


# Handlungsempfehlung

## Prüfung und Bewertung langlaufender Pump-and-Treat- Sanierungen (LCKW)

Auftraggeber:

 **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg**

## IMPRESSUM

Herausgeber: LUBW – Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg  
Postfach 100163, 76231 Karlsruhe, [www.lubw.baden-wuerttemberg.de](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de)

Autoren: Dr. Michael Reinhard, Sandra Russold,  
ARCADIS Consult GmbH, 76185 Karlsruhe  
  
Henning Leiteritz, Dr. Dieter Stupp,  
Dr. Stupp Consulting GmbH, 51465 Bergisch-Gladbach

Redaktion: LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg  
Referat 22 - Boden, Altlasten

Stand: 07.06.2010

## **INHALTSVERZEICHNIS**

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Einführung</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Veranlassung und Zielsetzung</b>	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Anwendungsbereiche und Einschränkungen</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Prüfkonzept</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Datenerfassung</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Datenauslegung und Betriebskosten</b>	<b>11</b>
<b>5.1</b>	<b>Überschlägliche Beurteilung der Betriebskosten</b>	<b>11</b>
<b>5.2</b>	<b>Detaillierte Prüfung der Sanierungsanlage – Stoffaustrag, Energiebedarf und Betriebskosten</b>	<b>15</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Vorgehensweise</b>	<b>15</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Auswertungsschritte</b>	<b>15</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Beurteilungskriterien</b>	<b>17</b>
<b>6.</b>	<b>Gesamtlaufzeit und Kosten</b>	<b>22</b>
<b>6.1</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>22</b>
<b>6.2</b>	<b>Abschätzung der Gesamtlaufzeit und Gesamtkosten</b>	<b>26</b>
<b>6.3</b>	<b>Beurteilung</b>	<b>30</b>
<b>7</b>	<b>Gesamtbewertung</b>	<b>31</b>

## **ANLAGENVERZEICHNIS**

<b>Anhang 1</b>	<b>Beispielfälle</b>
<b>Anhang 2</b>	<b>Auswerteprogramme und Anleitungen</b>

# 1 Zusammenfassung

In Baden-Württemberg werden jährlich ca. 3,5 Mio.€ für Sanierungsmaßnahmen mittels Pump-and-Treat für kommunale Fälle aufgewendet. Dabei stellt sich immer dringender die Frage nach einer Optimierung der Sanierungen oder Beendigung bei "geeigneten" Fallkonstellationen. Um hier Kosteneinsparungen zu erreichen, wurde die Methode zur Beurteilung insbesondere der Effizienz laufender Grundwassersanierungen entwickelt.

Das Konzept besteht aus mehreren Prüfschritten. Zu Beginn der Prüfung ist es erforderlich die Betriebskosten unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zusammenzustellen, da sie wichtige Eingangsgrößen für die spätere Berechnung der Gesamtkosten sind.

Nach Überprüfung der Anlagenauslegung und der Betriebskosten erfolgt eine Abschätzung der Laufzeit der Gesamtmaßnahme bis zum Erreichen des Sanierungsziels. Mit Kenntnis der jährlichen Betriebskosten und der Prognose der Laufzeit der Gesamtmaßnahmen wird schließlich der Gesamtwert der Sanierungsmaßnahme nach finanzmathematischen Methoden als Kostenbarwert ausgewiesen. Die hierzu vorgestellten Methoden können auch für Kostenschätzungen im Rahmen der Sanierungsuntersuchung verwendet werden.

Mit Hilfe der Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen erfolgt eine Gesamtbewertung der Effizienz der Sanierungsmaßnahme.

## 2 Einführung

### 2.1 Veranlassung und Zielsetzung

Derzeit gibt es eine Vielzahl von In-situ-Sanierungen mittels Pump-and-Treat, die bereits über längere Zeiträume (> 10 Jahre) betrieben werden. Häufig sind die prognostizierten Sanierungszeiträume überschritten, da die Sanierungszielwerte noch nicht erreicht wurden. Dies führt häufig zu einer unplanmäßigen Fortführung der Sanierungsbetriebe. Dieser Weiterbetrieb erfolgt dann oft von Jahr zu Jahr, während sich für die Betriebskosten eine zunehmend ungünstige Kostenwirksamkeit ergeben kann. Geringe Reinigungsleistungen können zudem zu einem ungünstigen Verhältnis zwischen Reinigungsleistung und ökologischer Belastung der Umwelt (Stichworte: CO<sub>2</sub>-Bilanz, Energieeffizienz, etc.) führen.

Ziel des Handbuchs ist es, eine Methode für die Praxis vorzustellen, mit der im Verwaltungsvollzug und in der gutachterlichen Bearbeitung lang andauernde Pump-and-Treat Maßnahmen hinsichtlich ihrer Kostenwirksamkeit und Effizienz bzgl. der Sanierungszielerreichung überprüft werden können. Diese Methode soll nicht die sachverständige Einzelfallbeurteilung ersetzen, sondern zur Erstbeurteilung, quasi als Filter und Hilfestellung für Fälle dienen, bei denen es deutliche Anhaltspunkte für einen nicht effizienten Betrieb gibt.

## 2.2 Anwendungsbereiche und –einschränkungen

### Ökologische, klimabezogene Bilanzierung

Die Ausarbeitung einer ökologischen, klimabezogenen Bilanzierungsmethode führt im Regelfall wegen noch nicht vorhandener Beurteilungsnormen zu kontroversen Diskussionen zwischen Sanierungspflichtigen und Behörden. Weil aber erfahrungsgemäß der Energieverbrauch bei den Pump-and-Treat Verfahren maßgebend für die Ökobilanzierung ist, wird ein besonderer Schwerpunkt auf dieses Thema gelegt.

### Dekontamination/Sicherung der Schadstoffe

Bei der Überprüfung der Pump-and-Treat-Maßnahmen steht das Erreichen des Abreinigungs-/Sanierungsziels und damit der effektive Austrag bzw. die Beseitigung (Dekontamination) von Schadstoffen im Vordergrund. Pump-and-Treat-Maßnahmen, die als Sicherungsmaßnahmen konzipiert wurden, können mit der vorgestellten Methodik hinsichtlich ihrer Kostenwirksamkeit bewertet werden.

Weitere Nebenbedingungen, die (z. T.) technisch bedingt an Pump-and-Treat-Maßnahmen geknüpft sind (z. B. die Entfernung von Störstoffen wie Eisen oder Mangan durch die Aufbereitungstechnologie) werden bei der Prüfmethode nicht berücksichtigt.

### Geologie, Schadstoffverteilung, Sanierungsverlauf

Bei den wenigsten Sanierungsfällen in der Praxisanwendung ist eine 1:1 – Vergleichbarkeit der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen an verschiedenen Standorten gegeben. Die wesentlichen Unterschiede ergeben sich aus:

- den geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen,
- den Schadstoffbelastungen (Substanzen, Gehalte, Verteilung),

- der Bindung der Schadstoffe an der Bodenmatrix,
- den hydrochemischen Milieubedingungen im Grundwasser,
- dem Vorhandensein und der Mobilisierbarkeit von Störstoffen im Hinblick auf die Verfahrenstechnologie zur Abreinigung (z. B. Eisen, Mangan, Karbonat, Huminstoffe, etc.),
- sowie standortbedingten Limitationen (z. B. Platzverhältnisse, Lärmschutzauflagen, Witterungsbedingungen).

Um bei der Erstellung der Bewertungsmethodik eine ausreichende Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde diese auf LHKW-Schäden in Lockergesteinsaquiferen bezogen.

Die Anwendbarkeit der Bewertungsmethodik auf andere Schadens- und Standorttypen ist möglich. Hierbei ist es aber erforderlich, insbesondere das Schadstoffverhalten im Untergrund anzupassen. Außerdem ist es möglich, die Prüfschritte „Datenerfassung“ sowie „Anlagenauslegung und Betriebskosten“ auch bei Sanierungen in Festgesteinsaquiferen anzuwenden.

### Limitationen hinsichtlich der Datenlage

Bei der Anwendung der Prüfmethode ergeben sich definitionsbedingt Einschränkungen des Anwendungsbereiches durch die Verfügbarkeit, die Vollständigkeit und die Detailliedichte aller relevanten Eingangsgrößen. Dem entsprechend kann die Bewertung nur ab einem bestimmten Mindestumfang der Daten als hinreichend belastbar für die Ableitung von Folge-Entscheidungen angesehen werden. Die Prüfmethode eröffnet aber auch die Möglichkeit, sinnvolle Sensitivitätsanalysen durchzuführen.

# 3 Prüfkonzep

Nach der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) sind Dekontaminationsmaßnahmen zur Sanierung geeignet, wenn sie auf technisch und wirtschaftlich durchführbaren Verfahren beruhen, die ihre praktische Eignung zur umweltverträglichen Beseitigung oder Verminderung der Schadstoffe gesichert erscheinen lassen.

Der Verordnungstext impliziert, dass im Gegensatz zu den nicht zeitlich begrenzten Sicherungsmaßnahmen eine Dekontamination in absehbarer Zeit erzielt werden kann. Eine solche "absehbare Zeit" ist jedoch vom Gesetzgeber nicht definiert.

Bei Pump-and-Treat-Sanierungen wird dieser Punkt häufig kontrovers diskutiert, wobei je nach Interessenslage oft die eine Partei die Sanierung als langlaufende Sicherung auffasst, während die andere Partei die Sanierung eher als zeitlich eng begrenzte Dekontaminationsmaßnahme ansieht.

Dies führt regelmäßig zu Diskussionen, in denen z. B. der Sanierungspflichtige nach einer Sanierungszeit von wenigen Jahren eine geringe Abnahme der Konzentrationen in den Entnahmebrunnen feststellt und gegenüber der Behörde eine Einstellung der Sanierung oder eine Anhebung der Sanierungsziele aus Gründen der Wirtschaftlichkeit fordert.

Andererseits gibt es nicht weniger Fälle, in denen Pump-and-Treat-Sanierungen über Jahrzehnte weiterbetrieben werden.

Zur Überprüfung der technischen Effizienz und Kostenwirksamkeit von Pump-and-Treat-Dekontaminationsmaßnahmen wurde ein Prüfkonzep entwickelt, das es ermöglicht, mehrere Fälle nach der gleichen Methode zu beurteilen.

Diese Methode soll nicht die sachverständige Einzelfallbewertung ersetzen, sondern dient zur Erstbeurteilung, quasi als Filter und Hilfestellung für Fälle, bei denen es deutliche Anhaltspunkte für einen kostenunwirksamen bzw. nicht effizienten Betrieb gibt.



Das Prüfkonzep gliedert sich in vier Teile (siehe Abbildung 3.1).

Zu Beginn ist es zunächst erforderlich zu ermitteln, ob sich die Betriebskosten noch in einem wirtschaftlichen Rahmen befinden. In vielen Fällen wurde die Sanierungsanlage technisch richtig ausgelegt, mit abnehmenden Konzentrationen im Rohwasser der Reinigungsanlage und mit evtl. reduzierten Fördermengen kann die Sanierungsanlage zu einem späteren Zeitpunkt aber überdimensioniert sein. Dies wirkt sich in der Regel auf die Betriebskosten aus. Obwohl die Betriebskosten zunächst Sache des Pflichtigen sind und nichts mit der eigentlichen öffentlich-rechtlichen Verpflichtung zur Sanierung zu tun haben, sind diese jedoch wichtige Eingangsgrößen für die spätere Berechnung der für die Gesamtbeurteilung wichtigen Gesamtkosten.

Nach Überprüfung der Anlagenauslegung und der Betriebskosten erfolgt eine Prognose der Laufzeit der Gesamtmaßnahme bis zum Erreichen des Sanierungsziels. Dies ist sicherlich der komplizierteste Teil der Überprüfung, es wurde aber darauf geachtet, dass Eingangsparameter, die in der Realität meist nicht bekannt sind, nicht erforderlich sind.

Mit Kenntnis der jährlichen Betriebskosten und der Prognose der Laufzeit der Gesamtmaßnahmen ist es dann möglich, den Gesamtwert der Sanierungsmaßnahme nach finanzmathematischen Methoden als Kostenbarwert auszuweisen.

Während der Überprüfung wird es möglicherweise weitere Hinweise auf einen ineffektiven Betrieb (z. B. eine nicht optimale Lage der Entnahmebrunnen zur Schadstoffquelle, etc.) geben. Hier ist keine standardisierte Abfrage vorgesehen, vielmehr ist die sachverständige Arbeit des Gutachters gefragt.

In dem Ablaufschema in Abbildung 3.1. sind auch die wesentlichen Beurteilungskriterien dargestellt. Es wird u. a. vorgeschlagen die Sanierungsmaßnahme als resultierenden Handlungsbedarf detailliert zu überprüfen, wenn die Prognose der Laufzeit der Sanierungsmaßnahme 25 Jahre oder die Berechnung der Gesamtkosten 1 Mio. € (netto) übersteigen. Diese Kriterien sind wie folgt begründet.

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) konnten 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.

