

Landesamt für Umwelt und Geologie
Referat Grundwasser und Altlasten



Materialien zur Altlastenbehandlung

Entscheidungshilfe Grundwassersanierung:
Effizienz von Pump and Treat-Sanierungen

Impressum

Materialien zur Altlastenbehandlung

**Entscheidungshilfe Grundwassersanierung: Effizienz
von Pump and Treat-Sanierungen.**

Titelbild:

Teil einer Pump and Treat –Grundwassersanierungsanlage
(oberirdischer Behandlungsteil)
Foto: ARCADIS, Freiberg / Harbauer GmbH

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Referat Grundwasser und Altlasten
Zur Wetterwarte 11, D-01109 Dresden
E-Mail: Abteilung3.LfUG@smul.sachsen.de (kein Zugang für
elektronisch signierte sowie für verschlüsselte elektronische
Dokumente)

Autor/Bearbeiter/Redaktion:

ARGE
ARCADIS Consult GmbH/ DGC
Dipl.-Chem. Sabine. Berek
Dipl.-Geol. Jürgen. Dittrich
Dipl.-Ing. V. Jungk
Geol.-Ing. E. Schneider
Dipl.-Geol. C. Ott

Jens Fahl
LfUG, Referat Grundwasser und Altlasten /
TU Dresden, Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten

Redaktionsschluss: März 2007

Copyright:

Diese Veröffentlichung ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind dem
Herausgeber vorbehalten.

Dresden, März 2007

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1 EINLEITUNG	7
2 RECHERCHE UND BEWERTUNG AUSGEWÄHLTER PUMP AND TREAT SANIERUNGSFÄLLE	8
2.1 RECHERCHEMETHODIK.....	8
2.2 KENNTNISSTAND ZUR BEWERTUNG DER EFFIZIENZ VON PUMP AND TREAT-VERFAHREN.....	8
2.3 ALLGEMEINE BESCHREIBUNG DER AUSGEWÄHLTEN SANIERUNGSFÄLLE.....	13
2.3.1 Schadensbilder, Klassifizierung der Fälle	13
2.3.2 Angewandte Sanierungsverfahren.....	14
2.4 SANIERUNGSERGEBNISSE / SPEZIFISCHE KOSTEN DER UNTERSUCHTEN FÄLLE.....	16
2.4.1 Fälle mit BTEX bzw. BTEX/MKW als Leitschadstoff.....	17
2.4.2 Fälle mit LHKW als Leitschadstoff.....	18
2.4.3 Fallbeispiele.....	19
2.4.4 Dokumentation der untersuchten Sanierungsfälle	25
2.5 ANALYSE DES ENTSCHEIDUNGSPROZESSES DER UNTERSUCHTEN PUMP AND TREAT-FÄLLE	26
2.6 ANGEWENDETE SANIERUNGSZIELWERTE	27
3 ENTSCHEIDUNGSHILFE GRUNDWASSERSANIERUNG	30
3.1 ENTSCHEIDUNGSFINDUNG IM VORFELD VON SANIERUNGSMABNAHMEN.....	30
3.1.1 Empfehlungen für die Detailuntersuchung und Sanierungsuntersuchung Grundwasser.....	30
3.1.2 Sanierungsziele - Definitionen	31
3.1.3 Grundsätze und Anforderungen an die Erreichbarkeit von Sanierungszielen	35
3.1.4 Beispiele für Sanierungsziele	36
3.1.5 Variantenauswahl geeigneter Verfahren und -kombinationen.....	38
3.1.6 Nichtmonetäre und monetäre Bewertung/ Wirtschaftlichkeitsprüfung	40
3.2 ENTSCHEIDUNGSFINDUNG ZUR OPTIMIERUNG / BEENDIGUNG LAUFENDER P & T - MAßNAHMEN	42
3.2.1 Prüfkriterien für die Bewertung im Sanierungsverlauf und Optimierungsmöglichkeiten.....	42
3.2.2 Überprüfung der Sanierungsziele / Abbruchkriterien / Strategieänderung	45
3.3 MINDESTANFORDERUNGEN AN DIE DOKUMENTATION	60
3.3.1 Dokumentation der Entscheidungsgrundlagen zur Sanierung.....	60
3.3.2 Dokumentation der Sanierungsmaßnahme.....	62
4 ZUSAMMENFASSUNG.....	65
5 UNTERLAGEN / LITERATUR.....	67

ANLAGENVERZEICHNIS

ANLAGE 1:	CHECKLISTE ZUR DOKUMENTATION VON GRUNDWASSERSANIERUNGSMABNAHMEN	69
ANLAGE 2:	BEWERTUNGSMATRIX FÜR SANIERUNGSSZENARIEN	72
ANLAGE 3:	ALTERNATIVVERFAHREN ZU PUMP & TREAT / VERFAHRENSKOMBINATIONEN	73
ANLAGE 4:	ZUSAMMENFASSENDE BERICHT DER FALLANALYSEN	90

TABELLENVERZEICHNIS

	Seite	
Tab.:1	Ergänzungsverfahren zu Pump and Treat	56
Tab.:2	Alternativverfahren nach Pump and Treat	58

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

	Seite	
Abb. 1:	CKW-Konzentration im Rohwasser im Verlauf einer Pump and Treat- Maßnahme (STUPP et.al.2006)	9
Abb. 2:	Phasenmodell einer P & T- Grundwassersanierung	11
Abb.3:	Hypothetischer Verlauf der Belastung des Anlagenzulaufs in Abhängigkeit von den Aquifereigenschaften und bei Vorliegen von NAPL's aus US EPA (1997)	12
Abb.4:	Leitschadstoffgruppen der recherchierten Grundwassersanierungen mittels Pump & Treat	13
Abb. 5:	Durchlässigkeitsbeiwerte der Zielgrundwasserleiter der untersuchten PUMP AND TREAT- Sanierungsfälle	14
Abb.6:	Bei den 62 Pump & Treat- Sanierungen eingesetzte Behandlungsverfahren nach Schadstoffen	15
Abb.7:	Eingesetzte Behandlungsverfahren bei den Sanierungsfällen mit LHKW und BTEX als Leitschadstoffe	15
Abb.9:	Spezifische Kosten der BTEX bzw. BTEX / MKW-Fälle im Vergleich zur Sanierungsdauer	17
Abb. 10:	Spezifische Kosten der LHKW-Fälle im Vergleich zur Sanierungsdauer	18
Abb.11:	Bilanz eines MKW/BTEX- Schadens, Gesamtbetriebskosten 1998 - 2005 ≈200.000 EUR, Entscheidung für Unterstützung durch Quellensanierung erst nach 6 Betriebsjahren	19
Abb.12:	Schadstoffkonzentrationen im Verlauf der Sanierung des MKW/BTEX-Schadens nach Abb. 8, Sanierungszielwert 50 mg/l BTEX	20
Abb.13:	Entwicklung der spezifischen Kosten eines langfristigen LHKW-Sanierungsfalls, Gesamtbetriebskosten ca. 11 Mio EUR	21
Abb. 14:	Entwicklung der LHKW-Konzentrationen in 4 Förderbrunnen	21
Abb. 15:	Effizienz Fall ARC 5, mittlere spezifische Kosten	22
Abb.16:	Konzentrationsverlauf Fall ARC 5, Sanierungseffekt bisher gering, Erreichen des Sanierungsziels (120 µg/l BTEX) noch nicht erkennbar	23
Abb. 17:	Effizienz Fall ARC 11, LHKW-Schaden, Abbruch	24

Abb. 18: Fall ARC 11 – LHKW, Konzentrationsverlauf (Schadensverlagerung)	24
Abb. 19: Anzahl der Gutachten zur Entscheidungsfindung (aufgenommen in GWKON)	25
Abb. 20: Sanierungszielwertverteilung der recherchierten Fälle für Benzol/BTEX	28
Abb. 21: Sanierungszielwertverteilung der recherchierten Fälle für LHKW	28
Abb. 22: Sanierungszielwerte der recherchierten Fälle für MKW/PAK	29

1 Einleitung

Im Freistaat Sachsen wurden in der Mehrzahl der Fälle der Altlastensanierung bei Sanierung von Grundwasserschäden Pump and Treat- Verfahren angewandt. Die Laufzeiten dieser Sanierungen übersteigen häufig den geplanten Zeitrahmen, ohne das Sanierungsziel erreicht zu haben. Die Betriebskosten stehen mit fortschreitender Sanierungsdauer in zunehmend ungünstigerem Verhältnis zum Sanierungseffekt. Die damit sinkende Effizienz der gesamten Sanierungsmaßnahme kann letztendlich deren Verhältnismäßigkeit und ökologische Gesamtbilanz in Frage stellen, wenn nicht rechtzeitig geeignete Verifizierungen am Verfahren oder den Randbedingungen vorgenommen werden.

Das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie hat zur Beurteilung der Effizienz von Pump and Treat- Sanierungen die Erarbeitung einer Entscheidungshilfe beauftragt, welche den Anwendern die Prüfung laufender oder in Planung befindlicher Grundwassersanierungen erleichtern soll.

Die Aufgabenstellung sieht vor, auf der Grundlage einer umfassenden Fallrecherche und -auswertung sowie dem Stand der Technik aller für eine Grundwassersanierung erforderlichen Leistungsteile sowohl technisch-ökologische als auch betriebswirtschaftliche Kriterien zu formulieren, welche die Anwender in die Lage versetzen, objektivere und nachhaltige Entscheidungen für die Optimierung laufender und die Planung neuer Grundwassersanierungen zu treffen.

2 Recherche und Bewertung ausgewählter Pump and Treat Sanierungsfälle

2.1 Recherchemethodik

Grundlage für die Erarbeitung der Entscheidungshilfe ist eine weitere detaillierte Fallrecherche, welche einen ausgewählten Teil der Fälle der Datenbank GWKON (UBA (2003) sowie Sanierungsfälle aus der eigenen Bearbeitung umfasst. Für die ergänzende Erhebung effizienz- und entscheidungsrelevanter Kriterien und Daten wurde ein entsprechender Fragenkatalog mit Zusatzfragen erstellt, welcher durch das LfUG auch anderen Landesbehörden mit der Bitte um Zuarbeit weiterer Falldaten übergeben wurde.

Um den Vorteil der bereits bestehenden Datenbank hinsichtlich einer variablen Auswertbarkeit der Falldaten zu nutzen, wurde die Datenbankversion GWKON 1.4 für die Erfassung des beschreibenden Teils der erhobenen Falldaten aus der eigenen Bearbeitung verwendet. Die ermittelbaren effizienzrelevanten Falldaten sowie der entscheidungsrelevanten Verbalbeurteilungen erfolgte separat. Insgesamt waren damit 62 Fälle in die Auswertung einbezogen.

Die Detailergebnisse der Datenrecherche befinden sich in Anlage 4. Zusammenfassende Ergebnisse sind im Kapitel 2.3 dargestellt.

2.2 Kenntnisstand zur Bewertung der Effizienz von Pump and Treat-Verfahren

Pump & Treat-Verfahren kommen zur Sanierung von Grundwasserschadensfällen weltweit seit Jahrzehnten zum Einsatz. Aus diesem Grund existieren umfangreiche Erfahrungen aus der Analyse abgeschlossener oder langfristig laufender Sanierungsfälle. Ebenso wurden die Erkundungstechniken, die analytischen und technologischen Verfahren sowie die Auswertungsmethoden weiterentwickelt. Die Analyse der Effizienz von Grundwassersanierungsfällen wurde in den 90er Jahren insbesondere durch das E.P.A. US thematisiert, woraus umfangreiche Fallstudien resultieren (US EPA(1996)/(1997)/(2002).

In der Bundesrepublik existieren einige Studien auf Länderebene, wobei sich deren Ergebnisse bezüglich einer Effizienzbewertung nur auf kleinere Fallgruppen reduzieren, von denen die erforderlichen Daten verfügbar gemacht werden können. Eine aktuelle, sehr detaillierte Effizienzbetrachtung, allerdings nur für CKW- Sanierungsfälle, wurde durch STUPP et.al. (2005)/(2006) durchgeführt. Für 13 Sanierungsfälle erfolgte eine Analyse der Kosten je m³ gereinigtes Grundwasser sowie der Kosten je kg zurück gewonnene Menge Schadstoff. Diese variiert fallspezifisch in einer großen Spannweite. Hierfür wurden die jeweiligen Randbedingungen analysiert.

Eine umfangreiche Falldatensammlung und -auswertung von Grundwassersanierungsfällen wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „Kriterien zur länderübergreifenden Behandlung von Grundwasser-

verunreinigungen“ erstellt (UBA 2003). Sie basiert auf Zuarbeiten aus den jeweiligen Landesämtern von 12 Bundesländern und umfasst zum Stichtag (31.05.2003) 89 Sanierungsfälle. In 90 Prozent der erfassten Fälle handelt es sich um klassische Pump and Treat- Sanierungen. Den weitaus größten Teil der Fälle stellen LHKW/CKW- Sanierungen dar (2/3), des Weiteren wurden Fälle mit BTEX/MKW-, PAK-, Pesti- zid-, Phenol- und Schwermetallkontaminationen als Leitschadstoffe erfasst. Die Sanierungsdauer hatte zum Stichtag in mehreren Sanierungsfällen bereits mehr als 15 Jahre erreicht. Obwohl die Datenbank eine sehr differenzierte Struktur zur Kostenerfassung besitzt, konnten auf Grund nicht ausreichender Datenver- fügbarkeit keine Effizienzbetrachtungen durchgeführt werden.

Der typische Verlauf einer Pump & Treat-Sanierungsmaßnahme ist durch folgende Merkmale gekenn- zeichnet:

- „Relativ“ schnelle Reduzierung der Schadstoffkonzentrationen in der Phase nach Erreichen stabiler Betriebsverhältnisse
- trotz gleich bleibenden Förderraten keine weitere Verbesserung mehr (Eintreten des Tailingeffekts)
- das Sanierungsziel ist noch nicht erreicht

Je nach Spezifik des Sanierungsfalls (Zustand der Quelle, Fahnsituation, hydraulische Limitierung des Aquifers, Geeignetheit der Dimensionierung etc.) verläuft die Abnahme der Schadstoffkonzentrationen mit mehr oder minder starken Schwankungen ohne das Sanierungsziel zu erreichen. Bei Abbruch der För- derung tritt oft ein Rebound-Effekt ein (Wiederanstieg der Konzentration). Ein extremes Beispiel hierfür wurde an einem sehr langfristigen CKW-Sanierungsfall von STUPP et.al. (2005)/(2006) gezeigt (Abb. 1).

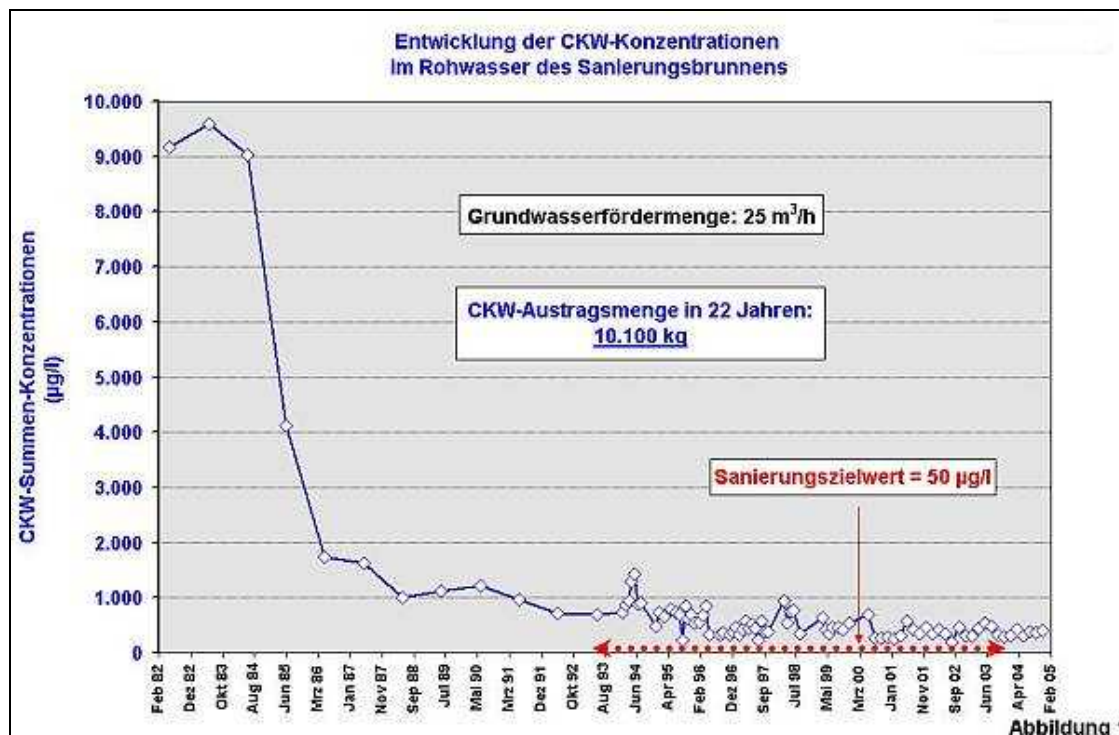


Abb. 1: CKW-Konzentration im Rohwasser im Verlauf einer Pump and Treat- Maßnahme (STUPP et.al.2006)

Weil Pump & Treat-Sanierungen das Trägermedium Grundwasser nutzen, sind diese generell durch folgende Sachverhalte limitiert:

- Eigenschaften des zu entfernenden Schadstoffs (Löslichkeit, Fluideigenschaften, Retardationsverhalten)
- Eigenschaften des Aquifers (Durchlässigkeit, Fließgeschwindigkeit, Chemismus, Sorptionseigenschaften)
- Existenz von Schadstoffen in Phase (NAPL)

Während im Bereich der relativ schnellen, advektiven Grundwasserströmung vorliegende Schadstoffe auch relativ schnell aus dem System entfernt werden können, kann der Feinporenraum mit sehr langsamen bzw. stagnierenden Grundwasserbewegungen dort vorliegende Schadstoffe nur durch Diffusion abgeben. Haben Schadstoffe in Phase das Porenwasser verdrängt, gilt dies ebenfalls, so dass sich extrem lange Sanierungszeiträume ergeben. Weiter verzögernd wirkt die Retardation der Schadstoffe an der Bodenmatrix selbst sowie an organischen Partikeln und sorptionsfähigen Präzipitaten wie z.B. Eisenhydroxiden. Aus dieser Tatsache heraus ergeben sich für eine Grundwassersanierung mittels Pump and Treat-Verfahren zwei Phasen der Schadstoffentfernung:

1. Transport der Schadstoffe aus dem advektiv zugänglichen Porenbereich des Aquifers
2. diffusionsbestimmter Stoffübergang aus nicht oder sehr gering durchströmten Bereichen und erst dann Transport aus dem Aquifer

Das Konzept dieses Phasenmodells (s. Abb.2) wurde bereits 1985 publiziert und in den 1990er Jahren weiter entwickelt (US EPA(1992)/(1996). Grundlage dieser Modellvorstellung war die Tatsache, dass P & T Maßnahmen, die bereits mehrere Jahre liefen, folgende Probleme aufwiesen:

1. Die PUMP AND TREAT Systeme lieferten bei etwa gleich (hoch) bleibenden Betriebskosten im Vergleich zum Beginn der Sanierungsmaßnahme keine relevanten Schadstoffmengen mehr.
2. Die Restkonzentration im Aquifer war nicht niedrig genug, um diesen als saniert (gereinigt) einzustufen.

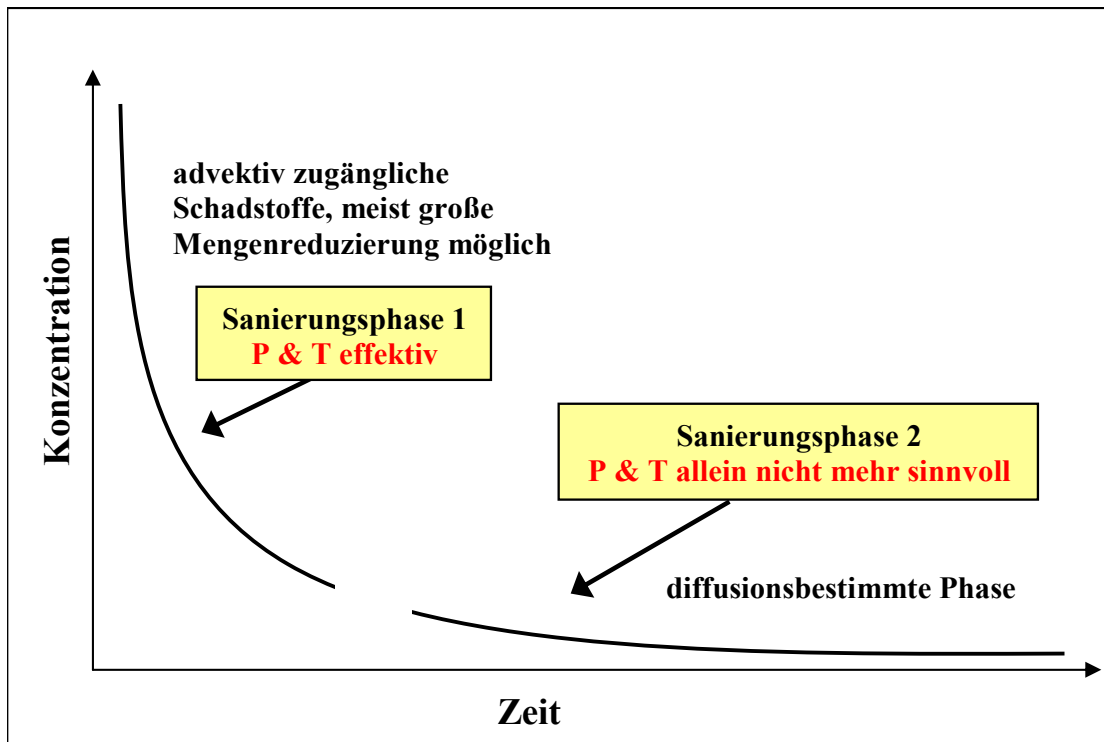


Abb. 2: Phasenmodell einer P&T- Grundwassersanierung

Dieses vereinfachte Phasenmodell beschreibt die Grenzen von Pump and Treat- Sanierungen im prinzipiellen Verlauf. Die Konzentrationsentwicklung wird von den Aquifereigenschaften und der Anwesenheit von NAPL's in unterschiedlicher Art und Weise beeinflusst.

Die geringste Verzögerung in der Schadstoffabgabe liefern weitgehend homogene Lockergesteinsgrundwasserleiter mit guter Durchlässigkeit. Bereits geringmächtige Einschaltungen geringerer Durchlässigkeit und höherer Sorptionskapazität bewirken eine Verlangsamung des Abtransports der Schadstoffe aus dem System. Dieser Effekt verstärkt sich weiter bei Vorliegen von Phasen (s. auch Abb.3).

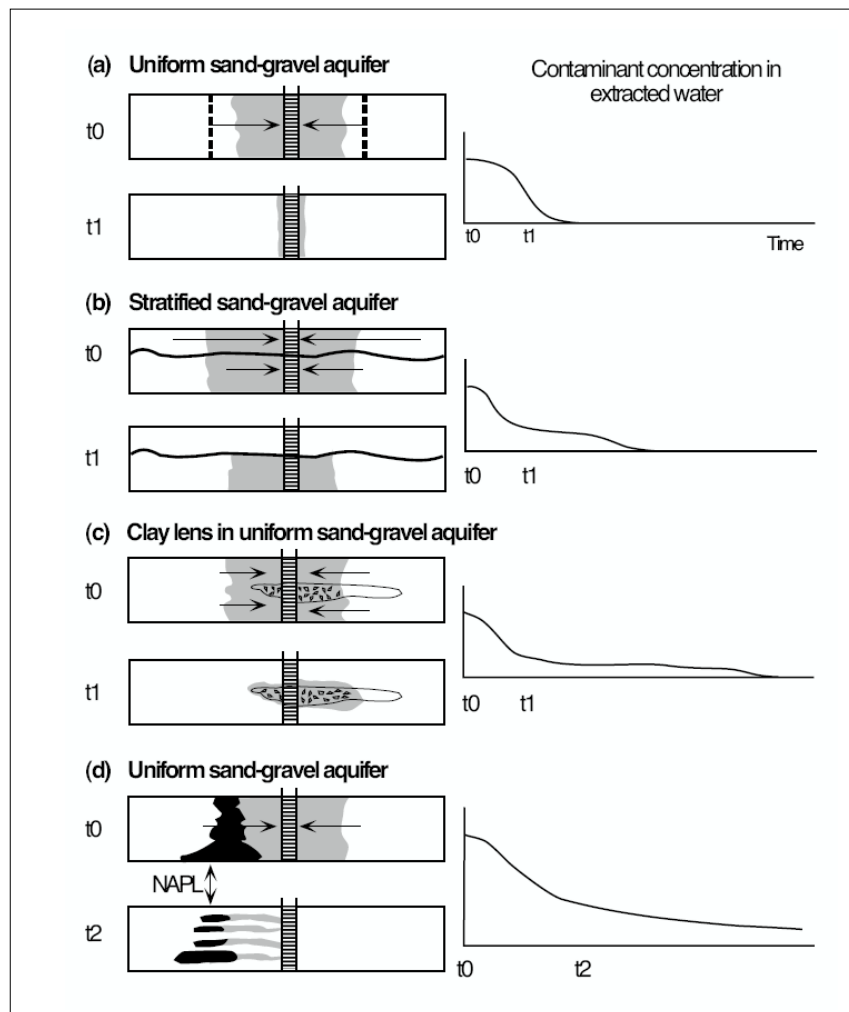


Abb.3: Hypothetischer Verlauf der Belastung des Anlagenzulaufs in Abhängigkeit von den Aquifereigenschaften und bei Vorliegen von NAPL's aus US EPA (1997)

Für die Anwendung im einzelnen Sanierungsfall ergibt sich hieraus die Notwendigkeit, bereits im Vorfeld der Sanierung unter Berücksichtigung der Spezifik des Falls abzuschätzen, ob (sanierungszielabhängig) und wann (Kriterien) die Sanierung durch Erreichen quasi unveränderter nur noch geringer Austragsraten nicht mehr als effizient zu betrachten sein wird und demzufolge ein Eingreifen vorzusehen ist.

