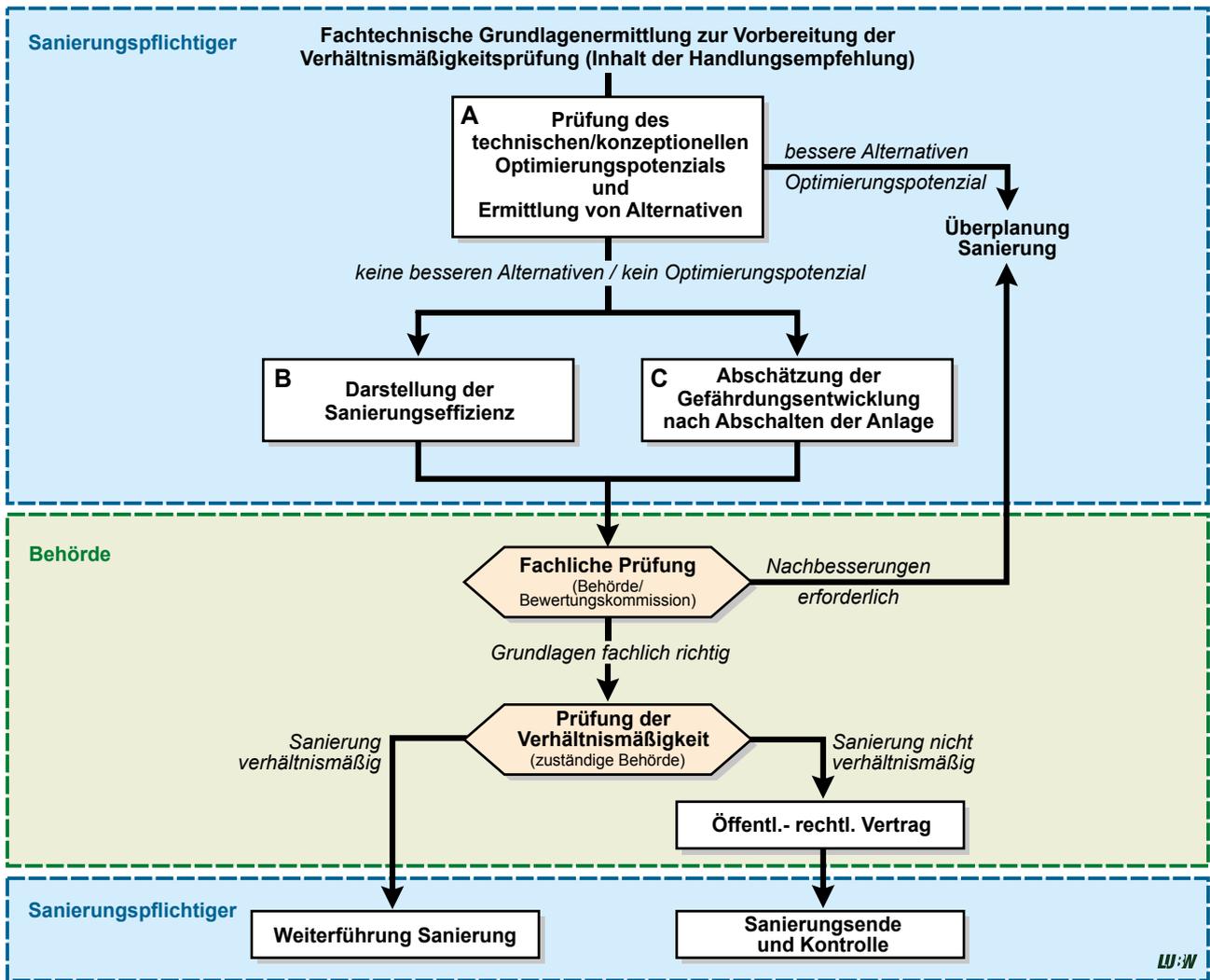


Abb. 1: Ablaufschema der fachtechnischen Grundlagenermittlung zur Vorbereitung der Verhältnismäßigkeitsprüfung langlaufender Pump-and-Treat-Maßnahmen (im Regelfall, Ausnahmen sind möglich)

## **Element A: Prüfung des technischen / konzeptionellen Optimierungspotenzials und Ermittlung von Alternativen**

Meist haben sich bei den langlaufenden Pump-and-Treat-Maßnahmen die Schadstofffrachten reduziert und es stehen inzwischen andere, neuere Techniken als zu Beginn der Sanierung zur Verfügung. Im Regelfall wird deshalb in einem ersten Schritt überprüft, ob es zu der laufenden Sanierung inzwischen ein technisches Optimierungspotenzial bzw. bessere Alternativen zu der Sanierungstechnik oder zu dem Sanierungskonzept gibt.

Die Prüfung des technischen Optimierungspotenzials erfolgt durch

- die Ermittlung der Betriebskosten
- der Abschätzung der Restlaufzeiten sowie der hieraus abgeleiteten
- Berechnung der Gesamtkosten als Kostenbarwert unter Berücksichtigung von
- sonstigen Hinweisen auf einen ineffektiven Betrieb

Die Prüfung alternativer Techniken oder Sanierungskonzepte sollte in Anlehnung an die in der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vorgesehenen Sanierungsuntersuchung durchgeführt werden. Bei der Sanierungsuntersuchung sind die zur Sanierung geeigneten, erforderlichen und angemessenen Maßnahmen zu ermitteln und transparent darzulegen. Gibt es nach dem ersten Schritt (Element A), bei dem alle Techniken und Konzepte nach dem Stand der Technik geprüft werden sollten, keine bessere Alternative zu der laufenden Sanierung, erfolgt im Regelfall in weiteren Schritten (Element B) die Grundlagenermittlung zu den Aspekten „Effizienz der Sanierungsmaßnahme“ und „Abschätzung der Gefährdungsentwicklung nach Abschalten der Sanierung“ (Element C).

## **Element B: Darstellung der Sanierungseffizienz**

Die Darstellung der Sanierungseffizienz erfolgt auf Basis von spezifischen Betriebsparametern, insbesondere:

- Fördermenge je entfernte Schadstoffmasse [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]
- Energieaufwand je entfernte Schadstoffmasse [ $\text{kWh}/\text{kg}$ ]
- Kosten je entfernte Schadstoffmasse [ $\text{€}/\text{kg}$ ]

Für die Bewertung dieser Größen gibt es keine allgemeingültigen Bewertungskriterien. Auf Basis einer statistischen Auswertung von rund 150 Sanierungsmaßnahmen kann die einzelne Sanierungsmaßnahme orientierend im Vergleich eingeordnet werden.

## **Element C: Prognose der Gefährdungsentwicklung nach Abschalten der Anlage**

Wichtiger Entscheidungspunkt bei der Bewertung einer langlaufenden Sanierungsmaßnahme ist die Betrachtung der zukünftigen Gefährdung von Schutzgütern, die bei Beendigung der Maßnahme eintreten würde.

Die allgemeine Vorgehensweise gliedert sich in fünf Arbeitsschritte:

- Schritt 1:** Zustandsbeschreibung (konzeptionelles Standortmodell)
- Schritt 2:** Prognose der Schadstoffausbreitung nach einer möglichen Beendigung der aktiven Sanierung
- Schritt 3:** Prüfung und Prognose der zukünftigen Beeinflussung von Schutzgütern und betroffenen Belangen Dritter, die bei Hinnahme einer Grundwasserverunreinigung in Zukunft betroffen sind oder sein können
- Schritt 4:** Vorschlag zu Kontrollmaßnahmen zur Prüfung der Prognose
- Schritt 5:** Festlegung von Kriterien für die Wiederaufnahme der aktiven Sanierung, sofern sich die Prognose nicht bestätigt und die tatsächliche Gefährdung größer ist als die prognostizierte und diese nicht hinnehmbar ist

# 5 Prüfung des Optimierungspotenzials und Ermittlung von Alternativen (Element A)

## 5.1 Allgemeine Vorgehensweise

Bei Element A erfolgt die Prüfung des Optimierungspotenzials und technischer Alternativen bzw. Sanierungskonzepte. Die Vorgehensweise ist in Abb. 2 dargestellt.

Die einzelnen sieben Arbeitsschritte sind in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben:

### BEGRIFFE

#### Effektivität

Die Effektivität bezeichnet die Wirkung bzw. den Wirkungsgrad eines Verfahrens im Hinblick auf ein definiertes Ziel. Bei der Effektivität spielt der zur Zielerreichung notwendige Aufwand keine Rolle.

#### Effizienz

Bei der Effizienz wird der zur Zielerreichung notwendige Aufwand berücksichtigt. Besonders effizient ist ein Verfahren, wenn der Aufwand zur Zielerreichung gering ist.

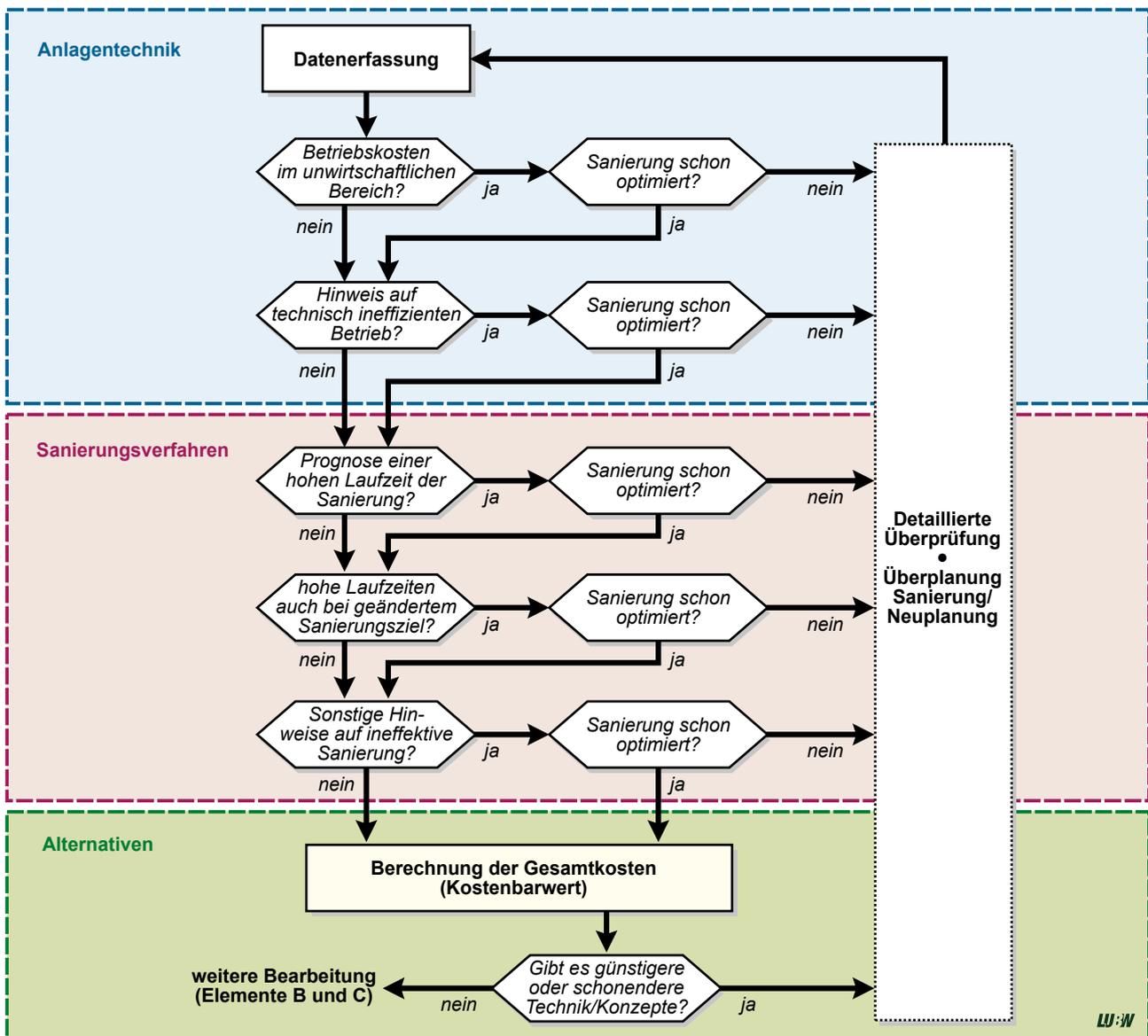


Abb. 2: Ablaufschema zur Prüfung des Optimierungspotenzials und technischer Alternativen bzw. Sanierungskonzepte

## 5.2 Arbeitsschritt 1: Datenerfassung

Bei langlaufenden Sanierungen gibt es eine teilweise schwer zu überschauende Menge an Informationen und Daten. Es kommt daher darauf an, ausschließlich die jeweils erforderlichen Daten zu erfassen. Für die Datenaufbereitung gilt ähnliches. Im Idealfall sollte die gesamte Standort- und Sanierungssituation auf wenigen Seiten beschrieben und auf einem Lageplan und in einem Querprofil dargestellt werden.

## 5.3 Arbeitsschritt 2: Überschlägige Prüfung der Gesamtbetriebskosten

In der Praxis können detaillierte Daten zu Anlagenauslegung und Betriebskosten fehlen, z.B. wenn ein Betreibermodell gewählt wird, bei dem die Investitionskosten abgeschrieben werden oder wenn die Behörde Privatfälle selbst überprüfen möchte.

Zur überschlägigen Prüfung, ob die Betriebskosten auf eine ungünstige Anlagenauslegung hinweisen, wurden Kennzahlen entwickelt, die mit den Betriebskosten verglichen werden können. Diese Kennzahlen beruhen auf einer modellhaften Anlagenauslegung und modellhaften Kalkulationsansätzen.

In den als Gesamtbetriebskosten pro m<sup>3</sup> Wasser oder Bodenluft ausgewiesenen Kennzahlen sind folgende Leistungen zum Betrieb enthalten:

- Aktivkohleverbrauch
- Stromverbrauch
- Wartungskosten
- Reparaturkosten
- Ingenieurkosten für gutachterliche Begleitung
- Analysekosten für Fremd- und Eigenüberwachung

Die dargestellten Kosten sind Nettokosten.

Die Vergleichskennzahlen wurden für typische Anlagenauslegungen für Pump-and-Treat-Maßnahmen berechnet. Dies sind:

- Anlagenauslegung 1:  
Brunnenpumpen → Mehrschichtfilter → Wasseraktivkohlefilter
- Anlagenauslegung 2:  
Brunnenpumpen → Mehrschichtfilter → Desorption und Luftaktivkohle → Wasseraktivkohle (Nachreinigungsstufe)

und eine typische Anlagenauslegung für eine Bodenluftabsaugung:

- Anlagenauslegung 3:  
Wasserabscheidung → Luftaktivkohlefilter

Bei der Kalkulation wurde davon ausgegangen, dass die Eisen- und Mangankonzentrationen unter 3 mg/l liegen. Die Mehrschichtfilter wurden wegen der besseren Schwebstoffbelastung und die dadurch weniger häufigen Rückspülintervalle gewählt, was im Hinblick auf die laufenden Kosten die Grundwassersanierung günstiger macht. Es ist jedoch anzumerken, dass der Einsatz von Einsichtfiltern in der Praxis – je nach Anforderungen / Randbedingungen – durchaus auch vorkommt.