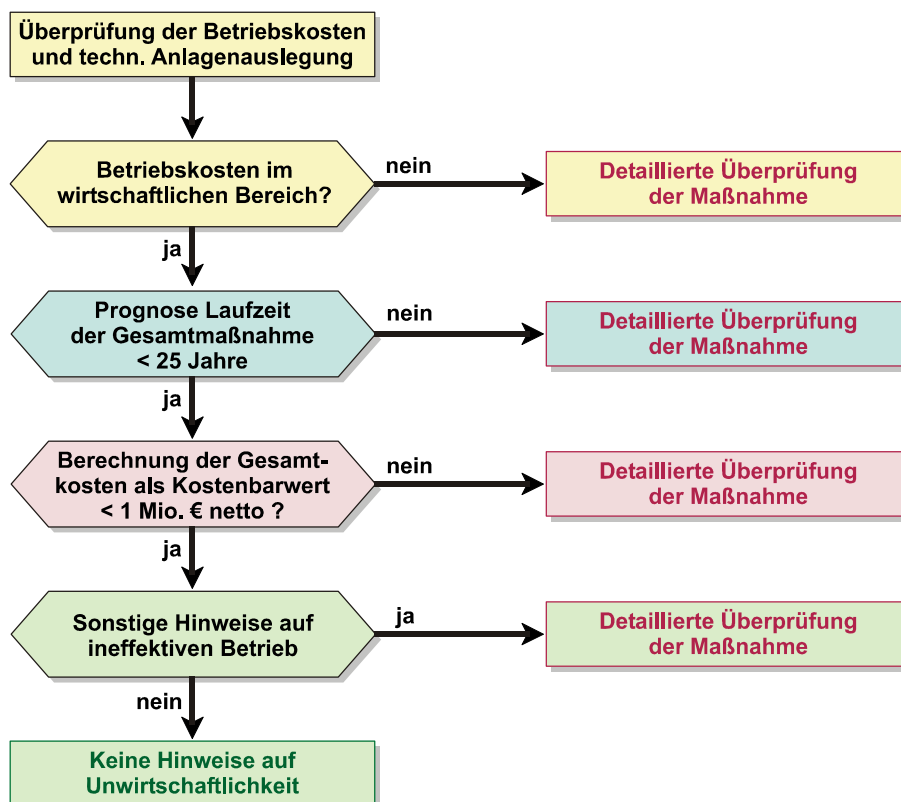


Abb. 3.1: Ablaufschema der Prüfungen zur Effizienz von Pump-and-Treat-Sanierungen

### Festlegung des Kriteriums „Gesamtkosten < 1 Mio. € netto“

Für das Kriterium „Gesamtkosten > 1 Mio. € netto“ wurde ein Standardfall definiert. Hierfür wurde eine Schadstoffquelle mit einer Grundfläche von 100 m<sup>2</sup> angenommen. Der Flurabstand bis zum Grundwasser beträgt 3 m. Die Schadstoffe sind weitere 3 m in den gesättigten Bereich vorgedrungen und haben sich auf eine Fläche von 250 m<sup>2</sup> verteilt. Im gesättigten Bodenbereich befinden sich ca. 2 Tonnen LCKW. Günstige Standort- und Untergrundverhältnisse vorausgesetzt, wäre eine Sanierung sowohl bei einer Aushub- als auch bei einer In-Situ-Maßnahme mit Kosten von ca. 1 Mio. € netto verbunden. Selbst wenn ein betrachteter Einzelfall stark von dem oben geschilderten Standardfall abweichen sollte wird empfohlen, das Kriterium „< 1 Mio. €“ beizubehalten. Erfahrungen und ausgewertete Fälle zeigen, dass es bei einem „Sanierungsbudget“ von = 1 Mio. € (netto) sehr häufig Möglichkeiten der Optimierung gibt.



Die praktische Bearbeitung erfolgt nach den gutachterlich üblichen Regeln. Zunächst werden die Daten erfasst, Sachverhalte ausgewertet und beurteilt, um anschließend über das weitere Vorgehen zu entscheiden (Abb. 3.2).

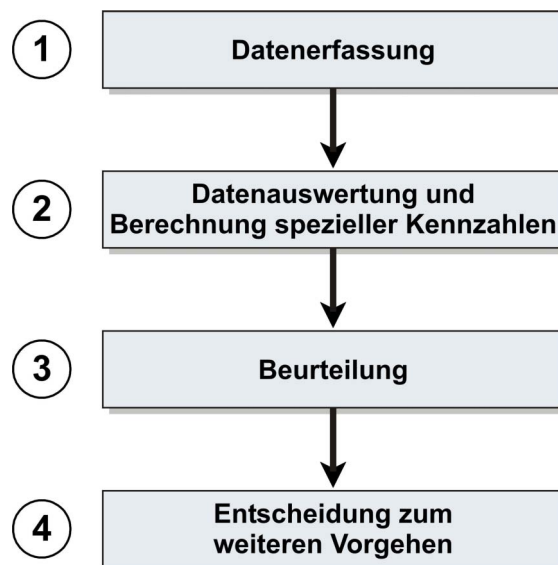


Abbildung 3.2

Arbeitsschritte bei der gutachterlichen Bearbeitung zur technischen Effizienz und Wirksamkeit von Pump-and-Treat-Sanierungen

# 4 Datenerfassung

Bei länger laufenden Sanierungen gibt es eine teilweise schwer zu überschauende Menge an Informationen und Daten. Die Kunst bei der Datenerfassung besteht somit darin, ausschließlich die für die Beantwortung der Fragestellung erforderlichen Daten herauszufiltern und diese nicht in einem Konvolut von vielleicht interessanten, aber für die Fragestellung nicht wichtigen Informationen zu verwässern. Für die Datenaufbereitung gilt ähnliches. Im Idealfall sollte die gesamte Standort- und Sanierungssituation auf wenigen Seiten und vor allem auf einem Lageplan und in einem Querprofil dargestellt werden. Das Herausfiltern und die Reduzierung der Daten kann dabei ein durchaus aufwändiger Prozess sein.

Für das Prüfkonzept wurde ein Datenerfassungsbogen (siehe Anlage) erstellt. Außerdem werden zwei Vorlagen für einen Lageplan und einen schematischen Querschnitt zum Download angeboten. Mit dem Erfassungsbogen werden wesentliche Daten und Informationen abgefragt.

Trotz der erwünschten Reduzierung auf die wichtigen Daten bleibt es unerlässlich eine Liste der verwendeten

Unterlagen zu erstellen und die Quellen den verwendeten Informationen im Erfassungsbogen bzw. in den Lageplänen zuzuordnen.

Für jeden zu prüfenden Fall sind obligatorisch ein Lageplan und mindestens ein Querprofil zu erstellen. Diese haben nicht den Anspruch lagegenau alle geometrischen Daten darzustellen, sondern dienen zur Erklärung der Standortsituation. Zur Erstellung dieser sind keine speziellen Zeichenprogramme erforderlich. Es genügt z. B. vorhandene Pläne auf einen sinnvollen einheitlichen Maßstab herunter zu verkleinern oder zu vergrößern (ggf. auch händisch auf die Vorlage durchzupausen) und die notwendigen Informationen übereinander zulegen. Im einfachsten Fall kann es genügen, eine klassische Papierkopie des Lageplans mit den handschriftlichen Informationen zu ergänzen.



Nachfolgend sind die für die Prüfung wesentlichen Informationen aufgelistet:

<b>1</b>	<b>Sanierungsvereinbarung</b>
1.1	Sanierungsvereinbarung/-anordnung (Art der Sanierungsvereinbarung/-anordnung; Jahr)
1.2	Grundlagen der Sanierungszielvereinbarung
1.3	Sanierungszielwert
1.4	Schutzgebiete (Betroffene WSG-Zonen)
<b>2</b>	<b>Quellencharakterisierung</b>
2.1	Relevante Schadstoffe
2.2	Alter des Schadens
2.3	Schadstoffinventar (die im Schadenbereich vorhandene/vermutete Schadstoffmenge)
2.4	Schadstoffquelle (Tiefenlage unter GOK)
2.5	Grundwasserbelastung in Quelle (Beginn Sanierung und aktuell)
2.6	Abstand Sanierungsbrunnen zu Quelle (bei mehreren Brunnen einzeln anzugeben)
2.7	Schadstoffphase (gibt es Hinweise auf phasenhafte Verunreinigungen?)
<b>3</b>	<b>Standortcharakterisierung</b>
3.1	Geologischer Aufbau (Art und Lage relevanter Bodenhorizonte sowie Bodenarten)
3.2	Grundwasserleiter (Mittlerer Grundwasserstand, Schwankungsbereich, Mächtigkeit Grundwasserleiter)
3.3	Grundwasserhydraulik (Durchlässigkeitsbeiwert kf, natürl. Grundwassergefälle, Abstandsgeschwindigkeit)
<b>4</b>	<b>Fahnencharakterisierung</b>
4.1	Fahnengeometrie (Ausbreitungsrichtung, Breite, vertikale Ausdehnung)
<b>5</b>	<b>Grundwasserförderung</b>
5.1	Gesamtfördermenge seit Sanierungsbeginn
5.2	Durchschnittlicher Volumenstrom über die Gesamtförderung
5.3	Anzahl der Förderbrunnen mit Angabe, ob sich die Anzahl der genutzten Brunnen über die Betriebsjahre geändert hat
5.4	Durchschnittlicher Volumenstrom je Sanierungsbrunnen
5.5	Tiefenlage der GW-Entnahme (Tiefenlage der Filterstrecke)
5.6	Unterbrechung der GW-Förderungen

<b>6</b>	<b>Energieverbrauch und Anlagentechnik</b>
6.1	Gesamtverbrauch seit Sanierungsbeginn
6.2	Leistungsaufnahme der Aggregate (Nennleistung der maßgebenden Aggregate)
6.3	Betriebsstunden (pro Betriebsjahr)
6.4	Reinigungsverfahren (z. B. Nassaktivkohleadsorption, Strippung, chemische Oxidation (mit/ohne UV), Bioreaktor, Extraktionsverfahren, andere)
6.5	Vorbehandlungsstufen (z. B. Sedimentation, Phasenabscheidung, Belüftung/Begasung, Enteisung/Entmanganung (Sandfilter), Zugabe von Pufferchemikalien, Zugabe von Oxidationsmitteln, Zugabe von Flockungsmitteln, andere)
6.6	Nachbehandlungsstufen Abluftreinigung bei Strippverfahren (Aktivkohle/Kat-Ox), Schlammbehandlung bei Bioreaktoren, Behandlung / Aufarbeitung von Extraktionsmitteln, Behandlung von Prozessabwässern, andere)
6.7	Basiskennzahlen zur Verfahrensbeurteilung (Hydraulische Auslegungsgrenze [m <sup>3</sup> /h], Auslegungsgrenze der Schadstoffbelastung [mg/l], Anzahl der Filterstufen (Aktivkohle), Luft/Wasserverhältnis Mengen an eingesetzten Hilfsstoffen, aktueller Wasserdurchsatz / Auslegungsgrenze, aktuelle Schadstoffbelastung / Auslegungsgrenze)
6.8	Ableitung des gereinigten Wassers (Kanalisation, Wiederversickerung, Gewässer)
6.9	Betriebsweise/Änderungen (Umstellungen in den letzten Betriebsjahren mit signifikantem Einfluss auf Fördermenge, Energieverbrauch, Förderung / Behandlung. Angabe mit Zeitpunkt der Umstellung)
<b>7</b>	<b>Betriebskosten, Wartung und Überwachung</b>
7.1	Stromkosten
7.2	Kontroll-/Reparatur- / Wartungskosten je Betriebsjahr (inkl. Personalkosten)
7.3	Verbrauchsmittelkosten je Betriebsjahr
7.4	Kosten für die Ableitung des gereinigten Wassers je Betriebsjahr
7.5	Kosten für Beprobung / Analytik je Betriebsjahr
7.6	Gutachterkosten je Betriebsjahr
7.7	Nebenkosten je Betriebsjahr
7.8	Gesamtkosten je Betriebsjahr
<b>8</b>	<b>Austragbilanzierung und Frachtermittlung</b>
8.1	Schadstoffaustrag (seit Beginn der Sanierung)
8.2	Jährlicher Schadstoffaustrag je Betriebsjahr
8.3	Schadstoffkonzentrationen im Rohwasser (als Zeitreihe über die bisherigen Betriebsjahre)
8.4	Konzentrationen Begleitstoffe (Art und Konzentration von Begleitstoffen, die bei der Aufbereitung mit entfernt werden müssen.)

# 5 Datenauslegung und Betriebskosten

## 5.1 Überschlägige Beurteilung der Betriebskosten

In vielen Fällen in der Praxis (so auch bei einem Großteil der hier detaillierter betrachteten Beispiele) fehlen detaillierte Daten zu der Anlagenauslegung und den Betriebskosten, 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 ausgewiesenen Kennzahlen sind folgende Leistungen zum Betrieb enthalten:

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

Die Vergleichskennzahlen wurden für 2 typische Anlagenauslegungen berechnet. Dies sind:

1. Brunnenpumpen ? Mehrschichtfilter ? Wasseraktivkohlefilter
2. Brunnenpumpen ? Mehrschichtfilter ? Desorption und Luftaktivkohle ? Wasseraktivkohle (Nachreinigungsstufe)

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

In den folgenden Abbildungen 5.1 bis 5.4 sind die Kennzahlen für die 2 Anlagenauslegungen und die schematischen Verfahrensfliessbilder, auf die sich die Vergleichskennzahlen beziehen, dargestellt. Hinsichtlich der angegebenen Kennzahlen ist dabei die Spannweite in der Kalkulation von etwa 15 % (vgl. Diagramm) zu berücksichtigen. Die Spannweite 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.

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

Unter Berücksichtigung einer Spannweite 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 Spannweite überschreiten. In diesem Fall sind Überprüfungen der Wirtschaftlichkeit erforderlich. Grundsätzlich sind standortspezifische Besonderheiten zu berücksichtigen (z.B. kostenintensive Chemikaliendosierung).