In den Empfehlungen nach US EPA (1996) wird das Phasenmodell als konsequent zweistufiges Verfahren betrachtet. Berücksichtigt wird hier auch die Qualität der Datenlage zur Charakterisierung des Schadens. Die Festlegung der Phasen erfolgt bereits im Ergebnis der Vorzugsvariantenermittlung in Abhängigkeit vom gewählten Sanierungsverfahren.

2.3 Allgemeine Beschreibung der ausgewählten Sanierungsfälle

2.3.1 Schadensbilder, Klassifizierung der Fälle

Die erfassten 62 Fälle spiegeln eine Verteilung der Leitschadstoffe wider, welche vermutlich durch die Vorauswahl und die Berücksichtigung von Freistellungsfällen im Freistaat Sachsen einen etwas geringeren Anteil an LHKW- Schadensfällen zugunsten von BTEX/MKW-dominierten Schäden aufweist als andere Statistiken. Die betrachteten Fälle gliedern sich nach Leitschadstoffen wie folgt:

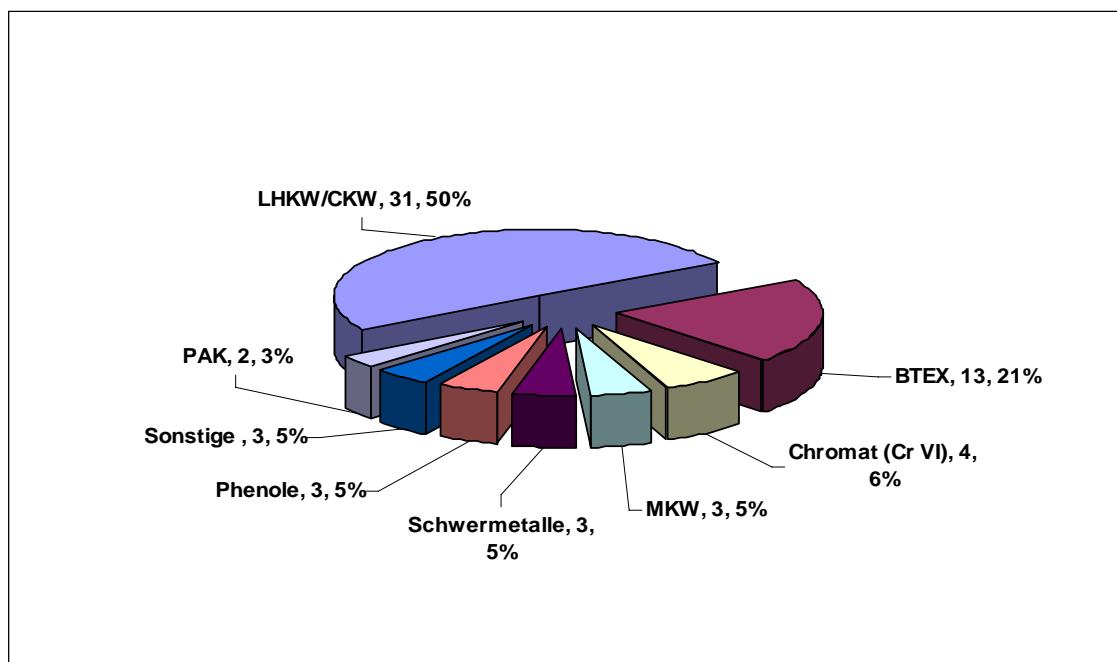


Abb.4: Leitschadstoffgruppen der recherchierten Grundwassersanierungen mittels Pump & Treat

Die Beschreibung der Geologie / Hydrogeologie der untersuchten PUMP AND TREAT- Sanierungsfälle weist überwiegend Porengrundwasserleiter aus. In sieben Fällen sind Kluft- und in einem Fall ein Karstgrundwasserleiter relevant.

Die Mächtigkeit der betroffenen GWL reicht von weniger als 1 m bis zu 85 m. Der Medianwert der Mächtigkeit des überwiegend betroffenen oberen GWL liegt bei ca. 8 m.

Die Durchlässigkeitsbeiwerte der Zielgrundwasserleiter der PUMP AND TREAT- Sanierungsfälle werden überwiegend im k_f - Wert- Bereich von $1 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ m/s angegeben (s. Abb. 5). Dies entspricht der Größenordnung von mittelkörnigem Sand und der Einstufung „stark durchlässig“ nach DIN 18130.

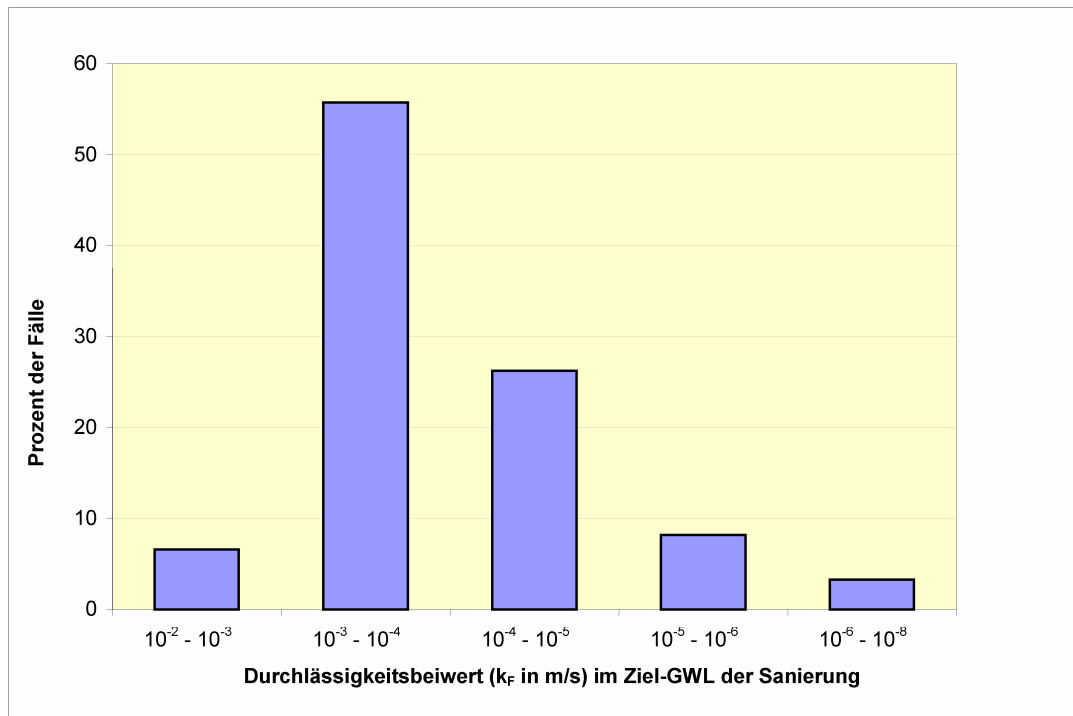


Abb. 5: Durchlässigkeitsbeiwerte der Zielgrundwasserleiter der untersuchten PUMP AND TREAT- Sanierungsfälle

Im Abstrom der Grundwasserschäden befinden sich in 16 Fällen Trinkwassergewinnungen. Der kürzeste Abstand zu einer Trinkwasserfassung liegt bei 60 m.

Die Datenlage zum Schadensumfang (Flächen/Volumen) ist auf Grund z.T. unzureichend abgegrenzter Schadensbereiche oder fehlender Kartierungsgrenzen nicht konsistent in die Datenbank eingepflegt worden, so dass hier Betrachtungen zu erwarteten Zusammenhängen allenfalls verbal erfolgen können.

2.3.2 Angewandte Sanierungsverfahren

Die Sanierungsverfahren der Pump & Treat-Fälle wurden getrennt nach Art der Grundwasserfassung und der Behandlungstechnologie/-kombinationen erfasst.

Bei den Entnahmeverfahren überwiegen bei den untersuchten Fällen Förderbrunnen mit Unterwassermotorpumpen.

Als on-site-Behandlungsverfahren für das kontaminierte Grundwasser kommen Einzelverfahren und Verfahrenskombinationen zum Einsatz, so dass in der Auswertung Mehrfachnennungen vorkommen. Das Erfordernis von Verfahrenskombinationen ergibt sich neben der Zusammensetzung der Schadstoffe insbesondere durch den Behandlungsbedarf hinsichtlich störender Begleitstoffe (ungünstiger Grundwasserchemismus). Das Gesamtspektrum der benannten Behandlungsverfahren ist nachfolgend schadstoffbezogen dargestellt (s.Abb.6).

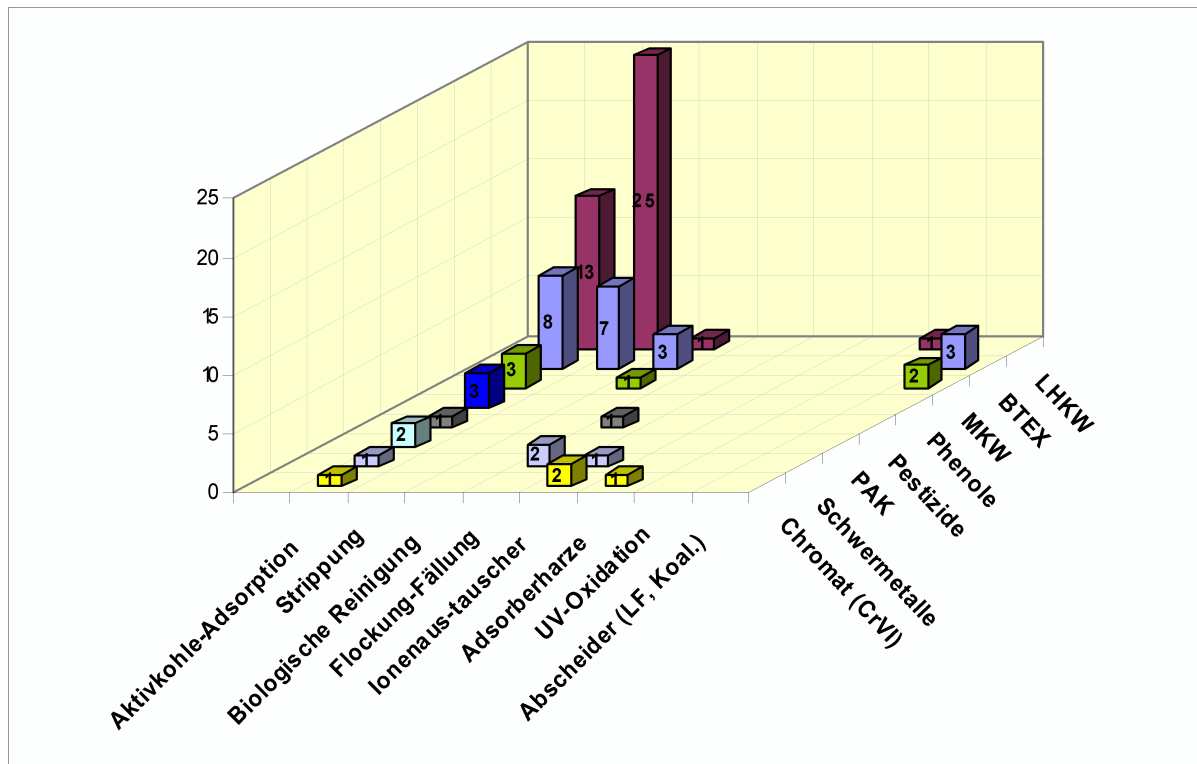


Abb.6: Bei den 62 Pump & Treat- Sanierungen eingesetzte Behandlungsverfahren nach Schadstoffen

Die Verteilung der Behandlungsverfahren bei leichtflüchtigen Stoffen unterscheidet sich dahingehend, dass bei den LHKW die Strippung anteilig häufiger zum Einsatz kommt als bei den untersuchten BTEX-Fällen. Die beiden folgenden Grafiken verdeutlichen die genannten Verhältnisse.

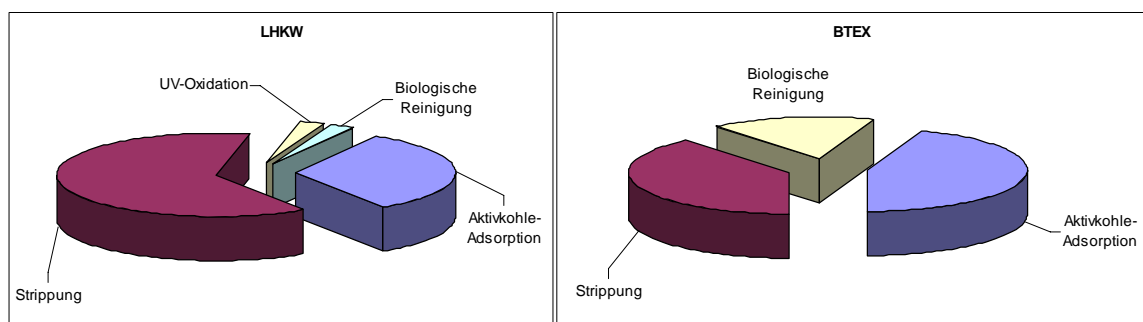


Abb.7: Eingesetzte Behandlungsverfahren bei den Sanierungsfällen mit LHKW und BTEX als Leitschadstoffe

Bei den BTEX- Schadensfällen war z.T. die Abscheidung von Leichtphase erforderlich, was sowohl durch Aromaten als auch durch Aliphaten in Phase begründet ist. Vorbehandlungsverfahren wie Enteisung/Entmanganung wurden bei den recherchierten BTEX- Fällen häufiger erforderlich als bei LHKW-Fällen. In insgesamt nur 5 Fällen wurden unterstützend in-situ- Verfahren angewendet (ohne Bodenluft). In der folgenden Darstellung (Abb. 8) sind die jeweiligen Vorbehandlungs- und in-situ-Verfahren nach Schadstoffen zusammengestellt.

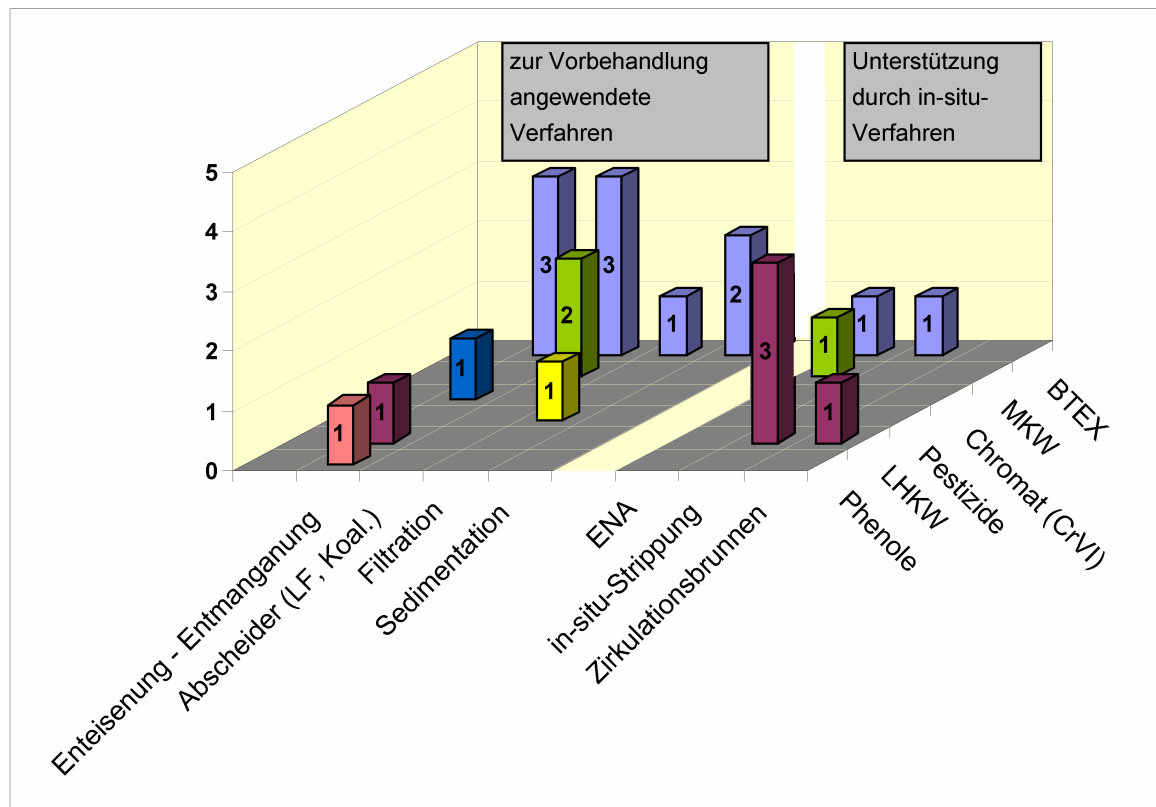


Abb.8: Angewandte Vorbehandlungsverfahren und unterstützende in-situ-Verfahren nach Leitschadstoff

Ergänzend zur Sanierung der gesättigten Zone wurde die Information zur Sanierung der Kompartimente Boden/Bodenluft ausgewertet, da dieser Sachverhalt i.d.R. auch Auswirkungen auf die Dauer der Sanierung bzw. das Erreichen des Sanierungsziels hat. Bei den untersuchten Sanierungsfällen erfolgten:

- weder Bodenluft noch Bodensanierung: in 15 Fällen
- nur Bodenluft: in 15 Fällen
- nur Bodensanierung: in 18 Fällen
- Bodenluft und Bodensanierung: in 13 Fällen.

Die Möglichkeit der Unterstützung durch Sanierung der ungesättigten Zone ist jedoch in starkem Maß von den Gegebenheiten des Falls abhängig. Es wurden auch bei Sanierungsfällen mit langer Dauer Boden- bzw. Bodenluftmaßnahmen durchgeführt, ohne dass der Sanierungszielwert erreicht werden konnte, so dass eine generelle Verallgemeinerung nicht vorgenommen sollte.

2.4 Sanierungsergebnisse / spezifische Kosten der untersuchten Fälle

Der Schadstoffaustrag (Anlagendurchsatz, mittlere Konzentration) der einzelnen Sanierungsfälle wurde entsprechend der Datenlage in Jahresscheiben (ggf. geringere Intervalle) erfasst. Dabei sollten die Intervallgrößen möglichst konform zu den erfassten Kosten sein. Darüber hinaus wurden die Schadstoffentwicklungen im Aquifer je nach Datenlage (Bestimmungsort abhängig von Sanierungsziel) in die Datenbank aufgenommen. So weit sinnvoll, wurden diese fallabhängig mit dargestellt.

Die Kosten der Pump & Treat- Sanierungen wurden soweit möglich, getrennt in Investitionskosten, Betriebskosten und Überwachungskosten aufgenommen. Die Überwachung umfasst dabei die Überwachung der Behandlung (Input, Output, Betriebsparameter) und die Überwachung der Schadstoffkonzentrationen im Aquifer, wobei letzteres im Idealfall von den Anforderungen des Sanierungsziels abhängig sein sollte (Ort des Nachweises).

Für die Bewertung der Effizienz der jeweiligen Pump & Treat- Maßnahme wurden für alle recherchierten Fälle die spezifischen Kosten ermittelt. Hierbei wurden die Betriebskosten ins Verhältnis zur entfernten Schadstoffmenge gesetzt. Da die Datenqualität der erfassten Fälle hinsichtlich der Kostenzuordnung erhebliche Unschärfen besitzt, sind die ermittelten spezifischen Kosten ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet.

2.4.1 Fälle mit BTEX bzw. BTEX/MKW als Leitschadstoff

Die Gesamtkosten je kg entnommener Schadstoff liegen bei den untersuchten BTEX/MKW- Fällen innerhalb einer Spannweite von 151 – 3.147 EUR/kg (s. Abb. 9). Zumindest bei den untersuchten Fällen erreichen diejenigen mit der insgesamt oder bisher noch kurzen Sanierungsdauer im Bereich von 2-3 Jahren niedrigere spezifische Kosten als Fälle mit Sanierungsdauern von 4-6 Jahren.

Die beiden Extremfälle besitzen fallspezifisch ungünstige Randbedingungen. Im Fall Nr.11 (erst seit 3 Jahren betriebene Abstomsicherung eines großen Schadens) erfolgt eine vertraglich ungünstig gebundene Mitbehandlung in einer vorgegebenen Anlage, im Fall Nr.12 erfolgt nur ein sehr geringer Schadstoffaustrag durch die relativ kleinräumige Schadensquelle, jedoch niedrigem Sanierungszielwert.

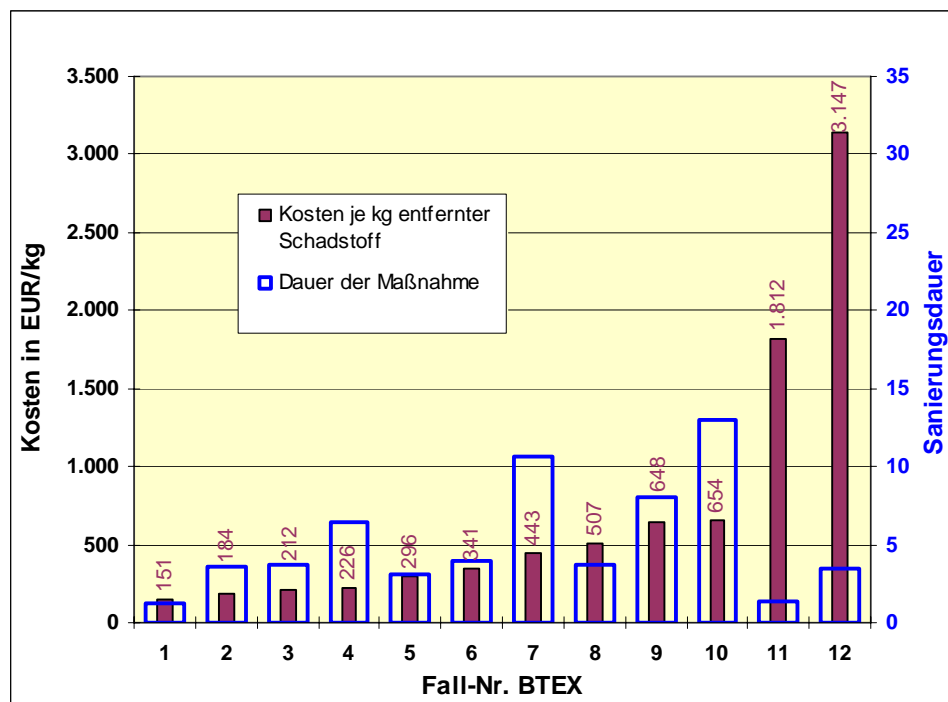


Abb.9: Spezifische Kosten der BTEX bzw. BTEX / MKW-Fälle im Vergleich zur Sanierungsdauer

2.4.2 Fälle mit LHKW als Leitschadstoff

Die Gesamtkosten je kg entnommener Schadstoff liegen bei den untersuchten LHKW- Fällen innerhalb der Spannweite von 166 – 7.896 EUR/kg (s. Abb. 10). Auch bei den untersuchten LHKW-Fällen erreichen diejenigen Fälle mit einer insgesamt oder bisher noch kurzen Sanierungsdauer im Bereich 2-4 Jahre niedrigere spezifische Kosten als Fälle mit Sanierungsdauern von >4 Jahren. Insgesamt liegt das Niveau der spezifischen Kosten bei dieser Schadstoffgruppe höher als bei BTEX- Sanierungsfällen. Der dargestellte Extremfall mit 7.896 EUR/kg (Fall Nr.19) ist in der nachfolgenden Verlaufsdarstellung nicht mit aufgeführt, die hohen spezifischen Kosten resultieren aus der Fallspezifika mit geringen entfernten Schadstoffmengen und Unklarheit des Quellenbereichs. Darüber hinaus wurden gegenüber den erfassten BTEX- Fällen bei den LHKW- Fällen deutlich mehr „Langläufer“- Sanierungen (>10 Jahre) ermittelt.