Erläuterungen zu den Anlagenauslegungen sind im Anhang A enthalten.

## 5.4 Arbeitsschritt 3: Prüfung der technischen Effizienz

Im Folgenden wird ein Prüfansatz zur Beurteilung der technischen Effizienz der Sanierungsanlage dargestellt. Dabei liegen die Schwerpunkte auf:

- Schadstoffaustragseffizienz
- Energieeffizienz
- Betriebskosteneffizienz

### Schadstoffaustragseffizienz

Ein Vergleich der Zeitreihen für den Schadstoffaustrag sowie die Grundwasserförderung bildet eine wichtige Grundlage zur Beurteilung der aktuellen Austragseffektivität der Sanierungsmaßnahme.

Pump-and-Treat-Maßnahmen und Bodenluftabsaugungen sind häufig dadurch gekennzeichnet, dass wegen der Tailing-Effekte zu Beginn ein starker Austrag vorhanden ist, der schnell nachlässt und zum Ende hin immer mehr abflacht (siehe Abb. 3).

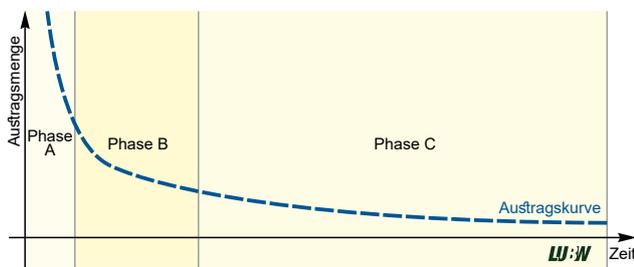


Abb. 3: Durch Tailing-Effekte beeinflusster Austragszustand

Bei einer hinreichend großen und dichten Datenbasis über einen ausreichend langen Zeitraum kann der Kurvenverlauf und damit der Status des aktuellen Austragsverhaltens abgeschätzt werden.

Das Excel-Auswertetool zur Anlageneffektivität steht im Internetangebot der LUBW (Altlasten\Anwendungsprogramme) zum Download bereit.

Bei der Abschätzung ist die dargestellte Zeitreihe der Grundwasserförderung ein wichtiges Zusatzinstrument. So zeigt eine relativ konstante Förderrate, dass die Veränderungen bei der Austragsrate tatsächlich auf eine Änderung der Austragseffizienz zurückzuführen ist, während eine stark schwankende Förderrate die Ursache für schwankende Austragsraten sein kann.

Die Darstellung in Abb. 3 zeigt eine prinzipielle Kurve des häufig anzutreffenden, durch Tailing-Effekte beeinflussten Austragsverlaufes über die Zeit. Erfahrungsgemäß kann der Kurvenverlauf auch sprunghafter ausgebildet sein.

In einer zweiten Auswertung kann der Schadstoffaustrag über die Zeit kumuliert dargestellt werden.

Ein Anhaltspunkt für den Eintritt in eine Effizienzprüfung kann ein sehr geringer Zuwachs der kumulativen jährlichen Austragsmenge sein.

## Energieeffizienz

Da erfahrungsgemäß nur in seltenen Fällen eine detaillierte Erfassung des Energieverbrauchs über den gesamten Zeitraum des Sanierungsbetriebs erfolgt, wird eine Auswertung nur in wenigen Fällen möglich sein. Der zeitliche Verlauf des spezifischen Energiebedarfs zeigt den Verlauf der Effizienzänderung.

Eine Zunahme des **Energiebedarfs je m<sup>3</sup>** geförderten Grundwassers bzw. Bodenluft zeigt einen steigenden Förderaufwand an, der u.a. ein Indiz für eine fortschreitende **Verschlechterung der Randbedingungen** sein kann, z.B. Verblockung der Brunnen/Pegel und des Filterkieses durch Störstoffe.

Eine Zunahme des **Energiebedarfs je kg** ausgetragener Schadstoff indiziert hingegen eine anhaltende Verschlechterung der Austragseffektivität und damit eine **schlechtere Energieeffizienz**.

## Betriebskosteneffizienz

Für die Auswertungen sollten mindestens die Gesamtbetriebskosten je Betriebsjahr herangezogen werden. Die jährlichen Gesamtbetriebskosten werden gegen die jährliche Grundwasserförderung bzw. gegen den jährlichen Schadstoffaustrag normiert (Euro pro kg Schadstoff bzw. m<sup>3</sup> geförderten Wassers/Bodenluft).

Bei der Auswertung der Kosteneffizienz wird, ähnlich wie bei der Energiebetrachtung, der zeitliche Verlauf vergleichend bewertet. In Abb. 4 ist ein Beispiel dargestellt.

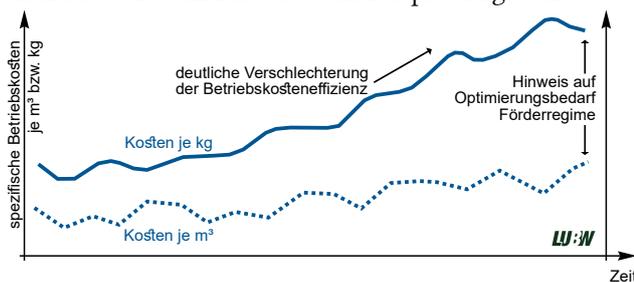


Abb. 4: Vergleich der spezifischen Betriebskosten mit Bezug zum abgereinigten Grundwasser und zur ausgetragenen Schadstoffmenge (idealisiertes Kurvenverlauf)

## Weitere Prüfungen

Bei den o.g. Prüfungen sollten auch die folgenden Aspekte berücksichtigt werden:

### ■ Ausfallzeiten der Anlage

Ausfallzeiten führen zu deutlich schlechteren Austragsraten, wodurch die Maßnahme ineffektiv arbeitet. Durch Ausblenden der Ausfallzeiten kann eine erneute Bewertung ein deutlich anderes Bild liefern.

### ■ Art des eingesetzten Verfahrens

Je nach Verfahren sind unterschiedlich hohe spezifische Energieaufwendungen erforderlich. Während bei einer einfachen Nassaktivkohleadsorption der Energieaufwand im Wesentlichen nur durch die Pumpenleistungen maßgebend beeinflusst wird, ist der spezifische Anteil bei Strippanlagen oder z.T. Oxidationsanlagen (UV) deutlich höher. Hierbei spielen insbesondere Nebenaggregate wie Gebläse, Heizregister, UV-Lampen oder gar Kat-Ox-Anlagen eine maßgebende Rolle.

Weiterhin sind die Verbrauchsmittel (z.B. Aktivkohle, Dosierchemikalien der Reinigungsanlage usw.) auf der Kostenseite wichtig. So können z.B. hohe spezifische Betriebskosten bei gleichzeitig hohem und effizientem Schadstoffaustrag ein Indiz für ein im Einzelfall ungünstiges Verfahren darstellen (z.B. Kat-Ox vs. Aktivkohle).

### ■ Standortspezifische Besonderheiten

Zusätzlich zu den vorgenannten Aspekten können örtliche Randbedingungen einen erheblichen Einfluss auf das Bewertungsergebnis haben. So können z.B. bestimmte hydrochemische Verhältnisse Vorbehandlungsstufen erfordern (Entsäuerung, Enteisung, Entmanganung, Chemikaliendosierung usw.).

Da für diese Aspekte kein geeigneter einheitlicher Bewertungsmaßstab ableitbar ist, muss deren Einfluss im Einzelnen verbal-argumentativ in die Bewertung mit einbezogen werden.

Eine Zunahme der **spezifischen Betriebskosten je kg** ausgetragener Schadstoff gibt einen Hinweis auf eine anhaltende Verschlechterung der Austragseffektivität und damit eine **schlechtere Kosteneffizienz**.

## **5.5 Arbeitsschritt 4: Prognose der Restlaufzeit und Gesamtkosten**

Die Prognose der Restlaufzeit und der Gesamtkosten ist ein wesentlicher Grundstein für den späteren Vergleich mit alternativen Techniken oder Sanierungskonzepten. Die Gesamtkosten berechnen sich aus der Restlaufzeit der Sanierung und den jährlichen Betriebskosten.

Eingangsgrößen für die Schätzung der Gesamtkosten sind:

1. Restlaufzeit der Sanierung
2. Jährliche zukünftige Betriebskosten

### **Abschätzung der Restlaufzeit**

Die Abschätzung der zukünftigen Restlaufzeit der Sanierung ist wissenschaftlich nicht hinreichend exakt durchführbar. Allerdings gibt es verschiedenste Möglichkeiten Prognosen durchzuführen. Die Begründung und die Grundlagen der Prognosen sind zu beschreiben.

Im Rahmen der Handlungshilfe 2012 wurde ein Auswerteprogramm zur Abschätzung von Restlaufzeiten und Kosten von Pump-and-Treat-Maßnahmen erstellt. Die Beschreibung des Auswerteprogramms ist in Anhang B enthalten.

## **5.6 Arbeitsschritt 5: Prüfung des Sanierungsziels**

Es wird vorgeschlagen, im Hinblick auf eine ökonomische und ökologisch sinnvolle Sanierung bei schon langlaufenden Maßnahmen zu prüfen, ob das ursprünglich vereinbarte Sanierungsziel nach heutigen Erkenntnissen und nach den Erfahrungen aus dem Projekt mit verhältnismäßigem Aufwand erreichbar ist. Dabei sind die in dem Leitfaden „Untersuchungsstrategie Grundwasser“ (LUBW 2008) genannten Entscheidungskriterien zur Festlegung von Sanierungszielen zu berücksichtigen (Stichworte: Immissions-/Emissionsbetrachtung, Sonderfälle).

## 5.7 Arbeitsschritt 6: Prüfung sonstiger Hinweise auf Ineffizienz

### Fehlende Daten

Sollte sich während der Bearbeitung herausstellen, dass Daten zur Abschätzung der Restlaufzeit fehlen, müssen diese Daten nachträglich ermittelt werden.

### Phase vorhanden

Ebenso kann bei der begründeten Annahme eines Schadstoffpools bzw. des Vorhandenseins von Schadstoffen in Schluff-, Ton- oder organischen Schichten die Betrachtung abgebrochen werden. In diesen Fällen ist eine Dekontamination mit Pump-and-Treat und Bodenluftabsaugung nicht sinnvoll. In derartigen Fällen empfiehlt sich eine detaillierte Erkundung des Schadensherdes inklusive Betrachtung von alternativen Sanierungskonzepten. Unter Umständen muss mit komplexeren Untersuchungsmethoden und Berechnungen geprüft werden, ob in diesen Schichten vorhandene Phasen mit derzeitig verfügbaren Techniken sanierbar sind. Bei unbebauten Flächen ist ein Aushub des Schadens oftmals effizienter.

### Regelmäßige Sanierungsaudits

Es wird vorgeschlagen, regelmäßig Sanierungsaudits durchzuführen, bei denen u. a. geprüft wird, ob konzeptionelle Umstellungen oder Ergänzungen des Sanierungsbetriebs sinnvoll sind.

Häufig kann

- die Errichtung neuer Grundwassersanierungsbrunnen bzw. Absaugstellen für die Bodenluft an geeigneteren Stellen, als auch
- die Anpassung des Förder- bzw. Entnahmeregimes

hilfreich sein. Im planerischen Ergebnis einer solchen Prüfung ist die Maßnahme erneut hinsichtlich der möglichen Austrageffektivität, der Energie- und Kosteneffizienz sowie der zu erwartenden Gesamtlaufzeit zu bewerten, bevor weitere Optimierungen oder Umstellungen erfolgen.

## 5.8 Arbeitsschritt 7: Prüfung von alternativen Techniken und Konzepten

Die Prüfung von alternativen Techniken und Konzepten sollte sich an die Vorgehensweise der in der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodschV) beschriebenen Sanierungsuntersuchung anlehnen.

Die Durchführung von regelmäßigen Sanierungsaudits bei größeren Sanierungsmaßnahmen ist aus wirtschaftlichen und fachlichen Gründen sinnvoll.



# 6 Darstellung der Sanierungseffizienz (Element B)

## 6.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die Effizienz von Grundwasser- bzw. Bodenluftsanierungen kann mit Hilfe der spezifischen Betriebsparameter

- Spezifische Grundwasser- bzw. Bodenluftförderung [ $\text{m}^3/\text{kg}$  Schadstoff]
- Spezifischer Energieverbrauch [ $\text{kWh}/\text{kg}$  Schadstoff]
- Spezifische Kosten [ $\text{€}/\text{kg}$  Schadstoff]

beurteilt werden.

Die Sanierungsprojekte unterscheiden sich z.T. deutlich hinsichtlich der (hydrogeologischen) Standortverhältnisse und angewandten technischen Sanierungsverfahren, weshalb jeder Sanierungsfall als Einzelfall behandelt werden muss.

Allgemeingültige Grenzwerte oder Grenzbereiche zur Effizienzbewertung können nicht abgeleitet werden, weil sie fachlich nicht begründbar sind. Darüber hinaus würden starre Grenzen den einzelfallspezifischen Ermessensspielraum unzulässigerweise einschränken.

Ziel der Darstellung der Effizienz ist nicht die Ausarbeitung von Grenzwerten oder Grenzbereichen im Sinne von „harten Werten“. Vielmehr soll dem Nutzer der Handlungshilfe eine Möglichkeit gegeben werden, die Werte seiner spezifischen Betriebsparameter anhand der hier durchgeführten Auswertungen vergleichend einzuordnen. Daher dienen die statistischen Auswertungen lediglich als Orientierungshilfe.

Bei den Datenerhebungen zeigte sich, dass in vielen Fällen die Daten, insbesondere Kosten aus der Anfangsphase der Sanierungen, nicht mehr vollständig rekonstruierbar oder auffindbar waren. Deshalb wurden die Werte des

letzten/aktuellen Betriebsjahres ausgewertet und für die Ermittlung der spezifischen Kosten herangezogen. Zu den Betriebskosten zählen alle Kosten, die durch den Betrieb der Sanierungsanlage entstehen. Darunter fallen Kosten für Energie (Strom), Verbrauchsmittel (Aktivkohle, Sonstiges), Wartung, Reparatur, Anlagenertüchtigung, Probenahme und Analyse (in Anlage und Zu- und Ablauf). Nicht berücksichtigt wurden Gutachterkosten, Kosten für ein Grundwassermonitoring, und Investitionskosten für die Sanierungsanlage.

Die in den nachfolgenden Auswertungsgrafiken dargestellten Summenkurven stellen die Bandbreite der betrachteten spezifischen Kenngrößen dar. Dabei ist zu beachten, dass die ausgewerteten Daten einem Mikrozensus entsprechen und lediglich von einer groben Repräsentativität auszugehen ist.

Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen können die ausgewerteten Daten zur Beurteilung der Effizienz einer laufenden Sanierungsmaßnahme orientierend herangezogen werden. Die Position der zu beurteilenden Sanierungsmaßnahme in der Summenkurve der betrachteten spezifischen Kenngröße ermöglicht eine qualitative Bewertung: Entsprechend der Lage im Diagramm ist eine qualitative Zuordnung in Kategorien wie z. B. „durchschnittlich“, „vergleichsweise effizient“, „vergleichsweise ineffizient“ möglich.

Die Angabe von definierten Bereichen ist mangels geeigneter Herleitungsmöglichkeiten nicht gerechtfertigt. Solche eindeutig definierten Kategorien würden darüber hinaus die Ermessensspielräume der Behörden zu stark einschränken. Die qualitative Bewertung der spezifischen Kenngrößen stellt sicher, dass bei der Gesamtbeurteilung des zur Entscheidung anstehenden Sanierungsfalls die Effizienzbewertung neben anderen wichtigen Elementen eine angemessene Berücksichtigung finden kann.

## 6.2 Datenerhebung

Die Datenbasis zur Ermittlung der Effizienzparameter bilden Datensätze von Landesämtern, Kommunen und der Industrie.

Als nicht langlaufend können Sanierungen mit einer Laufzeit von weniger als fünf Jahren angesehen werden. Diese wurden bei der Auswertung im Vergleich zu der ersten Handlungshilfe nicht berücksichtigt. Darunter fallen in der Regel auch PFC-Fälle, die somit in den ausgewerteten Datensätzen nicht enthalten sind.

### Grundwassersanierung

In Summe wurden Daten von 145 Sanierungsfällen berücksichtigt. 89 dieser Fälle wurden im Rahmen der Handlungshilfe 2012 und 56 Fälle im Rahmen der Fortschreibung 2019 erhoben. Die Kosten der Altdaten wurden entsprechend der Preissteigerung auf das Preisniveau von 2019 hochgerechnet.

Von den 145 ausgewerteten Sanierungsfällen stammen rund ein Viertel aus Baden-Württemberg. Die übrigen Fälle stammen aus anderen Bundesländern.

### Bodenluftsanierung

Bei den 18 erfassten Datensätzen zur Bodenluftsanierung handelt es sich ausschließlich um LCKW-Schäden. Diese setzen sich aus 12 Fällen der Handlungshilfe 2012 und aus 4 Fällen der Fortschreibung 2019 zusammen. Die Kosten der Datensätze aus 2012 wurden entsprechend der Preissteigerung auf das Preisniveau von 2019 hochgerechnet.

## DATEN DER ERHOBENEN GRUNDWASSER-FÄLLE

### Vorkommen der Schadstoffgruppen (zirka):

CKW:	bei 69% der Fälle
Mischfälle	bei 21% der Fälle
Andere	bei 3% der Fälle
PAK:	bei 3% der Fälle
SM:	bei 2% der Fälle
BTEX:	bei 1% der Fälle
MKW:	bei 1% der Fälle

### Mischfälle:

LCKW und Co-Kontaminanten	38% der Fälle
Kombination aus MKW, BTEX und PAK	41% der Fälle
Sonstige Kombinationen	21% der Fälle

### Sanierungsdauer

5 bis 10 Jahre:	38% der Fälle
10 bis 15 Jahre:	26% der Fälle
15 bis 20 Jahre	23% der Fälle
20 bis 25 Jahre	11% der Fälle
über 25 Jahre	2% der Fälle

### Reinigungsverfahren

Strippanlagen, Abluft über Aktivkohle, Katalytische und UV-Oxidation, Nassaktivkohle, Ionenaustauscher, Biologische Reinigungsstufe, Fällung/Flockung

### 6.3 Statistische Auswertung von Daten zur Sanierungseffizienz

Es wurden folgende spezifische Betriebsparameter ausgewertet:

- m<sup>3</sup> Grundwasserförderung / kg Schadstoff
- kWh Energieverbrauch / kg Schadstoff
- € Netto-Kosten / kg Schadstoff

Auf eine getrennte Darstellung der Fälle mit verschiedenen Schadstoffgruppen konnte verzichtet werden, da sich eine gleichmäßige Verteilung aller Komponenten über die gesamte Bandbreite der Summenkurve ergab. Auch die Sanierungen in den unterschiedlichen Aquifertypen (Poren-, Kluft- und Karstaquifer) zeigten keine signifikanten Unterschiede in der statistischen Verteilung.

Die Auswertung erfolgte auf Basis der Schadstoffentfrachtung und der jeweiligen Betriebsparameter des jeweils letzten oder aktuellen Betriebsjahres.

Die nachfolgende Auswertung stellt eine rein statistische Beschreibung der Grundgesamtheit dar. Die Nennung der Verteilungsparameter (Median und Quantile) dient ausschließlich zur Charakterisierung der Verteilung und Streuung.

#### BEGRIFFE

##### Summenkurve

Bei der Summenkurve werden die Einzelwerte nach ihrer Häufigkeit in aufsteigender Richtung nacheinander dargestellt (aufsummiert). Wählt man einen Wert aus, kann man mit der Summenkurve ablesen, wieviel der übrigen Werte hinsichtlich ihrer relativen Häufigkeit prozentual darunter oder darüber liegen.

##### Median

Der Median (auch Zentralwert genannt) ist ein spezieller Lageparameter von Verteilungen und teilt die Grundgesamtheit der Verteilung in zwei gleich große Hälften. Im Rahmen dieser Handlungshilfe wird der Median genutzt, um die Mittellage der statistischen Verteilung der ermittelten Betriebsparameter aus den ausgewerteten Sanierungsfalldaten zu charakterisieren.

##### Quantile

Quantile sind ein statistisches Lagemaß für Verteilungen, dabei erfolgt die Aufteilung der Grundgesamtheit in einem definierten prozentualen Maß. Der Median stellt hierbei als 50%-Quantil eine Sonderform dar. Im Rahmen dieser Handlungshilfe werden die Quantile genutzt, um die Lage und Streuung der statistischen Verteilung der ermittelten Betriebsparameter aus den ausgewerteten Sanierungsfalldaten zu charakterisieren.

## Grundwasserförderung [m³] / Schadstoff [kg]

Von den 145 erfassten Fällen zu Pump-and-Treat-Maßnahmen konnte die Größe der spezifischen Grundwasserförderung für 139 Sanierungsfälle ermittelt werden.

Für die Auswertung wurden die ermittelten Werte als Summenkurve mit logarithmischer Skalierung aufgetragen. Die entsprechende Grafik ist in der folgenden Abb. 5 dar-

gestellt. Die ermittelte Verteilung der spezifischen Grundwasserförderung zeigt, dass bei 50% der Grundwassersanierungen durch Pump-and-Treat-Maßnahmen die Werte im Bereich zwischen ca. 250 und 5.000 m³/kg (25%- bzw. 75%-Quantil) liegen. Der Median der Verteilung liegt bei rund 1.000 m³/kg.

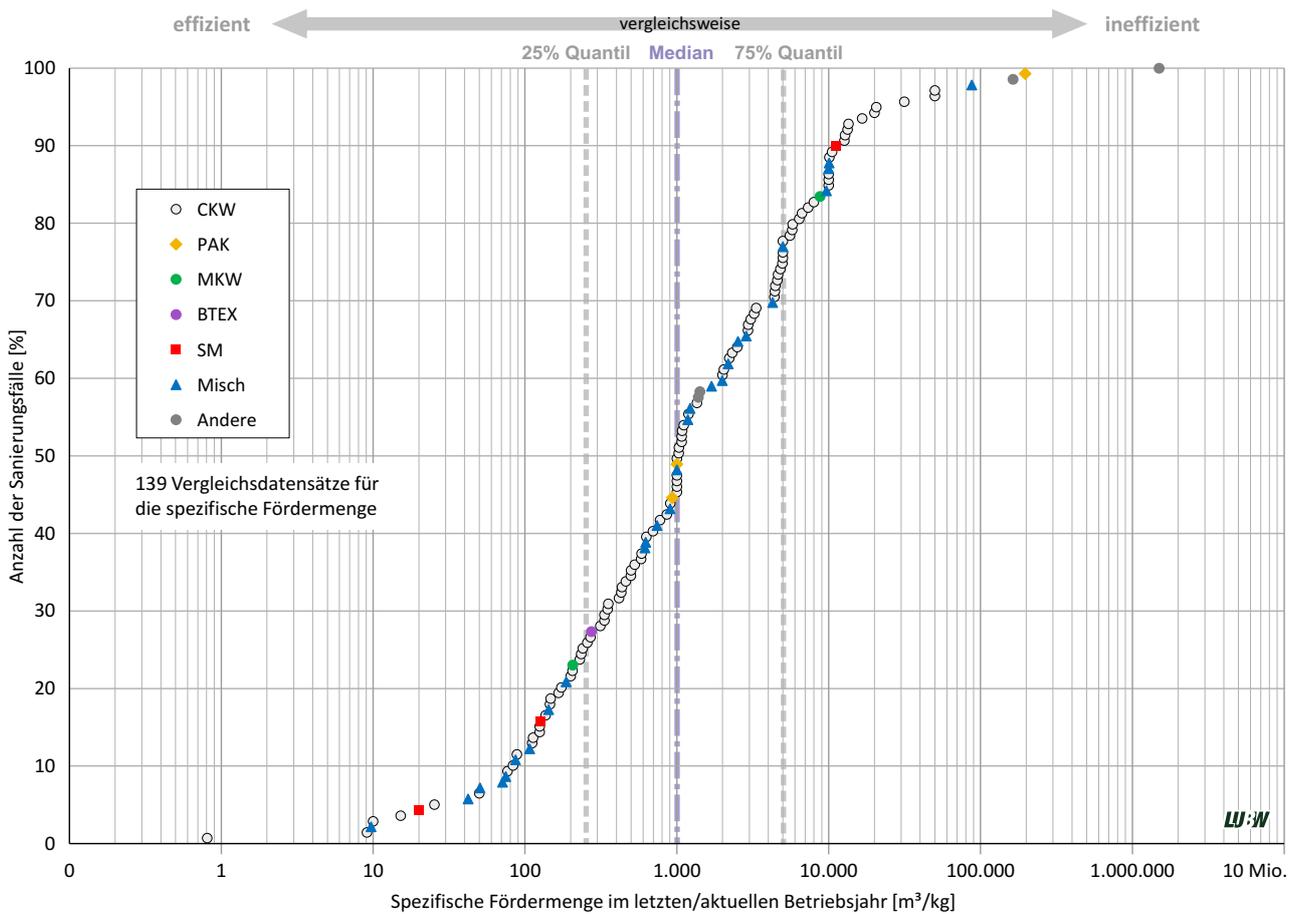


Abb. 5: Verteilung der spezifischen Fördermengen im letzten/aktuellen Betriebsjahr [m³/kg] der ausgewerteten Sanierungsfälle

## Energieverbrauch [kWh] / Schadstoff [kg]

Von den 145 erfassten Fällen zu Pump-and-Treat-Maßnahmen konnte der spezifische Energieverbrauch des letzten Betriebsjahres für 80 Sanierungsfälle ermittelt werden. Wie im vorhergehenden Abschnitt wurde auch für den spezifischen Energieverbrauch eine Summenkurve mit logarithmischer Skalierung erstellt. Die entsprechende

Grafik ist in der folgenden Abb.6 dargestellt. Bei 50% der Grundwassersanierungen durch Pump-and-Treat-Maßnahmen liegt der Energieverbrauch im Bereich zwischen ca. 200 und 2.600 kWh/kg (25%- bzw. 75%-Quantil), der Median der Verteilung bei rund 850 kWh/kg.

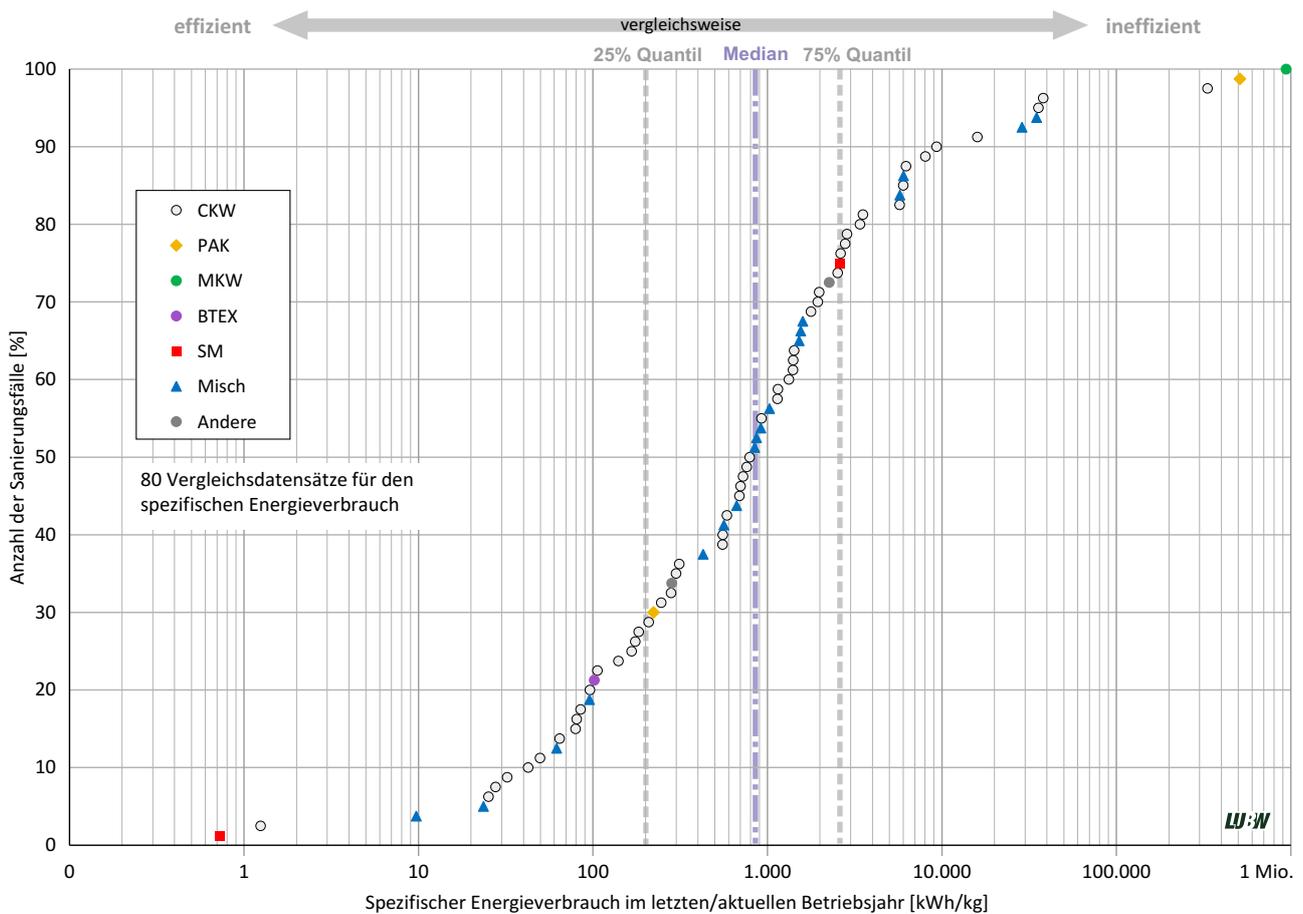


Abb. 6: Verteilung des spezifischen Energieverbrauchs im letzten/aktuellen Betriebsjahr [kWh/kg] der ausgewerteten Sanierungsfälle

## Kosten [€] / Schadstoff [kg]

Von den 145 erfassten Fällen zu Pump-and-Treat-Maßnahmen konnten die spezifischen Kosten des letzten Betriebsjahres für 129 Sanierungsfälle ermittelt werden. Vergleichbar zu den beiden vorhergehenden Abschnitten wurde für die spezifischen Kosten eine Summenkurve mit logarithmischer Skalierung erstellt. Die entsprechende

Grafik ist in der folgenden Abb.7 dargestellt. Die ermittelte Verteilung der spezifischen Kosten zeigt, dass bei 50% der Grundwassersanierungen durch Pump-and-Treat-Maßnahmen die Kosten zwischen 500 und 5.800 € (netto)/kg liegen (25%- bzw. 75%-Quantil). Der Median der Verteilung liegt bei rund 2.200 € (netto)/kg.