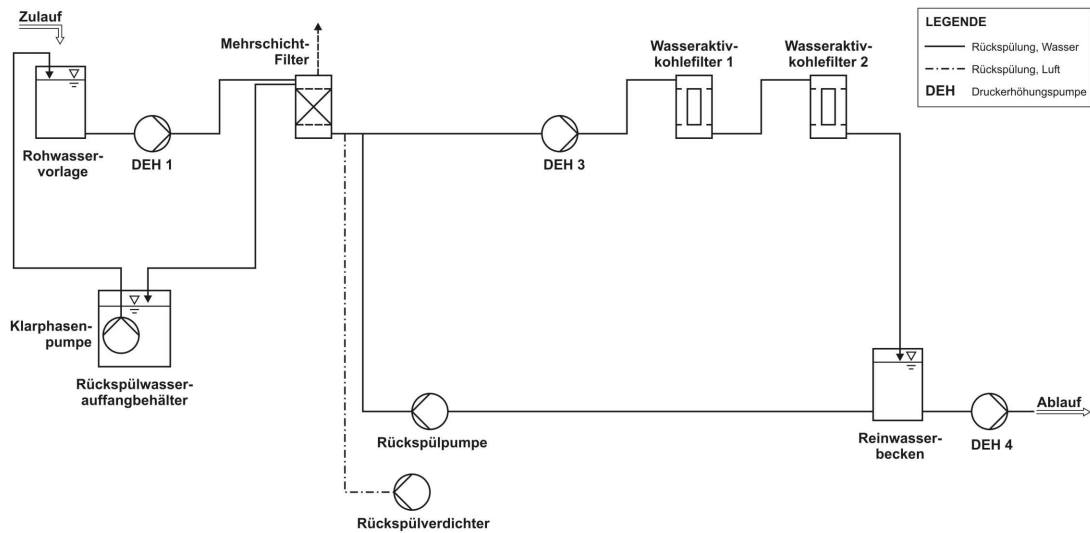
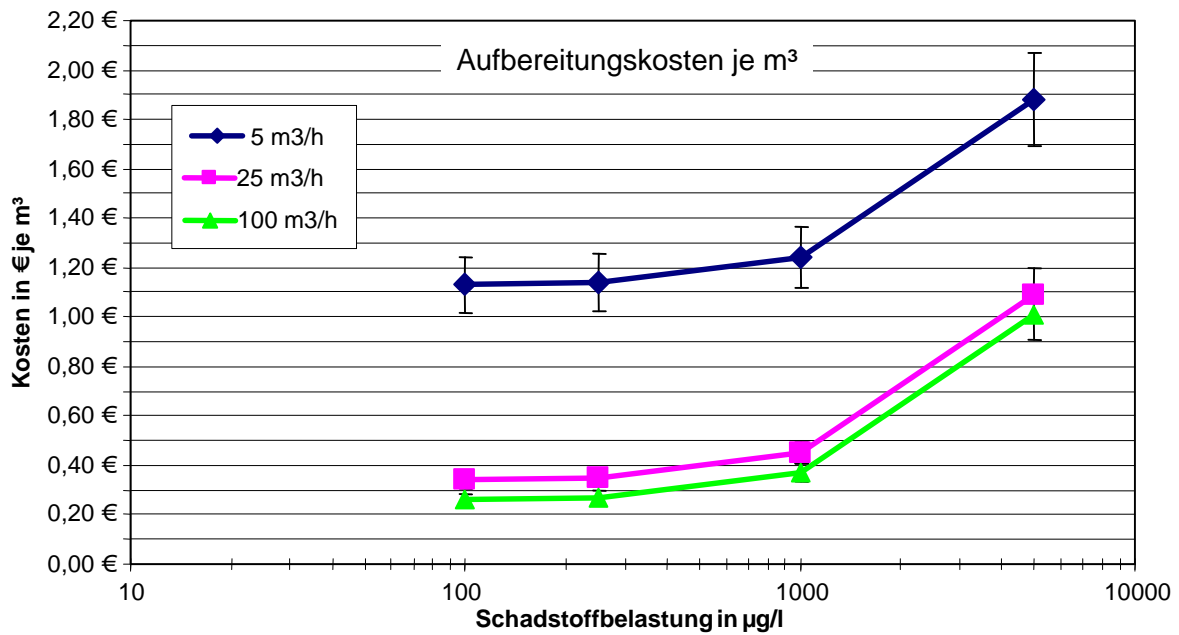


Abb. 5.1: Verfahrensfießbild zu Vergleichskennzahlen für Anlagenauslegung „Mehrschichtfilter ? Wasseraktivkohlefilter“



Fördermenge Konzentration LCKW	5 m³/h	25 m³/h	100 m³/h
100 µg/l	1,13 €	0,34 €	0,26 €
250 µg/l	1,14 €	0,35 €	0,27 €
1.000 µg/l	1,24 €	0,45 €	0,37 €
5.000 µg/l	1,88 €	1,09 €	1,01 €

alle Kosten ohne MwSt. (netto)

Abb. 5.2: Vergleichskennzahlen (€) zu Gesamtbetriebskosten pro m³ Wasser für Anlagenauslegung Mehrschichtfilter ? Wasseraktivkohlefilter (Stand 2009)

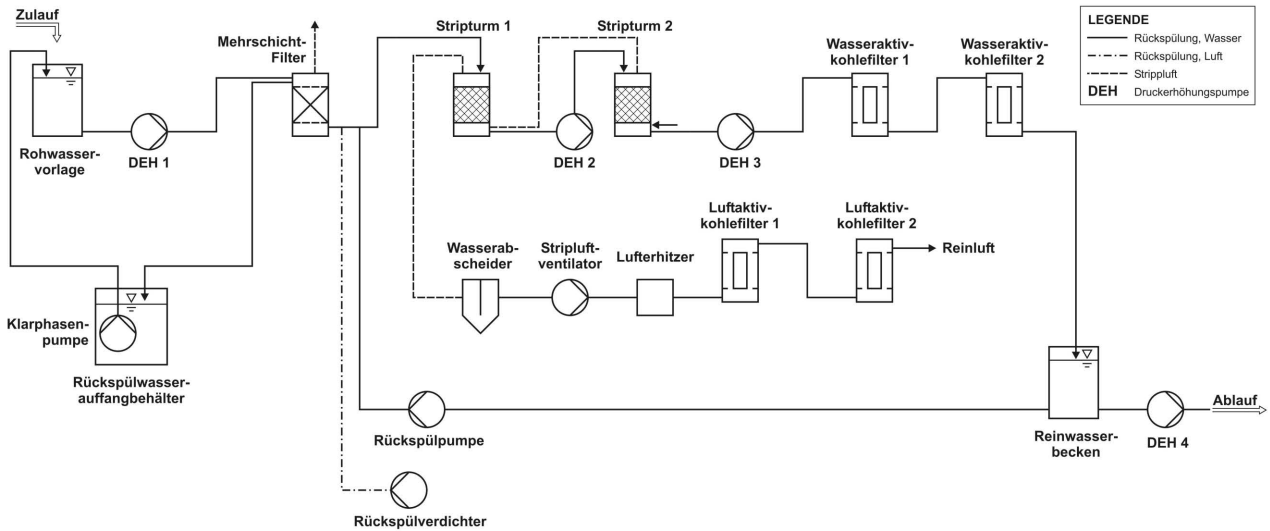
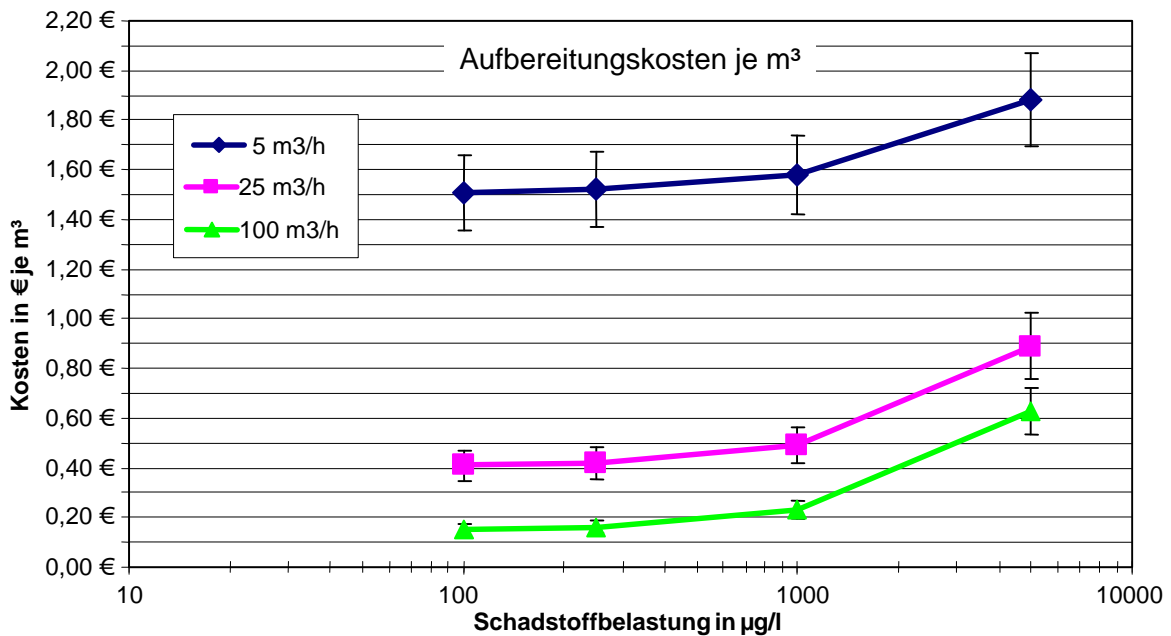


Abb.5.3: Verfahrensfießbild zu Vergleichskennzahlen für Anlagenauslegung „Mehrschichtfilter? Desorption? Luftaktivkohle“



Fördermenge Konzentration LCKW	5 m³/h	25 m³/h	100 m³/h
100 µg/l	1,51 €	0,41 €	0,15 €
250 µg/l	1,52 €	0,42 €	0,16 €
1.000 µg/l	1,58 €	0,49 €	0,23 €
5.000 µg/l	1,88 €	0,89 €	0,63 €

alle Kosten ohne MwSt. (netto)

Abb. 5.4: Vergleichskennzahlen (€) zu Gesamtbetriebskosten pro m³ Wasser für Anlagenauslegung „Mehrschichtfilter? Desorption? Luftaktivkohle“ (Stand 2009)

## **Anlagenauslegung 1:**

### **Brunnenpumpen ? Mehrschichtfilter ? Wasseraktivkohlefilter**

Die direkte Wasseraktivkohlefiltration kommt zumeist dann zu Einsatz, wenn die abzureinigenden Stoffe hinreichend gut in der wässrigen Phase an der Aktivkohle adsorbieren (Ausnutzung der Beladungskapazität) bzw. eine Überführung in die Gasphase, bedingt durch die Stoffeigenschaften

nicht möglich bzw. wirtschaftlich ist. Die Anlagenauslegung wird meist bei geringeren Fördermengen gewählt. Auch kann der Wasserchemismus (z.B. Kalkgehalt) im Einzelfall die Anwendung der Desorption (Anlagenauslegung 2) unpraktikabel werden lassen.

## **Anlagenauslegung 2:**

### **Brunnenpumpen ? 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, wobei das Hauptaugenmerk auf dem Vergleich der erreichbaren Aktivkohlebeladung für die Luft und die Wasserphase sowie die zusätzlichen technischen Aufwendungen für den Prozessschritt der Desorption liegt.

## 5.2 Detaillierte Prüfung der Sanierungsanlage – Stoffaustrag, Energiebedarf und Betriebskosten

### 5.2.1 Vorgehensweise

Unter Bezug auf das dargestellte Prüfkonzept (Kap. 3) sowie die Erfassung der bewertungsrelevanten Datengrundlage (Kap. 4) wird im Folgenden der Prüfansatz zur Beurteilung der Sanierungsanlage dargestellt. Dabei liegt der Schwerpunkt auf:

- dem Schadstoffaustrag und der Schadstoffaustrageffizienz,
- dem (Elektro-)Energiebedarf und der Energieeffizienz,
- sowie den notwendigen Betriebskosten sowie der Kosteneffizienz.

Es ist anzumerken, dass in diesem Kapitel der Fokus auf die Zustandsbewertung der Sanierungsmaßnahme zum gegenwärtigen Zeitpunkt gesetzt ist. Zu Beginn der Maßnahme gegebene Randbedingungen und Kennwerte dienen daher nur als Vergleichsmaßstab. Daher erfolgt an dieser Stelle bewusst keine Berücksichtigung der Verfahrensauswahl und eventueller Verfahrensalternativen für den konkreten Standort. Ebenso wird bewusst auf die Berücksichtigung der Anfangsinvestition innerhalb der Kostenbewertung verzichtet.

Zur Berechnung der Kennwerte sowie der zeitlichen Parameterverläufe zur Beurteilung der Sanierungsanlage wurde ein MS-Excel-Dokument erstellt. (Anleitung und Darstellung siehe auch Anhang 2).