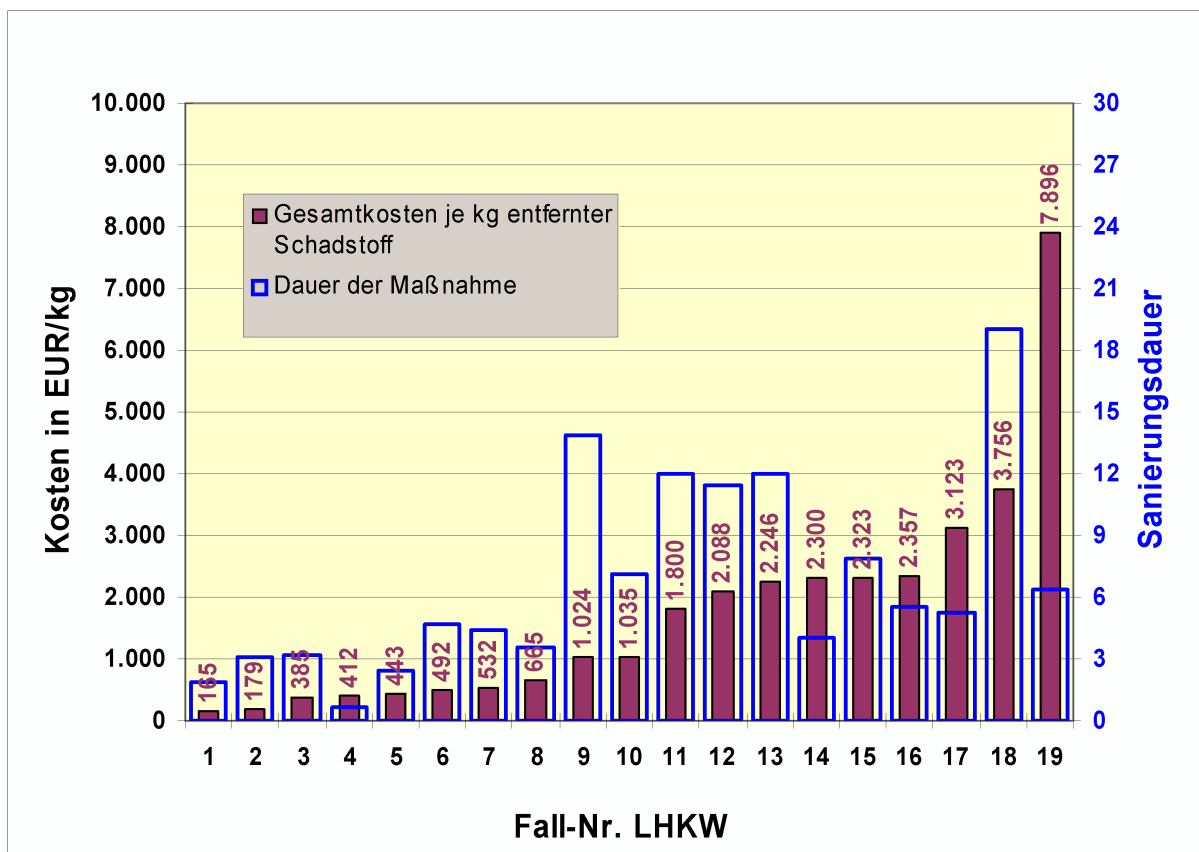


Abb. 10: Spezifische Kosten der LHKW-Fälle im Vergleich zur Sanierungsdauer

2.4.3 Fallbeispiele

Beispielhaft werden im Folgenden Sanierungsfälle hinsichtlich ihrer Effizienzbewertung dargestellt. In folgenden beiden Fällen erfolgten Eingriffe zur Effizienzsteigerung zu spät.

- Fall ARC 6: BTEX/MKW- Schaden mit nicht sanierter Schadstoffquelle im ungesättigten Bereich, Erreichbarkeit des Sanierungsziels nicht erkennbar
- Fall ARC 8: LHKW-Schaden im Anstrom eines Wasserwerks, Sanierung wird wegen Nichterreichen des Sanierungsziels nicht abgenommen

Die Einzelfallzusammenstellung alle weiteren sinnvoll auswertbaren Fälle erfolgt in Anhang 1.

Fall ARC 6: BTEX/MKW- Schaden

Aus der Entwicklung der spezifischen Kosten ist erkennbar, dass im 5. Sanierungsjahr die spezifischen Betriebskosten von 600 - 700 EUR/kg entfernter Schadstoff auf Werte > 2.000 EUR/kg ansteigen. Bereits im 3. Sanierungsjahr war es zu einer Verdopplung dieser Größe gekommen.

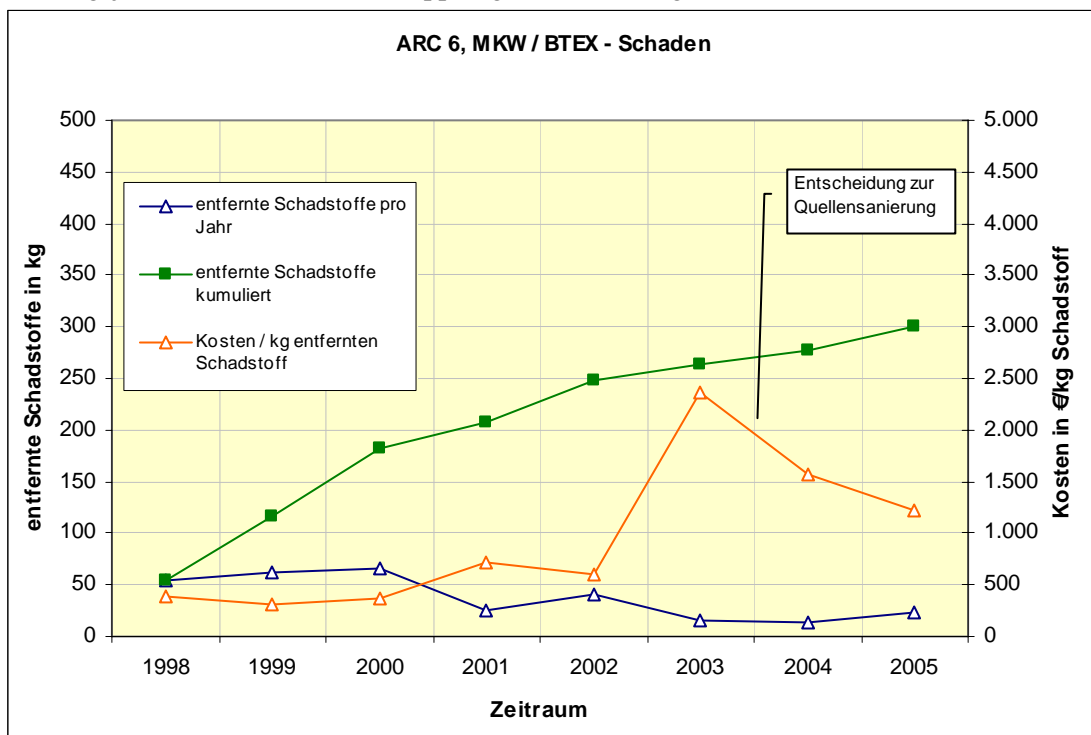


Abb.11: Bilanz eines MKW/BTEX- Schadens, Gesamtbetriebskosten 1998 - 2005 \approx 200.000 EUR, Entscheidung für Unterstützung durch Quellensanierung erst nach 6 Betriebsjahren

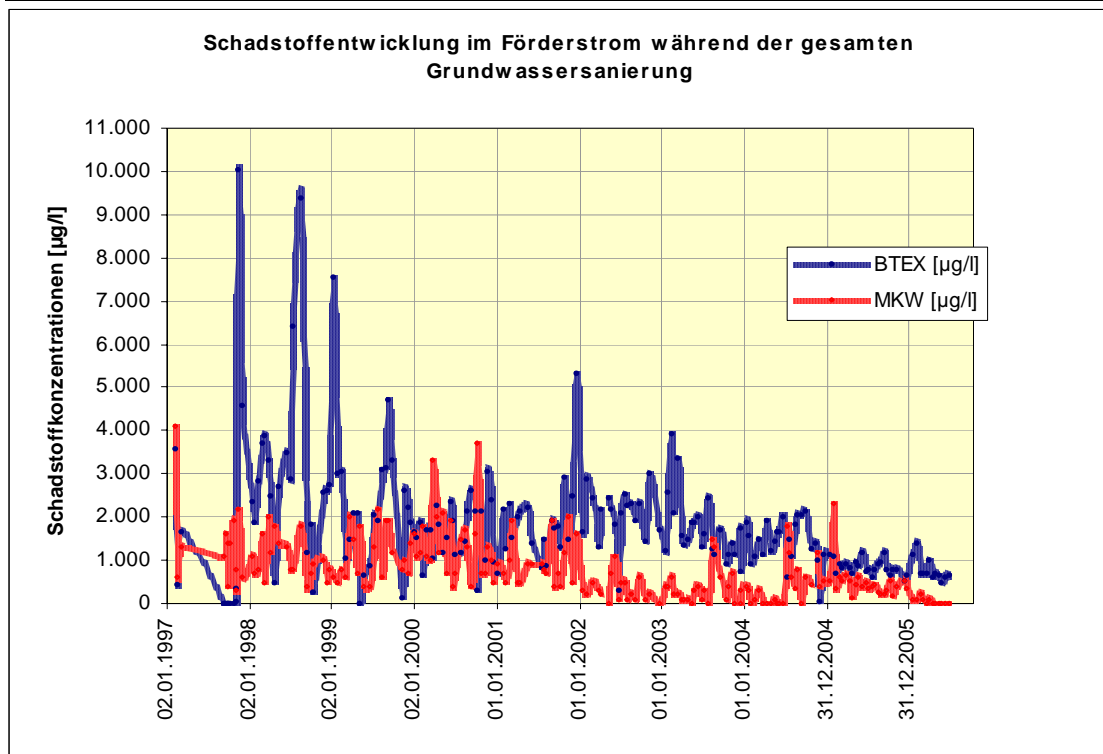


Abb.12: Schadstoffkonzentrationen im Verlauf der Sanierung des MKW/BTEX-Schadens nach Abb. 8, Sanierungszielwert 50 mg/l BTEX

Die Konzentration im Anlagenzulauf unterliegt während der gesamten Sanierungszeit sehr großen Schwankungen, wie Abb. 12 zeigt. Die BTEX-Konzentration liegt noch im 8. Sanierungsjahr um 1.000 µg/l und damit weit oberhalb des Sanierungszielwerts. Es erfolgte bisher keine begleitende Bodensanierung, obwohl in der ungesättigten Zone noch erhebliche Schadstoffkonzentrationen vorliegen. Eine Entscheidung zur Durchführung der Bodensanierung durch Auskofferung der Quelle wurde jedoch nach dem 6. Betriebsjahr getroffen (s. Abb. 11). Die Weiterführung der Maßnahme unter gegebenen Bedingungen war aus Gefahrenabwehrgründen jedoch erforderlich.

Fall ARC 8: LHKW-Schaden im Anstrom eines Wasserwerks

In der nachfolgenden Darstellung sind die spezifischen Kosten einer LHKW- Sanierung dargestellt, welche seit fast 20 Jahren betrieben wird (Abb. 13). Die Optimierung des Förderregimes durch Zuschaltung eines weiteren Brunnens im Jahr 2002 hat zwar Effekte gezeigt, das Sanierungsziel konnte jedoch immer noch nicht erreicht werden.

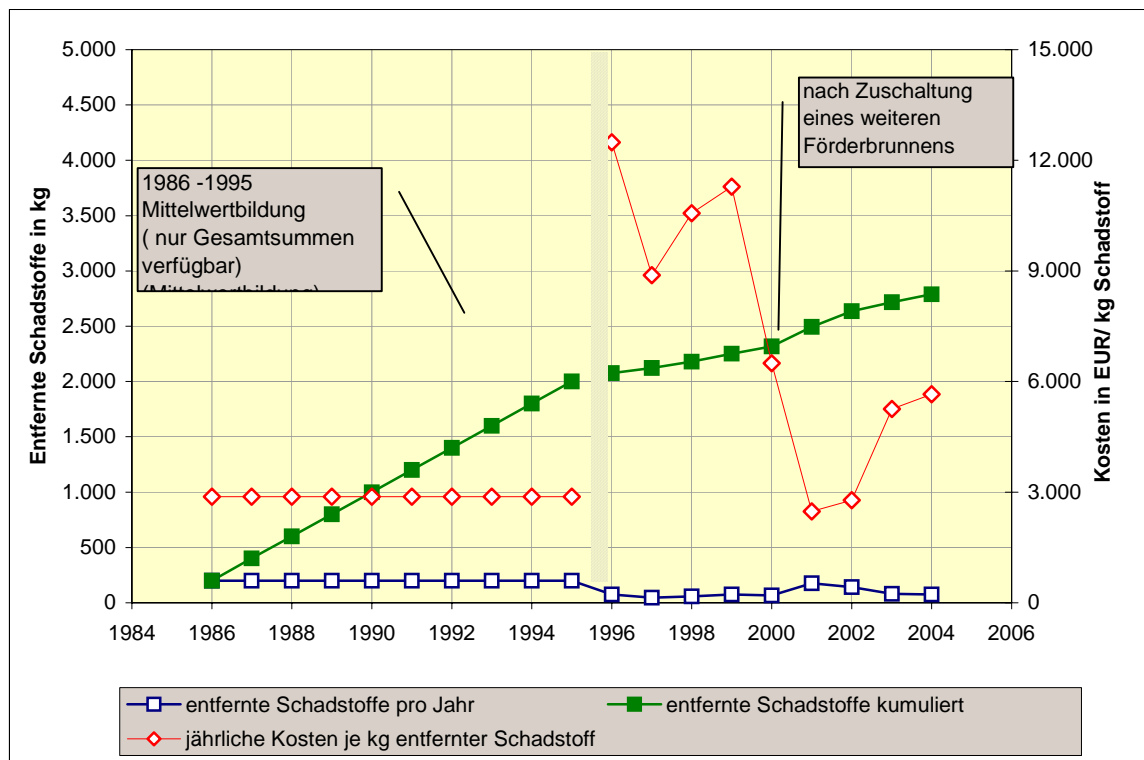


Abb. 13: Entwicklung der spezifischen Kosten eines langfristigen LHKW-Sanierungsfalls, Gesamtbetriebskosten ca. 11 Mio EUR

Die Ganglinien in den Förderbrunnen zeigen zwar z.T. bereits Unterschreitungen des Sanierungszielwerts von 20 µg/l (s. Abb. 14), insgesamt konnte die Maßnahme jedoch noch nicht abgeschlossen werden.

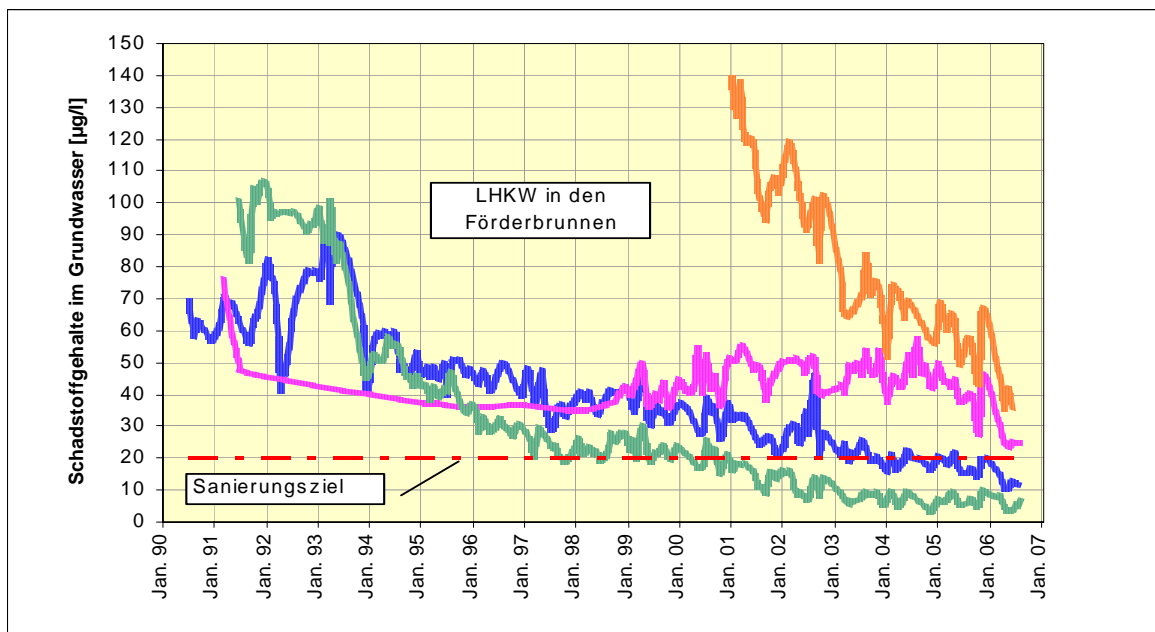


Abb. 14: Entwicklung der LHKW-Konzentrationen in 4 Förderbrunnen

Eine weitere Ursache für hohe Effizienzverluste im Verlauf der Sanierung liegt in Defiziten der Datenlage bei Sanierungsbeginn. Beispielhaft sind hier die Fälle Fall ARC 5– BTEX-Schaden / Gewerbebetrieb Farben/Lacke und Fall ARC 11 – LHKW-Schaden / Metallverarbeitung, genannt.

Fall ARC 5– BTEX-Schaden / Gewerbebetrieb Farben/Lacke

Die Sanierung erfolgte von 2000 – 2003 mittels Pump & Treat und Phasenabschöpfung. Es erfolgte ein vorläufiger Abbruch des Pump & Treat- Verfahrens wegen zu geringem Sanierungseffekt (s. Abb.15 u. Abb.16).

Vorerst weiterbetrieben wird nur die Phasenabschöpfung. Für die weitere Sanierung wurden zunächst ergänzende Untersuchungen aufgenommen, um Kenntnisdefizite zu beheben und Alternativen bzw. die Unterstützung von Pump & Treat zu prüfen.

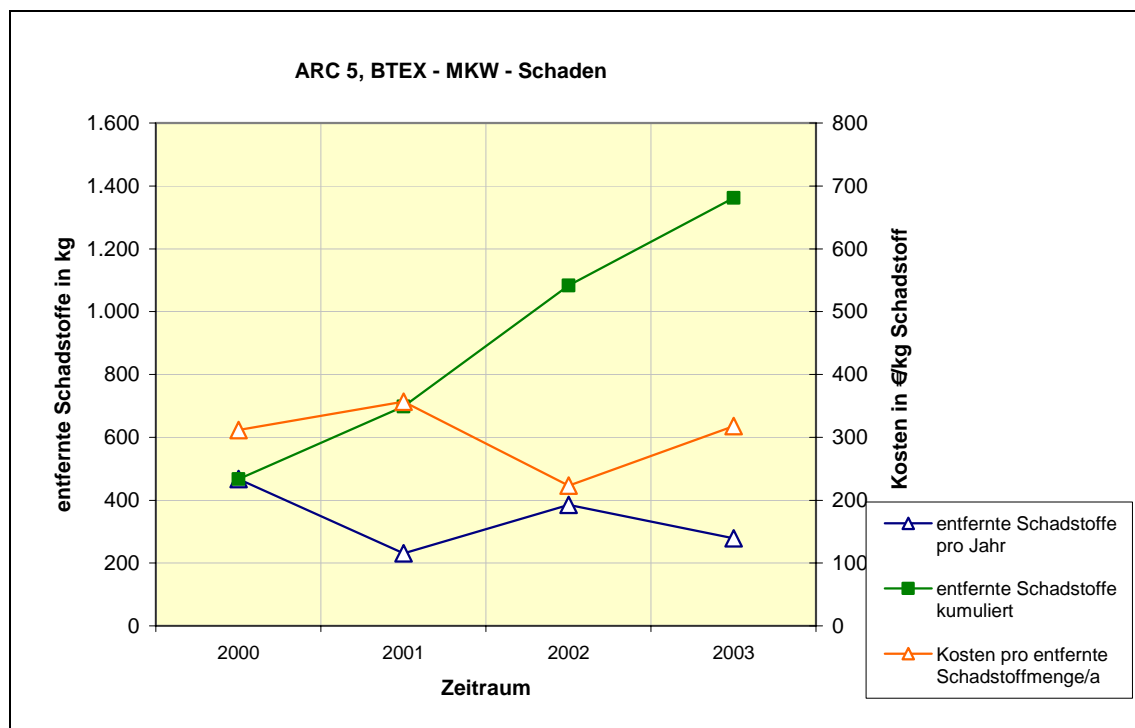


Abb. 15: Effizienz Fall ARC 5, mittlere spezifische Kosten

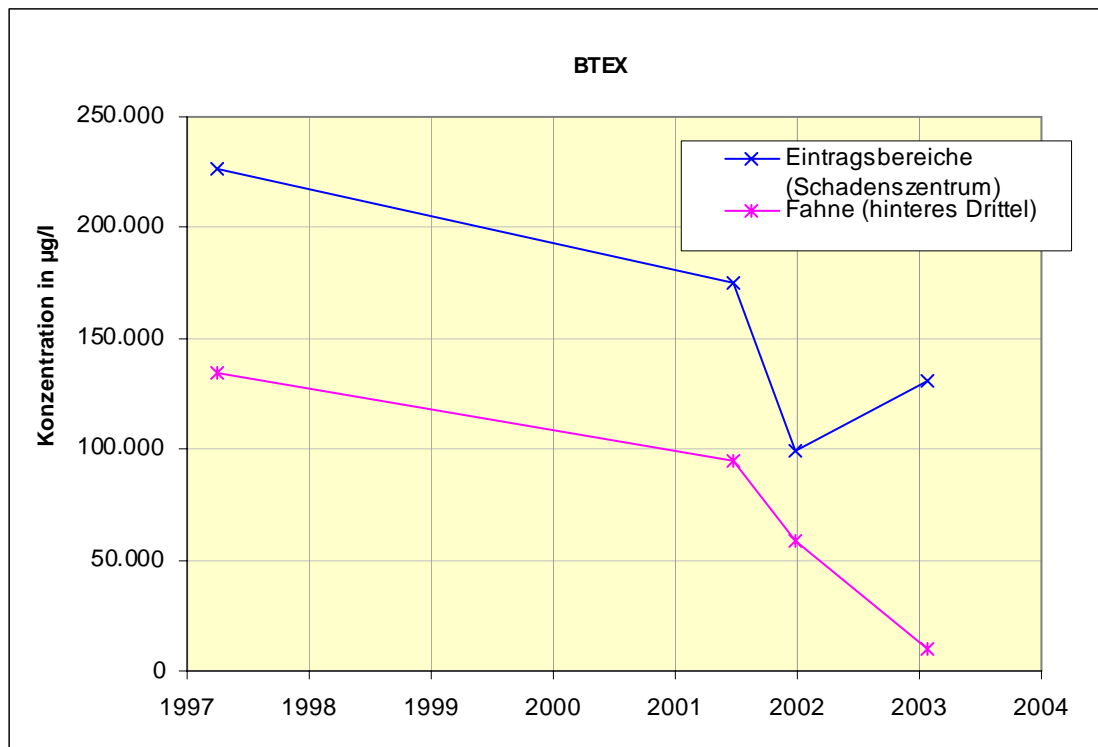


Abb.16: Konzentrationsverlauf Fall ARC 5, Sanierungseffekt bisher gering, Erreichen des Sanierungsziels (120 µg/l BTEX) noch nicht erkennbar

Fall ARC 11 – LHKW-Schaden / Metallverarbeitung

Die Sanierung mittels Pump & Treat erfolgte im Zeitraum 1998-2001 und wurde wegen Schadensverlagerung aus dem Eintragsbereich in Richtung Fahne (s. Abb. 17) und den 2.GWL abgebrochen. Es waren weitere Untersuchungen zur Beseitigung der Kenntnisdefizite der hydrogeologischen Verhältnisse erforderlich.

Vorerst wurde die Beobachtung der Entwicklung des Schadens unter den sich ändernden Verhältnissen durch die in der Region wirksame Tagebauflutung festgelegt. Die spezifischen Betriebskosten der lagen innerhalb der verhältnismäßig kurzen Betriebsdauer noch in einem relativ günstigen Bereich.