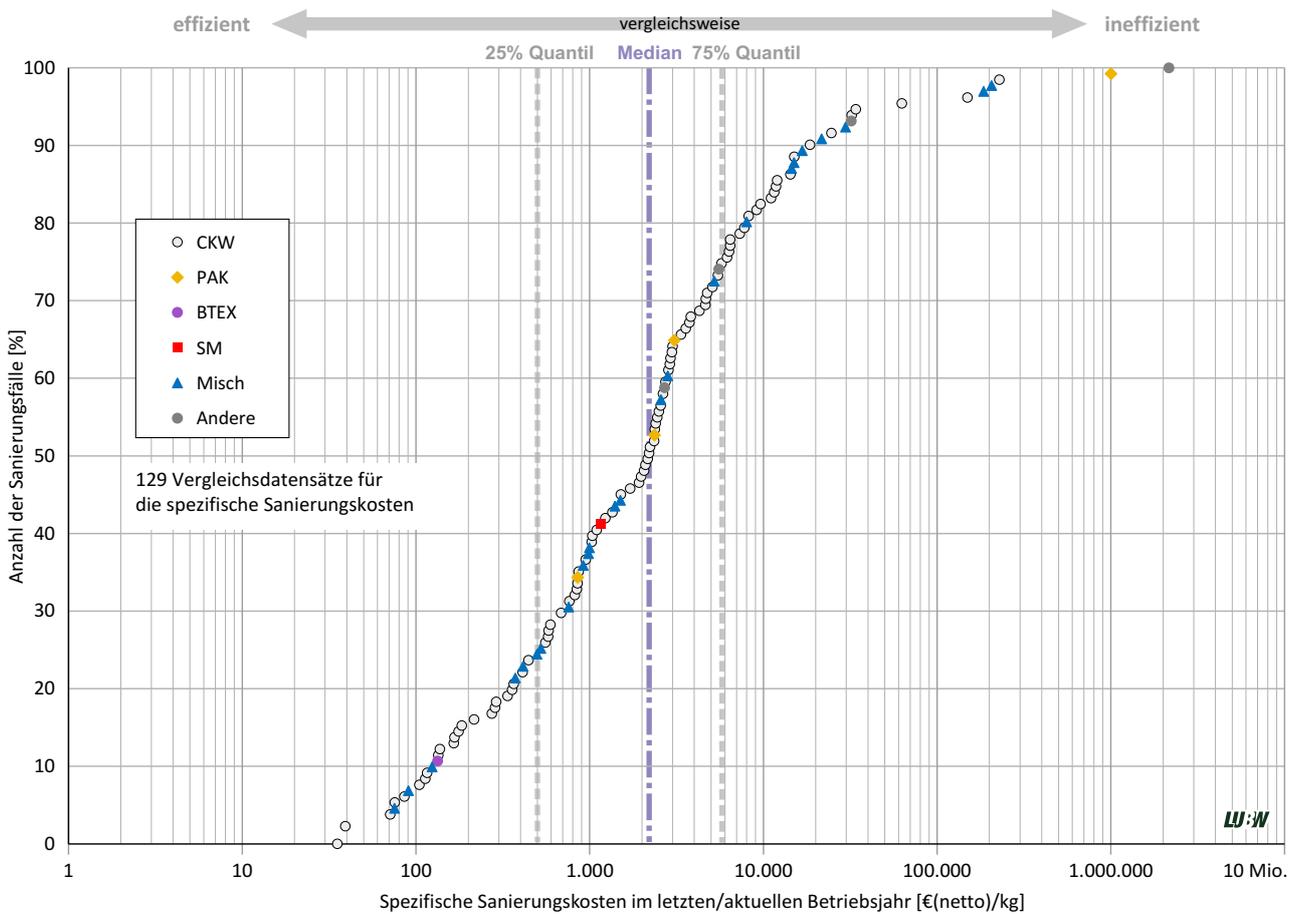


Abb. 7: Verteilung der spezifischen Sanierungskosten im letzten/aktuellen Betriebsjahr [€(netto)/kg] der ausgewerteten Sanierungsfälle

## 6.4 Auswertungen für Bodenluftsanierungen

Es wurden insgesamt 18 Datensätze von Bodenluftabsaugungen mit anschließender Reinigung der Bodenluft über Aktivkohle ausgewertet. Der Umfang der angegebenen spezifischen Betriebsparameter ist deutlich geringer als bei den Grundwassersanierungen. Eine dem vorhergehenden Abschnitt für Grundwasser vergleichbare Auswertung ist mit großer Unsicherheit behaftet, da die Datensatzanzahl zu gering ist. Es werden – im Gegensatz zur Auswertung der Grundwassersanierungen – nachfolgend die spezifischen Betriebsparameter über den gesamten Sanierungszeitraum dargestellt.

Die spezifischen Sanierungskosten lagen bei 50% der ausgewiesenen Fällen von Bodenluftsanierungen zirka zwischen 70 und 600 € (netto) pro Kilogramm (25%- bzw. 75%-Quantil; bei 13 Sanierungsfällen). Der Median der Verteilung liegt bei rund 200 € (netto) pro Kilogramm.

Der Energiebedarf lag bei 50% der ausgewerteten Fällen von Bodenluftsanierungen zwischen zirka 160 und 700 kWh/kg (25%- bzw. 75%-Quantil bei 18 Sanierungsfällen). Der Median der Verteilung liegt bei rund 450 kWh/kg.

# 7 Prognose der Gefährdungsentwicklung nach Abschalten der Anlage (Element C)

## 7.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die Prognose der zukünftigen Gefährdungsentwicklung für den Zeitraum nach dem Abschalten der Sanierungsanlage beinhaltet im Wesentlichen die Prüfung der zukünftigen Beeinflussung von Schutzgütern und der Belange Dritter (z.B. Wasserentnahmen), die in Zukunft betroffen sein könnten.

Die allgemeine Vorgehensweise gliedert sich in fünf Arbeitsschritte:

### Arbeitsschritt 1:

Zustandsbeschreibung (konzeptionelles Standortmodell)

### Arbeitsschritt 2:

Prognose der Schadstoffausbreitung nach einer möglichen Beendigung der aktiven Sanierung (räumliche und zeitliche Entwicklung)

### Arbeitsschritt 3:

Prüfung der zukünftigen Beeinflussung von Schutzgütern und Belangen Dritter (z.B. Wasserentnahmen), die bei Hinnahme einer Grundwasserverunreinigung in Zukunft betroffen sein könnten

### Arbeitsschritt 4:

Vorschlag zu Kontrollmaßnahmen

### Arbeitsschritt 5:

Kriterien für die Wiederaufnahme der aktiven Sanierung

Die einzelnen, oben genannten Arbeitsschritte werden in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert.

## 7.2 Arbeitsschritt 1:

### Konzeptionelles Standortmodell

Für die Zustandsbeschreibung in Arbeitsschritt 1 wird ein konzeptionelles Standortmodell erarbeitet.

#### BEGRIFFE

##### Konzeptionelles Standortmodell

Das konzeptionelle Standortmodell beschreibt die Schadstoffausbreitung vom Schadensherd bis zu den betroffenen Schutzgütern. Es gliedert sich in die Teile:

- Hydrogeologisches Arbeitsmodell
- Arbeitsmodell zur Schadstoffausbreitung.

Eine ausführliche Beschreibung findet sich im Leitfaden „Untersuchungsstrategie Grundwasser“ (LUBW 2008).

Das grundsätzliche Modellverständnis muss dabei nicht notwendigerweise quantitativ in einem numerischen Modell dargestellt werden. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Komponenten und Größen in tabellarischer oder graphischer Form kann – je nach Fragestellung und Standortsituation – ausreichen.

Das konzeptionelle Standortmodell soll im Wesentlichen als Grundlage für die Beantwortung der Frage dienen: Wie werden der Standort und seine Umgebung auf eine Beendigung der aktiven Sanierung reagieren?

Im Idealfall sollte die gesamte Standort- und Sanierungssituation auf wenigen Seiten und vor allem in Lageplänen und in Profilen dargestellt werden.

In einem ersten Arbeitsschritt werden die wesentlichen Daten für das konzeptionelle Standortmodell zusammengetragen. Die wesentlichen Bausteine sind in Abb.8 dargestellt und werden im Nachfolgenden erläutert. Je nach Einzelfall ist nicht zwingend für alle Bausteine eine Bearbeitung notwendig.

Im Allgemeinen sollte die Komplexität des konzeptionellen Standortmodells so gewählt werden, dass belastbare Prognosen zu der Schadstoffausbreitung und zu Auswirkungen auf die Schutzgüter möglich sind.

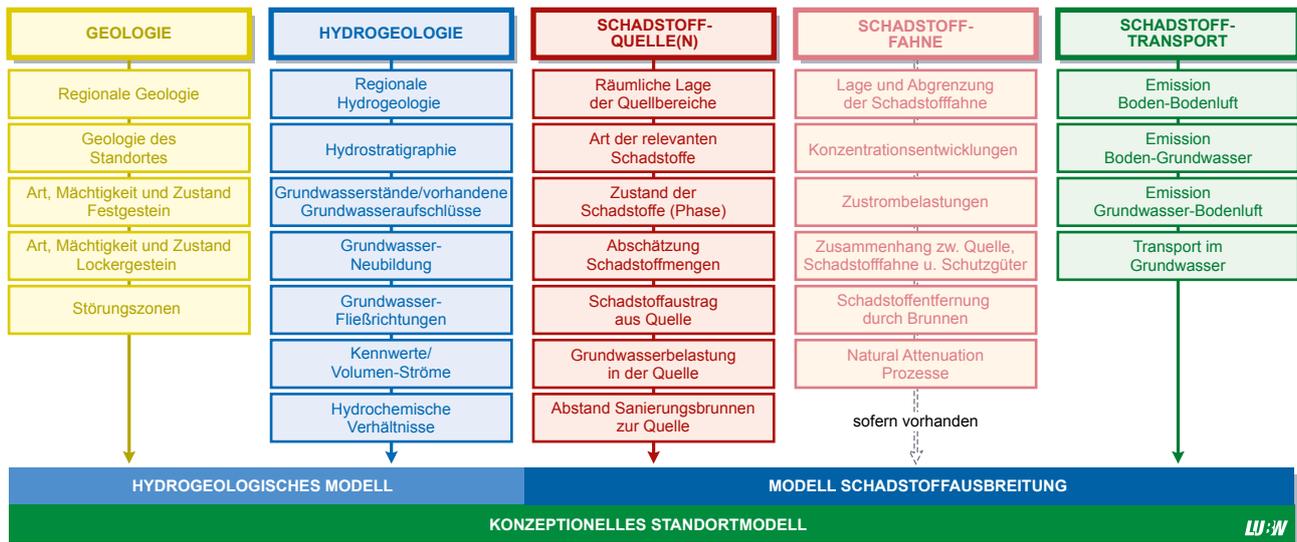


Abb. 8: Konzeptionelles Standortmodell mit den Bausteinen Geologie, Hydrogeologie, Schadstoffquellen, -fahne und -transport

### Geologie

Die Erstellung von geologischen Schnitten unter Einbeziehung sämtlicher Aufschlüsse des Standortes ist unverzichtbar. In der Regel sind mindestens zwei geologische Schnitte, in Richtung der Grundwasserfließrichtung und orthogonal, notwendig. Bei der Erarbeitung der Schnitte sind sämtliche vorliegende Daten in die Auswertung einzubeziehen, z.B. bohrlochgeophysikalische Untersuchungen, CPT-/EC-Sondierungen (Cone Penetration Test/Electrical Conductivity), hydraulische Kenngrößen, Messwerte und geophysikalische Untersuchungen.

Folgende Inhalte sollten beschrieben werden:

- Regionale und lokale Geologie und Strukturgeologie
- Lagerung, Mächtigkeit und Eigenschaften der Gesteine
  - Schichtung, tektonische Störungen
  - Einstufung in Sediment-, Metamorph- und Eruptivgesteine sowie Verwitterungsgrad, Klüfte/Schichtfugen, Heterogenitäten, Sorptionskapazitäten (Anteile des organischen Kohlenstoffs (foc) und Kationenaustauschkapazität (KAK))

### Hydrogeologie

Die hydrogeologische Situation ist zunächst überregional zu beschreiben. Danach ist eine detaillierte Modellvorstellung für den Standort zu erarbeiten. Vorhandene hydrogeologische Kartierungen sind in die Bearbeitung mit einzubeziehen. Prinzipiell ist zwischen den hydraulischen Bedingungen während der aktiven Sanierungsmaßnahme

und den sich einstellenden, natürlichen hydraulischen Bedingungen nach Beendigung der Sanierungsmaßnahme zu unterscheiden. Ggfs. kann es sinnvoll sein, beide Fälle darzustellen. Die wesentlichen Daten sollen in die geologischen Schnitte eingearbeitet werden.

Folgende Sachverhalte sollten beschrieben werden:

- Regionale Hydrogeologie. Angaben zu regionaler Wasserbilanz und Grundwasserströmung (vertikal/horizontal), insbesondere zu Quellen und Senken (z.B. Grundwasserinfiltrationen und Vorfluter, Grundwasserentnahmen)
- Hydrostratigraphie (Grundwasserleiter, Grundwassergeringleiter, Aquitarde, schwebende Grundwasserleiter). Angaben zu Mächtigkeiten und physikalischen Eigenschaften (hydraulische Leitfähigkeiten, primäre und effektive Porositäten), Heterogenitäten
- Zusammenstellung aller vorhandenen Grundwasseraufschlüsse am Standort und der weiteren Umgebung
- Grundwasserfließverhältnisse: Grundwasserstände, Grundwasserfließrichtungen, Volumenströme, horizontale und vertikale hydraulische Gradienten, Grundwasserfließgeschwindigkeiten unter den Bedingungen der aktiven Sanierung sowie unter natürlichen Bedingungen nach einer möglichen Beendigung der Sanierungsmaßnahme
- Hydrochemische Verhältnisse: Hintergrundkonzentrationen, Redoxzonen anzeigende Parameter, natürliche Mineralisation

### **Schadstoffquelle**

Ziel der Zustandsbeschreibung des Schadensherds ist es, das Nachlieferungspotenzial zum gegenwärtigen Zeitpunkt abzuschätzen und eine hinreichende Datengrundlage für eine langfristige Prognose der Auswirkungen im Abstrom zu schaffen.