### 5.2.2 Auswertungsschritte

#### Austragseffizienz

Für die Anlagenbeurteilung bilden die eingangs dieses Abschnitts genannten Schwerpunkte die Grundgliederung der Bewertungsmethodik. Somit ist der erste Prüfungsschritt die Auswertung des Schadstoffaustrages und der Austragseffizienz. Dabei wird die Entwicklung der Austragsrate über die letzten Betriebsjahre ermittelt

und der Grundwasserförderung gegenübergestellt. Für die Ermittlung der Austragsraten wird dabei auf den gängigen Berechnungsansatz auf Basis der Rohwasserbelastung im Anlagenzulauf (Mischwasserkonzentration im Fall von mehreren Sanierungsbrunnen) und der Gesamtfördermengen über definierte Zeitabschnitte zurückgegriffen:

$$M_{Schadst} = C_{GW, t} \cdot Q_{GW, t} \cdot t$$

- mit:  $M_{Schadst}$  ausgetragene Schadstoffmenge im Zeitabschnitt  $t$   
 $C_{GW, t}$  Schadstoffgehalt des Grundwassers im Zeitabschnitt  $t$   
 $Q_{GW, t}$  Förderrate des Grundwassers im Zeitabschnitt  $t$   
 $t$  definierter Zeitraum der erfassten Daten

Darüber hinaus erfolgt die Normierung der Austragsrate ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) auf das jeweils geförderte Grundwasser-

volumen, um somit direkt vergleichbare Kennzahlen zu generieren.

## Energieeffizienz

Der **zweite Prüfungsschritt** ist die Auswertung des Energiebedarfs der Anlage. Da erfahrungsgemäß nur in seltenen Fällen eine detaillierte Erfassung des Energieverbrauchs über den gesamten Zeitraum des Sanierungsbetriebs erfolgt, wird bewusst eine sehr vereinfachte Form der Erfassung des Energieverbrauchs zur Anwendung gebracht. Dabei wird auf Basis der Summe der Nennleistung der maßgebenden Aggregate im Zusammenspiel mit der Betriebsstundenzahl je Betriebsjahr der Jahresverbrauch als Pauschalwert ermittelt.

Alternativ kann dies auch über den gemessenen Energieverbrauch der Gesamtanlage über einen längeren definierten Zeitraum erfolgen, wobei in diesem Fall eine gesonderte Berücksichtigung der Anlagenbetriebsstunden je Betriebsjahr nicht notwendig ist.

## Kosteneffizienz

Der **dritte Prüfschritt** ist die Auswertung der Betriebskosten. Hierzu erfolgt auf Basis der Eingabedaten die Zusammenstellung der einzelnen Betriebskosten, wobei im Hinblick auf spätere Bewertungen eine möglichst detaillierte Aufsplittung angestrebt wird, wenn die Ausgangsdaten dies ermöglichen.

Als Mindestanforderung steht hier die Ermittlung der Gesamtbetriebskosten je Betriebsjahr, die – vergleichbar

**Der so gewonnene Pauschalwert je Betriebsjahr stellt eine hinreichend genaue Grundlage für die folgenden Vergleichsbewertungen dar.**

Zur Bewertung der Energieeffizienz der Sanierungsanlage wird der vorgenannte Jahrespauschalbetrag auf die bisherigen Betriebsjahre als etwa konstant bleibende Größe angenommen und gegen die Jahreswerte der Grundwasserförderung und des Schadstoffaustrags normiert. Der so ermittelbare zeitliche Verlauf des **spezifischen Energiebedarfs** (je m<sup>3</sup> gefördertem Grundwasser bzw. je kg ausgetragenen Schadstoff) zeigt den Verlauf der Effizienzänderung. Die zusätzlich ermittelten Kennwerte ermöglichen eine direkte Zustandsbewertung.

der Energieeffizienzbewertung im vorhergehenden Teilschritt – zur Betriebskosteneffizienzbewertung herangezogen wird. Dazu werden die **jährlichen Gesamtbetriebskosten gegen die jährliche Grundwasserförderung bzw. gegen den jährlichen Schadstoffaustrag normiert (Euro pro kg Schadstoff)** und als zeitlicher Verlauf sowie als spezifische Kennwerte zur Zustandsbewertung ermittelt.

## 5.2.3 Beurteilungsgrundlagen

### 1. Schadstoffausträge und der Austrageffizienz

Die ermittelten Zeitreihen für den Schadstoffaustrag sowie die Grundwasserförderung bilden eine wichtige Grundlage für die Beurteilung der aktuellen Austrageffektivität der Sanierungsmaßnahme.

Da hydraulische Maßnahmen häufig dadurch gekennzeichnet sind, dass wegen der Tailing-Effekte (siehe Kap. 6.1) zu Beginn ein starker Austrag gegeben ist, der recht schnell nachlässt und zum Ende hin immer

mehr abflacht, erscheint für die Bewertung des Austragszustandes die Klassifizierung in 3 Austragsphasen praktikabel.

Die folgende Darstellung in Abbildung 5.5 zeigt eine prinzipielle Kurve des häufig anzutreffenden, durch Tailing-Effekte beeinflussten Austragsverlaufes über die Zeit, wobei die Erfahrungen aus durchgeführten Projekten zeigen, dass der Kurvenverlauf oft sprunghafter ausgebildet ist.

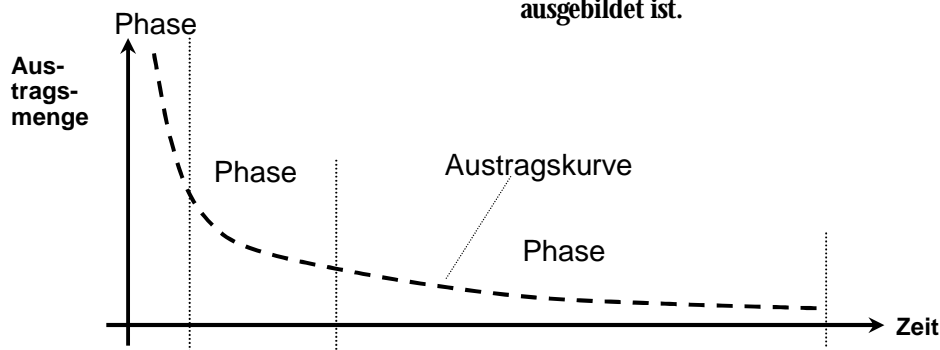


Abb. 5.5: *Prinzipielle Darstellung des durch Tailing-Effekte beeinflussten Austragszustandes mit grober Einteilung in 3 Phasen (idealisierte Kurvenverlauf)*

Liegt im zu prüfenden Sanierungsfall eine hinreichend große und dichte Datenbasis über einen hinreichend langen Zeitraum als Zeitreihe vor, so kann in der Excel-Auswerterroutine der Kurvenverlauf und damit der Status des aktuellen Austragsverhaltens abgelesen werden, so dass eine Einordnung in die vorgenannten Phasen möglich ist.

Darüber hinaus kann bei konstanten Entnahmemengen und hinreichend dichter und gesicherter Datenbasis das

zukünftige Austragsverhalten extrapoliert werden. Die gleichzeitig dargestellte Zeitreihe der Grundwasserförderung ist dabei ein wichtiges Zusatzinstrument. So zeigt eine relativ konstante Förderrate, dass die Veränderungen bei der Austragsrate tatsächlich auf eine Änderung der Austrageffizienz zurückzuführen sind, während eine stark schwankende Förderrate die Ursache für schwankende Austragsraten sein können (siehe Abbildung 5.6).

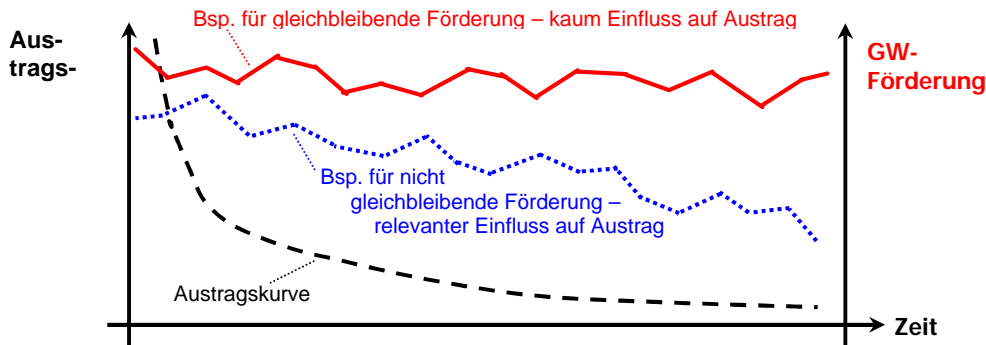


Abb. 5.6: *Prinzipielle Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Entwicklung von Schadstoffaustrag und Grundwasserförderung (idealisierte Kurvenverlauf)*

Bei deutlich geringerer Datendichte wird für eine grobe Phasenzuordnung das Verhältnis der Austragsmenge im aktuellen definierten Zeitraum zur Austragsmenge im vorhergehenden definierten Zeitraum herangezogen (siehe Abbildung 5.5). Dabei ist jedoch zwingend zu beachten, dass Effekte durch starke Förderschwankungen ausgeschlossen werden müssen. Unter der Voraussetzung konstant bleibender Fördermengen werden für die grobe Phasenzuordnung die in Tabelle 5.1 dargestellten Verhältnisse der Austragsmengen angewendet, die aus Erfahrungswerten in der Praxis abgeleitet wurden.

Bei den in Tabelle 5.1 dargestellten, zur groben Bewertung dienenden Orientierungswerten für die Austragsverhältnisse ist zu beachten, dass durch mögliche Schwankungen bei den Austragsmengen eine „Punktbewertung“ auf Basis von nur zwei zeitlich nebeneinander liegenden Austragsmengen zu einer deutlichen Fehleinschätzung führen kann. Um die Belastbarkeit dieser groben Bewertung zu erhöhen, ist daher zu empfehlen, die Austragsverhältnisse von mindestens 3 bis 4 benachbarten definierten Zeiträumen zu bestimmen und bei stärkeren Schwankungen der Verhältnisse die Einordnung über das gemittelte Verhältnis daraus vorzunehmen.

**Tabelle 5.1: Übersicht der Kennzahlen zur Bewertung des Tailing-beeinflussten Austragszustandes**

Austragsphase	Phase A	Phase B	Phase C
<b>Kurvenabfall</b> $\left( \frac{\text{Austragsmenge } t_{\text{aktuell}}}{\text{Austragsmenge } t_{\text{vorhergehend}}} \right)$	0,45 bis 0,65	0,65 – 0,85	0,85 bis 0,95

Im zweiten Diagramm (vgl. Abbildung 5.7) wird der Schadstoffaustrag über die Zeit kumuliert dargestellt und dem spezifischen Schadstoffaustrag (kg je m<sup>3</sup> geförderttes Grundwasser) gegenübergestellt.

Die kumulierte Austragskurve zeigt im Fall eines linear steigenden Verlaufs einen effektiven Schadstoffaustrag mit konstanter Effizienz an. Ein Abflachen der kumulierten Kurve über den zeitlichen Verlauf (vgl. farblich markierten Bereich) ist hingegen ein markantes Anzeichen für eine Reduktion der Austrageffektivität und damit für die Verschlechterung der Austrageffizienz.



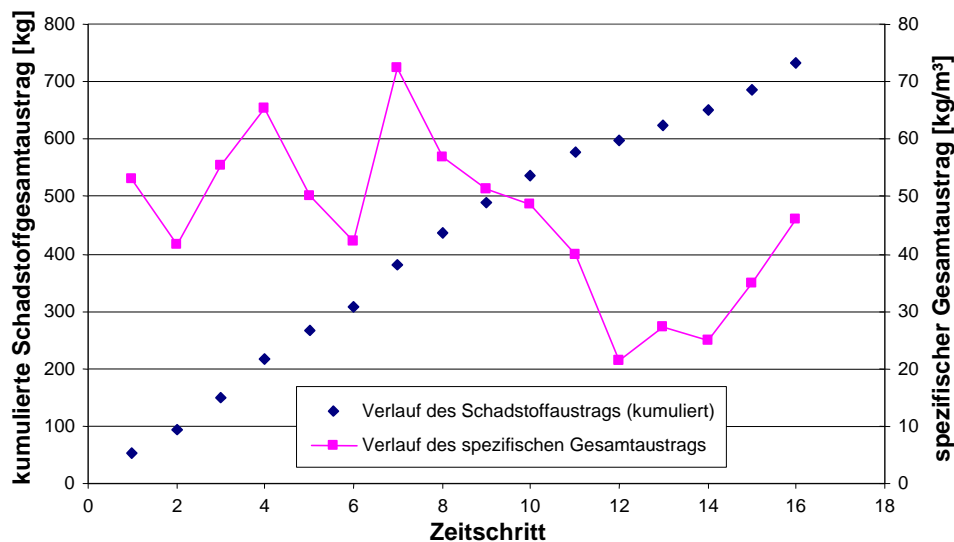


Abb. 5.7: Beispieldarstellung für die Entwicklung des kumulierten Schadstoffaustrages im Vergleich zum spezifischen Gesamtaustrag je  $m^3$  (idealisierte Kurvenverlauf)

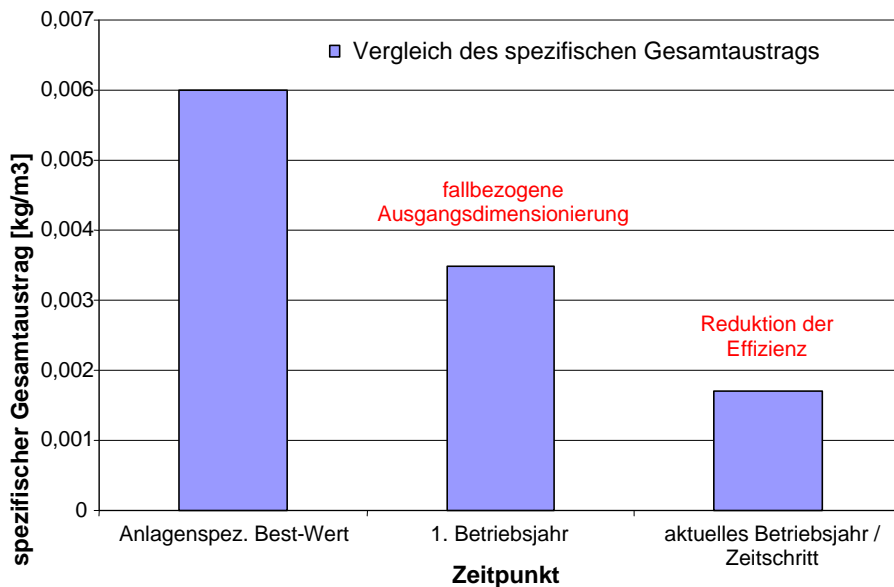


Abb. 5.8: Vergleichende Gegenüberstellung der Kennwerte zur Zustandsbewertung

Im dritten Diagramm (vgl. Abbildung 5.8) ist der spezifische Schadstoffaustrag vergleichend für den theoretischen Best-Wert (obere Auslegungsgrenze), für den Startpunkt der Sanierung sowie für den aktuellen Zustand aufgetragen.