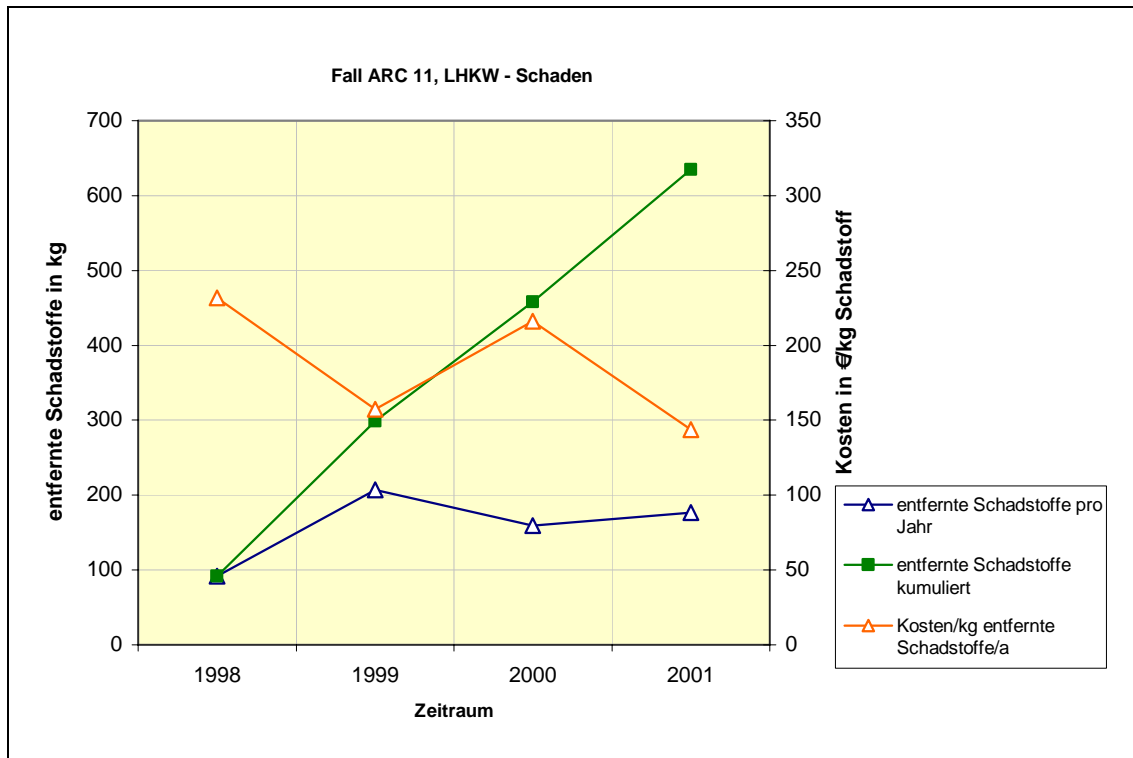


Abb. 17: Effizienz Fall ARC 11, LHKW-Schaden, Abbruch

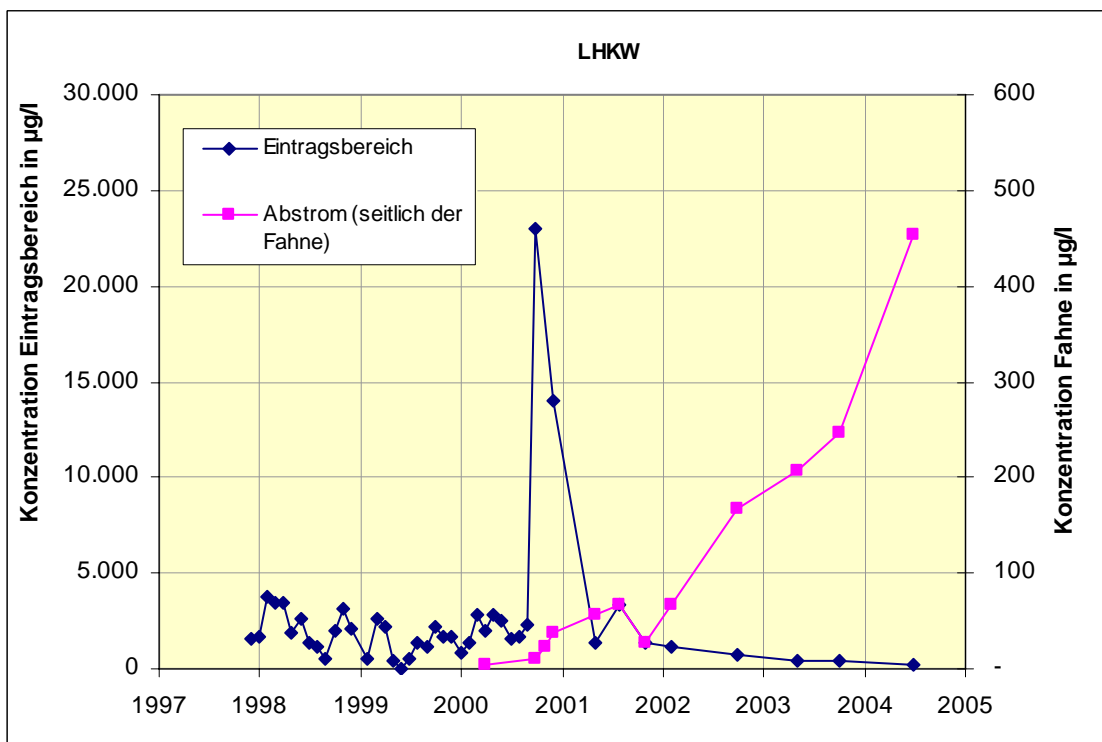


Abb. 18: Fall ARC 11 – LHKW, Konzentrationsverlauf (Schadensverlagerung)

2.4.4 Dokumentation der untersuchten Sanierungsfälle

Dokumentation der Entscheidungsphase

Als Maß für die Bewertung der Dokumentation in der Entscheidungsphase wird die Anzahl der im Sanierungsvorfeld erstellten Gutachten/Planungsunterlagen herangezogen, wenngleich die reine Anzahl nicht für den Inhalt der Unterlagen steht. Zusätzlich werden hier die Angaben des Ergänzungsfragebogens mit gewertet.

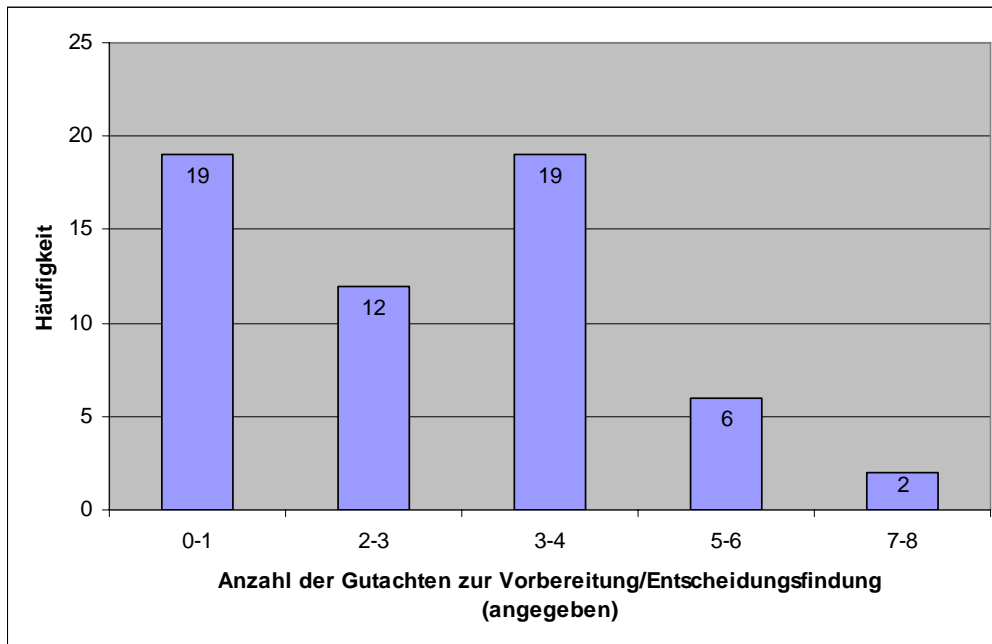


Abb. 19: Anzahl der Gutachten zur Entscheidungsfindung (aufgenommen in GWKON)

Es ist festzustellen, dass etwa bei einem Drittel der recherchierten Fälle entweder kein oder höchstens eine Unterlage in Vorbereitung der Sanierung benannt wurde. Eine gestufte Vorgehensweise, seit Ende der 90er Jahre der Regelfall, welche auf eine ausreichende Schadensbeschreibung und Ableitung des Handlungsbedarfs hindeutet, ist bei diesen Fällen nicht erkennbar. Bei den 62 betrachteten Fällen ist diese insgesamt nur bei 36 Fällen dokumentiert. Dieser Sachverhalt untersetzt die bei vielen Fällen im Verlauf der Sanierung festgestellten Defizite in der Kenntnis des Schadensfalls hinsichtlich der Schadstoffausbreitung, der hydrogeologischen und hydraulischen Verhältnisse und der Transportprozesse.

Dokumentation der Überwachung

Die in der Datenbank erfassten Messdaten bestätigen, dass die Dichte der Überwachungsmessungen fallspezifisch stark variiert. Eine Korrelation zum Verlauf der Sanierungsmaßnahmen ist jedoch nicht ableitbar. Es liegen Fälle mit hoher Überwachungsdatendichte vor, ohne dass durch diese im Verlauf der Sanierung entsprechend intensive Optimierungen dokumentiert sind.

2.5 Analyse des Entscheidungsprozesses der untersuchten Pump and Treat-Fälle

Die Auswertung der als Quelldaten in die Datenbank GWKON eingepflegten Unterlagen zeigt, dass zumindest recherchierbar dokumentierte Unterlagen in sehr heterogenem Umfang vorliegen. Während bei den jüngeren Sanierungsfällen die stufenweise Bearbeitung von der orientierenden Erkundung, der Detailuntersuchung sowie der Sanierungsuntersuchung erkennbar ist, sind bei den älteren Sanierungsfällen vergleichsweise wenig differenzierte Angaben vorhanden.

Als wesentliches Kriterium für die Qualität der Sanierungsvorbereitung hinsichtlich der Beschreibung des Schadensbilds als Grundlage für die Ableitung des Handlungsbedarfs und die Dimensionierung der Sanierungsmaßnahme wurden als Zusatzkriterium „gesichertes hydrogeologisches Standortmodell“ und „hydraulische bzw. Schadstofftransportmodellierung“ abgefragt. Während z.B. bei nur 13 Fällen eine hydraulische Modellierung belegt wurde, war in 22 Fällen die Fragestellung mit „nein“ belegt, für die restlichen Fälle konnte keine Angabe gemacht werden. Die Fragestellung nach modellgestützter Optimierung im Verlauf der Sanierung wurde nur 6 x positiv beantwortet.

Die Anzahl positiver und negativer Antworten ist nachfolgend zusammengestellt

Frage	Fälle mit positiver Antwort (ja)	Fälle mit negativer Antwort (nein)
– hydraulische Modellierung durchgeführt ?	13	22
– hydrogeologisches Modell vorhanden ?	21	17
– Schadstofftransportmodellierung durchgeführt?	4	28
– Fortschreibung Modell während Sanierung ?	5	26
– modellgestützte Planung ?	10	21
– modellgestützte Optimierung im Verlauf ?	6	25

Aus dem Kontext der recherchierten Unterlagen und Rückfragen bei den Bearbeitern zeigt sich jedoch auch, dass subjektive Kriterien bei der Entscheidungsfindung eine große Rolle spielen, insbesondere dann, wenn die Zuständigkeiten so vielschichtig sind wie z.B. bei den Altlastenfreistellungsfällen. In mindestens zwei Fällen wurde im Sanierungsverlauf der Ansatz falscher Randbedingungen festgestellt.

Die Entscheidungskriterien für PUMP AND TREAT wurden ebenfalls abgefragt:

<u>Frage</u>	Fälle mit positiver Antwort	Fälle mit negativer Antwort
– technische Entscheidungskriterien	29	2
– geprüfte Varianten	16	6
– monetäre und nichtmonetäre Randbedingungen	22	6
– Angabe Begründung P&T	7 konkrete Angaben	
– Entscheidungszeitpunkt vor 1990	6 Fälle	
– Entscheidungszeitpunkt 1991 - 2000	38 Fälle	
– Entscheidungszeitpunkt nach 2000	6 Fälle	
	(Rest keine Angabe)	

Wenn berücksichtigt wird, dass die meisten der betrachteten Fälle weit vor dem Jahr 2000 entschieden wurden, zeigt sich erneut, dass die Dokumentation der Entscheidungsfindung von besonderer Bedeutung ist. Da in nur 7 Fällen die konkrete Begründung für die Entscheidung zu Gunsten von Pump and Treat ohne weiteres nachvollzogen werden konnte, erschwert dies bei länger laufenden Pump and Treat - Sanierungen die Überprüfung der Sanierungsansätze und im Weiteren den Soll-Ist-Abgleich sowie das Erkennen von Optimierungspotentialen bzw. zu behebbenden Defiziten (s. Anl. 2).

2.6 Angewendete Sanierungszielwerte

Sanierungsziele können sowohl als verbale Formulierung als auch als absoluter Zielwert definiert sein (s. auch Kapitel 3.1). Für die angegebenen Leitschadstoffe wurden in einigen der recherchierten Fälle verbale Sanierungsziele formuliert wie z.B. „Vermeidung der Verlagerung der Schadstoffe in den 2. GWL“. In der Mehrheit waren jedoch Sanierungszielwerte in Form einer Konzentration bzw. fallspezifisch die Kombinationen mehrerer Konzentrationen vorgegeben.

Die festgelegten Absolutwerte variieren schadstoffabhängig. In den nachfolgenden Histogrammen sind die Sanierungszielwerte der Fälle mit LHKW, Benzol/BTEX sowie MKW/PAK als Leitschadstoffe dargestellt.

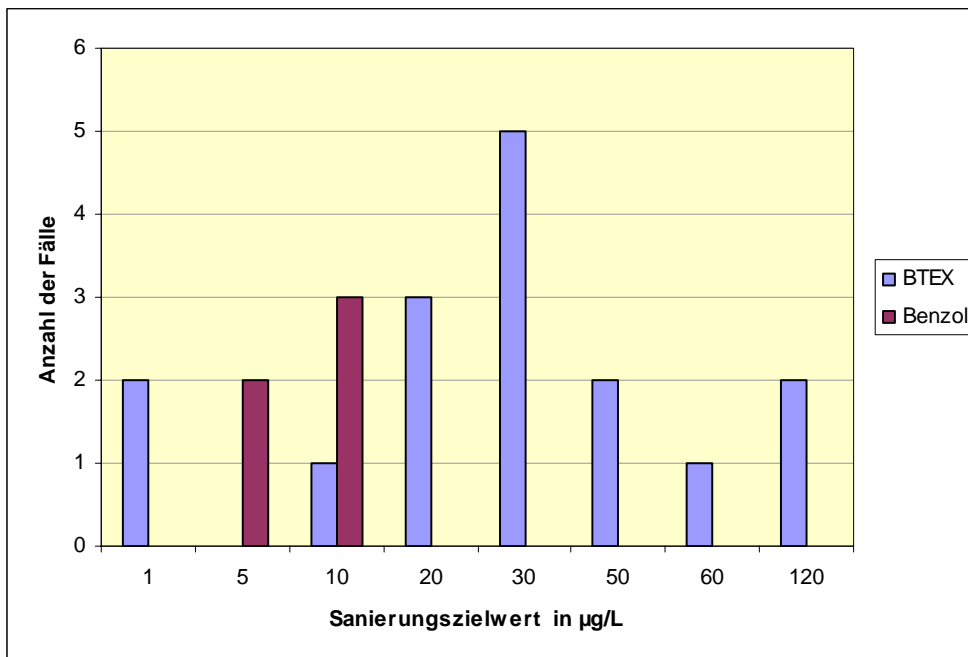


Abb. 20: Sanierungszielwertverteilung der recherchierten Fälle für Benzol/BTEX

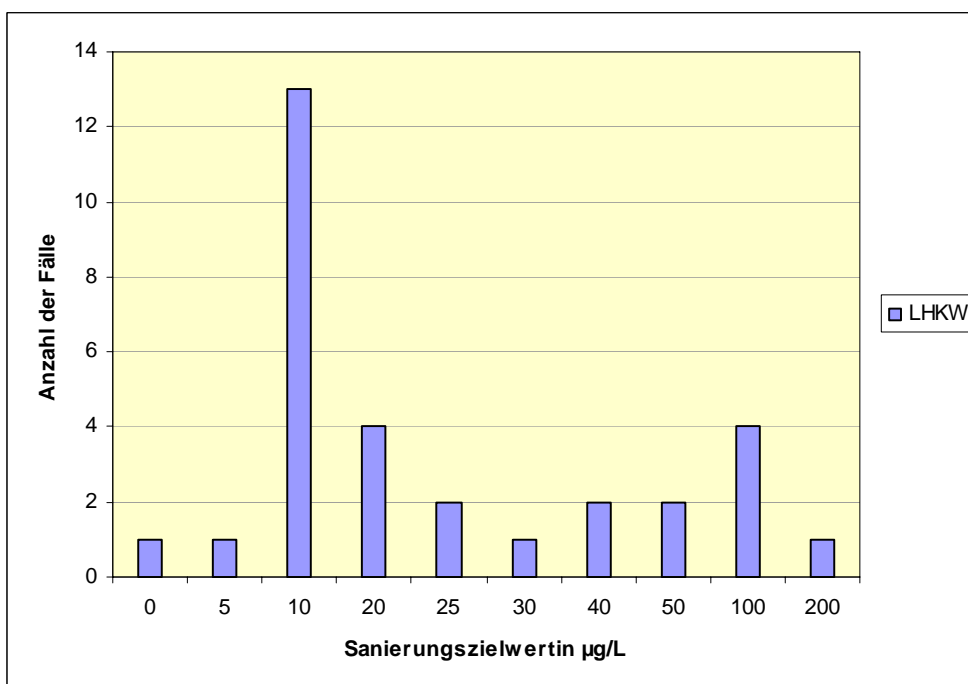


Abb. 21: Sanierungszielwertverteilung der recherchierten Fälle für LHKW

Aus dem Vergleich der untersuchten Fälle geht hervor, dass der häufigste Sanierungszielwert (Modalwert) bei den LHKW mit 10 µg/l deutlich unterhalb des Modalwerts für Benzol/BTEX mit 30 µg/l liegt. Diese Relation ist vergleichbar mit derjenigen der früheren LAWA-Werte 1/1994 (obere Prüfwerte) für diese Parameter:

LHKW: Prüfwert 2-10 µg/l

BTEX: Prüfwert 10-30 µg/l
 Benzol: Prüfwert 1-3 µg/l

Der Vergleich mit den im Sächsischen Altlastenkataster (LfUG, SALKA 1999/2000) registrierten sächsischen Fällen zeigt bei Benzol/BTEX ebenfalls als häufigsten angewendeten Sanierungszielwert 30µg/l. Für die LHKW-Fälle ergibt sich für die in SALKA gespeicherten Fälle jedoch ein deutlich höherer Wert von 50 µg/l.

Der Sanierungszielwert für MKW ist am häufigsten identisch mit der Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens nach dem früher angewendeten Verfahren der IR-Absorptionsmessung als summarische Bestimmung in einem definierten Wellenlängenbereich (DIN H18). Der Wert ist auch hier identisch mit dem oberen Prüfwert nach LAWA 1/94.

Der Modalwert für Sanierungszielwerte bei PAK-Schäden ist identisch mit dem Maßnahmewert LAWA 1/1994 von 2 µg/l (ohne Naphtalin). Der Sanierungszielwert für Phenole wurde mit 100 µg/l deutlich oberhalb der LAWA- Werte 1/1994 festgelegt, gleiches gilt für die Cr(VI)-Sanierungsfälle.

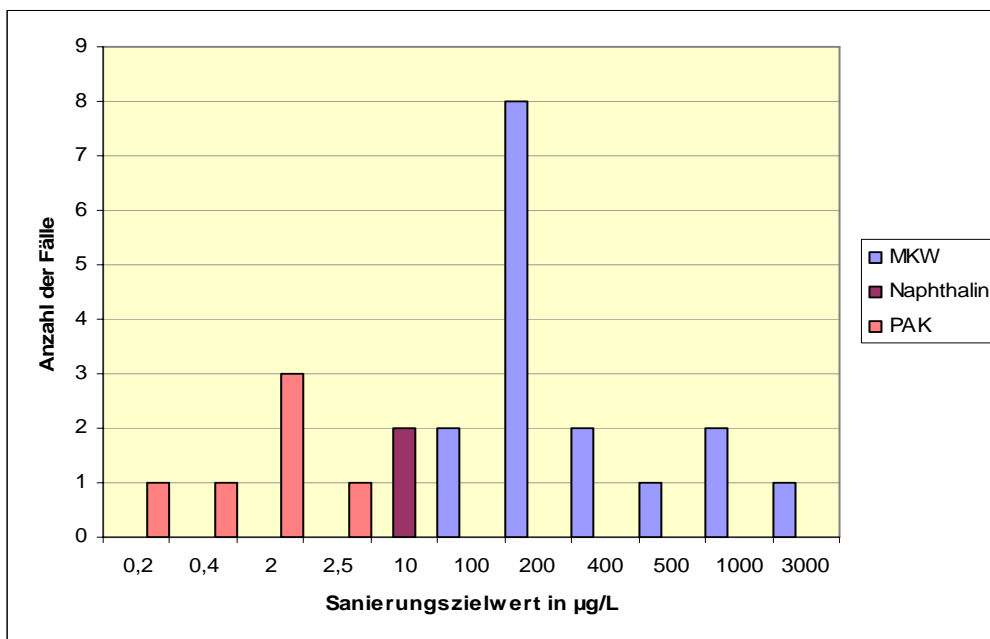


Abb. 22: Sanierungszielwerte der recherchierten Fälle für MKW/PAK

Die Ableitung der Sanierungsziele nach 1994 ist häufig angelehnt an die Prüf- und Maßnahmewerte LAWA 1/94. Bei Festlegung vor dieser Zeit wurden offensichtlich auch die damaligen länderspezifischen Listen verwendet. Insgesamt sind die Ableitungen der Sanierungszielwerte entweder gar nicht oder nur mit hohem Unterlagenrechercheaufwand nachzuvollziehen.

3 Entscheidungshilfe Grundwassersanierung

3.1 Entscheidungsfindung im Vorfeld von Sanierungsmaßnahmen

3.1.1 Empfehlungen für die Detailuntersuchung und Sanierungsuntersuchung Grundwasser

Zielstellung der Detailuntersuchung ist die abschließende Gefährdungsabschätzung zum betrachteten Objekt mit der Schlussfolgerung zum weiteren Handlungsbedarf. Ausgehend von einer möglichst umfassenden Beschreibung der Historie des Falles und den Ergebnissen vorangegangener Untersuchungen ist der gesamte Umfang des Schadens zu ermitteln und abzugrenzen. Für Grundwasserschäden sollte als einheitliche Beurteilungsgrenze für die räumliche Abgrenzung nach Möglichkeit die Geringfügigkeitsschwelle verwendet werden.

Als Grundlage für eine abschließende Bewertung der Gefahrenlage sind folgende Aussagen zu treffen:

- Lokalisierung / Schadstoffinventar der Schadensquelle
- Lokalisierung / Ausbreitung / Schadstoffinventar der Fahne (horizontal/vertikal)
- Beurteilung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse
- Ermittlung von Rezeptoren und Schutzobjekten

Aus der Begleitung von Praxisfällen ist erkennbar, dass diese Anforderungen oft unvollständig berücksichtigt wurden und daraus Lücken für das Schadensbild resultieren, die später nicht oder nur mit wesentlich größerem Aufwand geschlossen werden können.

Für die Abgrenzung des Schadens stehen neben den Standarduntersuchungen eine Reihe von innovativen Untersuchungsmethoden zur Verfügung, welche relativ kostengünstig zu erheblich besseren Datendichten als die klassische Grundwasserprobenahme aus entsprechenden Messstellen führen. Diese sind z.B.:

- Grundwasserprobenahme mit direct-Push-Sondierungen, ggf. BAT-Probenahmetechnik
- ROST-Sondierungen (ROST - **R**apid **O**ptical **S**creening **T**ool, LIF - Laserinduzierte Fluoreszenz)
- MIP-Sondierungen (Membran Interface Sonde mit FID-, PID- und DELCD-Detektor)
- Radonmessungen in der Bodenluft zur Phasenlokalisierung

Besonders hinzuweisen ist auf das Methodenspektrum zur Untersuchung von NA-Prozessen im Grundwasser, welches im Rahmen des Forschungsverbunds KORA entwickelt bzw. weiterentwickelt wurde. Eine praktikable Zusammenstellung ist ebenfalls in LfW (2004) enthalten.

Die Sanierungsuntersuchung hat die Zielstellung, eine zweckmäßige und verhältnismäßige Sanierungslö-

sung auf der Grundlage einer gesicherten und belastbaren Datengrundlage zu ermitteln. Die Vorgehensweise der Altlastenmethodik entsprechend dem Handbuch 8, Sanierungsuntersuchung (LfUG (1999)) ist entsprechend Fallspezifik abzuarbeiten.

Besonderes Augenmerk bei erforderlichlichem Sanierungsbedarf für das Grundwasser ist dabei auf die Prüfung der Ausgangsdatenlage für die Sanierungsuntersuchung und deren Belastbarkeit zu richten. Dies ist umso wichtiger, da nach der Entscheidung über die Notwendigkeit einer Sicherung- oder Sanierung in der eigentlichen Sanierungsuntersuchung bereits schrittweise die Grundlagen für das umzusetzende Grundwassersanierungskonzept geschaffen werden sollen. Festgestellte Erkundungslücken und Untersuchungsdefizite sind zu schließen. Die Prüfung soll sich an folgenden Aspekten orientieren:

- ausreichend sichere Beschreibung von Quellbereich und Schadstoffausbreitung in der Fahne (Abgrenzung, Schadstoffinventar), Klärung der räumlichen Verteilungen erforderlichenfalls auch mit 3D-Visualisierungsverfahren
- belastbare hydrogeologische und hydrodynamische Beschreibung der Strömungs- und ggf. der Schadstofftransportprozesse
- Berücksichtigung der natürlichen Schadstoffminderungsprozesse

In Abhängigkeit von der Spezifik des Sanierungsfalls wird an dieser Stelle die Einführung der Sanierungsphasenbetrachtung nach dem Sanierungsphasenmodell gem. Abschnitt 2.1 empfohlen.