Dazu ist/sind zunächst die Schadstoffquelle(n) in ihrer räumlichen Lage und Charakteristik zu beschreiben. Eine wesentliche Komponente ist die Überprüfung der Anwesenheit von freier oder residualer Phase als Einflussgröße auf den Sanierungsverlauf und die Schadstoffausbreitung unter Nicht-Sanierungsbedingungen. Sofern keine konkreten (Mess-)Daten vorliegen, sind z.B. auf Grundlage der gemessenen, im Grundwasser gelösten Schadstoffanteile Abschätzungen zu treffen. Die Beschreibung der Schadstofffahne umfasst gleichzeitig die Darstellung der physiko-chemischen und biologischen Eigenschaften der Schadstoffe (Potenzial zur Verflüchtigung, Sorption, biologischer Abbau). Die Abschätzung der eingetragenen Schadstoffmenge, unter Berücksichtigung der Schadstoffreduzierung während der aktiven Sanierung erfolgte bereits während der Effizienzüberprüfung und wird hier lediglich der Vollständigkeit halber aufgeführt.

Die wesentlichen Informationen sollten wiederum in Schnitten sowie ergänzend in Lageplänen dargestellt werden.

Folgende Inhalte sollten beschrieben werden:

- Räumliche Lage des Schadensherdes (horizontale und vertikale Ausdehnung in gesättigter und/oder ungesättigter Zone)
- Eigenschaften der relevanten Schadstoffe (organisch, anorganisch, physiko-chemische und biologische Abbaubarkeit)
- Zustand der Schadstoffe (freie Phase, residuale Phase)
- Abnahme der Schadstoffmenge und -konzentrationen im Schadensherd
- Grundwasserbelastung im Schadensherd (zu Beginn der Sanierung und aktuell), falls dieser im gesättigten Bodenbereich liegt
- Abstand zwischen Sanierungsbrunnen und Schadensherd

### **Schadstofffahne (sofern noch vorhanden)**

Sofern noch vorhanden und bekannt, soll die aktuelle Gestalt der Schadstofffahne aus dem Zeitraum vor und während der Sanierung in die Lageplandarstellungen sowie in die Schnittdarstellungen eingearbeitet werden. Historische Daten können ggfs. einen Hinweis über die Ausbreitungsrichtung und den Rückhalt der Schadstoffe nach Beendigung der Sanierung geben. Aktive Messungen sind nicht vorgesehen.

Folgende Inhalte sollten, sofern vorhanden und bekannt, beschrieben werden:

- Lage und Abgrenzung der vorhandenen Schadstofffahnen (Plausibilisierung mit der vorherrschenden Richtung des hydraulischen Gradienten und der ermittelten Grundwasserfließgeschwindigkeit / Zeitpunkt des Schadstoffeintrages)
- Konzentrationsentwicklungen in allen Grundwasser-aufschlüssen. Entwicklung von Schadstofffrachten entlang von Ebenen.
- Zusammenhang zwischen Schadensherd, Schadstofffahne und Schutzgütern
- Schadstoffaustrag im Brunnen / Pegel (Konzentration in Abhängigkeit der Förderraten / Frachten)
- Natural Attenuation Prozesse im Grundwasser (Vorhandensein von Metaboliten, Ausbildung von Redoxzonen)

### **Schadstofftransport**

Basierend auf den vorherigen Daten sollen die Mechanismen für den Schadstofftransport beschrieben werden. Zu berücksichtigen sind die Transferpfade:

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

### 7.3 Arbeitsschritt 2: Prognose der Schadstoffausbreitung nach einer möglichen Beendigung der aktiven Sanierung

Folgende Methoden stehen zur Abschätzung der Schadstoffausbreitung im Grundwasser zur Verfügung:

- Auswertung der Konzentrationsreihen von Daten, die vor der Aufnahme der aktiven Sanierung gemessen wurden, z. B. zur Ermittlung der Retardierung
- Analogieschlüsse von bekannten stationären MNA-Schadstofffahnen (Schadstoffgruppen für die kurze Fahnenlängen und geringe Quellstärken typisch sind sowie Standorte, bei denen Schutzgüter im Grundwasserabstrom nicht gefährdet werden können), vgl. LfU (1997)
- Berechnungen mittels analytischer Modelle (nur für einfache und/oder eindeutige Standortverhältnisse)
- Berechnungen mittels numerischer Modelle, die komplexe Strömungs-, Transport- und Reaktionsprozesse darstellen können

Die Abschätzungen können immer nur mit einer entsprechenden Unsicherheit/Wahrscheinlichkeit angegeben werden, die durch den Gutachter im Einzelfall zu benennen ist. Diese Unsicherheiten sind im Rahmen der fachlichen Prüfung durch die Behörde/Bewertungskommission für Bodenschutz und Altlasten zu berücksichtigen.

Bei der Prognose der Schadstoffausbreitung nach Beendigung der Sanierung sind mindestens folgende Fälle und Randbedingungen zu betrachten:

1. Grundwasserfließweg (bzw. mögliche Migrationsbahn) bis zum nächsten Vorfluter, in den das verunreinigte Grundwasser infiltriert. Grundwasserströmungen in andere (oberhalb oder unterhalb gelegene) Grundwasserleiter sind zu berücksichtigen. Der Fließweg ist mit einer Fließbahn (Migrationsbahn) und mit einem Schwankungsbereich der natürlichen Fließrichtungsschwankungen anzugeben. Sofern diese unbekannt sind, ist eine Schwankungsbreite von  $\pm 30^\circ$  anzusetzen.

2. Darstellung der räumlichen Schadstoffausbreitung im Grundwasser in einem ‚sicheren‘ und einem ‚wahrscheinlichen‘ Szenario. In Abhängigkeit von den Schadstoffeigenschaften können folgende Kategorien angesetzt werden:

- 2.1. Geringe Retardation und geringer/kein Abbau (z. B. Schwermetalle)
- 2.2. Mit Retardation und geringem Abbau (z. B. hochmolekulare PAK)
- 2.3. Mit Retardation und nachweislichem Abbau (z. B. MKW)

3. Darstellung der Lage der Schadstofffahnen spitze in den ersten zehn Jahren in Jahresschritten, danach zehn-jährlich.

Weiterhin sind mindestens folgende Abschätzungen durchzuführen:

1. Bei mehrstöckigen Grundwasserleitern: Darstellung und Beschreibung des Grundwasserleiters im Hangenden und Liegenden des belasteten Grundwasserleiters. Angabe der relativen Druckverhältnisse zueinander entlang des Fließweges bis zum Vorfluter.  
Grundsätzlich: Darstellung und Beschreibung des Grundwasserleiters unterhalb des belasteten Grundwasserleiters (sofern vorhanden). Angabe der relativen Druckverhältnisse zueinander entlang des Fließweges bis zum Vorfluter.
2. Durchflussraten ( $\text{m}^3$  Wasser /  $\text{m}^2$  Querschnittsfläche) und Abstandsgeschwindigkeiten von dem betroffenen Grundwasserleiter und von dem jeweils darüber und darunter liegenden Grundwasserleiter.
3. Schadstofffrachten und Konzentrationen unter Berücksichtigung der natürlichen Fließrichtungsschwankungen im betroffenen Grundwasserleiter. Sofern es wegen unterschiedlicher Druckverhältnisse Hinweise darauf gibt, Abschätzung von Schadstoffübergängen zwischen einzelnen Grundwasserleitern (Angaben von Schadstofffrachten und resultierenden Konzentrationen).
4. Berücksichtigung von Hintergrundbelastungen (geogen, anthropogen) und/oder weiteren Schadensfällen im Prognosegebiet. Berechnung der Gesamtfracht und Vergleich mit der Hintergrundbelastung.

## 7.4 Arbeitsschritt 3:

### Prüfung der zukünftigen Beeinflussung von Schutzgütern und ggfs. Prüfung von Belangen betroffener Dritter

In Arbeitsschritt 3 werden alle schutzwürdigen Nutzungen, die im prognostizierten Abstrom über einen Wirkungspfad den Schadstoffen exponiert sind, bestimmt und kartiert.

**In Bezug auf zukünftig beeinflusste Schutzgüter können folgende Wirkungspfade relevant sein:**

- Grundwasser – Bodenluft – Innenraumluft – Mensch
- Grundwasser – Bodenluft – Pflanze
- Grundwasser – Grundwassernutzung (Trinkwasser für Mensch und Vieh, Bewässerung)
- Grundwasser – Oberflächengewässer (stehende Gewässer, Vorfluter)

Belange Dritter umfassen hierbei:

- z.B. Eigentumsrechte, gegenwärtige oder geplante Nutzungsrechte sowie -gebiete (z.B. Wasserrechte, Erschließungsgebiete)
- Einschränkungen privater oder gewerblicher Nutzungen von Grundwasser (z.B. Brauchwasser, Wärme- oder Kältegewinnung durch Brunnenanlagen, Nutzung von Wasser zur Feldbewässerung, Gartenbrunnen)
- Einschränkungen gewerblicher Nutzung von Oberflächengewässern (z.B. Fischteiche, Badeseen)
- Trinkwassergewinnung
- Einschränkungen bei bestehenden Siedlungsgebieten (Bebauungsplan)
  - Wohngebiete:  
Einschränkungen der Möglichkeit zur Nutzung von Geothermie (vorwiegend Erdwärmesonden, untergeordnet Brunnenanlagen)
  - Gewerbe-/Industriegebiete:  
Einschränkungen der Möglichkeit zur Nutzung von Geothermie (bei Produktions- und Warenhäusern vorwiegend Brunnenanlagen und Energiepfähle zur Klimatisierung, untergeordnet Erdwärmesonden)

- Nachteile bei der Vermarktung zukünftiger Siedlungsgebiete (Flächennutzungsplan)
  - Wohngebiete:  
Wertminderung durch wegfallende Optionen zur Nutzung von Geothermie
  - Gewerbe-/Industriegebiete:  
Wertminderung bzw. mögliches K.o.-Kriterium für spezielle Branchen, z.B. bei Wegfall von Grundwassernutzungen zur regenerativen Klimatisierung

Die oben genannten Auflistungen sind nicht abschließend.

Entsprechend den genannten, möglichen Belangen Dritter sind mindestens folgende Informationsquellen auszuwerten:

- Regionalpläne/Flächennutzungspläne/Bebauungspläne (Baubehörde)
- geplante Flächenuntersuchungen (Baubehörde)
- Wasserrechtliche Erlaubnisse und Genehmigungen (Wasserbehörde)
- Wasserschutzgebiete (Heilquellen = Schutzgebiet) (Wasserbehörde)

Auf der Basis der prognostizierten Schadstoffausbreitung bis zum Vorfluter steht der mögliche, räumliche Einflussbereich der Schadstoffe auf Schutzgüter/Belange Dritter fest. Der Einflussbereich wird mit den vorhandenen oder zukünftigen Nutzungen oder Interessen Dritter abgeglichen.

## **7.5 Arbeitsschritt 4: Vorschlag zu Kontrollmaßnahmen**

Für den Fall, dass die zuständige Behörde die Sanierung als nicht verhältnismäßig bewertet, sind die prognostizierten Auswirkungen in Bezug auf die Schutzgüter/Belange Dritter zu überwachen.

Der Umfang und die Häufigkeit der Kontrollmaßnahmen sollten die Aussagesicherheit der Prognose widerspiegeln: Je unsicherer die Prognose, desto intensiver muss überwacht werden. Ziel der Kontrollmaßnahmen ist es, die Prognose anhand von im Feld erhobenen Daten zu bestätigen. Zur Durchführung der Kontrolle wird es im Regelfall erforderlich sein, das bestehende Grundwassermessstellennetz zu erweitern. Eine höhere Aufschlussdichte im unmittelbaren Abstrom ermöglicht einen zeitnahen Abgleich der Prognose mit den realen Bedingungen. Gleichzeitig empfiehlt es sich mit einer höheren Überwachungsfrequenz zu beginnen und diese in Abhängigkeit der Ergebnisse anzupassen.

## **7.6 Arbeitsschritt 5: Kriterien für die Wiederaufnahme der aktiven Sanierung**

Für den Fall, dass die Kontrollmaßnahmen die Prognosen nicht bestätigen, sind Kriterien für die Wiederaufnahme der aktiven Sanierung festzulegen. Vorschläge hierzu werden vom Sanierungspflichtigen bzw. von dessen Gutachter zusammen mit der Prognose erarbeitet und von den zuständigen Behörden festgelegt.

Als Kriterien für die Wiederaufnahme der aktiven Sanierung dienen in der Regel Konzentrationen in Messpunkten, die in Abhängigkeit von der Lage und Sensitivität der Schutzgüter festzulegen sind.

# 8 Schlussbemerkung

Nach Überprüfung der fachtechnischen Grundlagenermittlung der Elemente A, B und C (siehe Abb.1) durch den Sanierungspflichtigen und Vorlage der Ergebnisse bei

der Behörde, obliegt es der zuständigen Behörde, die Verhältnismäßigkeit der Maßnahme zu prüfen und den weiteren Handlungsbedarf zu formulieren.



# ANHANG A

## Erläuterungen zu den Anlagenauslegungen

In den Abbildungen A2, A4 und A6 sind die Kennzahlen für die drei Anlagenauslegungen dargestellt. Hinsichtlich der angegebenen Kennzahlen ist dabei die Spannbreite in der Kalkulation von etwa 15 % zu berücksichtigen. Die Spannbreite ist in den Grafiken dargestellt.

Die Vergleichskennzahlen verhalten sich in Abhängigkeit der Eingangskonzentrationen und Fördermengen nicht linear. Dies hängt damit zusammen, dass die Kosten für Wartungen, Reparaturen, die ingenieurtechnische Begleitung sowie die Analytik im Wesentlichen von der Schadstoffbelastung entkoppelt sind. Darüber hinaus sind bei größeren Fördermengen und größeren Schadstoffgehalten hinsichtlich der Energieeffizienz der Aggregate sowie der Ausnutzung der Beladungskapazität günstigere Bedingungen gegeben, wodurch die spezifischen Kosten je m<sup>3</sup>

sinken. Für einen überschlägigen Vergleich wird dennoch vorgeschlagen, zwischen den Kennzahlen linear zu interpolieren und die Zahlen in der Zukunft mit einer jährlichen Preissteigerungsrate von cirka 2 % anzuheben.