Ein deutlicher Unterschied zwischen dem theoretischen Best-Wert und dem Startpunkt der Sanierung indiziert eine deutliche Überdimensionierung der Sanierungsanlage, mit der Folge einer schlechten Energie- und Kosteneffizienz. Ein großer Unterschied zwischen dem Sanierungsstartwert und dem aktuellen Zustand ist ein deutlicher Beleg für den Rückgang der Austrags-effektivität.



## 2. Energiebedarf und Energieeffizienz

Bei der Auswertung des Energiebedarfs sowie der Energieeffizienz wird der zeitliche Verlauf des auf die Grundwasserförderung bzw. den Schadstoffaustrag normierten Energieverbrauchs vergleichend bewertet. Im ersten Diagramm der Excel-Auswerteroutine (vgl. Abbildung 5.9) wird diese Darstellung automatisch bereitgestellt.

Im zweiten Diagramm des Excel-Sheets sind vergleichend die Kennwerte des spezifischen Energieverbrauchs (je  $m^3$  bzw. je kg) für den theoretischen Best-Wert (obere Auslegungsgrenze), für den Startpunkt der Sanierung sowie für den aktuellen Zustand aufgetragen.

Eine Zunahme der Verlaufskurve für den Energiebedarf je  $m^3$  gefördertem Grundwasser zeigt dabei einen steigenden Förderaufwand an, der u. a. ein Indiz für eine fortschreitende Verschlechterung der hydraulischen Randbedingungen (z. B. Verblockung der Brunnen und des Filterkieses) sein kann.

Eine Zunahme der Verlaufskurve für den Energiebedarf je kg ausgetragener Schadstoff indiziert hingegen eine anhaltende Verschlechterung der Austrageffektivität und damit eine schlechtere Energieeffizienz.

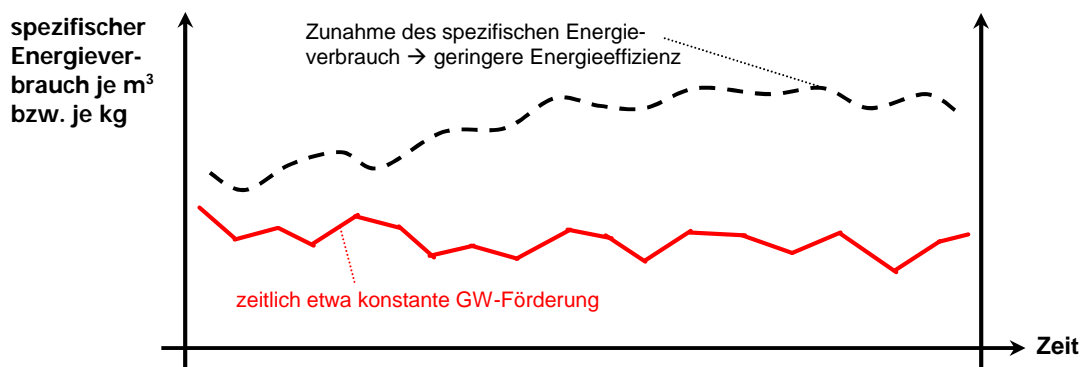


Abb. 5.9: Vergleich des Energiebedarfs je  $m^3$  im Vergleich zur Gesamtförderung (idealisiertes Kurvenverlauf)

Ein deutlicher Unterschied zwischen dem theoretischen Best-Wert und dem Startpunkt der Sanierung ist ein Anzeichen für eine deutliche Überdimensionierung der Sanierungsanlage und die daraus folgende schlechtere Energieeffizienz.

Ein starker Unterschied zwischen dem Sanierungsstartwert und dem aktuellen Zustand ist ein deutlicher Beleg für den Rückgang der Austrageffektivität.

Eine vergleichende Darstellung beider Kennwerte ist in diesem Zusammenhang wichtig, da die Relevanz der Fördermenge zum Austrag und zum Energieverbrauch von Fall zu Fall sehr verschieden ist.

### 3. Kosteneffizienz

Bei der Auswertung der Betriebskosten und der Kosteneffizienz wird – ähnlich wie bei der Energiebetrachtung – der zeitliche Verlauf der auf die Grundwasserförderung bzw. den Schadstoffaustrag normierten Betriebskosten vergleichend bewertet. Im ersten Diagramm der Excel-Auswerteroutine (vgl. Abbildung 5.10) wird diese Grafik dargestellt.

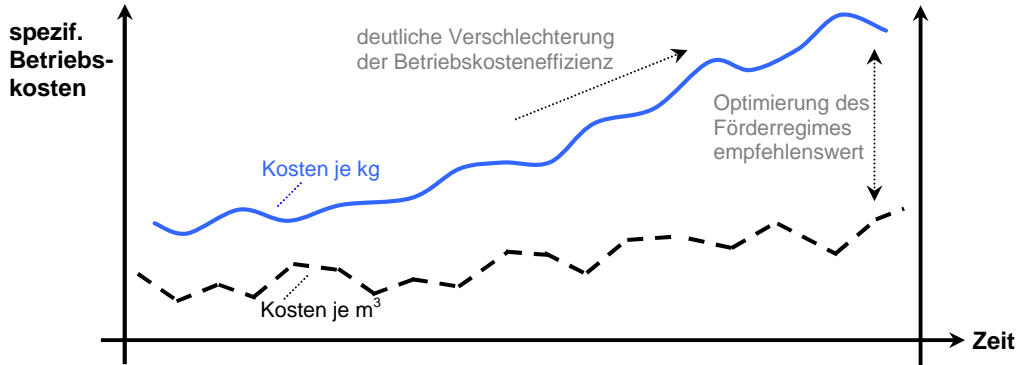


Abb. 5.10: Vergleich der spezifischen Betriebskosten mit Bezug zum abgereinigten Grundwasservolumen und zur ausgetragenen Schadstoffmenge (idealisiertes Kurvenverlauf)

Eine Zunahme der Verlaufskurve für die spezifischen Betriebskosten je  $m^3$  geförderten Grundwasser zeigt dabei einen steigenden Förderaufwand an, der in diesem Fall ein direktes Indiz für eine Verschlechterung der Fördereffizienz ist. Dies wird umso deutlicher, je höher der Anteil des Stromverbrauchs an den Gesamtbetriebskosten ausfällt.



Eine Zunahme der Verlaufskurve für die spezifischen Betriebskosten je kg ausgetragener Schadstoff indiziert hingegen eine anhaltende Verschlechterung der Austrageffektivität und damit eine schlechtere Kosteneffizienz..



Zeigt die  $\text{€}/m^3$  – Kurve im Vergleich zur  $\text{€}/\text{kg}$  – Kurve einen deutlich stärkeren Anstieg, so ist dies ein Hinweis darauf, dass der Optimierungsansatz in erster Linie bei der Mobilisierung der Schadstoffe sowie der Optimierung des Förderregimes zu suchen ist.



In einem weiteren Diagramm des Excel-Sheets sind vergleichend die Kennwerte der spezifischen Betriebskosten (je  $m^3$  bzw. je kg) für den theoretischen Best-Case (obere Auslegungsgrenze), für das erste Betriebsjahr der Sanierung sowie für den aktuellen Zustand aufgetragen.

Ein deutlicher Unterschied zwischen dem theoretischen Best-Case und dem Startpunkt der Sanierung ist ein Anzeichen für eine deutliche Überdimensionierung der Sanierungsanlage und damit ein Indiz für eine bereits zu Beginn der Maßnahme gegebene schlechtere Kostenwirksamkeit.



Ein starker Unterschied zwischen dem Sanierungsstartwert und dem aktuellen Zustand ist ein deutliches Indiz für den Rückgang der Austrageffektivität.



Eine vergleichende Darstellung beider Kennwerte ist in diesem Zusammenhang wichtig, da die Relevanz der Fördermenge zum Austrag und zu den Betriebskosten von Fall zu Fall sehr verschieden ist.

# 6 Gesamtlaufzeit und Kosten

## 6.1 Grundlagen

Der Prozess der Schadstofffreisetzung aus der Schadstoffquelle in das Grundwasser wird hauptsächlich über die chemische Löslichkeit der LCKW gesteuert. Die chemische Lösung der Schadstoffe findet an der Oberfläche der LCKW statt, die entweder als Tropfen im Korngerüst (blobs), als benetzende Phase des Bodenkorns, als so genannte vertikale Phasenfinger (Ganglien) oder sogar als zusammenhängende Schadstoffphase (Pool) vorkommen können (Abb. 6.1).

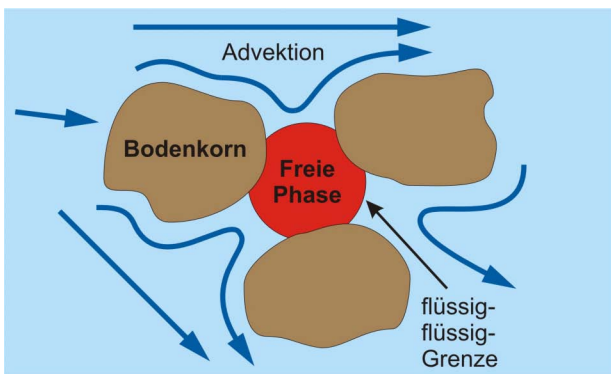


Abb. 6.1: Lösung der LCKW im Kontaktbereich LCKW-/Wasserphase

Bei einer idealisierten Pump-and-Treat-Sanierung in einem homogenen Aquifer würde die Schadstoffquelle so lange gezielt durchströmt, bis alle LCKW ausgewaschen sind. Eine theoretische Schadstoffaustragskurve ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

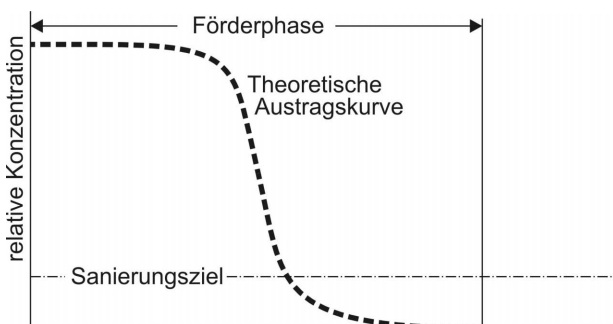


Abb. 6.2 Theoretische Austragskurve bei Pump-and-Treat-Sanierung

Der Schadstoffaustrag der theoretischen Austragskurve bleibt bei einer homogenen Schicht lange Zeit auf hohem Niveau, um dann relativ abrupt bis unterhalb des Sanierungsziels abzufallen. Bei Mehrschichtsystemen sind mehrere theoretische Kurvenverläufe in Abhängigkeit der Schichtung möglich. Eine Auswahl von Kurvenverläufen ist in den nachfolgenden Abbildungen 6.3 bis 6.6 dargestellt.

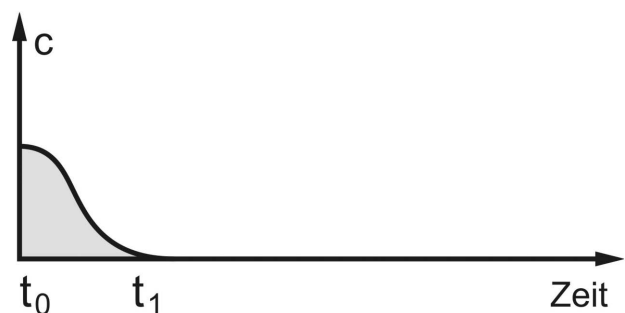
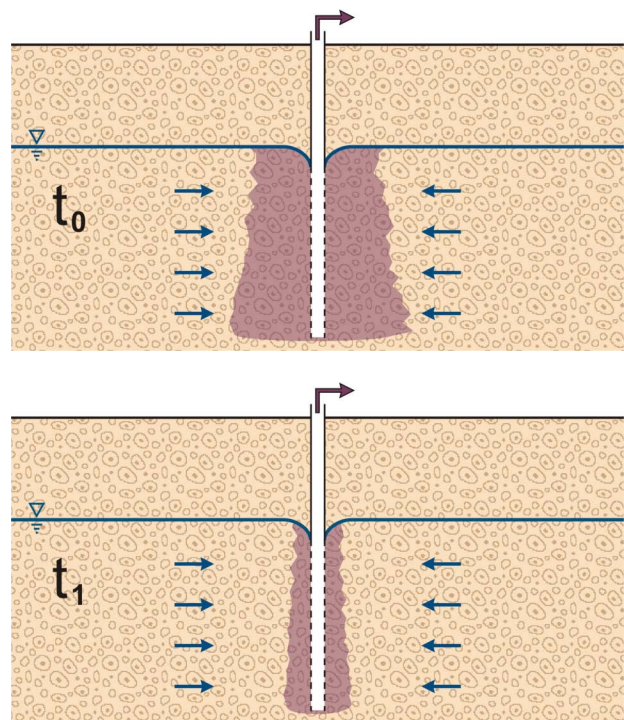


Abb. 6.3 Theoretische Schadstoffaustragskurve bei homogenem Sand-Kies

Bei einem mehrschichtigen gut durchlässigen Sand- oder Kiesaquifer würde sich statt einer einstufigen (Abb. 6.3), eine mehrstufige Kurve ergeben (Abb. 6.4).