Die ergänzenden Standortuntersuchungen im Rahmen der Sanierungsuntersuchung sollten sich jedoch nicht ausschließlich auf die Beseitigung von Kenntnisdefiziten zum Grundwasserschaden selbst beschränken, sondern auch auf Untersuchungen zur Eignung von Sanierungsverfahren ausgerichtet sein. Dies können je nach Komplexität des Schadensfalles sowohl Laborversuche als auch halbtechnische Versuche bis hin zu umfangreichen Feldversuchen sein.

Diese Ergebnisse münden nach entsprechender Vorauswahl grundsätzlich geeigneter Verfahren in der fachlichen und Kosten-Nutzen-Bewertung standortspezifischer Sanierungsszenarien, woraus der gutachterliche Sanierungsvorschlag bzw. das Sanierungskonzeptes resultieren.

Die Arbeitsschritte der Ermittlung geeigneter Sanierungsverfahren, ihrer fachlichen und monetären Bewertung erfolgt im Abschnitt 4.2.2.

3.1.2 Sanierungsziele - Definitionen

Sanierungsziele bzw. Sanierungszielwerte bestimmen in entscheidendem Maße Ablauf, Umfang, Kosten, Zeitdauer und Effizienz des ausgewählten Grundwassersanierungsverfahrens. Es sollten keine Grundwassersanierungsmaßnahmen ohne vorhergehende eindeutig festgelegte Zielbestim-

mungen durchgeführt werden. Diese Festlegungen müssen nachvollziehbar begründet und verhältnismäßig sein.

Sanierungsziele unterliegen in den einzelnen Phasen der Altlastenbehandlung einem Stufenprozess, welcher der stufenweisen gutachterlichen Bearbeitung und der schrittweisen Einbeziehung der zuständigen Behörden entspricht:

Vorschlag von vorläufigen Sanierungszielen



Entscheidungsprozess



Konkretisierung der Sanierungsziele

Überwiegend erfolgt auf dieser Grundlage die behördliche Anordnung, in einzelnen Fällen wird ein öffentlich-rechtlicher Vertrag abgeschlossen. Dies hängt von der Größe und Komplexität des kontaminierten Standorts sowie den rechtlichen Konstellationen ab. In einzelnen Fällen wird auch nur das Sanierungskonzept behördlich bestätigt.

Grundsätzlich sollte zwischen **Sanierungszielen** und **Sanierungszielwerten** unterschieden werden.

Sanierungsziele	<p>Vor allem verbal begründete Maßnahmen- und Schutzziele sowie quantitative Festlegungen zu Randbedingungen des Anlagenbetriebes bzw. der zu erreichenden Zielgrößen.</p> <ul style="list-style-type: none"> • den Sanierungsentscheid und – umfang bestimmende Ziele • verbal formulierte Anforderungen an die Grundwasserbehandlung, z.B. Prozentuale Angaben zur Abreinigung im Vergleich mit der Ausgangssituation, Vorgabe von Fördermengen, Vorgabe von Reinigungszeiträumen u. ä., • je Schadstoff festlegte Ziele (mit Festlegungszeitpunkt und verbaler Erläuterung)
Sanierungszielwerte	<p>Sanierungszielwerte regeln qualitativ und quantitativ konkret zu erreichende Konzentrations- oder Frachtwerte einer Grundwasserbehandlungsmaßnahme. Dazu werden genutzt:</p> <ul style="list-style-type: none"> • gesetzliche Grundlagen und Anforderungen nach BBodSchG / BBodSchV (Prüf- und Maßnahmenwerte), • untergesetzliche Empfehlungen (beispielsweise LAWA-Prüf- und Maßnahmenwerte, Geringfügigkeitsschwellen), • in Abhängigkeit vom jeweiligen Schadensfall und der anordnenden Behörde oft in Analogie zu weiteren Fällen empirisch festgelegte Sanierungszielwerte („Praxiswerte“), • rechnerische Ableitung standortspezifischer Sanierungszielwerte (beispielsweise nach der Methodik DU),

Weitere Kategorien werden je nach Art und Umfang des Einzelfalles angewendet:

Zonierte Sanierungsziele	Sanierungszielwerte für definierte Sanierungszonen (mit Festlegungszeitpunkt). Bei komplexen Schadensfällen können für einzelne Sanierungszonen unterschiedliche Vorgaben als Ziele oder Zielwerte erforderlich werden. Die Kriterien zur Festlegung von Sanierungszonen – siehe SMUL/LfUG (1999) – sind dabei zu beachten.
Technische Sanierungsziele	Fall- und anlagenspezifische Zielgrößen: <ul style="list-style-type: none"> • definierte Fördermengen • Förderzeiten • Zu erreichende Absenkungen • Einzuhaltende oder zu erreichende Anlagenverfügbarkeit (jeweils mit Festlegungszeitpunkt)
Reinigungsendwerte	Die am Ausgang der Reinigungsanlage zu erreichenden Konzentrationen und Mengen, die die Beurteilung der technologischen Effizienz des gewählten Verfahrens ermöglichen und die Vorbedingung für die Einleitung darstellen.
Einleitwerte	Konkrete Konzentrations- und / oder Mengenvorgaben nach der Abreinigung als Grenzbedingung für die Einleitung: <ul style="list-style-type: none"> • in eine Kanalisation, • in ein Oberflächengewässer oder • zur Reinfiltration in den Grundwasserleiter <p>Die Einleitwerte werden in der Regel in der wasserrechtlichen Erlaubnis von der zuständigen Behörde festgelegt oder durch den zuständigen Abwasserzweckverband vorgegeben.</p>

Vorläufige Sanierungsziele werden im Rahmen der Detailuntersuchung als Maß der duldbaren Restgefährdung/Restschädigung unter Abwägung der relevanten Randbedingungen einzelfallspezifisch festgelegt - SMUL/LfUG (1999). Sie dürfen die objektkonkreten Gefahrenabwehrmaßnahmen nicht einschränken und daher keinen Bezug zu technischen Maßnahmen aufweisen. Sie sind Grundlage der Sanierungsuntersuchung.

Konkretisierte Sanierungsziele - nach SMUL/LfUG (1999) - In einem iterativen Prozess erfolgt innerhalb der Sanierungsuntersuchung unter Einschluss der jeweiligen standortspezifischen Gegebenheiten und der technischen Durchführbarkeit (verfahrensabhängig) eine Konkretisierung der Sanierungsziele, die nach Abstimmungen zwischen Verpflichtetem, Gutachter und zuständiger Behörde ihre Aufnahme in den Sanierungsvorschlag (Sanierungskonzept) finden.

Folgendes ist dabei zu berücksichtigen:

- Für den Wirkungspfad Boden – Grundwasser kann die Angabe einer Sickerwasserkonzentration im ungesättigten Bereich unterhalb der Altlast bzw. an der Kontaktstelle zwischen ungesättigter und ge-

sättigter Zone erfolgen.

- Für Sanierungsmaßnahmen im Grundwasser selbst wird der Sanierungszielwert direkt im Grundwasser festgelegt.

Prüf- und Festlegungsmaßstäbe

Sanierungsziele werden in der Regel unter Berücksichtigung oder Anwendung folgender Prüfmaßstäbe abgeleitet und festgelegt:

- BBodSchG v. 17.03.1998 mit Definition von Prüfwerten, Maßnahmenwerten, Vorsorgewerten
- BBodSchV vom 12.07.1999, Anhang 2 mit konkreten Stoffkonzentrationen als Prüfwerte (Sickerwasserprüfwerte) zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden - Grundwasser
- LAWA 1/1994 – Empfehlung für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden
- Freistaat Sachsen – Vorläufiger Rahmenerlass Altlasten / Grundwasser 27.06.2000
- LAWA 12/2004 – Ableitung von Geringfügigkeitsschwellen für das Grundwasser

Diese Maßstäbe bilden bis auf die gesetzlichen Vorgaben von BBodSchG / BBodSchV keinen verbindlichen Rahmen. Sie sollten daher nicht formal angewendet werden, sondern immer einzelfallbezogen und standortspezifisch umgesetzt werden. Eine formale Anwendung der o.g. Prüfmaßstäbe ohne entsprechende Begründung ist abzulehnen.

Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) als Sanierungszielwerte?

Eine besondere Beachtung kommt den Geringfügigkeitsschwellenwerten (GFS) zu. Unter Beachtung, dass Grundwassersanierungen in der Regel als Nachsorgemaßnahmen durchgeführt werden (die Behörde dagegen vor allem vorsorgend tätig ist), ist die Anwendung und Umsetzung von GFS als Sanierungszielwerte sehr kritisch zu betrachten.

Nach neuerer Literatur, z.B. GALLE-BÜRGELE et.al. (2006) ist dabei folgendes zu berücksichtigen:

1. Nach dem LAWA-Bericht – LAWA (2004) – dienen die GFS als Grenze einer schädlichen Veränderung der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers. Danach wird die GFS definiert als *„Konzentration, bei der trotz einer Erhöhung der Stoffgehalte gegenüber regionalen Hintergrundwerten keine relevanten ökotoxischen Wirkungen auftreten und die Anforderungen der Trinkwasserverordnung oder entsprechend abgeleiteter Werte eingehalten werden können.“*
2. Der LAWA-Bericht enthält keine Aussagen zur Funktion der GFS bei durch Altlasten oder schädliche Bodenveränderungen verursachten Grundwasserverunreinigungen.
3. GFS besitzen keine Rechtsnormqualität. Sie können daher in den Fällen, wo gesetzliche Prüfwerte

nach BBodSchV vorhanden sind, nicht als Prüfwerte angewendet werden. Wenn dies durch Behörden dennoch gefordert wird, ist das rechtswidrig.

4. Auch wenn Dekontaminationsmaßnahmen im Einzelfall gerechtfertigt sind, können die GFS nicht als Sanierungszielwerte herangezogen werden.
5. Behörden dürfen keine Sanierungszielwerte für Grundwasser festlegen, die unter den Prüfwerten der BBodSchV liegen.
6. Darüber hinaus sei grundsätzlich abzulehnen, sich an den Prüfwerten der BBodSchV bzw. den GFS (als Regelungen zum Gefahrenverdacht) zu orientieren.
7. Entscheidend für die Festlegung von Sanierungszielwerten im Grundwasser sind nicht die Prüf- oder Geringfügigkeitsschwellenwerte, sondern die konkrete Gefahrenbeurteilung im Einzelfall.
8. Auch in der fachlichen Praxis wird die Anwendung von GFS als Sanierungszielwert als nicht ziel führend betrachtet, da diese bei Grundwassersanierungen kaum erreicht werden können.

3.1.3 Grundsätze und Anforderungen an die Erreichbarkeit von Sanierungszielen

Folgende Anforderungen an Sanierungsziele und –zielwerte bestimmen regelmäßig deren Erreichbarkeit bei Grundwassersanierungsmaßnahmen:

Gefahren- und Schadensbezug

Die nachgewiesene Gefahr bzw. der nachgewiesene Schaden müssen beseitigt oder auf ein akzeptables Maß reduziert werden.

Nutzungsbezug

Die Sanierungsziele müssen auf die vorhandene und / oder planungsrechtlich zulässige Nutzung des Schutzgutes abgestellt sein. Probleme bezüglich Durchführung und Finanzierung von Maßnahmen treten immer dann auf, wenn durch Sanierungspflichtige oder Behörden eine höherwertige (sensiblere) Nutzung angestrebt wird.

Eignung der Zieldefinition

Die Unterschreitung der Gefahrenschwellen muss sicherstellen, dass eine dauerhafte Wirksamkeit und Umweltverträglichkeit im Rahmen der durchgeführten Sanierungsmaßnahme gewährleistet werden kann.

Die Zieldefinition ist nur dann geeignet, wenn sie mit angemessenen Maßnahmen erreichbar ist.

Berücksichtigung der Hintergrundbelastung (HGB)

Sanierungsziele müssen die für den Einzelfall jeweils aus dem Umfeld bereits vorhandene Hintergrundbelastung (HGB) berücksichtigen. Die Festlegung von Zielwerten unterhalb der HGB ist nicht sinnvoll und deshalb abzulehnen.

Ortsbezug

Sanierungsziele müssen verfahrensbezogen für einen konkreten Geltungsort bestimmt werden. Damit ist nicht nur der Einzelfall an sich gemeint, sondern als Geltungsort die für den Fall maßgebenden Prüforte. Diese können beispielsweise sein: der Schadherd selbst, der Abstrombereich, der Rand der Schadstofffahne, die Grundstücksgrenze. Prüforte sind zur besseren Kontrollierbarkeit mit Bilanzschnittlinien in Übereinstimmung zu bringen.

Zeitbezug

Sanierungsziele sind mit einem eindeutigen Zeitbezug zu versehen, der ebenfalls standort- und verfahrensbezogen abzuleiten ist und Bestandteil der regelmäßigen Verhältnismäßigkeitsüberprüfung sein muss.

Ermessen im Einzelfall

Die Durchsetzung beispielsweise einer Sanierungsanordnung liegt regelmäßig im Ermessen der zuständigen Behörde. Diese hat ein Entschließungs- und Auswahlermessen. Damit liegt im Ermessen der Behörde, ob sie die Pflichten des § 4 BBodSchG durchsetzt.

Sie ist dabei nicht verpflichtet, bestimmte Sanierungsziele vollständig zu verwirklichen. Die Auswahl steht wieder in ihrem Ermessen und damit auch das Sanierungsziel selbst.

Nochmals zusammengefasst bedeutet das für Sanierungsziele:

- einzelfallspezifische Ableitung
- grundsätzliche Erreichbarkeit
- Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit
- Rechtssicherheit
- grundsätzliche Genehmigungsfähigkeit
- Konformität mit gesetzlichen Vorgaben und vorhandenen Prüfmaßstäben

3.1.4 Beispiele für Sanierungsziele

Mit den Sanierungszielen für das Grundwasser wird eine vollständige oder teilweise Dekontamination festgeschrieben. Sanierungszielwerte sind nach den vorliegenden Praxiserfahrungen kaum vollständig und flächendeckend erreichbar. Das bedeutet, dass Restbelastungen verbleiben, für die ebenfalls eine Bewertung bezüglich ihrer Tolerierbarkeit bzw. sich daraus weiter ergebender Maßnahmen bereits bei der Formulierung von Sanierungszielen berücksichtigt werden sollte.

Neben konkreten prüfmaßstabsbezogen abgeleiteten Sanierungszielwerten ist es oft sinnvoll, verbale Ziele zu formulieren und diese im Verlauf des Sanierungsprozesses zu kontrollieren und ggf. im Zuge der Effizienz- und Verhältnismäßigkeitsbewertung anzupassen. Für verbal formulierte (z.T. sehr allgemeine) Sanierungsziele sollen nachfolgend einige Beispiele aufgeführt werden:

- Langfristig ist gemäß WRRL eine regressive, d.h. rückläufige Entwicklung der Schadstoffgehalte zu erreichen (Trendumkehr). Zudem ist das Verschlechterungsverbot bezüglich der Qualität des Grundwassers im Vergleich zum Ist-Zustand zu sichern.
- Die Schadstoffkonzentration im Grundwasser ist durch die Maßnahme auf ein solches Niveau einstellen, dass Qualitätsziele dauerhaft eingehalten werden können.
- Die Unterbrechung des Wirkungspfades Schädliche Bodenveränderung ⇒ Boden ⇒ Sickerwasser ⇒ Grundwasser hat durch geeignete Maßnahme zu erfolgen.
- Die Reduzierung des im Grundwasser orts- und zeitkonkret festgestellten Schadstoffpotenzials hat gegenüber dem Ausgangspotenzial um ...% auf ...% zu erfolgen.
- Die Schadstofffrachten über den Sickerwasserpfad sind unter Beachtung der Verhältnismäßigkeit auf ein minimal vertretbares Maß zu reduzieren.
- Die Reduzierung der Schadstofffracht im Grundwasser ist auf ein zulässiges Maß von ...kg Schadstoff/Jahr zu senken.
- Es hat ein ...maliger Austausch des kontaminierten Grundwasserkörpers zu erfolgen.
- Die Anlagenverfügbarkeit von ...% ist dauerhaft zu gewährleisten.
- Die standortspezifisch ausgewählte Anlage ist so zu konzipieren, dass die festgelegten Reinigungs- (Einleitwerte) sicher und dauerhaft erreicht und eingehalten werden können.
- Für verbleibende Restkontaminationen (nach Beendigung der aktiven Grundwasserentnahme) ist zu sichern, dass für das Grundwasser und sonstige im Abstrom liegende Schutzgüter dauerhaft keine Gefahren ausgehen.
- Restschäden in der ungesättigten Zone, die nachweislich Schadstoff emittieren, sind zu behandeln, wenn eine Gefahr für das Grundwasser dauerhaft nicht auszuschließen ist.
- Der Sanierungszielwert im Grundwasser darf nachweislich an einem bestimmten Prüfort nicht überschritten werden.
- Die Sanierungsverfahren müssen geeignet sein, die Boden- und Grundwasserverunreinigungen soweit zu beseitigen, dass künftig keine Störungen und Gefahren für die öffentliche Sicherheit und Ordnung bestehen.
- Die Ermittlung des geeigneten Sanierungsverfahrens hat sich an den festgelegten vorläufigen Sanierungszielwerten für Eluat und Grundwasser zu orientieren.
- Die Durchführung einer hydraulischen Sicherung / Sanierung muss eine geschlossene Kreislaufführung des Wassers sichern und ein seitliches Abdriften von Schadstoffen verhindern.
- Der Abstrom von kontaminiertem Grundwasser ist grundsätzlich zu verhindern.
- Die Maßnahme muss eine Rekontamination weiterer GW-Bereiche verhindern.

- Das Ziel der hydraulischen Sanierung ist dann erreicht, wenn im Grundwasser über die gesamte Teufe (oder konkret zu benennender Bereiche!) des Aquifers bestimmte Schadstoffkonzentrationen über einen bestimmten Zeitraum (konkret benennen!) nicht mehr überschritten werden.

Sanierungsziele bzw. Sanierungszielwerte bestimmen in entscheidendem Maße Ablauf, Umfang, Kosten, Zeitdauer und Effizienz des ausgewählten Grundwassersanierungsverfahrens. Es sollten keine Grundwassersanierungsmaßnahmen ohne vorhergehende eindeutig festgelegte Zielbestimmungen durchgeführt werden.

Diese Festlegungen müssen nachvollziehbar begründet und verhältnismäßig sein.

3.1.5 Variantenauswahl geeigneter Verfahren und -kombinationen

Grundsätzlich wird für die Variantenprüfung geeigneter und verhältnismäßiger Grundwassersanierungsmaßnahmen die methodische Herangehensweise, die mit dem Hdb.8, Sanierungsuntersuchungen (SMUL (1999)) dargelegt wurde, empfohlen. Sie sollte jedoch ergänzt werden durch die Phasenbetrachtung des Sanierungsablaufs, welche die Veränderung der Konzentrations- und Mobilisierbarkeitsverhältnisse der Schadstoffe im GWL im Verlauf der Sanierung berücksichtigt (s. Kapitel 3).

Für die Sanierung von Grundwasserschadensfällen existieren zwei prinzipielle Verfahrensgruppen

- ***Klassische Pump & Treat-Verfahren***
- ***Alternativverfahren zu Pump & Treat***

Eine Auswahl möglicher Behandlungsverfahren der ersten Gruppe (oberirdisch) ist nachfolgend aufgelistet, ihre Anwendbarkeit ist abhängig von der Art der Schadstoffe bzw. Schadstoffkombinationen:

- Fällung, kombinierte Fällung/Flockung
- UV/Ozonierung
- Chemische Oxidation/Reduktion
- Destillation
- Air Stripping/Steam Stripping
- A-Kohle-Adsorption
- Aktivtonerde- Adsorption
- Verdampfung
- Dichtentrennung
- Flotation
- Membran-technologien
- Ionenaustausch
- Filtration
- Biologische Methoden

- Elektrochemische Methoden
- Harzabsorption
- MPPE-Verfahren (Makro-poröse-Polymer-Extraktion = Flüssig-Flüssig-Extraktion),
- HVEA (Elektronenstrahlverfahren)

Neben dem Ex-situ-Verfahren Pump and Treat stehen seit einiger Zeit zahlreiche Alternativverfahren zur **in-situ-Sanierung** von Grundwasserschäden zur Verfügung, bei denen das Grundwasser im Untergrund verbleibt und die im Grundwasser enthaltenen Schadstoffe im Untergrund abgebaut oder zerstört werden. Hinsichtlich ihrer Wirkungsweise lassen sich die Verfahren in folgende drei Hauptgruppen unterteilen:

Mikrobiologische In-situ-Sanierung

- hydraulischer Kreisläufe
- Grundwasserzirkulationsbrunnen
- Air- / Bio-Sparging
- Bioscreens
- reaktive Systeme

Chemisch – physikalische In-situ-Behandlung

- Chemische Transformation (Oxidation, Reduktion)
- Chemische Extraktion (Tensidspülung, Alkoholspülung, Mikroemulsions-spülung)
- Hydroschockverfahren (Fracken)
- Elektrokinetische Verfahren (Elektroosmose, -phorese)
- Reaktive Systeme

Thermische In-situ-Behandlung

- Thermische Verfahren (Dampf-Luft-Injektion)

Eine Zusammenstellung und Erläuterung von Alternativverfahren erfolgt in Anlage 3.

Darüber hinaus können die Verfahren technisch betrachtet in aktive und passive Verfahren differenziert werden. Im Gegensatz zu den passiven Verfahren erfolgen bei den aktiven Techniken induzierende Maßnahmen, wodurch das Grundwasser entweder aktiv zutage gefördert (Pump and Treat), Strömungsvorgänge ausgelöst (Grundwasserzirkulationsbrunnen) oder durch weitere aktive technische Eingriffe chemisch-physikalische oder biologische Vorgänge im Grundwasser ausgelöst werden. Passive Maßnahme (z. B. reaktive Systeme) laufen ohne induzierende Maßnahmen ab, d. h. ohne zur Sanierung notwendige aktive betriebliche Prozesse.

Nachdem eine Vorauswahl prinzipiell geeigneter Varianten getroffen wurde, sind abhängig vom Sanie-

rungsfall Szenarien zu entwickeln, welche erforderliche Verfahrenskombinationen (Grundwasserförderung/Vorbehandlung/Nachbehandlung) bzw. alternative Lösungen beinhalten.

Da Grundwasserschäden in den weitaus meisten Fällen spätestens ab der Phase Detailuntersuchung in Quellen- und Fahnenbereichen zu betrachten sind, ergibt sich hier ggf. in Abhängigkeit vom Handlungsbedarf der „Sanierungszonen“ –Ansatz, welcher der Sanierungsszenarienbetrachtung zu Grunde gelegt werden sollte.

Ausschluss von Pump & Treat-Verfahren

Wie bereits im Kapitel 3.1 dargelegt, ist die Effizienz von Pump and Treat-Verfahren durch die zeitliche Veränderung der Freisetzung der Schadstoffe aus dem GWL limitiert:

- Transport der Schadstoffe aus dem advektiv zugänglichen Porenbereich des Aquifers (effektiv)
- diffusionsbestimmter Stoffübergang aus nicht durchströmten Bereichen und Transport aus dem Aquifer (allein mit P & T wenig effektiv)

Schadensfälle, deren Verhältnisse im Aquifer die effektive erste Phase nicht ermöglichen (z.B. zu geringe GWL- Mächtigkeit, zu geringe Grundwassernachlieferung, Schadstoffe advektiv nicht (mehr) zugänglich), oder nur noch durch diffusionbestimmten Stoffübergang geprägt sind, erscheinen daher für Pump & Treat wenig geeignet.

3.1.6 Nichtmonetäre und monetäre Bewertung/ Wirtschaftlichkeitsprüfung

Die weitere Verfahrensweise zur fachlichen Bewertung orientiert sich an der Verfahrensweise des LfUG-Handbuches „Sanierungsuntersuchungen“ [SMUL/LfUG (1999)].