Unter Berücksichtigung einer Spannbreite in der Kalkulation von etwa 15 % gibt es Anhaltspunkte dafür, dass die Anlagentechnik nicht optimal ausgelegt ist oder nicht effizient arbeitet, wenn die angegebenen Vergleichskennzahlen diese Spannbreite überschreiten. In diesem Fall sind Überprüfungen der Wirtschaftlichkeit erforderlich. Grundsätzlich sind standortspezifische Besonderheiten zu berücksichtigen (z.B. kostenintensive Chemikaliendosierung), die auch mögliche Abweichungen von den Vergleichszahlen plausibel erklären können.

### Erläuterungen zu Anlagenauslegung 1

**Pump-and-Treat:**

Brunnenpumpen → Mehrschichtfilter → Wasseraktivkohlefilter

Die direkte Wasseraktivkohlefiltration kommt meist dann zum Einsatz, wenn die abzureinigenden Stoffe hinreichend

gut in der wässrigen Phase an der Aktivkohle adsorbieren (Ausnutzung der Beladungskapazität) oder eine Überführung in die Gasphase, bedingt durch die Stoffeigenschaften, nicht möglich bzw. nicht wirtschaftlich ist. Die Anlagenauslegung 1 wird meist bei geringeren Fördermengen gewählt. Auch kann der Wasserchemismus (z.B. Kalkgehalt) im Einzelfall die Anwendung der Desorption (Anlagenauslegung 2) unpraktikabel werden lassen.

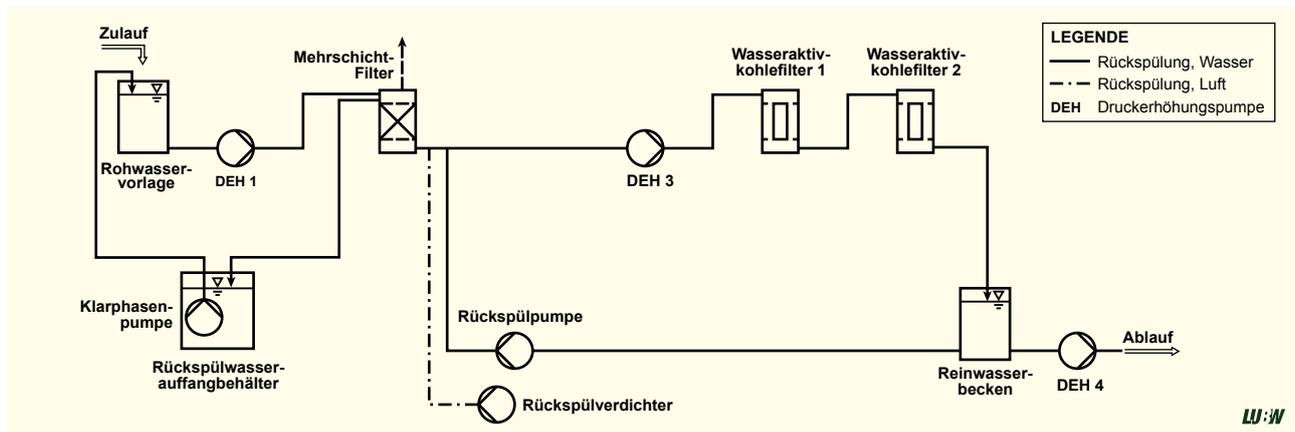
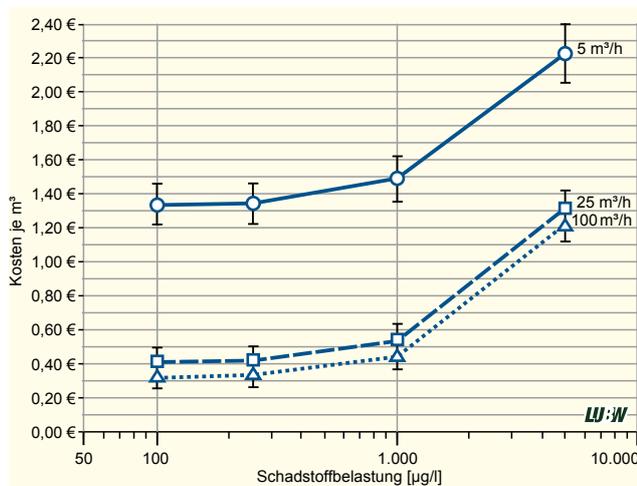


Abb. A 1: Verfahrensfliessbild zu Vergleichskennzahlen für Anlagenauslegung "Mehrschichtfilter → Wasseraktivkohlefilter"



**Vergleichskennzahlen zu Gesamtbetriebskosten pro m³ Wasser für Anlagenauslegung "Mehrschichtfilter → Wasseraktivkohlefilter"**

Konzentration LCKW	5 m³/h	25 m³/h	100 m³/h
100 µg/l	1,36 €	0,41 €	0,32 €
250 µg/l	1,37 €	0,42 €	0,33 €
1.000 µg/l	1,49 €	0,54 €	0,44 €
5.000 µg/l	2,26 €	1,31 €	1,21 €

Spannbreite der Kalkulation 15%  
 Alle Kosten ohne Mehrwertsteuer (Stand 2019)

Abb. A 2: Vergleichskennzahlen zu Gesamtbetriebskosten pro m³ Wasser für Anlagenauslegung "Mehrschichtfilter → Wasseraktivkohlefilter" (Stand 2019)

## Erläuterungen zu Anlagenauslegung 2

### Pump-and-Treat:

Brunnepumpen → Mehrschichtfilter → Desorption und Luftaktivkohle

Die Desorption wird hingegen meist bei flüchtigen Substanzen eingesetzt, da diese Stoffe, bedingt durch ihre Flüchtigkeit, leicht in die Gasphase überführt werden können und Luftaktivkohle im Vergleich zur Wasseraktivkohle eine deutlich höhere Beladungskapazität hat.

Es gibt hinsichtlich der Schadstoffbelastung sowie dem Fördervolumenstrom keine allgemeingültigen Einsatzgrenzen, vielmehr ist standortspezifisch eine Einzelfallprüfung erforderlich. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Vergleich der erreichbaren Aktivkohlebeladung für die Luft und die Wasserphase sowie der zusätzlichen technischen Aufwendungen für den Prozessschritt der Desorption.

Bei der Kalkulation für die Bodenluftabsaugung wurde ab einer Bodenluftkonzentration von 1.000 mg/m<sup>3</sup> und größer eine Technik mit Explosionsschutz angesetzt.

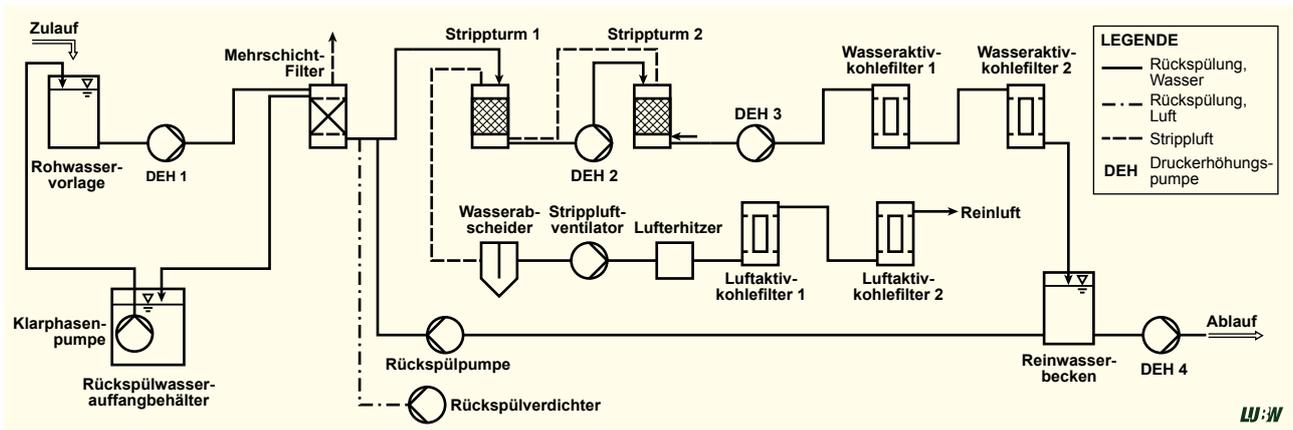


Abb. A3: Verfahrensfließbild zu Vergleichskennzahlen für Anlagenauslegung "Mehrschichtfilter→Desorption→Luftaktivkohle"

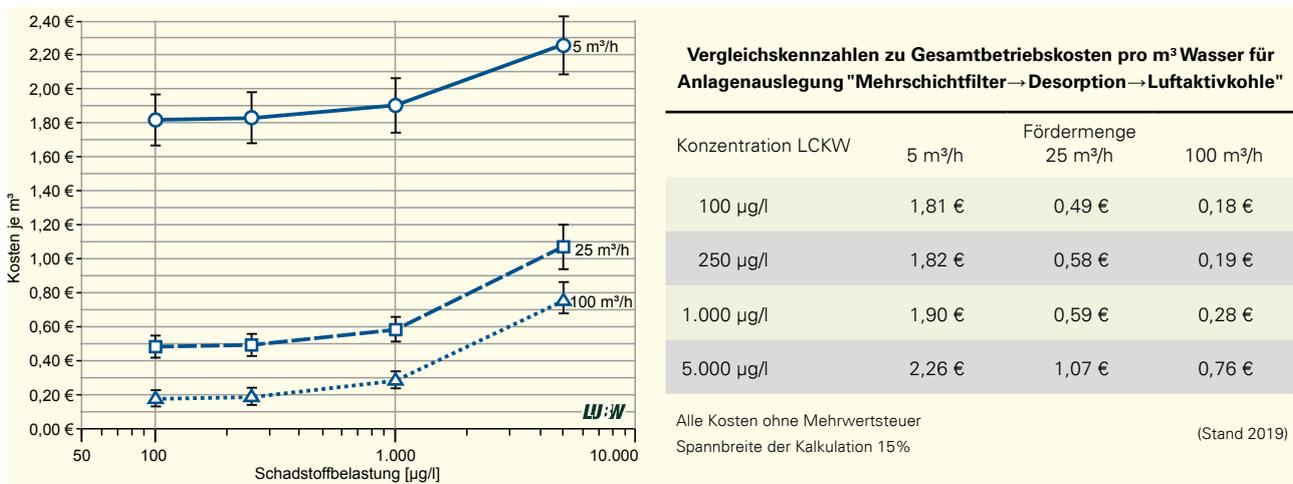


Abb. A4: Vergleichskennzahlen zu Gesamtbetriebskosten pro m<sup>3</sup> Wasser für Anlagenauslegung "Mehrschichtfilter→Desorption→Luftaktivkohle" (Stand 2019)

### Erläuterungen zu Anlagenauslegung 3

**Bodenluftabsaugung:**

Wasserabscheidung → Luftaktivkohlefilter

Die Luftaktivkohlefiltration kommt zumeist dann zum Einsatz, wenn die zu reinigenden Stoffe hinreichend gut an der Aktivkohle adsorbieren (Ausnutzung der Beladungskapazität). Die Anlagenauslegung wird meist bei geringeren Fördermengen gewählt.

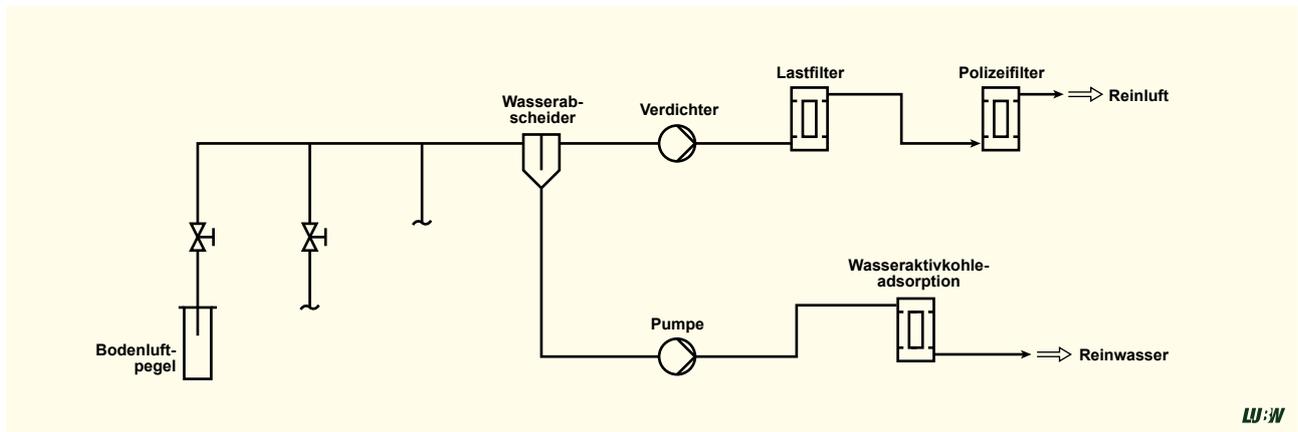


Abb. A5: Verfahrensfießbild zu Vergleichskennzahlen für Anlagenauslegung Bodenluftabsaugung "Wasserabscheidung → Luftaktivkohlefilter"

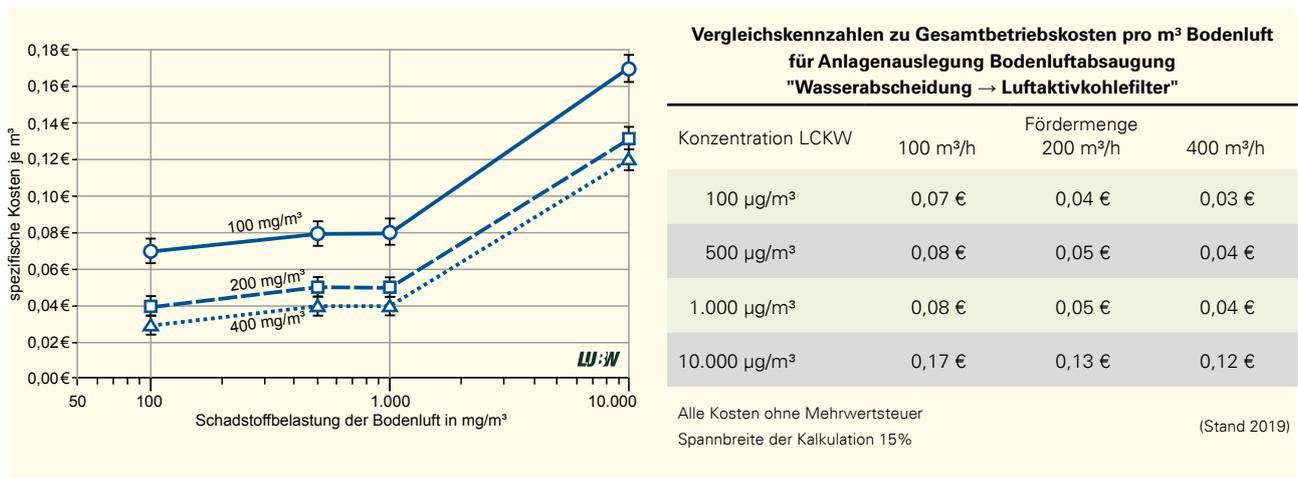


Abb. A6: Vergleichskennzahlen zu Gesamtbetriebskosten pro m³ Bodenluft für Anlagenauslegung Bodenluftabsaugung "Wasserabscheidung → Luftaktivkohlefilter" (Stand 2019)



# ANHANG B

## Vereinfachte Auswertung zur Abschätzung von Gesamtlaufzeiten und -kosten von Pump-and-Treat-Maßnahmen (inkl. Anleitung zu MS-Excel-Dokument)

Anmerkung:

Zur besseren Lesbarkeit wurden Textteile vom Hauptteil der Handlungshilfe 2012 aufgenommen.