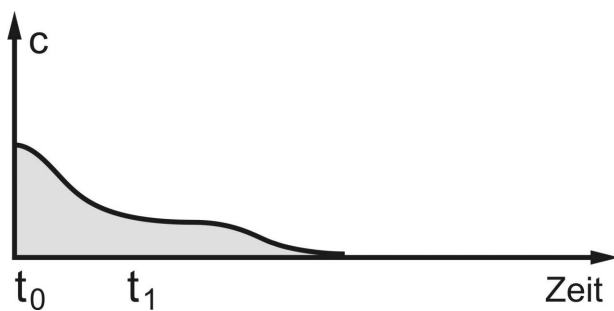
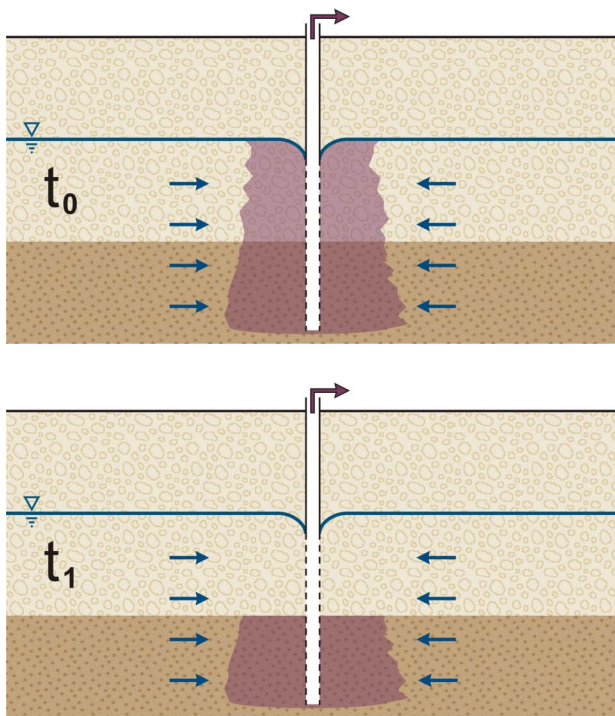


Abb. 6.4: Theoretische Schadstoffaustragskurve bei geschichtetem Sand-Kies

Wenn sich jedoch Schlufflinsen im Schadensherd befinden, die mit LCKW verunreinigt sind, ist die Schadstoffabreicherung nicht lösungs- sondern diffusionsgesteuert. In der theoretischen Austragskurve

würde sich nach anfänglich abgestufter Kurvenverlauf ein sehr langsamer Schadstoffaustrag anschließen. Einen Eindruck über die Zeitdauer der Abreinigung einer verunreinigten Schlufflinse gibt Abbildung 6.5.

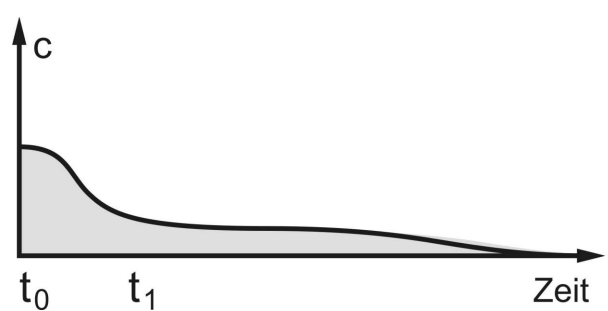
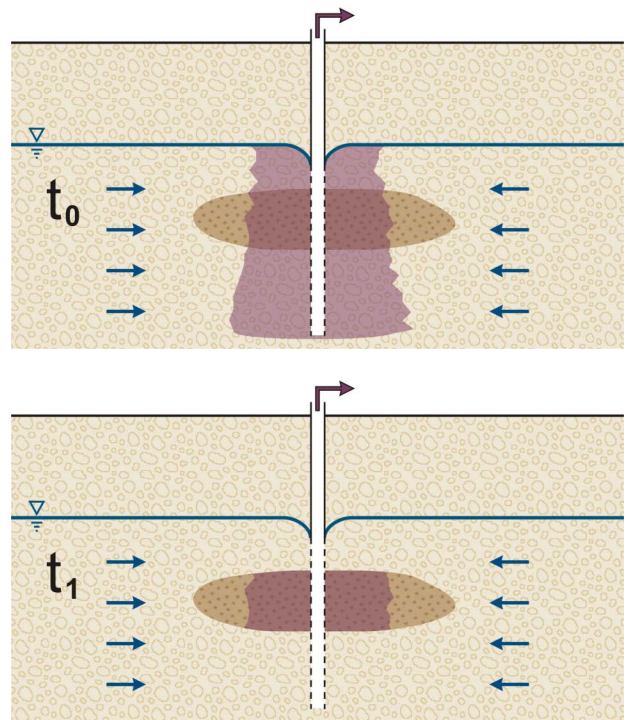


Abb. 6.5: Theoretische Austragskurve (diffusionsgesteuert) bei Sand-Kies mit Schluff-Feinsandlinsen

Eine solche Situation kann in Abhängigkeit der vereinbarten Sanierungsziele eine Pump-and-Treat-Maßnahme unwirtschaftlich werden lassen. Ebenso unwirtschaftlich ist meist die Sanierung von größeren Schadstoffphasen, die sich auf undurchlässigere Schichten

gesammelt haben. Bei einer Phasendicke von mehreren Zentimetern und einer relativ langsamen chemischen Lösung an der Oberfläche des Pools ist eine Sanierung in absehbarer Zeit nicht möglich (Abbildung 6.6).

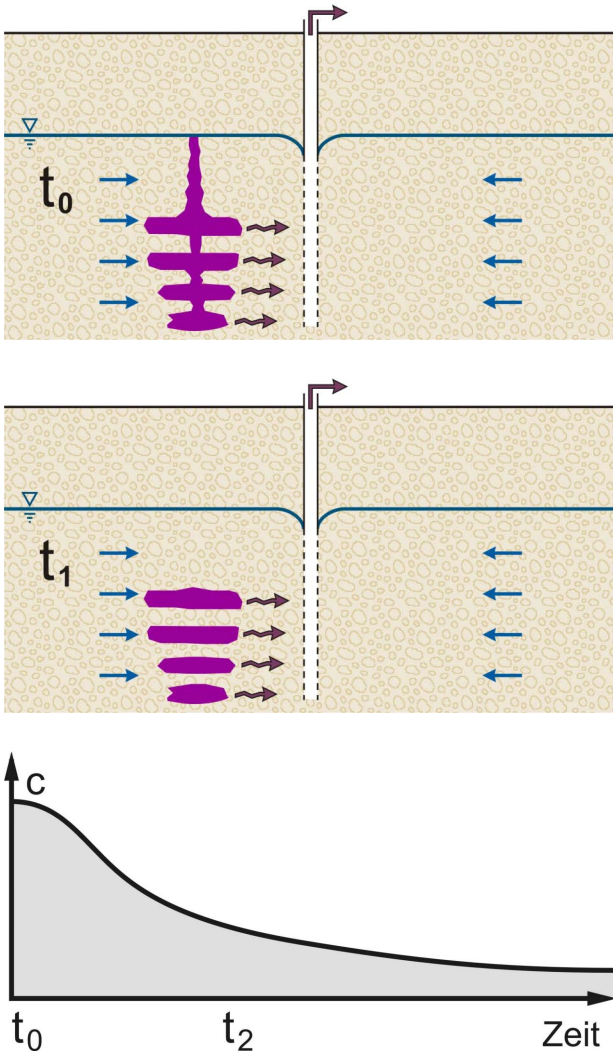


Abb. 6.6: Theoretische Austragskurve mit Produktphase (NAPL)

Die vorgenannten theoretischen Schadstoffaustragskurven werden zu Beginn und nach Abschalten der Pump-and-Treat-Maßnahme von so genannten Tailing- und Rebound-Effekten überlagert (siehe Abb. 6.7). Tailing bezeichnet dabei die Auslängung der Austragskurve, Rebound den Wiederanstieg der Konzentrationen nach Abschalten der Förderbrunnen. Diese Effekte können einen anfänglich erfolgreichen Sanierungs-

verlauf und eine starke Abreinigung des Grundwassers vortäuschen, sind aber auf die Veränderung der Standortbedingungen durch den Pumpbetrieb zurückzuführen.

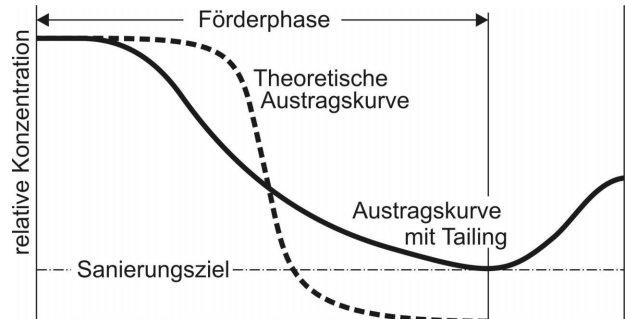


Abb. 6.7: Überlagerung der theoretischen Austragskurve mit Tailing- und Rebound-Effekten

Die wesentlichen Tailing und Rebound-Effekte sind nachfolgend kurz beschrieben:

### 1. Erhöhung der Fließgeschwindigkeit

Durch die Erhöhung der Fließgeschwindigkeit wird die Kontaktzeit zwischen dem Schadstoff am Bodenkorn und dem vorbei fließenden Wasser sowie die zum Erreichen eines Lösungsgleichgewichts erforderliche Zeit verringert (Abbildung 6.8).

Vereinfacht gesagt: "Je stärker gepumpt wird, desto geringer ist die Aufnahmekapazität des Wassers für die Schadstoffe"

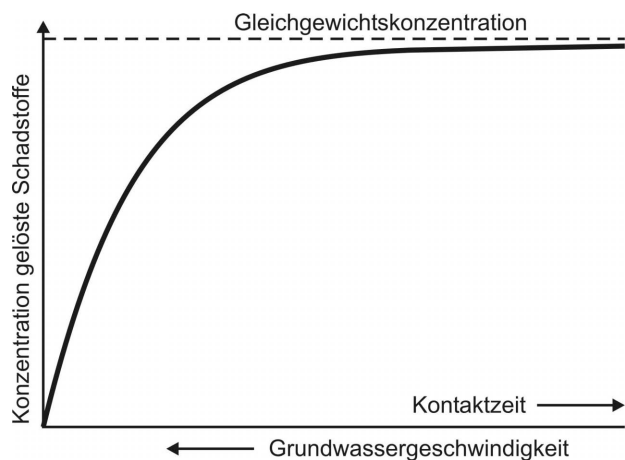


Abb. 6.8: Tailing und Rebound – Variable Schadstoffaufnahme in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit

## 2. Verdünnung

Ist die Entnahmebreite und -tiefe größer als die Schadstoffquelle, wird das im Brunnen ankommende Wasser stark verdünnt (Abb. 6.9).

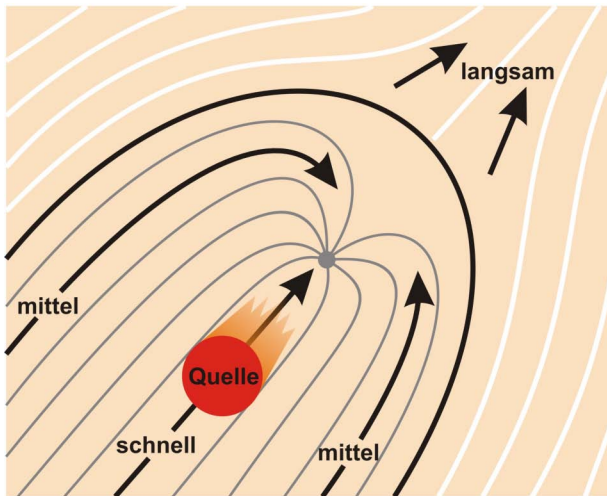


Abb. 6.9: Tailing und Rebound - Verdünnung im Pump-and-Treat-Betrieb

## 3. Unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten zum Förderbrunnen

Durch die Grundwasserentnahme bildet sich ein Absenktrichter mit unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten (siehe Abbildung 6.10) aus. Die Wasserpartikel aus der gleichen Distanz kommen somit zu unterschiedlichen Zeiten am Brunnen an.