Es erfolgt zunächst eine Festlegung von Bewertungskriterien. Für die Bewertung von Grundwassersanierungsszenarien wird nachfolgend eine Präzisierung der bereits benannten Kriterien zu Wirksamkeit und Nachhaltigkeit sowie spezifischer technischer Kriterien vorgeschlagen. Diese sind im Einzelnen:

Kriterium Wirksamkeit

- Wahrscheinlichkeit des Erreichens des Sanierungsziels (Schärfe der Prognoseaussagen zur Entwicklung der Schadstoffkonzentrationen)
- Sanierungsdauer (Prognose)
- Flexibilität gegenüber verändertem Schadstoffspektrum
- Flexibilität gegenüber veränderten Konzentrationen
- Entwicklungsstand/ Referenzen

Kriterium Realisierbarkeit am Standort

- Standortvoraussetzungen (geol./ hydrogeol.)
- Flächenbedarf
- Infrastrukturbedarf
- erforderlicher Arbeits- und Emissionsschutz

KriteriumWartung/ Überwachung

- Wartungsaufwand
- Überwachungsaufwand
- Kontrollierbarkeit des Sanierungserfolges
- Störanfälligkeit

Auswirkungen auf die Umwelt

- Beeinträchtigung Anwohner/ Peripherie
- Material- und Rohstoffverbrauch
- Reststoffanfall
- Energiebedarf Herstellung/ Betrieb

Weitere Kriterien

- Genehmigungsfähigkeit
- Zusätzlicher Untersuchungsbedarf

In Abhängigkeit von der Komplexität der Maßnahme reicht ggf. schon eine verbale Argumentation zur Priorisierung der Sanierungsszenarien aus. Andernfalls ist eine nutzwertanalytische Betrachtung erforderlich, bei welcher die Bewertungskriterien nach festzulegenden Maßstäben (Skalen) beurteilt werden. Es kann darüber hinaus erforderlich sein, die Kriteriengruppen mit Wichtungsfaktoren zu belegen, so dass im Ergebnis eine Bewertungsmatrix entsteht, welche im Endergebnis eine Priorisierung der Sanierungsszenarien entsprechend dieser Nutzwertbetrachtung enthält.

Ein Beispiel für eine solche Bewertungsmatrix enthält Anlage 2.

Im Anschluss an die nichtmonetäre Bewertung erfolgt die monetäre Bewertung der Szenarien. Dabei sind die Sanierungskosten getrennt nach

- Investitionskosten,
- Betriebskosten und
- Überwachungs- und Betreuungskosten

zu erfassen. Die über die Sanierungsdauer anfallenden (zeitabhängigen) Kosten sollten nach dem finanzmathematischen Verfahren der Ermittlung des Barwerts in Abhängigkeit von den Zinserwartungen erfol-

gen. Nur auf diese Weise sind Szenarien mit unterschiedlichen Laufzeiten vergleichbar.

Im Anschluss an die Kostenschätzung erfolgt die Ermittlung des Nutzen/Kosten- Verhältnisses für die einzelnen Szenarien (s. auch Anlage 1) und deren Diskussion mit den fachlich zu Beteiligten.

3.2 Entscheidungsfindung zur Optimierung / Beendigung laufender Pump and Treat-Maßnahmen

3.2.1 Prüfkriterien für die Bewertung im Sanierungsverlauf und Optimierungsmöglichkeiten

Generell sollten die Prüfkriterien zur Bewertung eines Sanierungsverlaufes vorhabensbezogen zu Beginn einer Sanierungsmaßnahme definiert werden. Die Bewertung muss sowohl fachliche als auch wirtschaftliche/monetäre Gesichtspunkte beinhalten.

Die Prüfkriterien orientieren sich an den „Prüfkriterien für die Beurteilung von Sanierungsverfahren“ für die Beurteilung von Dekontaminations- und Sicherungsverfahren nach BBodSchG und BBodSchV (ITVA 2000).

Fachliche Prüfkriterien sind:

- Erreichung des Sanierungszieles / der Sanierungszielwerte
- Anteil der entfernten Schadstoffe im Vergleich zum Schadstoffpotenzial / Restbelastung (Schadstoffbilanzierung)
- Gefährdungspotenzial der Restbelastung
- Entwicklung der Schadstoffkonzentrationen im Verlauf der Sanierungsdurchführung
- Entwicklung der in bestimmten Zeiteinheiten (z. B. monatlich) rückgewonnenen Schadstoffmengen im Verlauf der Sanierung
- Vergleich geplante / tatsächliche (tatsächlich zu erwartende) Sanierungsdauer
- Entwicklung der geförderten Grundwassermenge im Vergleich zu den rückgewonnenen Schadstoffmengen
- Einordnung des Sanierungsstandes in das Phasenmodell

Monetäre Prüfkriterien sind:

- Entwicklung der Betriebskosten pro gefördertem Kubikmeter Grundwasser
- Entwicklung der Betriebskosten pro rückgewonnener Menge Schadstoff
- Bilanzierung der Ist-Kosten im Rahmen des Gesamtbudgets

Neben tabellarischen Darstellungen sollten die Änderungen von Schadstoffkonzentrationen, Schadstoff-

mengen, Fördermenge, rückgewonnene Schadstoffmengen, Betriebskosten etc. auch grafisch dargestellt und ausgewertet werden.

Die Optimierung laufender PUMP AND TREAT Maßnahmen kann sowohl im technologischen Bereich erfolgen als auch bei der Vertragsgestaltung.

Untersuchungen zu langjährigen PUMP AND TREAT Maßnahmen belegen, dass die größten Kosteneinsparpotentiale durch die optimale Abstimmung von Pumprate und Reinigungskapazität erreicht werden. Hierfür sind jedoch oftmals viele Einzeloptimierungen notwendig.

Prinzipiell besteht ein P & T-System aus vier Grundkomponenten:

- Sanierungsbrunnen mit Pumpsystem
- Leitungsnetz
- Ex-Situ Reinigungssysteme
- MSR-Technik

Zum Ende der Sanierungsphase 1 ist insbesondere für die Ex-Situ Reinigungssysteme eine Optimierung zwingend, da sich in der Regel die Beschaffenheit der geförderten Wässer so weit verändert hat, dass aus Wirtschaftlichkeitsgründen zu reagieren ist.

Die Entscheidung für den Wegfall oder die Substitution von Reinigungskomponenten zu Beginn der Sanierungsphase 2 muss in Auswertung einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung erfolgen (Vertragssituation, Abschreibung der Anlagen, aktueller Markt usw.).

Optimierung der vorhandenen Anlagenkonfiguration:

- Überprüfung der einzelnen Komponenten auf Zweckmäßigkeit
- Vermeidung redundanter Anlagenteile und Systemstränge, wo nicht notwendig aus Sicherheitsgründen
- Substitution kostenintensiver Anlagenteile (Betriebskosten)
- Überprüfung der generellen Zweckmäßigkeit der vorhandenen Anlagenkonfiguration (Berücksichtigung der Zweiphasigkeit der Sanierung)
- Optimierung des Monitorings / der Systemüberwachung (s.a. Automatisierung)
- Prüfung der vorhandenen Entsorgungswege (Ableitung, Deponierung)

Neben dieser technisch-technologischen Überprüfung muss eine *Überprüfung der Kosteneffizienz* erfolgen:

- Zuordnung der Betriebskosten zu den Anlagenkomponenten

Optimierung der Grundwasserförderung:

- Überprüfung des Wirkungsgrades der Sanierungsbrunnen (mögliche Folge: Regenerierung oder Er-

satz)

- Optimierung der Pumprate (Beachtung: z.B. Ersatz energieintensiver Pumpen möglich!)
- Optimierung des Pumpregimes (kontinuierliches oder pulsendes PUMP AND TREAT)
- Ggf. Optimierung der Phasenabschöpfung

Optimierung der vorhandenen Behandlungstechnologie:

- Nutzung neuer / effizienterer Chemikalien (z.B. eines neuen Oxydationsmittels um die Abscheidungsrate von SM/Metallen zu erhöhen)
- Nutzung effizienterer Technologien (z.B. Ersatz einer thermischen Oxydation durch Aktivkohlead-sorption)
- Automatisierung

In den meisten Fällen sind bei der Optimierung die Grenzen zwischen Anlagenkonfiguration, Grundwasserförderung und Reinigungstechnologie fließend. Von grundlegender Bedeutung ist jedoch, dass zunächst die Einzelkomponenten der Anlage auf ihre Zweckmäßigkeit und Sinnfälligkeit für den gegenwärtigen Stand der Sanierung und die zu erwartenden Änderungen (auch rechtlich) bewertet werden.

Ist für eine Optimierung der Grundwasserförderung die Regenerierung oder der Ersatz eines oder mehrerer Sanierungsbrunnen notwendig, so sollte dies nur im Zusammenhang einer komplexen Betrachtung der gesamten Anlagenkonfiguration vorgenommen werden. Im Falle des Ersatzes sollten zudem Modellbetrachtungen für eine Optimierung der Brunnenstandorte und Ausbautiefen erfolgen.

In Einzelfällen, insbesondere bei bereits länger laufenden Sanierungsmaßnahmen ohne den erwarteten Sanierungsfortschritt sollte die Überprüfung der generellen Zweckmäßigkeit der vorhandenen Anlagenkonfiguration erfolgen. In solchen Fällen sind folgende Optimierungsbetrachtungen sinnvoll:

- Neubewertung von Anzahl, Lage und Ausbau von Sanierungs- und Überwachungsbrunnen
- Nutzung intelligenter Softwarelösungen für eine mögliche Neubestimmung von Standorten für Sanierungs- und Überwachungsbrunnen (z.B. Dynamisches GWS Management: Gleichzeitige Betrachtung von Brunnenstandort und spezifischer Pumprate als Optimierungskriterien.¹⁾)
- Entscheidung hinsichtlich kontinuierlichem oder pulsendem PUMP AND TREAT
- Ggf. Optimierung der Pumprate

Falls seitens des Gesetzgebers eine Optimierung des *Entsorgungswegs* zulässig ist, so sollte auch dieser den ggf. geänderten Randbedingungen angepasst werden, insbesondere im Hinblick auf mögliche Ände-

rungen der Schadstoffgehalte im Auslauf. Geänderte Randbedingungen können sich auch von außen ergeben, wenn beispielsweise eine zwischenzeitlich errichtete AWA erhöhte Einleitzielwerte zulässt.

Optimierung der Vertragsgestaltung:

Mittels einer Optimierung der Vertragsgestaltung kann, auch noch nachträglich, eine deutliche Optimierung der Betriebskosten erreicht werden. Ein geänderter Vertrag sollte deshalb folgende Punkte enthalten:

- eine klare Regelung der Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten
- klare Regelungen für eine flexible Anpassung der Systemanforderungen im Falle sich weiter ändernder geologischer (hydraulischer, geochemischer etc.) Rahmenbedingungen
- klare Regelungen für den Fall sich ändernder administrativer Rahmenbedingungen
- Anreize für den Auftragnehmer für eine stetige, den Erfordernissen angepasste Anlagenoptimierung (Bonusregelung, Erfolgshonorar)

Dabei kann es sinnvoll sein mit EINEM Auftragnehmer mehrere separate Verträge innerhalb eines Rahmenvertrages abzuschließen. So können z.B. Projektmanagement, Berichtswesen und Routineüberwachung pauschal erfasst werden, wogegen Prozessüberwachung und –analytik sowie Grundwassermonitoring und –analytik aufgrund sich ändernder Massen über Einheitspreisverträge erfasst werden. Leistungen, welche zusätzlich erbracht werden müssen, Optimierungen der Anlage/von Anlagenteilen, dazugehörige Stoffe und Gerätekosten sowie die Entsorgung der Reststoffe können mittels Selbstkostenerstattungsverträgen erfasst werden.

Anlagenoptimierung ist keine Aufgabenreduzierung!

Seitens des Eigentümers oder Betreibers (Auftragnehmers) sollte die Optimierung auch stets als solche verstanden werden. Aufgabenreduzierungen führen zwar zunächst auch zu einer Kostenreduzierung, welche jedoch meist nicht nachhaltig ist.

Beispiele für Aufgabenreduzierungen:

- Reduzierung des GW-Monitorings aufgrund nachgewiesener mehrjähriger Trends
- Reduzierung des Prozessmonitorings aufgrund nachgewiesener Effizienz der Gesamtanlage
- Reduzierung der Anlagen- und/oder Prozessüberwachung aufgrund längeren kontinuierlichen Betriebs ohne Havarie / Zwischenfälle
- Nur noch diskontinuierliche Reinigungsprozesse, wenn am Anlageneinlauf bereits Einleitgrenzwerte erreicht werden

3.2.2 Überprüfung der Sanierungsziele / Abbruchkriterien / Strategieänderung

Entscheidungen zu notwendigen Verfahrensänderungen / Optimierungen der Sanierungsmaßnahme bzw. ggf. zu deren Abbruch sind immer standortspezifisch, einzelfall- und verfahrensbezogen auf der Basis

einer umfassenden Analyse zu treffen.

Grundlage dazu bilden die festgesetzten Sanierungsziele. Deshalb müssen vor Beginn einer Maßnahme in jedem Fall auch entsprechend konkrete Ziele vorgeschlagen und behördlich bestätigt worden sein, die dann im weiteren Verlauf der Maßnahme zu überprüfen sind.

Es existieren keine allgemeingültigen Kriterien für die abzuleitenden Entscheidungen. Die Entscheidung kann nur auf der Basis zu beurteilender Einzelsachverhalte getroffen werden.

Ablauforganisatorisch besteht diese aus 3 Schritten:

1. Überprüfung der Sanierungsziele durch Beurteilung relevanter Verfahrenskriterien
2. Aktualisierte Gefährdungsabschätzung (Gefahrenanalyse) durch komplexe Betrachtung von einzelnen Entscheidungskriterien
3. Schlussfolgerungen zu möglichen Strategieänderungen

A). Überprüfung der Sanierungsziele durch Beurteilung relevanter Verfahrenskriterien

Sanierungsziele sind während der Grundwassersanierung an definierten Zeitschnitten auf ihre Erreichung bzw. Erreichbarkeit zu überprüfen. Für daraus resultierende Entscheidungen sind die Grundsätze der Verhältnismäßigkeit maßgebend und zu berücksichtigen. Bevor diese beurteilt werden können, sind einzelne Verfahrenskriterien zu überprüfen und eine Aktualisierung der Gefahrenanalyse (aktualisierte Gefährdungsabschätzung, ggf. Defizitanalyse) durchzuführen.

Im ersten Schritt sind daher als Voraussetzung für eine aktualisierte Gefährdungsabschätzung alle standortrelevanten und verfahrensspezifischen Kriterien zu erfassen und die dafür entsprechend zu beantwortenden Fragen aufzustellen.

Aus nachfolgender Auflistung ist erkennbar, dass nach Separierung einzelner Kriterien aus einem zu beurteilenden Gesamtkomplex hinsichtlich der Fragestellungen Überschneidungen auftreten.

Grundlagen zum Sanierungsfall

Fragenkatalog:

- Wie wird die Ausgangsdatenlage zum Sanierungsfall eingeschätzt?
- Auf welchen Grundlagen wurde die Sanierungsentscheidung getroffen?
- Sind ausreichende Daten zur reproduzierbaren Quantifizierung des Schadens vorhanden (Bohrungen, Messstellen, hydraulische und Schadstoffparameter)?
- Welche Lücken sind feststellbar, die ggf. Einschränkungen bezüglich Auswertung und Beurteilung des Schadensfalles nach sich ziehen können?
- Welche Möglichkeiten der Lückenschließung werden gesehen?

Entnahmeelemente

Fragenkatalog:

- Erfassen die für die Grundwasserabreinigung vorgesehenen bzw. betriebenen Brunnen, Gräben, Drainagen, Schächte den gesamten Schadensherd?
- Ist mit den Entnahmeelementen eine wirkungsvolle Sicherung des Schadens gegeben oder erreichbar?
- Ist die Verteilung der Entnahmeelemente repräsentativ?
- Welche Reichweiten wurden erreicht?
- Erfolgt eine Erfassung des Abstrombereiches („Rückholung von Schadstoffen“), bis zu welcher Entfernung?
- Wird mit der Anordnung der Entnahmeelemente tatsächlich nur die als Ziel gestellte Abreinigung des betreffenden Schadens durchgeführt?
- Welchen Einfluss haben ggf. Seitenzustrom- und –anstrombelastungen (hydraulische und Schadstoffbeeinflussung)?
- Ist eine eindeutige Separierung möglich und gegeben?

Grundwasserförderraten

Fragenkatalog:

- Werden konstante Förderraten entsprechend der Sanierungsplanung eingehalten?
- Ist mit den eingehaltenen Förderraten die vollständige Erfassung des abzureinigenden Schadensherdes möglich?
- Sind die Förderraten zu verändern, anzupassen?
- Ist die Förderatenverteilung auf die einzelnen Entnahmeelemente zu untersuchen und ggf. zu differenzieren?
- Ist eine alternierende Grundwasserförderung zu untersuchen?

Schadstoffkonzentrationen (Konzentrationsverläufe)

Fragenkatalog:

- Werden mit der sanierungsbegleitenden Überwachung alle relevanten Schadstoffparameter (Hauptkontaminanten - Leitparameter) erfasst?
- Erlauben die zyklisch erfassten Parameter eine repräsentative Auswertung von Konzentrations-Zeit-Verläufen für die Schadstoffparameter?
- Werden regelmäßig (in größeren Abständen) die allgemeinen Milieuparameter im Grundwasser zur Beurteilung verfahrensbeeinflussender Randbedingungen mit erfasst?
- Welcher Status ist bezüglich des Konzentrationsverlaufes erreicht?
- Erfolgt noch eine progressive Zunahme der Schadstoffkonzentrationen?
- Ist eine Plateauphase (stagnierender Konzentrationsverlauf - Gleichgewichtszustand) zu verzeichnen?
- Ist ein deutlicher Konzentrationsrückgang feststellbar?
- Sind die Sanierungszielwerte bereits erreicht? Bei einzelnen Schadstoffen? In einzelnen Sanie-

rungszonen?

- Wird der geplante (modellerte) zeitliche Ablauf der Sanierung eingehalten?
- Welche Veränderungen / Verzögerungen treten diesbezüglich auf?
- Ist eine Zielwerterreichung prognostizierbar?
- Welcher Zeithorizont lässt sich dafür prognostizieren?

Parameterbezogene Schadstoffaustragsraten, Gesamtschadstoffaustrag

Fragenkatalog:

- Sind aus der Erkundung und Sanierungsplanung berechnete Ausgangsschadstoffmengen (parameterbezogene Schadstoffmenge, Gesamtschadstoffmenge) vorhanden?
- Wie belastbar (sicher / unsicher) sind diese Ausgangsparameter für sanierungszeitliche Beurteilungen?
- Welcher Schadstoffaustragsstand (parameterbezogen, gesamt) ist diesbezüglich erreicht?
- Kann der Schadstoffaustrag bezogen auf den Ausgangszustand prozentual angegeben werden?
- Wie ist dieser Austrag hinsichtlich des erwarteten Gesamtergebnisses zu beurteilen?

Schadstofffrachten

Fragenkatalog:

- Welche Schadstofffrachten (parameterbezogen, gesamt) waren vor Beginn der Grundwassersanierung vorhanden?
- Dienen diese Ausgangsdaten zur Dimensionierung der Anlage?
- Welche Schadstofffrachten sind zum Überprüfungszeitpunkt feststellbar?
- Erfolgt noch ein weiterer Schadstofffrachteintrag aus der ungesättigten in die gesättigte Zone?
- Sind die Schadstofffrachten ausschließlich auf den Transport über den Grundwasserpfad begrenzt?
- Welche Schadstofffrachten treten im Eingang der Grundwasserreinigungsanlage auf?
- Werden mit der betriebenen Grundwasserreinigungsanlage die vorhandenen Schadstofffrachten vollständig erfasst?
- Welche Schadstofffrachten sind abstromig der Grundwasserreinigungsanlage noch vorhanden?

Neben der Erfassung der schadstoffbezogenen Kriterien (Gefahrenaspekte, Nutzen) kommt der Kostenseite als zweite wesentliche Seite für die Beurteilung der Verhältnismäßigkeit herausragende Bedeutung zu. Hierbei sind neben den Gesamtkosten vor allem die verschiedenen Kostenarten zu analysieren.

Kostenanalyse

Soll-Ist-Vergleich für

- | | |
|---------------------|-----------------------------------|
| ➔ Investkosten | ➔ Betriebskosten |
| ➔ Entsorgungskosten | ➔ Kosten der Sanierungsbegleitung |

Ermittlung spezifischer Kosten

Mit den spezifischen Kosten erfolgt die Zusammenführung der Kosten und des Nutzens des Anlagenbetriebes.

Fragenkatalog:

- Werden die spezifischen Kosten (€/ kg ausgebrachter Schadstoff bzw. €/ m³ gehobenen und gereinigten Wassers) regelmäßig erfasst und ausgewertet?
- Welche spezifischen Kosten waren zu Beginn des Anlagenbetriebs vorhanden?
- Welche Entwicklung ist diesbezüglich festzustellen (zeithorizontbezogene monatliche, quartalsmäßige oder jährliche Auswertung)?
- Wie werden die erreichten spezifischen Kosten beurteilt?

Bilanzbetrachtungen

Mit vorstehenden Einzelkriterien sind zusammenführende Bilanzbetrachtungen durchzuführen. Bilanzen sind einzelfallbezogen je nach Komplexität des Falles monats-, quartals- oder jahresweise für mehrere Bilanzschnitte (Anstrom, Schadherd, Abstrom, Fahne) zu erstellen.

Fragenkatalog:

- Welche Bilanz war Ausgangspunkt des Anlagenbetriebes?
- Welche Bilanz ist zum aktuellen Überprüfungszeitpunkt erreicht?
- Welche Bilanzprognose lässt sich bezüglich der Erreichung der Sanierungsziele treffen?

Zeitliche Prognose zum erfolgreichen Abschluss der Sanierung

Fragenkatalog:

- Welcher Zeithorizont wurde dem Betrieb der Grundwasserreinigungsanlage zu Grunde gelegt?
- Welchen Zeitpunkt stellt in dieser Planung der aktuelle Überprüfungszeitpunkt dar (Jahre, Sanierungsquartal)?
- Welche Zeitprognose zur Zielerreichung kann daraus abgeleitet werden?

Grundwasserreinigungsverfahren

Fragenkatalog:

- Welche Anlage wurde geplant und erstellt (Analyse der Einzelbestandteile)?
- Erfolgten zwischenzeitlich bereits Anpassungen der Anlagentechnik? Welche? Mit welchem Effekt?
- Entspricht die Anlage zum Überprüfungszeitpunkt den Erwartungen (u.a. Anlagenverfügbarkeit)?
- Welche Schwachstellen sind erkennbar (anlagentechnische Störungen, Störungen aus Einflüssen des Schadensfalles)?
- Sind Entscheidungen zu Veränderungen / Anpassungen /Ergänzungen bezüglich der Anlage zu treffen?

Analyse der Effizienz des gewählten Verfahrens

Fragenkatalog:

- Welche Defizite bezüglich der Effizienz des gewählten Verfahrens sind zum Überprüfungszeitpunkt erkennbar?
- Durch welche Maßnahmen kann die Effizienz der Anlage verbessert werden?
- Kann die Anlage ohne Veränderungen weiterbetrieben werden?
- Sind Anpassungen / Optimierungen notwendig und zielführend?
- Muss die Anlage oder Anlagenteile aus technischen, verfahrenstechnischen oder Effizienzgründen ersetzt werden?
- Wie sind ergänzende Möglichkeiten zur Erreichung der Sanierungsziele zu bewerten?

B). Aktualisierte Gefährdungsabschätzung (Gefahrenanalyse) durch komplexe Betrachtung von einzelnen Entscheidungskriterien

Im Ergebnis einer jeweils für den Überprüfungszeitpunkt zu aktualisierenden Gefährdungsabschätzung muss klar erkennbar sein, ob die vom Schadensfall ausgehende Gefahr für öffentliche Schutzgüter im Abstrom bzw. für Unterlieger beseitigt oder auf ein tolerierbares Maß gesunken ist.

Dabei ist beispielsweise festzustellen, ob eine weitere Schadenausbreitung erfolgt, Fahnenlängen konstant oder rückläufig sind bzw. ob insgesamt rückläufige Tendenzen für den Schaden/ die Gefahr erkennbar sind.

Allgemein sind bei einer komplexen **aktualisierten Gefährdungsabschätzung / Gefährdungsanalyse** nach den unter Pkt. 1 genannten Einzelkriterien zu berücksichtigen:

- Höhe des noch vorhandenen Schadstoffeintrages nach Konzentrationen und Frachten
- Dauer und zukünftige räumliche Ausbreitung des Schadstoffeintrages
- Schadstoffspektrum
- Wasserwirtschaftliche Nutzungen
- Sensibilität der Umfeldnutzungen
- Art, Umfang und Auswirkungen natürlicher Stoffminderungsprozesse

Überprüfung der Verhältnismäßigkeit

Die Wahrung der Verhältnismäßigkeit beruht auf dem verfassungsrechtlichen Grundsatz des Eigentumsrechts (Art. 14 Abs. 1 GG) und wurde auch in die Bodenschutzgesetzgebung übernommen (BBodSchG, BBoDSchV).

Nach der BBodSchV sind nur solche Maßnahmen durchsetzbar, die geeignet, notwendig und angemessen

sind.

Eine Maßnahme ist nur dann verhältnismäßig und zumutbar, wenn die zu erwartenden negativen Auswirkungen zum beabsichtigten Erfolg nicht erkennbar außer Verhältnis stehen.

Bei der Prüfung der Verhältnismäßigkeit sind allgemein zu berücksichtigen:

- Interesse an der Gefahrenbeseitigung
- Interessen der Allgemeinheit oder des betroffenen Einzelnen

Bei der Gefahrenbetrachtung bzw. von Grundwasserschäden ausgehenden Gefährdungen ist ein nur geringer Spielraum für ein Ermessen bezüglich dieser Sachverhalte immer dann gegeben, wenn die vom Schadensfall ausgehenden objektiven Gefährdungen sehr groß sind. Das betrifft beispielsweise die oft massiven und bezüglich der Auswirkungen auf die Umgebung massiven CKW-Schadensfälle in besonderem Maße.