### 1 Konzept und Vorgehensweise

Die Berechnung der Gesamtlaufzeit kann mit einem stark vereinfachten standardisierten Verfahren erfolgen, mit dem es möglich ist auch bei Unkenntnis von einigen Eingangsparametern nach gutachterlichem Ermessen Sensitivitätsanalysen durchzuführen.

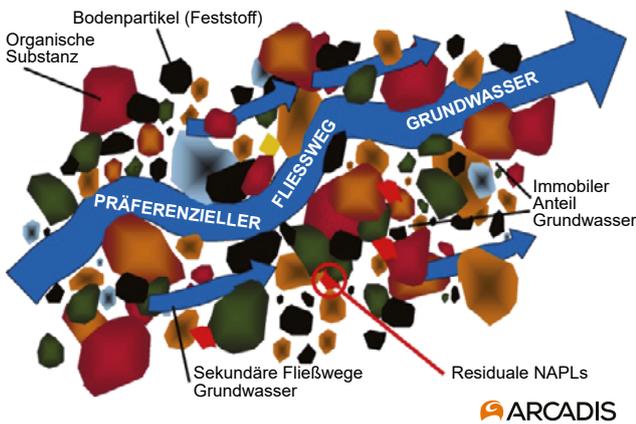


Abb. B1: Mikrokosmos eines Schadensherdes

Die Berechnung der Gesamtlaufzeit beruht nicht auf einem Modell das im Detail versucht, die Prozesse von der Schadstoffquelle über den Grundwasserpfad bis in den Brunnen hinein vollständig abzubilden. Die natürlichen Prozesse im Mikrokosmos des Schadensherdes (siehe

Abb.B1) und die Tailing-Prozesse werden im Rahmen der qualifizierten Abschätzung der Gesamtlaufzeiten jeweils als "Black-Box" definiert. Dabei wird lediglich das Ergebnis der Prozesse in der jeweiligen "Black-Box" berücksichtigt. Abb. B2 zeigt das Prinzip der Berechnung.

Der Untergrund wird in Schichten unterschiedlicher Durchlässigkeiten eingeteilt. Wasser durchströmt die Schadstoffquelle, bei der für jede Schicht das Schadstoffpotenzial abgeschätzt werden muss. Durch Lösungsprozesse (= "Black-Box") strömt in Abhängigkeit der Schadstoffverteilung oder Durchlässigkeit schadstoffbelastetes Grundwasser ab, dessen Konzentration schichtbezogen variiert.

Durch Tailing-Effekte (= "Black-Box") während der Pump-and-Treat-Maßnahme erfolgt eine Reduzierung der Konzentrationen. Der Brunnen selbst erfasst schließlich diese schichtbezogenen Frachten (unterschiedliche Mengen und Konzentrationen), die durch die Grundwasserentnahme im Brunnen vermischt werden (Abb.B2). Ausgehend von diesem einfachen Modell kann die Gesamtlaufzeit der Maßnahme abgeschätzt werden.

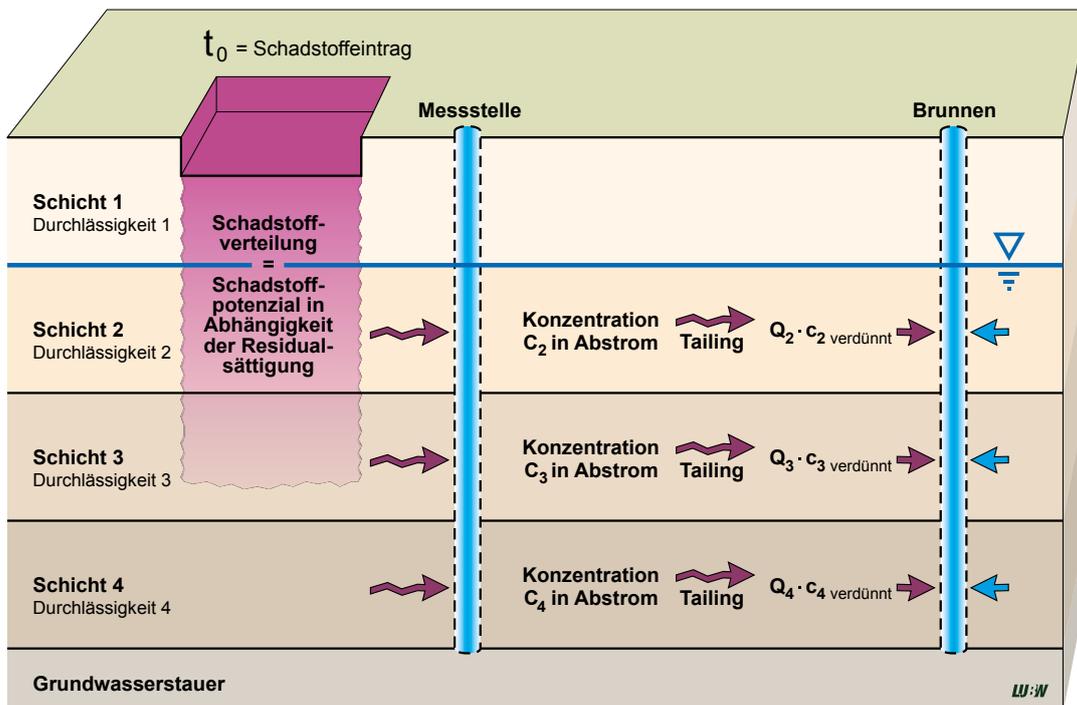


Abb. B2: Schema zur Berechnung der Gesamtlaufzeit einer Sanierung durch Pump-and-Treat-Maßnahmen

Eine wesentliche für die Berechnung notwendige Information ist neben der Kenntnis der unterschiedlichen Durchlässigkeiten des Untergrundes das Schadstoffpotenzial im Verunreinigungsherd (Quelle) und dessen Tiefenverteilung. Das Potenzial und die Tiefenverteilung der Schadstoffe in der Quelle sind in den seltensten Fällen bekannt und müssen abgeschätzt werden. Vereinfacht können dann gedanklich die Schadstoffe über eine zu definierende Eintragsfläche (Schadensherdfläche z.B. 1 m<sup>2</sup>) von der Oberfläche in den Untergrund versickert werden. In Abhängigkeit der Durchlässigkeiten wird eine Residualsättigung angesetzt, die multipliziert mit dem Schichtvolumen unterhalb der Versickerungsfläche die schichtbezogene Schadstoffmenge definiert (Abb.B3).

Die abgeschätzten Residualsättigungen von Perchlorethen/Trichlorethen betragen nach LfU (1985) bei unterschiedlichen kf-Werten:

$$\begin{aligned}
 k_f &= 1 \times 10^{-2} \text{ m/s} \rightarrow 5 \text{ l/m}^3 \\
 &= 1 \times 10^{-3} \text{ m/s} \rightarrow 20 \text{ l/m}^3 \\
 &= 1 \times 10^{-4} \text{ m/s} \rightarrow 50 \text{ l/m}^3
 \end{aligned}$$

Vereinfacht kann bei Per- und Trichlorethen von einer Dichte 1,5 g/cm<sup>3</sup> ausgegangen werden.

Zum aktuellen Bewertungsstichtag, der häufig Jahrzehnte nach dem Eintrag liegt, werden die noch verbliebenen Restmengen im Schadensherd durch Abzug der schon natürlich oder aktiv ausgetragenen Schadstoffmengen berechnet.

Die beschriebene Vorgehensweise kann bei bekannten Schadstoffverteilungen oder bei bekannten Eintragsmengen kalibriert bzw. verfeinert werden.

Die Prognose in die Zukunft (siehe Abb.B4) erfolgt mit einem schichtbezogenen Dreisatz, der letztlich die dargestellten theoretischen Austragskurven berechnet (siehe Abb.B5).

Mit der Kenntnis der Tiefenverteilung der Konzentrationen und der in den Brunnen eintretenden Wassermengen ("Produktivität") kann mit diesem schichtbezogenen Ansatz die Zeitdauer der Auslaugung des Schadensherdes errechnet werden. Wichtig ist dabei die Konzentrationsver-

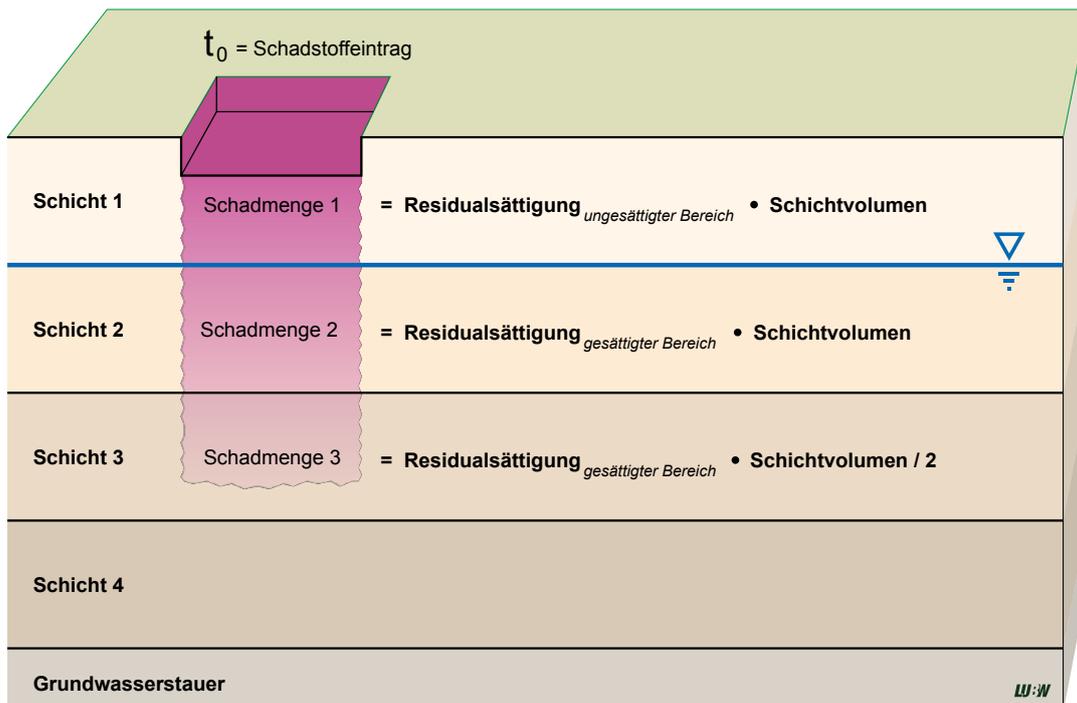


Abb. B 3: Schema zur Abschätzung der Schadstoffmenge im Schadensherd (Quelle)

teilung nicht unmittelbar in oder im Abstrom der Schadstoffquelle, sondern im Brunnen zu kennen.

**HINWEIS**

Falls Informationen über die horizontierte Schadstofffrachtverteilung im Sanierungsbrunnen fehlen, kann die Verteilung mit überschaubarem Aufwand mit Flow-Meter-Messungen und einer horizontierten Probenahme erhoben werden.

Zur Feststellung möglicher Phasen gibt es unterschiedliche Untersuchungsmethoden, z.B. Direct-push-Sondierungen. Weitere Untersuchungsmethoden sind in den Schriften des *altlastenforums* Baden-Württemberg und in den Veröffentlichungen des BMBF-Forschungsprojektes KORA beschrieben.

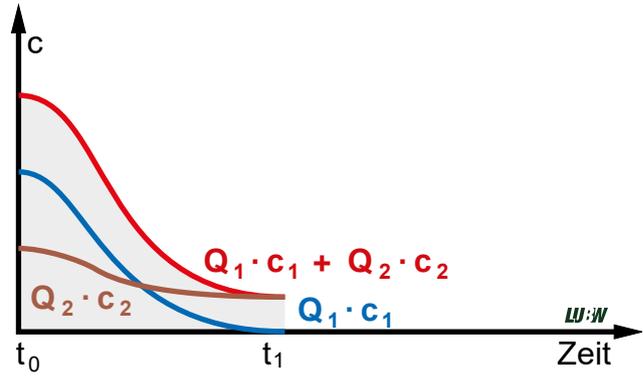


Abb. B5: Schadstofffrachten in geschichtetem Aquifer und berechnete Austragskurve

Im Rahmen der Erstellung dieser Handlungshilfe wurde ein Excel-Sheet zur Abschätzung der Sanierungsgesamtlaufzeit erstellt. Die Verwendung des Excel-Sheets entbindet jedoch nicht von der sorgfältigen gutachterlichen Bearbeitung jedes Einzelfalls.

An die Berechnung der Gesamtlaufzeit, eventuell mit worst- und best-case-Annahmen, schließt sich die Berechnung der Gesamtkosten an. Die Gesamtkosten berechnen sich als Kostenbarwert nach den Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen der LAWA 2005 und werden einer progressiv jährlich steigenden Kostenreihe ausgewiesen. Mit dieser Methode wird ein fiktiver Geldbetrag errechnet, der zum jetzigen Zeitpunkt zur Verfügung gestellt wird, jährlich Zinsen abwirft und von dem bis zum Ende der Gesamtlaufzeit die Betriebskosten abgezogen werden.