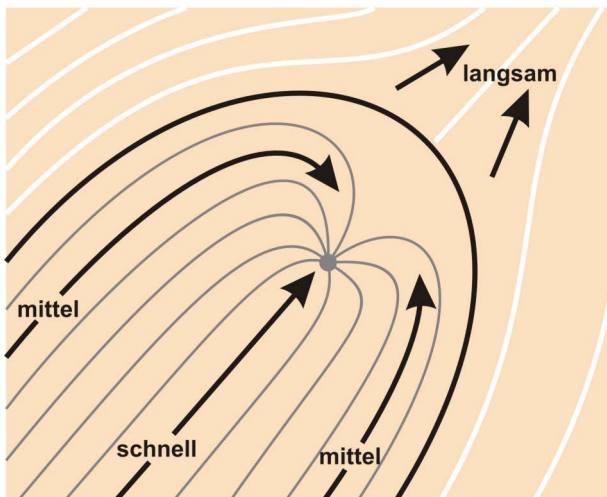


Abb. 6.10: Tailing und Rebound – Variierende Fließgeschwindigkeiten im Pump-and-Treat-Betrieb

## 4. Retardation/Adsorption

Unter Retardation wird der zeitverzögerte Schadstofftransport im Grundwasser von der Schadstoffquelle zum Entnahmebrunnen verstanden. Die Retardation ist maßgeblich abhängig z. B. vom Anteil des organischen Kohlenstoffs im Korngerüst, an dem die Schadstoffe adsorbiert werden. Auch Entfernungen von der Schadstoffquelle bis zum Entnahmebrunnen können zu einem zeitverzögerten Eintreffen der Schadstoffe beim Brunnen und zu einem längeren Nachlauf nach Abschalten der Brunnen führen (Abb. 6.11).

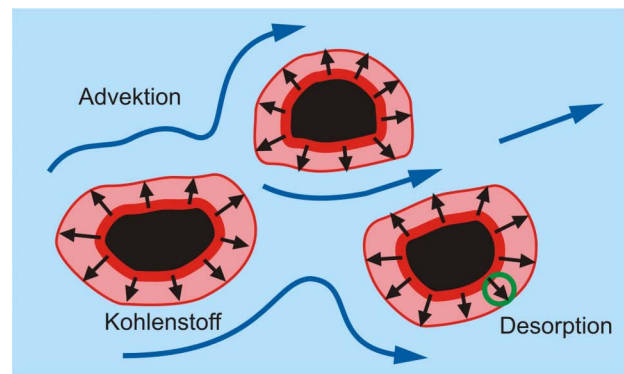


Abb. 6.11: Tailing und Rebound – Adsorption und Desorption am Bodenkorn

## 5. Absenktrichter

Liegt der Entnahmebrunnen innerhalb des Schadensherdes fällt der Bereich des Absenktrichters trocken (siehe Abbildung 6.12) und wird nicht mehr vom Grundwasser durchströmt. Nach Abschalten der Pumpen bei der Beendigung der Maßnahme wird der schadstoffbelastete, trockengefallene Bereich wieder von Grundwasser erfüllt und schadstoffbelastetes Grundwasser strömt ab.

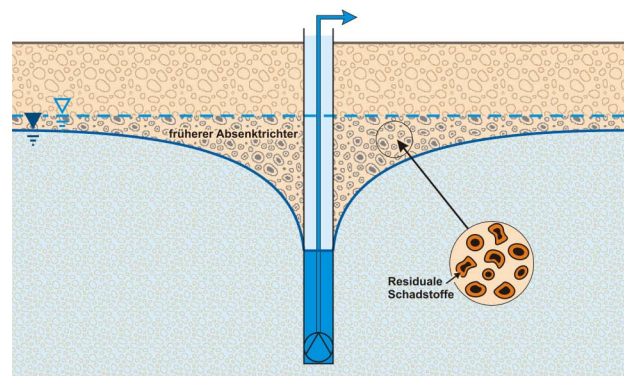


Abb. 6.12: Tailing und Rebound – Residualbelastungen im Absenktrichter

## 6. Diffusion

Die LCKW können in Ton- oder Schluffschichten eindringen. Innerhalb der Ton- oder Schluffschichten findet nur eine untergeordnete Grundwasserzirkulation statt. Eine Abreicherung der LCKW erfolgt hier hauptsächlich über die Diffusion (siehe Abb. 6.13).

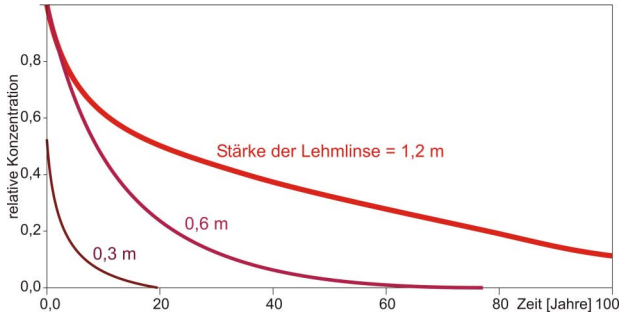


Abb. 6.13: *Tailing und Rebound – Diffusion von LHKW (TCE) aus einer Lehmschicht unterschiedlicher Mächtigkeiten (NRC 1994)*

### 6.2 Abschätzung der Gesamtlaufzeit und –kosten

Mit einer Dekontamination sollen die Schadstoffe in der Quelle beseitigt oder vermindert werden. Dies setzt voraus, dass die Beseitigung in einer absehbaren Zeit auch möglich ist. Eine solche absehbare Zeit ist vom Gesetzgeber allerdings nicht definiert. Somit gibt es eine Grauzone, in der nicht genau zwischen Dekontaminations- und Sicherungsmaßnahmen unterschieden werden kann. Deshalb ist es sinnvoll zur Überprüfung der Wirksamkeit von Pump-and-Treat-Maßnahmen die über die Gesamtlaufzeit anfallenden Kosten abzuschätzen.

Eingangsgrößen für diese Kostenschätzung sind:

1. Gesamtlaufzeit der Sanierung (in der Zukunft!)
2. Jährliche Betriebskosten (in der Zukunft!)

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

Die Berechnung der Gesamtlaufzeit beruht nicht auf einem Modell, das im Detail versucht die tatsächlichen, natürlichen Prozesse von der Schadstoffquelle über den Grundwasserpfad bis in den Brunnen hinein abzubilden, sondern auf Abschätzungen auf Grundlage von meist vorhandenen Kenntnissen über den Schadensherd und den Grundwasserpfad. Die natürlichen Prozesse im Mikrokosmos des Schadensherdes (siehe Abb. 6.14) und die Tailing-Prozesse werden dabei jeweils als "Black-Box" definiert und lediglich das Ergebnis der Prozesse in der jeweiligen "Black-Box" berücksichtigt. Abbildung 6.15 zeigt das Prinzip der Berechnung.

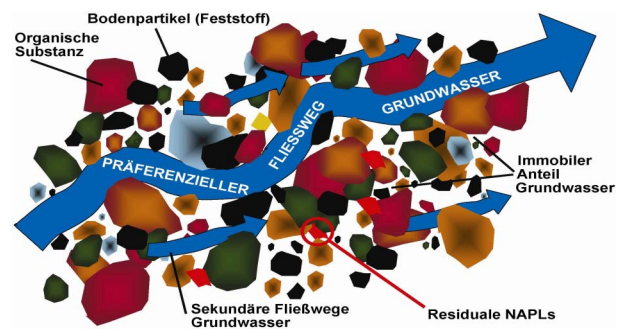


Abb. 6.14: *Mikrokosmos eines Schadensherdes*

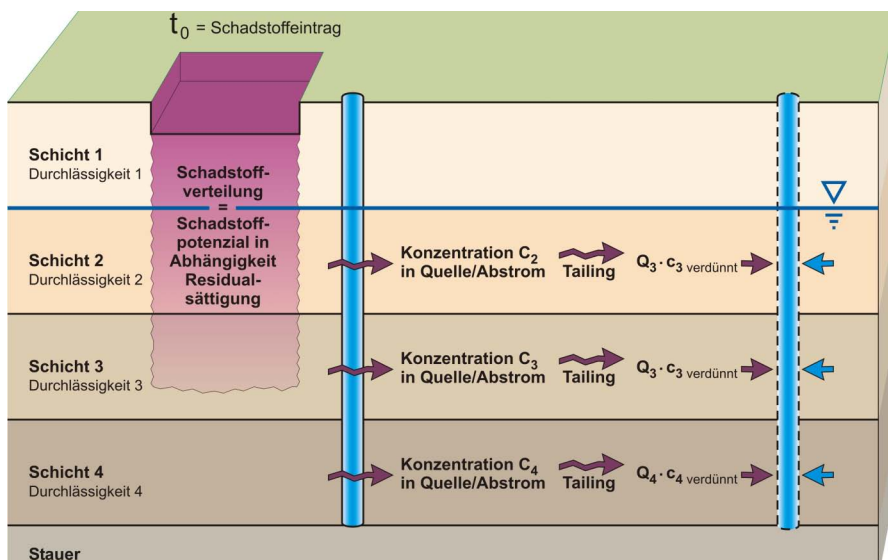


Abb. 6.15  
*Schema zur Berechnung der Gesamtlaufzeit der Sanierung*

Der Untergrund wird in Schichten unterschiedlicher Durchlässigkeiten eingeteilt. Wasser durchströmt die Schadstoffquelle, bei der das schichtbezogene Schadstoffpotenzial (= schichtbezogene Schadstoffmenge) 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 differierenden Frachten (unterschiedliche Mengen und Konzentrationen), die im Brunnen wieder gemischt werden. Ausgehend von diesem einfachen Modell kann die Gesamtlauzeit der Maßnahme abgeschätzt werden.

Eine wesentliche für die Berechnung notwendige Information ist neben der Kenntnis der unterschiedlichen Durchlässigkeiten des Untergrundes das Schadstoffpotential im Verunreinigungsherd (Quelle) und dessen Verteilung zur Tiefe. Diese Information ist in den seltensten Fällen bekannt und muss abgeschätzt werden. Meistens kennt man aber die Tiefe der Schadstoffverunreinigung und die unterschiedlichen Durchlässigkeiten der Schichten. Vereinfacht können dann gedanklich die LCKW über eine zu definierende Eintragsfläche (im kleinsten Fall 1 m<sup>2</sup>) von oben 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 (Abbildung 6.16).

Residualsättigung Perchlorethen/Trichlorethen (LUBW-Literaturverweis)

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

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

Zum Bewertungsstichtag, der häufig Jahrzehnte nach dem Eintrag liegt, werden die vor der Sanierung und durch die laufende Sanierung entfernten Schadstoffmengen abgezogen und die noch verbliebene Restmenge im Schadensherd berechnet.

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

Die Prognose in die Zukunft (siehe Abbildung 6.17) erfolgt mit einem schichtbezogenen Dreisatz, der letztlich die in Kapitel 6.1 dargestellten theoretischen Austragskurven berechnet (siehe Abbildung 6.18).

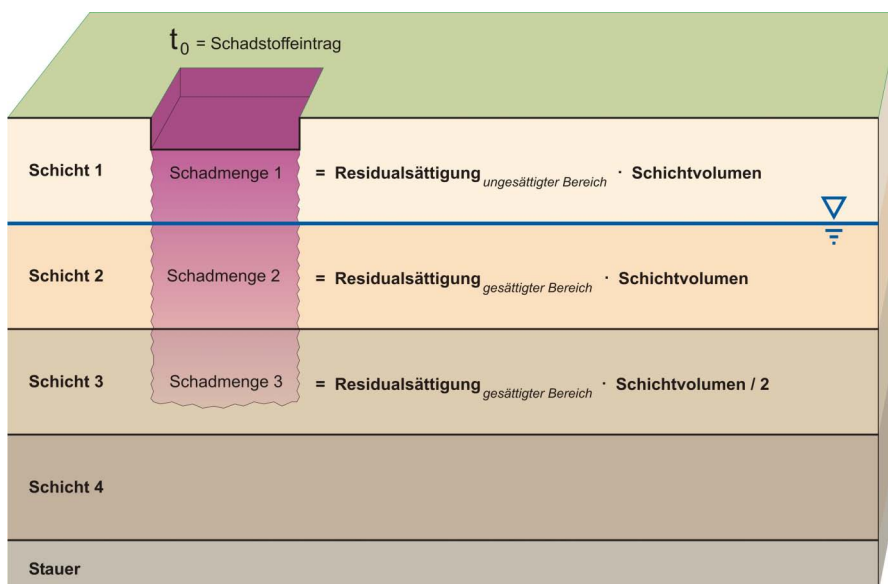


Abb. 6.16:  
Schema zur Abschätzung  
der Schadstoffmenge im  
Verunreinigungsherd (Quelle)

Mit der Kenntnis der Tiefenverteilung der Konzentrationen und der in den Brunnen eintretenden Wassermengen ("Produktivität") kann mit diesem schichtbezogenen Ansatz die Zeitdauer der Auslaugung der Schadstoffquelle errechnet werden. Wichtig ist dabei die Kenntnis der Konzentrationsverteilung im Brunnen und nicht unmittelbar in oder hinter der Schadstoffquelle, weil die Konzentrationen im Brunnen die Tailing-Effekte beinhalten.

### HINWEIS

Falls Informationen zu in den Entnahmekunnen eintretenden tiefenzonierten Schadstofffrachten fehlen, können diese Informationen mit einem überschaubaren Aufwand mit Flow-Meter-Messungen und einer horizontalen Probenahme erhoben werden.