Als ein wichtiges Maß für die Konkretisierung der Verhältnismäßigkeit gelten die Kosten.

Weitere objektivierte Kriterien, wonach verhältnismäßige von unverhältnismäßigen Sanierungsmaßnahmen zu trennen wären, existieren in Deutschland nicht.

Es gibt mehrere Ansätze für eine Verhältnismäßigkeitsprüfung.

Vorschlag von Bewertungs- und Entscheidungsstufen zur Sanierung von Grundwasserschäden – siehe WILLAND / GROSSMANN (2002)

Die mit Hilfe der Kategorien Eignung, Erforderlichkeit und Angemessenheit erfolgende Verhältnismäßigkeitsprüfung ist durch die etwas nähere Bestimmung des dabei ausgeübten Ermessens bei der Sanierung von altlastbedingten Grundwasserschäden durch WILLAND und GROSSMANN (2002) gut dargestellt.

Darin wird ausgesagt:

- **Geeignet** ist die Maßnahme, wenn sie technisch machbar ist und die Erreichung des Sanierungsziels fördert (Eignung setzt die vorherige Sanierungszielbestimmung voraus, der angestrebte Erfolg kann erreicht werden)
- **Erforderlich** ist diejenige Sanierungsalternative, die den Einzelnen (in der Regel den Pflichtigen) und die Allgemeinheit am wenigsten belastet und im Vergleich zu anderen der gleicher Erfolg erreicht werden kann („milderes Mittel“, geringerer Aufwand)
- **Angemessen** ist eine Sanierungsmaßnahme, wenn deren Auswirkungen nicht außer Verhältnis zum

erstrebten Erfolg stehen. Dazu ist eine Zweck-Mittel-Relation zu bilden, die den angestrebten Sanierungserfolg im Verhältnis zu den verbundenen Belastungen betrachtet (Proportionalität). Für diesen Abwägungsprozess sind besonders die Kosten, aber auch weitere nachteilige Auswirkungen wie Umweltbelastungen, Beeinträchtigungen und Ressourcenverbrauch zu betrachten (Kosten-Nutzen-Vergleich).

Unter Einbeziehung dieser allgemeinen Kategorien werden zur Sanierung von Grundwasserschäden Bewertungs- und Entscheidungsstufen vorgeschlagen, die Prüfkriterien bei der Auswahlentscheidung des Gutachters für den Sanierungsvorschlag darstellen:

Stufe 1 - Bewertung des Schadens und der von ihm ausgehenden Gefahren

Stufe 2 - Entschluss über das „Ob“ einer Sanierung („Entschließungsermessen“)

Stufe 3 - Entschluss über das „Wie“ einer Sanierung („Auswahlermessen“)

Stufe 4 - Entscheidung über Modifikationen oder Abbruch laufender Maßnahmen

Prinzipiell sind vorgenannte Kriterien implizit Grundlage auch der sächsischen Vorgehensweise, die mit den erforderlichen Arbeitsschritten zur Sanierungsuntersuchung (Ziel: einzelfallbezogene Ermittlung eines technisch geeigneten, rechtlich zulässigen und verhältnismäßigen Sanierungsszenarios zur Beseitigung, Verminderung oder Verhinderung der vorhandenen Gefahr unter Berücksichtigung der planungsrechtlich zulässigen Nutzung des Standortes) verbunden sind.

Prüfgrundsätze nach LABO (2005)

Das Positionspapier der LABO (2005) zur Berücksichtigung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse bei der Altlastenbearbeitung stellt bzgl. der Ermessensausübung für Entscheidungen zu MNA folgende Grundsätze auf:

- Die o.g. Verhältnismäßigkeitskriterien bauen aufeinander auf, für das jeweilige Sanierungsziel fallen nicht geeignete Maßnahmen aus der weiteren Betrachtung heraus.
- Das bedeutet, dass zur Erreichung der Sanierungsziele geeignete und nicht geeignete Maßnahmen unter dem Kostenaspekt (milderes Mittel) verglichen werden müssen.
- Treffen die 3 genannten Auswahlkriterien zunächst nicht auf die zur Auswahl stehenden Sanierungsmaßnahmen zu, ist unter Berücksichtigung des technisch Machbaren das Sanierungsziel neu zu formulieren und die Geeignetheit erneut zu prüfen (iterative Vorgehensweise).
- Dafür fehlende Untersuchungen müssen nachgeholt werden.
- Wichtige Aspekte bei der Verhältnismäßigkeitsprüfung stellen die Prognosesicherheit (Zeithorizont für Zielerreichung), die Sicherheit für die Überwachung des erreichten Zieles sowie die dauerhafte Einhaltung dieses Ziels dar.

Tolerierbarkeitsbetrachtung nach sächsischer Vorgehensweise (vorläufiger Rahmenerlass Altlasten / Grundwasser 2000)

Festzustellen ist, dass in vielen Fällen mit verhältnismäßigem Mitteleinsatz eine vollständige Grundwasserreinigung nicht möglich ist. Es verbleiben damit Restbelastungen (auch bei teilsanierten Flächen). Restbelastungen sind mit entsprechenden Kriterien möglichst konkret zu bewerten. Das Ergebnis mündet in eine Tolerierbarkeitsbetrachtung.

Die Maßstäbe für eine Tolerierbarkeitsbetrachtung sind im Freistaat Sachsen durch den vorläufigen Rahmenerlass „Altlasten / Grundwasser“ (SMUL, 2000) vergleichsweise gut geregelt.

Für einen tolerablen Grundwasserschaden werden die wesentlichen Beurteilungskriterien qualitativ- und quantitativ erfasst:

- Art der Schadstoffe
- eingetragene Mengen
- Höhe von Überschreitungsraten
- zeitliche Ausbreitung,
- räumliche Verteilung,
- Bedeutung und Nutzung des Schutzgutes betrachtet

Zu näheren Erläuterungen soll auf o.g. Erlass verwiesen werden. Für die Praxis wünschenswert ist eine konsequentere gutachterliche und behördliche Anwendung dieser Kriterien, da sie oft als wesentlichste Anerkennungsgrundlage für den Maßnahmenabschluss dienen.

C). Schlussfolgerungen zu möglichen Strategieänderungen

Nach der Gefahrenanalyse sind auf der Grundlage der vorstehenden Verhältnismäßigkeitsbetrachtung (ggf. noch unterstützt durch eine Tolerierbarkeitsbetrachtung nach der sächsischen Vorgehensweise) die notwendigen Schlussfolgerungen zu treffen. Die nachfolgend aufgestellten Entscheidungen sind rechtzeitig einzuleiten und mit nachvollziehbarer Begründung zu versehen.

Der weitere Handlungsbedarf kann in folgenden Entscheidungen liegen:

- 1. Fortsetzung der Sanierung** mit dem bisherigen Verfahren. Nach dem Ergebnis der Analyse (Verlauf der Schadstoffabreinigung, Zeitprognose zur Beendigung) kann es durchaus verhältnismäßig sein, das ursprüngliche Verfahren bis zum prognostizierten Zeitpunkt fortzusetzen. Sollte hier der Zeithorizont in sehr weiter Entfernung liegen, sind zwischenzeitlich weitere regelmäßige Überprüfungen zum Kosten-Nutzen-Verhältnis vorzunehmen.
- 2. Ersatz des bisher angewendeten Grundwasserreinigungsverfahrens** durch ein wirtschaftlicheres

Verfahren. Diese Entscheidung bedingt in der Regel neue Investitionen, für die geprüft sein muss, dass sie die Zielerreichung sicher ermöglichen und das neue Verfahren im Vergleich mit dem ursprünglichen Verfahren wesentlich effizienter ist.

3. **Optimierungen des laufenden Verfahrens** / Verfahrensänderungen, z. B. durch Reduzierung der zu behandelnden Grundwassermenge nach Durchführung einer präzisierten Schadstoff- und Transportmodellierung, Aufwandsanpassung zur Sanierungskontrolle, Umstellung der Ableitung des gereinigten Grundwassers von der Einleitung in die Kanalisation auf Reinfiltration in den GWL.
4. **Ersatz oder Ergänzung des Verfahrens durch weitere standortspezifische Lösungen.** (Alternativen zur Grundwassersanierung). Hierunter sind beispielsweise die Möglichkeiten zur standort- und schadstoffspezifischen Ergänzung der Grundwasserreinigung beispielsweise bei CKW-Fällen durch eine gezielte Bodenluftabsaugung oder auch einen lokalen Bodenaushub zu betrachten. Zu letzterer Möglichkeit sind die genauen Kenntnisse der ggf. noch in der ungesättigten Zone vorhandenen Quellbelastungen erforderlich. Ist dies der Fall, kann ein lokaler Bodenaushub eine kosteneffiziente Alternative gegenüber der langzeitigen Abreinigung des Grundwassers darstellen.
5. **Fortschreibung und Anpassung von Sanierungszielen.** Im Rahmen der regelmäßigen Bewertung des Standes der Grundwassersanierung kann dies erforderlich werden, wenn eine Verhältnismäßigkeit nach den zu bewertenden Kriterien (insbesondere unter dem Kostenaspekt) nicht mehr gegeben ist.
6. **Beendigung / Abbruch der aktiven Sanierung.** Beim Abbruch aus den unter Pkt. 5 genannten Gründen kann die Prüfung nach Pkt. 7 erforderlich werden. Die planmäßige Beendigung erfordert nachfolgend dann nur noch die Kontrolle zum dauerhaften Nachweis des Sanierungserfolges.
7. **Anwendungsprüfung von MNA.** Hier sind insbesondere die relativ hohen Anforderungen (umfangreiche Analytik an mehreren in Bilanzschnitten angeordneten Prüfstellen) sowie die lange Zeitdauer für einen sicheren Nachweis zu beachten.
8. **Übergang zur Überwachung.** Für die Nachsorgeüberwachung sind der Umfang der Überprüfung (Kriterien, Zeitturnus) sowie die Festlegungen zur Beendigung entscheidend.

Zuschaltung von Ergänzungs- / Alternativverfahren

Die allgemein langjährige Sanierungsdauer von Pump and Treat-Verfahren zur Grundwassersanierung und damit verbunden die hohen, schwer kalkulierbaren Sanierungskosten werden durch die im Verlauf der Sanierung sinkende Schadstoffkonzentration im Grundwasser und dem damit immer geringeren Schadstoffaustrag verursacht. Die Schadstoffkonzentrationen nähern sich dabei asymptotisch Werten an, die in der Regel oberhalb der Sanierungszielwerte liegen. Zudem bestimmen mit fortschreitender Sanierungsdauer zunehmend langsame Prozesse wie Desorption, Lösung und Diffusion der Schadstoffe den Stofftransport. Hinzu kommen prozessspezifische Probleme wie das Verblocken von Poren durch oxidier-

tes Eisen und Carbonate, die Ausbildung von bevorzugten Strömungskanälen sowie das Vorhandensein schlecht durchströmter Bodenschichten (ZITTWITZ 2003).

Mit dem Einsatz von Ergänzungs- bzw. Alternativverfahren können diese Limitierungen von Pump and Treat überwunden werden. Einerseits können zusätzliche Verfahren ergänzend zu laufenden Pump and Treat-Sanierungen eingesetzt werden, um die Effizienz der Schadstoffgewinnung zu erhöhen. Dies geschieht indem Schadstoffe verstärkt mobilisiert und damit höhere Austragsraten erreicht werden bzw. indem Schadstoffe zusätzlich bereits im Untergrund abgebaut werden. Das Ziel solcher Maßnahmen besteht in der Verkürzung der Sanierungszeit und damit in der Verringerung der Sanierungskosten.

Andererseits gibt es Verfahren, die sich auch als Alternativverfahren für den Einsatz im Anschluss an Pump and Treat, sobald ein signifikanter Rückgang der Schadstoffaustragsraten eingetreten und die Wirtschaftlichkeit der Sanierung nicht mehr gegeben ist, eignen.

Vor Einsatz von Ergänzungs- bzw. Alternativverfahren ist generell einzelfallspezifisch zunächst zu bewerten, ob deren Einsatz hinsichtlich der

- standortspezifischen Verhältnisse (insbesondere geologisch-hydrogeologische Verhältnisse),
- der Kontaminationsverhältnisse (Art, Höhe, Verteilung und Eigenschaften der Schadstoffe) und
- vorhandenen Anlagentechnik

sinnvoll ist. Zu prüfen ist auch, ob die vorhandene Datengrundlage ausreichend ist oder zusätzliche Untersuchungen zur Entscheidungsfindung erforderlich sind.

Die Kosten zur Durchführung der Ergänzungs- bzw. Alternativverfahren sind zu ermitteln und auch im Vergleich zur weiteren ausschließlichen Anwendung von Pump and Treat zu beurteilen. Es ist zu berücksichtigen, dass bei Einsatz von ergänzenden bzw. Alternativmaßnahmen zunächst im Rahmen der Planung und Umsetzung erhöhter personeller Bedarf und höhere finanzielle Aufwendungen entstehen, die im Verhältnis zu dem Gesamtprojekt stehen müssen. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit sollten zunächst Ergänzungsverfahren, bei dem keine umfänglichen Neuinvestitionen für die Anlagentechnik erforderlich sind, der Vorzug im Vergleich zu Alternativverfahren gegeben werden.

Verfahren, die sich zur Ergänzung / Unterstützung einer laufenden Pump and Treat-Sanierung besonders gut eignen, sind Verfahren, die ohnehin eines hydraulischen Kreislaufes bedürfen (siehe nachfolgende Tabelle).

Da für die Verfahren

- Air- / Bio-Sparging
- Grundwasserzirkulationsbrunnen
- Elektrokinetische Verfahren
- Reaktive Systeme

die bestehenden technischen Einrichtungen des Pump and Treat in der Regel nur in geringem Umfang bzw. nicht genutzt werden können und im Wesentlichen die technischen Einrichtungen vollständig neu einzurichten sind, werden diese Verfahren aus Gründen der Wirtschaftlichkeit zur Ergänzung von Pump and Treat nicht als geeignet angesehen, sondern eher als Alternativen.

Tab.:1 Ergänzungsverfahren zu Pump and Treat

Ergänzungsverfahren	Ziel	Rahmenbedingungen / Umsetzung	prinzipielle Eignung
mikrobiologischer Abbau mittels hydraulischem Kreislauf	Starten / Beschleunigung mikrobieller Abbauvorgänge im Grundwasserleiter zur Verringerung organischer Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> - relativ unkomplizierte Einbindung in bestehenden hydraulischen Kreislauf möglich - Zugabe von Mikroorganismen, Nährstoffen, gelösten Sauerstoff oder Sauerstoffdonatoren zu dem geförderten und gereinigten Grundwasser - hierfür ist Einrichtung einer Dosieranlage einschließlich Mess- und Steuertechnik und Leitungen erforderlich - Zugabestoff ist in Abhängigkeit von Art und Höhe der Kontamination zu wählen - zur Infiltration des beaufschlagten Grundwassers in den Grundwasserleiter können bereits vorhandene anstromig und schadherdnahe Brunnen / Grundwassermessstellen genutzt werden; im Idealfall Nutzung der bisherigen Infiltrationsbrunnen 	sehr gut
Chemische Oxidation	schneller Abbau der organischen Schadstoffe im Grundwasserleiter	<ul style="list-style-type: none"> - relativ unkomplizierte Einbindung in bestehenden hydraulischen Kreislauf möglich - insbesondere für die Behandlung des Schadherdquellbereiches sehr gut geeignet - für Zugabe von Oxidationsmitteln ist Einrichtung einer Dosieranlage einschließlich Mess- und Steuertechnik und Leitungen erforderlich - Oxidiermittel ist in Abhängigkeit von Art und Höhe der Kontamination zu wählen - zur Infiltration der Oxidationsmittel in den Grundwasserleiter können ggf. bereits vorhandene schadherdnahe Brunnen / Grundwassermessstellen genutzt werden - gleichmäßige und flächendeckende Verteilung der Oxidantien im Grundwasserleiter muss angestrebt werden 	sehr gut

Chemische Extraktion mittels Spülung	Mobilisierung der Schadstoffe im Untergrund, damit diese hydraulisch gefördert werden können	<ul style="list-style-type: none"> - relativ unkomplizierte Einbindung in bestehenden hydraulischen Kreislauf möglich - Zugabe von Spülmitteln (Tenside, Alkohole, Mikroemulsionen) zu dem geförderten und gereinigten Grundwasser - hierfür ist Einrichtung einer Dosieranlage einschließlich Mess- und Steuertechnik und Leitungen erforderlich - Spülmittel ist in Abhängigkeit von den Kontaminations- und der Standortverhältnissen zu wählen - zur Infiltration des beaufschlagten Grundwassers in den Grundwasserleiter können bereits vorhandene anstromig und schadherdnah gelegene Brunnen / Grundwassermessstellen genutzt werden; im Idealfall Nutzung der bisherigen Infiltrationsbrunnen - über bisherige Entnahmebrunnen Förderung des kontaminierten Grundwassers einschließlich der Spülmittel - Modifikation der bestehenden Reinigungsanlage, damit Spülmittel zurückgewonnen und ggf. für weitere Spülungen eingesetzt werden 	sehr gut
Thermische Verfahren	Mobilisierung der Schadstoffe im Untergrund	<ul style="list-style-type: none"> - durch hydraulische Sanierung nicht erfassbare Schadstoffe können mobilisiert und über das Grundwasser oder die Bodenluft ausgetragen werden - Einrichtung zusätzlicher Pegel für Dampf-Luft-Injektion sowie von Bodenluftabsaugpegeln erforderlich - vorhandener hydraulischer Kreislauf bleibt bestehen zur Förderung der im Grundwasser gelösten Schadstoffe 	sehr gut
Hydroschock	Schaffung neuer Wegsamkeiten im Untergrund und Mobilisierung der Schadstoffe, damit diese hydraulisch gefördert werden können	<ul style="list-style-type: none"> - vorhandener hydraulischer Kreislauf bleibt bestehen und muss nicht modifiziert werden - Einrichtung speziell ausgebauter Bohrlöcher und Einbauten zur Wellenerzeugung erforderlich - Verfahren ist noch nicht allgemein Stand der Technik 	gut
mikrobiologischer Abbau mittels Bioscreen	mikrobieller Schadstoffabbau nahe dem Ende oder am Ende der Schadstofffahne	<ul style="list-style-type: none"> - zur eigentlichen Verbesserung des Pump and Treat im Schadherdquellbereich und in dessen Nähe nicht geeignet - in Abhängigkeit von den Kontaminations- und Standortbedingungen und dem Sanierungsziel kann Bioscreen ergänzend zum Pump and Treat zur Behandlung großräumiger Schadstofffahnen eingesetzt werden 	nur bedingt


Nachfolgende Tabelle enthält in Frage kommende Alternativen im Anschluss an Pump and Treat, sobald ein signifikanter Rückgang der Schadstoffaustragsraten eingetreten und die Wirtschaftlichkeit der Sanierung nicht mehr gegeben ist.

Tab.:2 Alternativverfahren nach Pump and Treat

Alternativverfahren	Ziel	Rahmenbedingungen / Umsetzung	prinzipielle Eignung
Chemische Oxidation	schneller Abbau der organischen Schadstoffe im Grundwasserleiter	<ul style="list-style-type: none"> – nach Pump and Treat gut einsetzbar, insbesondere für schwerer abbaubare und weniger mobile Schadstoffe, die hydraulisch nicht erfasst wurden – vorhandene Brunnen / Messstellen von Pump and Treat können ggf. genutzt werden zur Injektion der Oxidationsmittel – gleichmäßige und flächendeckende Verteilung der Oxidantien im Grundwasserleiter ist erforderlich 	sehr gut
mikrobiologischer Abbau mittels Bioscreen	mikrobieller Schadstoffabbau in der aktivierten Zone	– einsetzbar als passives System im Abstrom bei geringen Schadstofffrachten, nachdem die hohen Schadstoffkonzentrationen durch Pump and Treat beseitigt wurden	gut
reaktive Systeme	Rückhalt / Abbau der Schadstoffe im reaktiven System	<ul style="list-style-type: none"> – theoretisch nach Pump and Treat gut einsetzbar zur passiven Abreinigung der vorhandenen Restbelastung des Grundwassers – auf Grund der Aufwendungen zur Planung und Errichtung solcher Systeme und den damit verbundenen hohen Investitionskosten ist ein Ersatz von Pump and Treat i. d. R. nicht sinnvoll 	nur bedingt
Air- / Bio-Sparging oder GWZB	Strippen leichtflüchtiger Schadstoffe und Starten / Beschleunigen mikrobieller Abbauvorgänge im Grundwasserleiter	– da diese Verfahren im Wesentlichen für leichtflüchtige Schadstoffe effektiv eingesetzt werden, ist deren Anwendung nach Pump and Treat nur dann sinnvoll, wenn noch relevante Mengen leichtflüchtige Schadstoffe zu entfernen sind	nur bedingt

Nachstehende Tabelle enthält die Ergebnisse einer Literaturstudie vorwiegend US-amerikanischer Veröffentlichungen zur bisherigen Anwendung und Effizienz von in-situ-Quellensanierungen.

Tab.:3 Bisherige Anwendungs(bereiche) und effizienz von in-situ-**Quellensanierungsverfahren**



 Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Bisherige Anwendungs(bereiche) und Effizienz von in-situ Quellensanierungsverfahren

Typ	Anwendung ^{a)}	Anwendungsbereich ^{b)}	Kosten ^{c)} (\$/yd ³)	Schadstoffreduktion ^{d)}	Behandlungsdauer ^{e)} (Tage)	Rebound ^{f)}
Therm. Methoden	Pilot / Full (25/25)	pools + residuals +	32 – 300 88 (n=6)	55-99% > 95%	142 – 1127 228	k.A.
Chem. Extraktion	v.a. Pilot (10)	pools (+) residuals +	66 – 5500 385 (n= 6)	90-99% ~ 95%	6 – 58 46	k.A.
Chem. Oxidation	Pilot / Full (7/14)	pools + residuals +	20 – 518 125 (n=13)	0 / 70-99 ~ 88%	1 – 731 212	57
ENA	Pilot / Full (10/15)	pools - residuals +	2 – 225 29 (n=11)	30 – 99 ~ 95%	1 – 2123 427	10

a) P: Pilot studies / F: Full scale (Zsf. aus aktueller Lit. Recherche)
 b) +: möglich ; -: ungeeignet, v.a. für poröse Medien (U.S. EPA, 2003)
 c) Full-scale & Pilot Anwendungen; Wertebereich; Median, (n=Anzahl der Standorte), (McDade et al. 2005)
 d) Konzentration Ausgangssubstanzen: Wertebereich (Min-Max), Median (McGuire et al. 2006)
 e) Wertebereich (Min-Max), Median (McGuire et al. 2006)
 f) Prozentanteil an Standorten mit Rebound an > 50% der untersuchten Pegel (McGuire et al. 2006)

Die Tabelle ist Bestandteil des Manuskriptes:

Grandel, S., Köber, R., Schäfer, D., Dahmke, A. (in prep): Ein Review zur Effektivität und Effizienz von (partiellen) in-situ Technologien zur Quellensanierung von DNAPL / LCKW Standorten. wird eingereicht im „Altlasten Spektrum“ im Jan. 2007

3.3 Mindestanforderungen an die Dokumentation

3.3.1 Dokumentation der Entscheidungsgrundlagen zur Sanierung

Die Grundsätze zur Dokumentation der Sanierungsmaßnahme müssen sehr frühzeitig berücksichtigt und angewendet werden, nicht erst in der Phase der Sanierung selbst.

Wesentliche Grundlagen dazu werden bereits in den vorhergehenden Erkundungsstufen, insbesondere der Detailuntersuchung, sowie der Sanierungsuntersuchung und den Planungsphasen der Sanierung geschaffen. Daten dazu sind nachträglich nur sehr schwer recherchierbar bzw. aufzustellen und können so gravierende Entscheidungslücken bilden.

Die Umsetzung einer umfänglichen, vollständigen und bezüglich der getroffenen Entscheidungen nachvollziehbaren Dokumentation ist daher ausschlaggebend für sachgerechte Entscheidungen zum erfolgreichen Abschluss von aktiven Grundwassersanierungsmaßnahmen. Diese Grundlagen müssen ebenso für eine eventuelle Fortsetzung der Maßnahme unter Berücksichtigung von Optimierungen oder Alternativen zum Pump and Treat vorhanden, aber auch zur Erfolgskontrolle geeignet sein.

Aus dem Vorschlag einer Checkliste zur Dokumentation - siehe Anlage 1- ist erkennbar, welche Daten zu welchem Zeitpunkt erfasst werden müssen, damit zu den vorgesehenen Evaluierungszeitpunkten die notwendigen Fakten zur Auswertung vorliegen.

Stand der Voruntersuchungen

In der Detailuntersuchung erfolgt die abschließende Gefährdungsabschätzung zum betrachteten Objekt mit der Schlussfolgerung zum weiteren Handlungsbedarf. Dieser besteht bei begründeter Gefahren- und Schadenslage in der Vorbereitung von Sicherungs- und Sanierungsarbeiten.