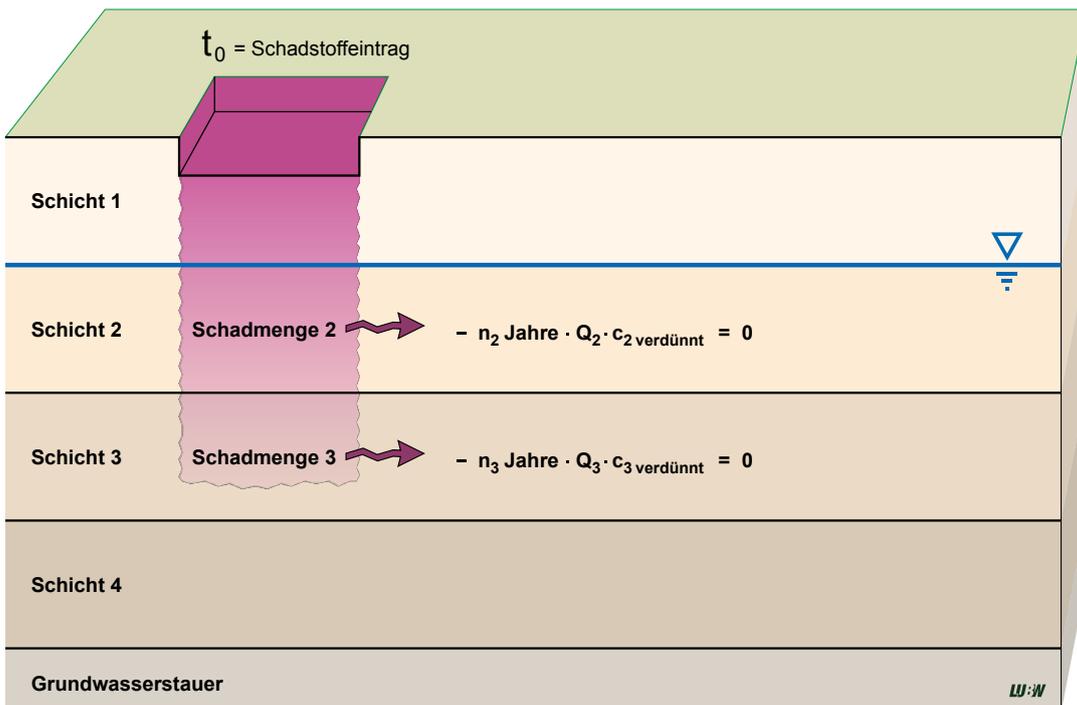


Abb. B4: Schema zur Abschätzung der Restlaufzeit der Sanierung

Die Berechnung des Kostenbarwertes erfolgt nach folgender Formel:

$$\text{Kostenbarwert} = \text{Diskontierungsfaktor} \times \text{jährliche Betriebskosten}$$

Wichtig ist bei der Angabe der Kosten, ob Netto- oder Bruttobeträge angegeben sind.

#### Festlegung des Kriteriums „Laufzeit >25 Jahre“

Nach den Testläufen mit dem in der Handlungshilfe verwendeten Abschätzverfahren zur Prognose der Laufzeit, waren in den meisten Fällen die Eingangsdaten sehr ungenau. Bei einer Variation dieser Eingangsdaten innerhalb eines plausiblen Wertebereichs (Sensitivitätsanalyse) haben sich rechnerische Laufzeiten zwischen 1 und 25 Jahren ergeben. Deshalb wurde als Kriterium die Laufzeit „25 Jahre“ festgelegt, unterhalb derer man noch von einer „absehbaren Zeit“ der Sanierung (Dekontamination) sprechen kann.

#### Fehlende Daten

Sollte sich während der Bearbeitung herausstellen, dass die vereinfachte Abschätzung der Gesamtlaufzeit nicht möglich ist, weil z.B. Daten über die Durchlässigkeitsverteilung, die Konzentrationsverteilung o.ä. fehlen, sind diese Daten nachträglich zu ermitteln.

#### Phase vorhanden

Ebenso kann bei der begründeten Annahme eines Schadstoffpools bzw. des Vorhandenseins von Schadstoffen in Schluff-, Ton- oder organischen Schichten die Berechnung abgebrochen werden. In diesen Fällen ist eine Dekontamination mit Pump-and-Treat meist nicht sinnvoll. Unter Umständen muss mit komplexeren Untersuchungsmethoden und Berechnungen geprüft werden, ob in diesen Schichten vorhandene Phasen mit derzeit verfügbaren Techniken sanierbar sind.

## 2 Kurzanleitung

### MS-Excel-Auswerteprogramm "Tool Abschätzverfahren"

Die Excel-Auswertetools stehen im Internetangebot der LUBW (Altlasten\Anwendungsprogramme) zum Download bereit. Eintragungen dürfen NUR in weiß hinterlegten Feldern mit orangefarbener Umrandung vorgenommen werden. Die übrigen Felder dürfen NICHT verän-

dert werden. Es müssen mindestens zwei Bodenschichten im gesättigten Bereich angelegt werden. Werden Daten in einer bestehenden Datei geändert, müssen alle nachfolgenden Berechnungen, die über Buttons ausgeführt werden, erneut durchgeführt werden.

#### Vorgehensweise:

1. Auf dem Tabellenblatt „Vorgaben“ die Residualsättigungen, die Dichte des vorliegenden Schadstoffs und die Konzentration im Pumpbetrieb in die zugehörigen Felder eintragen.
2. Auf Tabellenblatt „Tabelle 1“ wechseln.
3. Nach Öffnen des Tabellenblatts mit dem Button „Format c:\“ die eventuell noch in der Datei vorhandenen Eintragungen löschen.
4. Eingabe der Mächtigkeiten der einzelnen Bodenschichten. Bei nicht benötigten Bodenschichten die Eingabefelder nicht ausfüllen!
5. Eingabe der Fläche der einzelnen Bodenschichten. Bei nicht benötigten Bodenschichten die Eingabefelder nicht ausfüllen!
6. Wenn für jede Bodenschicht  $k_f$ -Werte bekannt sind, den Button „Bekannt ja/nein“ in der Spalte „ $k_f$ -Werte“ anklicken. In dem sich öffnenden Fenster in der linken Spalte die jeweiligen  $k_f$ -Werte eintragen und mit dem Button „Nach Eingabe hier bestätigen“ bestätigen. Das Feld „mittlerer  $k_f$ -Wert“ am Ende der Spalte muss in diesem Fall nicht ausgefüllt werden.
7. Wenn die einzelnen  $k_f$ -Werte nicht bekannt sind, den (angenommenen) mittleren  $k_f$ -Wert in das Feld „mittlerer  $k_f$ -Wert“ eintragen. Die  $k_f$ -Werte können nach Eingabe der einzelnen Produktivitäten, das heißt Schichtergiebigkeiten (siehe Punkt 9), mit dem Button „Automatische Berechnung für alle Bodenschichten“ in o.g. Fenster berechnet werden.
8. Das Porenvolumen der einzelnen Bodenschichten in die Spalte „Porenvolumen“ eintragen. Bei nicht benötigten Bodenschichten die Eingabefelder nicht ausfüllen!
9. Wenn für jede Bodenschicht die jeweilige Produktivität bekannt ist, den Button „Bekannt ja/nein“ in der Spalte „Verteilung Durchlässigkeit, Produktivität“ anklicken. In dem sich öffnenden Fenster in der linken Spalte die jeweilige Produktivität eintragen und mit dem Button „Nach Eingabe hier bestätigen“ bestätigen.
10. Wenn die einzelnen Produktivitäten nicht bekannt sind, können diese in dem o.g. Fenster mit dem Button „Automatische Berechnung für alle Bodenschichten“ berechnet werden. Für diese Berechnung müssen allerdings für jede Bodenschicht  $k_f$ -Werte eingetragen sein (siehe Punkt 6).
11. Das natürliche Gefälle in das Feld „natürliches Gefälle“ am Ende der Spalte „Verteilung Durchlässigkeit, Produktivität“ eintragen.

12. Die Schadstoffkonzentration in der Quelle oder dem unmittelbaren Abstrom für die einzelnen Bodenschichten in der Spalte „Konzentration in der Quelle oder dem unmittelbaren Abstrom“ eintragen.
  13. Das Jahr der Feststellung in das Feld „Feststellung“ am Ende der Spalte „Konzentration in der Quelle oder dem unmittelbaren Abstrom“ eintragen.
  14. Wenn der ursprüngliche prognostizierte Schadstoffeintrag bekannt ist, den Button „Bekannt ja/nein“ in der Spalte „Ursprüngliches Schadstoffpotenzial“ anklicken. In dem sich öffnenden Fenster in das Eingabefeld den prognostizierten Schadstoffeintrag eingeben und mit dem Button „Nach Eingabe hier bestätigen“ bestätigen.
  15. Wenn der ursprüngliche prognostizierte Schadstoffeintrag nicht bekannt ist, kann dieser über den Button „Berechnung starten“ in o.g. Fenster berechnet werden. Der Eintrag wird über die Annahme einer ursprünglich vorhandenen Verunreinigung bis zur Residualsättigung (in Abhängigkeit der Durchlässigkeit) automatisch berechnet und kann händisch nachkorrigiert werden.
  16. Das Jahr des Schadstoffeintrags in das Feld „Jahr Schadstoffeintrag“ am Ende der Spalte „Ursprüngliches Schadstoffpotenzial“ eintragen.
  17. Wenn der derzeitige Schadstoffaustrag für jede einzelne Bodenschicht bekannt ist, den Button „Bekannt ja/nein“ in der Spalte „Derzeitige tiefenzonierte Abstromkonzentration“ anklicken. In dem sich öffnenden Fenster in das Eingabefeld den derzeitigen Schadstoffaustrag eingeben und mit dem Button „Nach Eingabe hier bestätigen“ bestätigen.
  18. Wenn nur ein durchschnittlicher derzeitiger Schadstoffaustrag bekannt ist, kann dieser in o.g. Fenster in das Eingabefeld unten rechts eingegeben und mit dem zugehörigen Button bestätigt werden.
  19. Wenn weder einzelne, noch ein durchschnittlicher derzeitiger Schadstoffaustrag bekannt sind, muss in o.g. Fenster in das Eingabefeld oben rechts ein für alle Bodenschichten gültiger angenommener derzeitiger Schadstoffaustrag eingetragen und mit dem zugehörigen Button bestätigt werden.
  20. Das Jahr des Sanierungsbeginns in das Feld „Jahr Sanierungsbeginn“ am Ende der Spalte „abgeströmte Schadstoffe“ eintragen.
  21. Die Förderleistung der Brunnen in das zugehörige Eingabefeld eintragen.
  22. Die bereits durch die Sanierung entfernten Schadstoffe in das zugehörige Eingabefeld eintragen.
  23. Das Jahr der Berechnung in das zugehörige Eingabefeld am Ende der Spalte „Bereits entfernte Schadstoffe“ eintragen.
  24. Zur grafischen Darstellung des Schadstoffaustrags den Button „Grafik erstellen – Schadstoffaustrag“ anklicken.
  25. Zur grafischen Darstellung des Schadstoffabbaus den Button „Grafik erstellen – Schadstoffabbau“ anklicken.
- Grundsätzlich müssen die Ergebnisse durch Plausibilitätsabschätzungen überprüft werden.



# Abbildungsverzeichnis

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1:	Ablaufschema der fachtechnischen Grundlagenermittlung zur Vorbereitung der Verhältnismäßigkeitsprüfung langlaufender Pump-and-Treat-Maßnahmen (im Regelfall, Ausnahmen sind möglich)	11
Abb. 2:	Ablaufschema zur Prüfung des Optimierungspotenzials und technischer Alternativen bzw. Sanierungskonzepte.	13
Abb. 3:	Durch Tailing-Effekte beeinflusster Austragszustand	15
Abb. 4:	Vergleich der spezifischen Betriebskosten mit Bezug zum abgereinigten Grundwasser und zur ausgetragenen Schadstoffmenge (idealisierte Kurvenverlauf)	16
Abb. 5:	Verteilung der spezifischen Fördermengen im letzten aktuellen Betriebsjahr [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ] der ausgewiesenen Sanierungsfälle	22
Abb. 6:	Verteilung der spezifischen Fördermengen im letzten aktuellen Betriebsjahr [ $\text{kWh}/\text{kg}$ ] der ausgewiesenen Fälle	23
Abb. 7:	Verteilung der spezifischen Sanierungskosten im letzten aktuellen Betriebsjahr [ $\text{€}(\text{netto})/\text{kg}$ ] der ausgewiesenen Fälle	24
Abb. 8:	Konzeptionelles Standortmodell mit Bausteinen Geologie, Hydrogeologie, Schadstoffquellen, -fahne und -transport	28
Abb. A 1:	Verfahrensfließbild zu Vergleichskennzahlen für Anlagenauslegung "Mehrschichtfilter → Wasseraktivkohlefilter"	33
Abb. A 2:	Vergleichskennzahlen zu Gesamtbetriebskosten pro $\text{m}^3$ Wasser für Anlagenauslegung "Mehrschichtfilter → Wasseraktivkohlefilter" (Stand 2019)	33
Abb. A 3:	Verfahrensfließbild zu Vergleichskennzahlen für Anlagenauslegung "Mehrschichtfilter → Desorption → Luftaktivkohle"	34
Abb. A 4:	Vergleichskennzahlen zu Gesamtbetriebskosten pro $\text{m}^3$ Wasser für Anlagenauslegung "Mehrschichtfilter → Desorption → Luftaktivkohle" (Stand 2019)	34
Abb. A 5:	Verfahrensfließbild zu Vergleichskennzahlen für Anlagenauslegung Bodenluftabsaugung "Wasserabscheidung → Luftaktivkohlefilter"	37
Abb. A 6:	Vergleichskennzahlen zu Gesamtbetriebskosten pro $\text{m}^3$ Bodenluft für Anlagenauslegung Bodenluftabsaugung "Wasserabscheidung → Luftaktivkohlefilter" (Stand 2019)	35
Abb. B 1:	Mikrokosmos eines Schadensherdes	38
Abb. B 2:	Schema zur Berechnung der Gesamtlaufzeit einer Sanierung durch Pump-and-Treat-Maßnahmen	38
Abb. B 3:	Schema zur Abschätzung der Schadstoffmenge im Schadensherd (Quelle)	39
Abb. B 4:	Schema zur Abschätzung der Restlaufzeit der Sanierung	40
Abb. B 5:	Schadstofffrachten in geschichtetem Aquifer und berechnete Austragskurve	40

# Literaturverzeichnis

ASTM International (2008):

E 1689 – 95 Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites, West Conshohocken.

ASTM International (2008):

D5979 – 96 Standard Guide for Conceptualization and Characterization of Groundwater Systems, West Conshohocken.

DGG (2002): Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Geologischen Gesellschaft:

Hydrogeologische Modelle - Ein Leitfaden mit Fallbeispielen.

HLNUG (2018) Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie:

Arbeitshilfe zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen; Handbuch Altlasten, Band 3, Teil 7, 3. Auflage

LABO (2009): Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz,

Ständiger Ausschuss Altlasten – ALW, Ad-hoc Unterausschuss “Natürliche Schadstoffminderung”:

Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung, Positionspapier vom 10.12.2009.

LAWA (2005): Länderarbeitsgemeinschaft Wasser:

Leitlinie zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinie).

LAWA (2006): Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Boden (LABO):

Grundsätze des nachsorgenden Grundwasserschutzes bei punktuellen Schadstoffquellen.

LfU (1985): Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg:

Leitfaden für die Beurteilung und Behandlung von Grundwasserverunreinigungen durch leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe.

LfU (1997): Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg:

Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle.

Literaturstudie zum natürlichen Rückhalt / Abbau von Schadstoffen im Grundwasser.

LUBW (2008): Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg:

Untersuchungsstrategie Grundwasser, Leitfaden zur Untersuchung bei belasteten Standorten.

LUBW (2010): Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg:

Altlastenbewertung-Priorisierungs- und Bewertungsverfahren Baden-Württemberg.

PAYNE et al. (2008): Payne, F. C., Quinnan, J. A., Potter, S. T. Remediation Hydraulics: CRC Press.