Zur Feststellung möglicher Phasen gibt es unterschiedliche Methoden (z. B. direkt-push-Sondierungen). Entsprechende Erkundungsmethoden sind in den Schriften des **altlastenforum** Baden-Württemberg und in den Veröffentlichungen des Forschungsprojektes KORA beschrieben.



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.

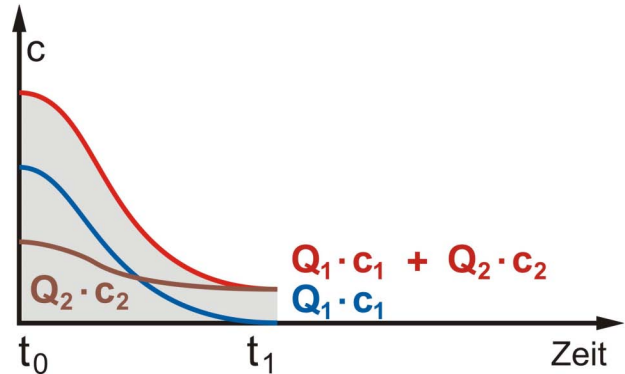


Abb. 6.18: Schadstofffrachten in geschichtetem Aquifer und resultierende theoretische Austragskurve

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 (Literaturzitat) und werden als Kostenbarwert 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.

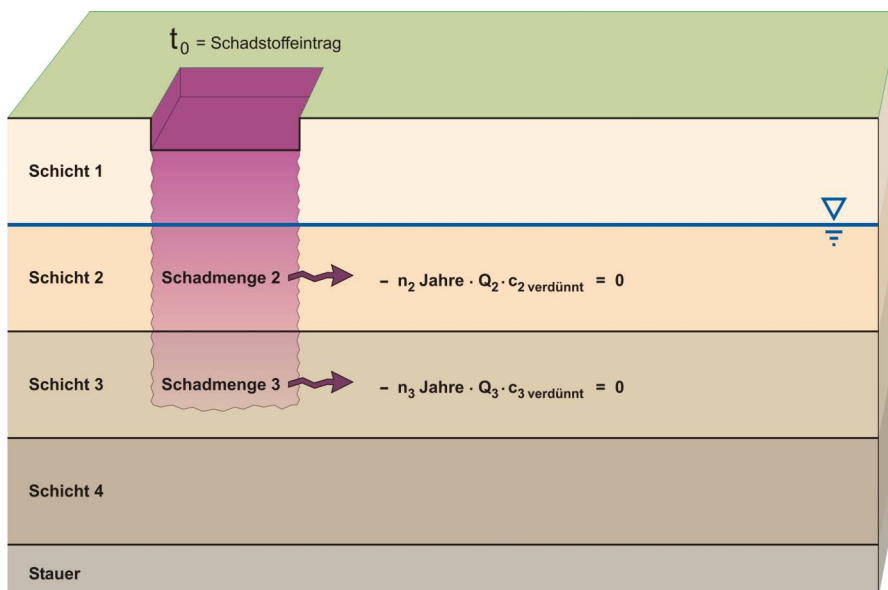


Abb. 6.17: Schema zur Abschätzung der Gesamtlaufzeit der Sanierung

Als durchschnittliche, langfristige Faktoren werden eine Preissteigerung von 2 % und ein inflationsbereinigter Zinssatz von 3 % vorgeschlagen. In der nachfolgenden Tabelle sind für diese Annahme Diskontierungsfaktoren für unterschiedliche Zeitdauern dargestellt. Die Berechnung des Kostenbarwertes erfolgt

nach folgender Formel:

$$\text{Kostenbarwert} = \text{Diskontierungsfaktor} \times \text{jährl. Betriebskosten}$$

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

Zinszeitraum n in Jahren	Diskontierungsfaktor
--------------------------	----------------------

Zinszeitraum n in Jahren	Diskontierungsfaktor
--------------------------	----------------------

Zinszeitraum n in Jahren	Diskontierungsfaktor
--------------------------	----------------------

1	0,99029
2	1,97097
3	2,94212
4	3,90385
5	4,85624
6	5,79938
7	6,73337
8	7,65829
9	8,57423
10	9,48127
11	10,3795
12	11,2690
12	11,2690
13	12,1499
14	13,0223
15	13,8861
16	14,7416
17	15,5888
18	16,4277
19	17,2585
20	18,0812
21	18,8960
22	19,7028

23	20,5018
24	21,2931
25	22,0766
26	22,8526
27	23,6210
28	24,3820
29	25,1355
30	25,8818
31	26,6208
32	27,3526
33	28,0774
34	28,7951
35	29,5058
36	30,2096
37	30,9066
38	31,5968
39	32,2804
40	32,9573
41	33,6276
42	34,2914
43	34,9488
44	35,5997
45	36,2444

46	36,8828
47	37,5150
48	38,1411
49	38,7611
50	39,3750
55	42,3566
60	45,1963
65	47,9007
70	50,4764
75	52,9294
80	55,2657
85	57,4907
90	59,6098
95	61,6280
100	63,5501

## 6.3 Beurteilung

### 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, so ergibt sich daraus der weitere Handlungsbedarf diese Grundlagen zu erheben.

### 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 derzeitig verfügbaren Techniken sanierbar sind.

### Gesamtlaufzeit größer 25 Jahre oder Gesamtkosten größer 1 Million Euro

Wenn bei erfolgreicher und plausibler Berechnung der Gesamtlaufzeit und –kosten die Gesamtlaufzeit bis zum Erreichen des Sanierungsziels mehr als 25 Jahre und die Gesamtkosten mehr als 1 Mio. € (netto) betragen, so ist zu prüfen, ob es günstigere Sanierungsverfahren gibt, die eventuell zum Beginn der Pump-and-Treat-Maßnahmen noch nicht entwickelt waren.

### Prüfung der Verhältnismäßigkeit des Sanierungsziels (Übermaßverbot)

Nach der rechtlichen Definition ist ein Handeln verhältnismäßig, wenn die folgenden Kriterien erfüllt sind:

- 1. Geeignetheit:** Durch eine Maßnahme kann der gewünschte Erfolg erreicht werden.
- 2. Erforderlichkeit:** Es gibt keine alternativen, weniger belastende Maßnahmen, um den gleichen Erfolg zu erreichen.
- 3. Angemessenheit:** Herbeigeführte Nachteile der Maßnahme sind nicht deutlich größer, als die Nachteile, die durch sie abgewendet werden sollen.

In Verbindung mit den in der Handlungshilfe beschriebenen Auswertungen können das 1. Kriterium „Geeignetheit“ und das 2. Kriterium „Erforderlichkeit“ gutachterlich beurteilt werden.

Um das 3. Kriterium „Angemessenheit“ einer Sanierung prüfen zu können, ist es gegebenenfalls erforderlich durch die Variation von Sanierungszielen zu prüfen, inwieweit sich diese auf die Gesamtlaufzeit und die Gesamtkosten der Sanierung auswirken. Wenn keine alternativen, besser geeigneten Verfahren zur Verfügung stehen, kann im Rahmen des behördlichen Ermessens im Einzelfall das Sanierungsziel angepasst werden. Diese Anpassung kann erfolgen, wenn ein deutlich erkennbares Übergewicht der Nachteile der Sanierung im Vergleich zu den Nachteilen, die abgewendet werden sollen, existiert. Die Nachteile, die abgewendet werden sollen sind bei einer Altlastensanierung meist die Größenordnungen der existierenden Gefahr oder die Schädigung eines öffentlich-rechtlichen Schutzgutes. Entsprechende Regelungen oder Empfehlungen für den behördlichen Vollzug sind dabei zu beachten. (siehe auch Anmerkungen im Kapitel 7)

# 7 Gesamtbewertung

## Sanierungsziel

Es wird vorgeschlagen, im Hinblick auf eine ökonomisch und ökologisch sinnvolle Sanierung bei schon lang andauernden Maßnahmen zu überprüfen, ob das damals vereinbarte Sanierungsziel nach heutigen Erkenntnissen und nach den Erfahrungen aus dem Projekt mit verhältnismäßigem Aufwand erreichbar ist (siehe auch Kapitel 6.3). Dabei ist zu prüfen, ob die in dem Leitfaden „Untersuchungsstrategie Grundwasser“ (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz; Heft Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Nr. 42 vom September 2008) genannten Entscheidungskriterien zur Festlegung von Sanierungszielen berücksichtigt worden sind (Stichworte: Emissionsbegrenzung, Nutzungswürdigkeit von Geringleitern).

Bei der Prüfung der Sanierungsziele sollten folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- 1) Bei Sicherungen, die energetisch auch zu Kühl- oder Heizzwecken genutzt werden, sollte die positive Ökobilanz bei der Gesamtbewertung berücksichtigt werden.
- 2) Bei einigen Fällen kann selbst bei ineffizienten Dekontaminationsmaßnahmen eine Sicherung weiter sinnvoll sein.
- 3) Grundsätzlich ist der Zeithorizont für das Einhalten von Sanierungszielen nicht maßgebend, so lange das Schutzgut durch die laufende Sanierung geschützt ist.

## Anlagenauslegung und Betriebskosten

Hinsichtlich der Gesamtbeurteilung der Sanierungsmaßnahme geben die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Auswertungen der Zeitreihen und der spezifischen Kennwerte einen kompakten Überblick über den aktuellen Zustand der laufenden Maßnahme. Insbesondere der „interne Eigenvergleich“ der Maßnahme mit dem theoretischen Auslegungs-Optimum und dem Start zeigt schnell und belastbar an, ob noch ein effektiver Schadstoffaustrag gegeben ist oder ob

hinsichtlich der Aufwendungen (Energie, Kosten) ein Optimierungsbedarf besteht.

Darüber hinaus bilden die normierten Kennwerte ein belastbares Vergleichsmaß für Sanierungsmaßnahmen mit ähnlichem Randbedingungen.

Zusätzlich dazu ist eine Einzelbewertung der Maßnahme erforderlich, wobei schwerpunktmäßig die folgenden Aspekte berücksichtigt werden sollen:

### 1.) Ausfallzeiten der Anlage

Diese führen zu deutlich schlechteren Austragsraten, wodurch die Maßnahme im ersten Moment ineffektiv arbeitet. Mit der Beseitigung kann eine erneute Bewertung ein deutlich anderes Bild liefern. Daher ist unbedingt zu prüfen ob durch ‚gemittelte‘ Datenerfassungen und Eingabedaten die in der Realität vorhandenen Ausfallzeiten im nennenswerten Umfang überblendet werden.

### 2.) 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 trotzdem gleichzeitig hohem und effizienten Schadstoffaustrag ein Indiz für ein im Einzelfall ungünstiges Verfahren darstellen (z. B. Kat-Ox vs. Aktivkohle).

### 3.) Standortspezifische Besonderheiten

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

Chemikaliendosierung, usw.). Auch diese haben hinsichtlich der Kosten – und Energieeffizienz einen großen systematischen Einfluss.

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

### **Gesamtlaufzeit und -kosten**

Für die Beurteilung der Kostenseite und der Gesamtlaufzeit sind das Quellverhalten im Schadenszentrum sowie der zu erreichende Sanierungszielwert von Bedeutung. Die als Bewertungsgrößenordnung ermittelten Betriebskosten je Betriebsjahr geben hier eine Kalkulationsgrundlage.

Für die Gesamtkosten ist jedoch weiterhin die Ableitung der noch zu erwartenden Restlaufzeit auf Basis des Quellverhaltens unbedingt erforderlich. Nur so kann eine belastbare Entscheidungsgrundlage für Anpassungen / Optimierungen oder gar Sanierungsumstellungen auf andere Verfahren erzielt werden.

Grundsätzlich gilt: Bei einer prognostizierten Restlaufzeit der Sanierung von mehr als 25 Jahren oder prognostizierten Gesamtkosten von über 1 Mio. € (netto) ergibt sich das Erfordernis weiterer, detaillierter Überprüfungen der Maßnahmen.

Gerade bei Sanierungsmaßnahmen, die hinsichtlich der absoluten Schadstoffgehalte kurz oberhalb des Sanierungszielwertes stagnieren, kann trotz konstantem Schadstoffaustrag ein ergänzender konzeptionell anderer Sanierungsansatz hilfreich sein.

Weiterhin sind gerade bei lang laufenden Maßnahmen die „eingefahrenen Wege“ im Hinblick auf die Kosten für Beprobungen und Analytik, die Überwachungs- und Wartungshäufigkeit überprüfungswürdig.

Da auch hier wiederum kein geeigneter einheitlicher Bewertungsmaßstab ableitbar ist, ist eine Einzelfallprüfung unter Würdigung der Angemessenheit von Fall zu Fall erforderlich.

### **Sanierungskonzeption**

Neben den vorgenannten Beurteilungsansätzen ist eine Bewertung alternativer Methoden der Sanierungskonzeption, insbesondere im Hinblick auf die hydraulische Erschließung und das Freisetzungsverhalten der Schadensquelle notwendig. Auf Basis des Bewertungsschemas für die Schadstoffquelle und der daraus erhaltenen Resultate ist die konzeptionelle Umstellung der Förderung / Schadstofferschließung zu prüfen. Dabei kann

- die Errichtung neuer Sanierungsbrunnen an anderen Standorten,
- die Anpassung des hydraulischen Förderregimes als auch,
- der Einsatz von Hilfsmitteln (z. B. Tenside als Lösungsvermittler)

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

Die Durchführung von regelmäßigen Sanierungsaudits bei größeren Sanierungsmaßnahmen ist auch aus wirtschaftlichen Gründen notwendig.