Das bedeutet für den Gutachter, dass alle entscheidungsrelevanten Daten zur Historie des Falles und zum Umfang des Schadens in der Unterlage zur Sanierungsentscheidung (Sanierungsvorschlag/Sanierungskonzept) so darzustellen sind, dass diese ohne nochmalige Primärdateneinsicht abrufbar sind (Schadstoffmengen, -frachten der Ausgangssituation, Randbedingungen).

Dies betrifft auch die Ergebnisse von ergänzenden Untersuchungen zur Schließung von Kenntnislücken und Eignungsuntersuchungen für Sanierungsverfahren. Es sind ebenfalls die Ergebnisse durchgeführter Variantenvergleiche (Nutzen-Kosten-Bewertung), insbesondere der wesentlichen Entscheidungsgründe zu dokumentieren, da dies bei der späteren Analyse des Sanierungsverlaufs, hauptsächlich jedoch bei unbefriedigenden Ergebnissen des Soll-Ist-Vergleichs, Aufwand und Verfahren vereinfacht.

Rechtliche Grundlagen zum Sanierungsfall

Der fachlich fundierte Entscheidungsvorschlag bestimmt den anschließenden rechtlichen Akt, in dem im einfachsten Fall die behördliche Bestätigung des Sanierungskonzeptes erfolgt, besser aber die Aufstellung eines Sanierungsplanes behördlich gefordert wird. Die Durchführung der Maßnahme erfolgt dann auf der Basis der wasser- und bodenschutzrechtlichen Anordnung. Anzustreben ist für komplexe Sanierungsfälle der Abschluss eines öffentlich-rechtlichen Vertrages, der als sicheres Planungs- und Entscheidungsinstrument für Sanierungspflichtige, zuständige Behörde und Kostenträger gilt. Nachvollziehbar dokumentiert werden müssen damit hier vor allem die Begründungen für die getroffenen Entscheidungen für später ggf. notwendige Änderungen oder Ergänzungen.

Grundlageninformationen zum Sanierungsfall

Hierunter sind vor allem alle territorialen und formalen Angaben, aber auch die fachlichen Ausgangsdaten zu verstehen.

Neben den vorhandenen Unterlagen (Gutachten, Berichte, Dokumente) sind die Standortangaben zur Lage (Koordinaten, Flur / Flurstücke, Höhen) zu erfassen sowie die Flächen und Volumina zu ermitteln, die die Ausgangssituation vor Beginn aktiver Sanierungsmaßnahmen umschreiben. Auch sind Angaben zur Einordnung des Standortes in sein Umfeld (Lage zu Schutzgebieten, Angaben zu Gewässern) zu berücksichtigen. Weitere formelle Angaben betreffen Eigentümer / Sanierungsträger / Zuständige Behörde sowie Angaben zu Betroffenen. Sehr wichtig ist die sichere Erfassung der Nutzung des Sanierungsgrundstücks. Neben der Historie stellt hier die geplante Nutzung (oder die planungsrechtlich zulässige Nutzung) eine wesentliche Grundlage für die spätere Sanierung dar.

Große Bedeutung kommt der Erfassung der Leitschadstoffe sowie der weiteren flächenrelevanten Kontaminanten zu. Dokumentiert werden sollte auch der Zeitpunkt der Schadensfeststellung. Die Beschreibung zum Schadensbild muss unbedingt auch den allgemeinen Grundwasserchemismus zur Kennzeichnung des hydrochemischen Typs sowie ggf. auftretende Begleitstoffe umfassen, die das spätere Verfahren in seiner Effizienz beeinflussen können. Mit der umfänglichen und quantifizierenden Beschreibung der Ausgangskonzentrationen sowie der Hintergrundbelastung werden die Grundlagen für die später erforderlichen Bilanzierungen geschaffen.

Angaben zur Geologie / Hydrogeologie

Mit den Angaben zur Geologie / Hydrogeologie werden weitere wichtige Daten zur Ausgangslage erfasst. Sie sind im Einzelnen für die Berechnung der Schadstoffmengen sowie des Austragsverhaltens wichtig. Hierzu werden auch die Wasserhaushaltsdaten benötigt. Eintragsbereich und Fahnenbereich sind getrennt darzustellen. Die Kontaminationssituation für die einzelnen Medien (Boden, Bodenluft und Grundwasser) ermöglicht dann die Abgrenzung kontaminierter Bodenkörper nach Fläche und Volumen. Zu unterscheiden ist auch hier nach Schadherden sowie Fahnen – und Abstrombereichen, da daraus die späteren Sanierungszonen und unter Umständen ein getrennter und unterschiedlicher Maßnahmenbedarf resultiert.

Ausbreitungsverhalten

Die Angaben zum Ausbreitungsverhalten liefern wesentliche Grundlagen zur regelmäßig durchzuführenden Bilanzierung des Schadens. Zu erfassen sind der Schadstoffeintrag in das Grundwasser, der Schadstoffaustrag bzw. das Transferverhalten im Grundwasser selbst, die Schadstofffrachten im Abstrom (an Bilanzschnittlinien) sowie die Länge/Erstreckung der Schadstofffahne (horizontal / vertikal). Diese Daten sind Voraussetzung für Pumpversuche und Grundwassermodellierungen, mit deren Hilfe das einzusetzende Sanierungsverfahren vorausschauend quantifiziert werden soll. Dabei sind die ermittelten oder angenommenen Parameter umfassend auszuwerten und mit entsprechender Begründung zu dokumentieren.

Sanierungszonen / Sanierungsziele / Sanierungszielwerte

Entscheidend für Art und Umfang der geplanten Grundwassersanierung sowie deren erfolgreiche Durchführung und Abschluss ist die Festlegung und nachvollziehbare Begründung von verhältnismäßigen Sanierungszielen (vergleiche hierzu auch Kap. 3.1) als Stufenprozess vom Vorschlag über die Anwendung und ggf. Modifizierung/Anpassung während der Sanierung. Je nach Komplexität des Falles können für einzelne Sanierungszonen unterschiedliche Festlegungen gelten. Wichtig für den späteren Fallabschluss sind bereits in der Entscheidungsphase zu einer Sanierungsmaßnahme Definitionen zur Verhältnismäßigkeit der Ziele sowie eine Prognose zum angenommenen Zeitbedarf für die Zielerreichung. Die Ziele selbst bilden eine der wesentlichen Voraussetzungen zum ausgewählten Sanierungsverfahren.

Entscheidungskriterien zum Sanierungsverfahren

Die Entscheidungskriterien zum Sanierungsverfahren sind fachlich in den einzelnen Verfahrensschritten der Sanierungsuntersuchung zu begründen und anschließend behördlich zu bestätigen.

Damit verbunden sein sollten zu diesem frühen Zeitpunkt (vor Beginn einer Sanierungsmaßnahme) auch Kriterien für ggf. notwendige Verfahrensoptimierungen, Verfahrensergänzungen, Alternativverfahren sowie Schutz und Beschränkungsmaßnahmen. Erste Vorschläge für Beendigungskriterien sind ebenfalls zu erfassen.

3.3.2 Dokumentation der Sanierungsmaßnahme

Die dargelegten Anforderungen an die Dokumentation einer Sanierungsmaßnahme (vergleiche auch Anlage 1 ab Pkt. 12) beziehen sich besonders auf die Anforderungen von Pump and Treat-Sanierungen, können jedoch ebenso allgemein für weitere Verfahren der Grundwassersanierung angewendet werden.

Mit einer reproduzierbaren Dokumentation der durchgeführten Grundwassersanierung wird gesichert, dass die Maßnahmen tatsächlich zu einem definierten Zeitpunkt abgeschlossen werden können. Damit stellt die Dokumentation auch ein Instrument zur Planungssicherheit für den Sanierungspflichtigen, die

zuständigen Behörden und die Betroffenen dar.

Darstellung der Sanierungsmaßnahme / Verfahrensinformationen zur gewählten Grundwassersanierungsanlage

Die Darstellung der Sanierungsmaßnahme sowie Verfahrensinformationen zur gewählten Grundwassersanierungsanlage müssen alle technischen Daten zur Reinigungsanlage enthalten, die für später notwendige Änderungen oder Ergänzungen als Grundlage dienen können.

Kostenplanung / Kostenaufstellung

Ein entscheidender Teil für die Beurteilung der Effizienz der Maßnahme stellen die dafür notwendigen Kosten dafür. Diese sind vorausschauend zu planen und danach während der Durchführung der Sanierung zu festgelegten Zeitschnitten zu verfolgen und zu bewerten. Zum Abschluss der Maßnahme sind dann die tatsächlich angefallenen Kosten in den einzelnen Kostenarten Investkosten, Betriebskosten, Überwachungskosten, Sanierungsbegleitkosten, Entsorgungskosten und ggf. Einleitkosten aufzustellen.

Verlauf der Sanierung

Dieser hervorgehobene Teil stellt im eigentlichen Sinne einen Abschnitt der Dokumentation zum Verlauf der Sanierung dar. Hierunter sind zu verstehen:

- Entwicklung der Grundwasserförderraten
- Entwicklung der Schadstoffkonzentrationen (Austragskurven, Konzentrationsverläufe)
- Entnommene Schadstoffmengen (schadstoffparameterbezogen, gesamt)
- Entwicklung der Schadstofffrachten
- Entwicklung der Betriebskosten
- Regelmäßige Bilanzbetrachtungen (je nach Einzelfall Monate, Quartale, Jahre)
- Zeitliche Entwicklung einschl. Prognose zum Abschluss
- Regelmäßige Beurteilung der Effizienz des gewählten Verfahrens
- Verfahrensänderungen / Optimierungen (Begründung / Zeitpunkt)

Sanierungsüberwachung

Wichtiger Bestandteil für Auswertung und Beurteilung des Verlaufes sowie der Effizienz einer Maßnahme stellt seine turnusmäßige Überwachung dar. Hierfür sind die Kriterien zur regelmäßigen Überwachung, der Umfang der zu überwachenden Parameter und deren grafische und tabellarische Darstellung (Konzentrationen, Frachten, Kosten) zu verstehen. Für später notwendige Entscheidungen sind nicht nur die eigentlichen Schadstoffparameter, sondern auch weitere, das Verfahren bestimmende Begleit- oder Abbauprodukte in Abständen mit zu dokumentieren. Sie ermöglichen unter anderem die Entscheidung zur Effizienz, zur Beendigung der aktiven Sanierung sowie zur Tolerierbarkeit ggf. verbleibender Restbelastungen.

Erfolgskontrolle für den Abschluss von Sanierungsmaßnahmen

Den Abschluss der Sanierungsdokumentation bildet die Erfolgskontrolle für den erfolgreichen Abschluss von Sanierungsmaßnahmen. Hierbei werden neben der Erfassung von Umfang, Parametern und Prüfstellen besonders die Kriterien zur Beendigung der Überwachung entwickelt. Da in vielen Fällen Restbelastungen verbleiben, die aktiv nicht effizient zu sanieren sind, sind Alternativlösungen, ggf. auch für ein mittel-langfristiges MNA-Konzept vorzuschlagen.

Mit vorstehenden Ausführungen, die grundlegend dem Ablauf einer Maßnahme von deren Vorbereitung über die Planung zur Durchführung bis zum Abschluss folgen, sollte gezeigt werden, dass Daten zur Sanierung sehr umfangreich zu dokumentieren und zu begründen sind, damit die Sanierung im Einzelfall auf fachlich- und rechtlich gesicherter Basis erfolgreich abgeschlossen und bestätigt werden kann.

4 Zusammenfassung

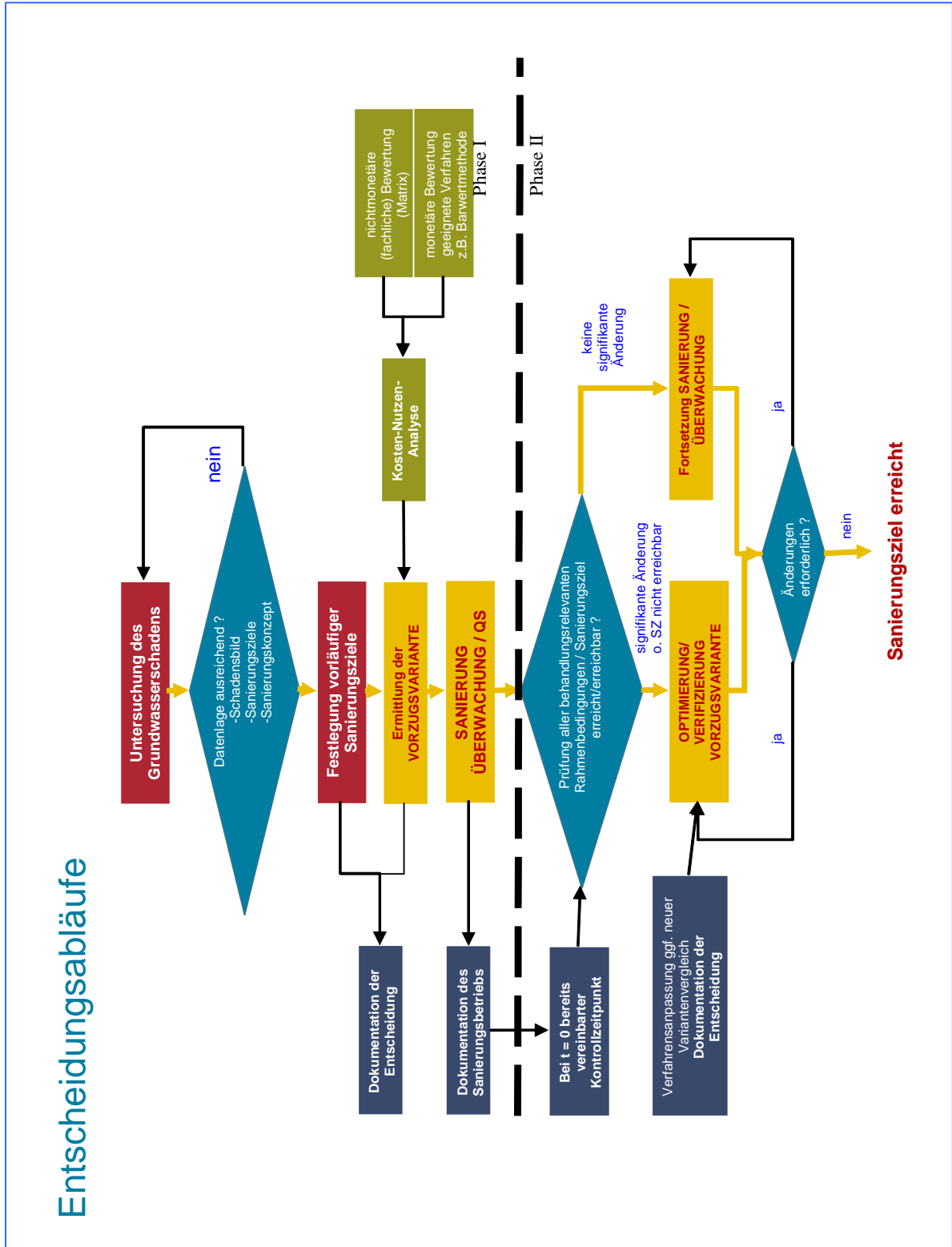
Pump and Treat- Verfahren stellen nach wie vor effektive Verfahren vor allem zur Entfernung großer Schadstoffmengen bei hohen Konzentrationen dar. Obwohl die prinzipielle Limitierung durch das Trägermedium Grundwasser bekannt ist, wird der zu erwartende Übergang zur diffusionslimitierten Phase im konzeptionellen Ansatz üblicherweise kaum berücksichtigt. Darüber hinaus bestehen häufig Defizite in Form unzureichender Erkundung des Schadensfalls, mangelhafter oder unzweckmäßiger Dokumentation des Sanierungsverlaufs (vor allem der Kosten) und nicht mehr nachvollziehbarer Entscheidungen zu Handlungsbedarf und Verfahrensauswahl.

Die vorliegende Entscheidungshilfe Grundwassersanierung - Effizienz von Pump and Treat-Sanierungen wurde im Ergebnis einer Recherche von Grundwassersanierungsfällen und einer Literaturliteraturauswertung zur Effizienzbewertung von Grundwassersanierungen erstellt. Dabei wurde eine Bewertung des Iststands der weitgehend üblichen Ausführung und Begleitung von Grundwassersanierungen vorgenommen. Im Ergebnis der durchgeführten Betrachtungen wurden

- Möglichkeiten zur Optimierung noch laufender, aber nicht mehr effizienter Pump & Treat-Sanierungen und
- die generelle Verfahrensweise bei der Konzipierung von Grundwassersanierungen sowie die Voraussetzungen für die Ermittlung des geeignetsten Verfahrens dargelegt.

Darüber hinaus wurden im Ergebnis der festgestellten Defizite bei laufenden/abgeschlossenen Sanierungen Mindestanforderungen an die Dokumentation und Begleitung von Grundwassersanierungen definiert.

In der nachfolgenden Grafik ist eine Übersicht der Entscheidungsabläufe dargestellt:



5 Unterlagen / Literatur

- ATRIUM Rechercheprogramm – Altlasten-Technologie Recherche im Umweltmanagement. – Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
- BAYER P., FINKEL M. & TEUTSCH G.(2004): Kombinierte Pump and Treat-Barrierensysteme, Teil 1: Minimierung der Grundwasserentnahmerate durch hydraulische Zusatzmaßnahmen, Grundwasser 9(3), 173-180
- BÜRGER C. , FINKEL M. & TEUTSCH G. (2003): Reaktionswandsysteme und Pump and Treat – Ein Kostenvergleich, Grundwasser 8(3),
- CZEKALLA C., MOOSMANN L. & SCHRADER J.P.(2002): Leistungsvergleich von Pump and Treat und hydraulisch-biologischer in-situ-Sanierung einer Grundwasserfahne, Terratech 11(3), 38-41
- DSC Dr. Stupp Consulting GmbH, Bergisch-Gladbach; Internetseite: www.sanierungsverfahren.de
- GALLE-BÜRGELE, TH., SCHMITT, TH. (2006): Zur Umsetzung von Geringfügigkeitsschwellen auf Landesebene. altlasten spektrum 2/2006
- GRANDEL, S.; KÖBER, R.; SCHÄFER, D.; DAHMKE, A. (2006): Ein Review zur Effektivität und Effizienz von (partiellen) in-situ-Technologien zur Quellensanierung von DNAPL / LCKW-Standorten (Manuskript, wird eingereicht im „Altlastenspektrum“ im Januar 2007), DECHEMA-Tagung 20. – 21.11.2006
- GROSSMANN, J., WILLAND, A., (2002): Methodik für die Bestimmung von Sanierungszielen und –maßnahmen bei Grundwasserverunreinigungen in den Altlastenprojekten im Land Sachsen-Anhalt. (i.A. der LAF). GGSC / GICON, Mai 2002
- HAUPT T. (2005): Grundwassersanierung in Hamburg-Eppendorf – Variantenprüfung im Rahmen der Konzepterstellung, Altlastensymposium Köln 2005
- LABO (2005): Berücksichtigung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse bei der Altlastenbearbeitung. Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz. Positionspapier vom 01.06.2005
- LfUG (1999/2000) Sächsisches Altlastenkataster - SALKA
- LfW Bayern-Merkblatt Nr.3.8/3, Natürliche Schadstoffminderung bei Grundwasserverunreinigungen durch Altlasten und schädliche Bodenveränderungen –Natural Attenuation- , Stand 11/2004
- ODENSASS M. & SCHROERS S. (Landesumweltamt NRW) (2004): Empfehlungen für die Durchführung von Grundwassersanierungsmaßnahmen bei Altlasten, Landesumweltamt NRW
- PHILIPP, R.; LOIBNER, A. P.; AICHBERGER, K. (2006): Technischer Leitfaden. Biologische Sanierung der gesättigten Bodenzone – Grundwasserzirkulationsbrunnen (GWZB), erstellt im Forschungsprojekt INTERLAND; TERRA Umwelttechnik GmbH, Wien und BOKU Wien, Department IFA-Tulln, Institut für Umweltbiotechnologie, April 2006
- SOJA, G. (2006): Technischer Leitfaden. In-situ-Anwendung chemischer Oxidationsmittel und Oxidationsverfahren, erstellt im Forschungsprojekt INTERLAND; ARC Seibersdorf research GmbH, Seibersdorf / Österreich, April 2006
- STUPP H.D., BAKENHUS A., STAUFFER R. & LORENZ D.(2006): Kosten zur Sanierung von Grundwasserverunreinigungen durch CKW und Ansätze zur Definition der Verhältnismäßigkeit von Sanierungsmaßnahmen, Altlastenspektrum 2/2006, 84-92
- STUPP H.D., BAKENHUS A., STAUFFER R. & LORENZ D. (2005): Sanierungsoptimierung von CKW-Grundwasserschäden – Möglichkeiten zur Reduzierung der Sanierungskosten, Altlastenspektrum 6/2005, 313-322

- STUPP H.D., BAKENHUS, A, GASS, M., SCHWAAR, I., LORENZ, D. (2006): Ausbreitung von CKWE und MTBE im Grundwasser – Grundwassertransport und Fahnenlängen. *altlasten spektrum* 5/2006
- SMUL (2000): Vorläufiger Rahmenerlass "Altlasten/ Grundwasser - Bewertungen und Festsetzung vorläufiger Sanierungszielwerte am Ende der Detailuntersuchung". Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, 27.06.2000.
- SMUL / LfUG (1999): Handbuch zur Altlastenbehandlung in Sachsen, Teil 8: Sanierungsuntersuchung, Juli 1999
- SMUL / LfUG (2004): Handbuch zur Altlastenbehandlung in Sachsen, Teil 7: Detailuntersuchung, Mai 2004
- Materialien zur Altlastenbehandlung. Mikrobiologische Sanierungsverfahren. Hrsg.: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden, April 2000
- SMUL / LFUG (2006): Materialien zur Altlastenbehandlung im Freistaat Sachsen: Überwachung und Nachsorge von altlastenverdächtigen Flächen und Altlasten. Arbeitsstand September 2006 (Entwurf)
- UMWELTBUNDESAMT (2003): Datenbank Grundwasserkontaminationen GWKON, Version 1.4, GICON GmbH 2003
- U.S. EPA (2005): Cost-Effectiv Design of Pump and Treat Systems, United States Environmental Protection Agency, EPA 542-R-05/008
- U.S. EPA (2002): Elements for Effectiv Management of Operating Pump and Treat Systems, United States Environmental Protection Agency, EPA 542-R-02/009
- U.S. EPA (1997): Design Guidelines for Conventional Pump-and-Treat Systems, EPA Ground Water Issue, United States Environmental Protection Agency, EPA 540-S-97/504
- U.S. EPA (1996): Pump and Treat Ground-Water Remediation – A Guide for Decision Makers and Practitioners, United States Environmental Protection Agency, EPA 625-R-95/005
- U.S. EPA (1996): Presumptive Response Strategy and Ex-Situ treatment technologies for contaminated ground water at cercla sites, final guidance, EPA 540/R-96/023
- VEGAS Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung, Institut für Wasserbau, Stuttgart; Internetseite: www.iws.uni-stuttgart.de/Vegas/
- WILLAND, A. (2005): Rechtliche Probleme der Grundwassersanierung: Sanierungsziele, Wirksamkeitsprognose für Maßnahmen und Natural Attenuation. *altlasten spektrum* 2/2005
- WILLAND, A., GROSSMANN, J. (2005): Ermessenskriterien für die Entscheidung über die Sanierung von Grundwasserschäden. *altlasten spektrum* 6/2002
- ZITTWITZ, M.; GERHARDT, M.; RINGPFEIL, M (2003): Praktische Erfahrungen in der kommerziellen Anwendung von enhanced natural attenuation für die Sanierung von Mineralöl- und LCKW-Schadensfällen, BIOPRACT GmbH, 5. Symposium Natural Attenuation (DECHEMA e.V.), 2. – 3. Dezember 2003

ANLAGE 1: Checkliste zur Dokumentation von Grundwassersanierungsmaßnahmen

- 1 **Stand der Voruntersuchungen (Altlastenstufe)**
 - Detailuntersuchung
 - *Ergebnisse der technischen Erkundungen*
 - *Vorschlag vorläufiger Sanierungsziele*
 - *Abschätzung von Schadstoffmengen*
 - *Ableitung von Schadstofffrachten*
 - Sanierungsuntersuchung
 - *Ergebnisse der Sanierungsuntersuchung*
 - *Ergebnisse ergänzender Standortuntersuchungen*
 - *Sanierungsvorschlag / Sanierungskonzept(mit Begründung)*

- 2 **Rechtliche Grundlagen zum Sanierungsfall**
 - Bestätigtes Sanierungskonzept
 - Sanierungsplan
 - Wasser- und bodenschutzrechtliche Anordnung
 - Öffentlich-rechtlicher Vertrag

- 3 **Grundlageninformationen zum Sanierungsfall**
 - Vorhandene Unterlagen
 - Allgemeine Standortangaben
 - *Lage*
 - *Flur / Flurstücke*
 - *Flächen*
 - *Volumina*
 - *Lage zu Schutzgebieten*
 - Angaben zu Gewässern (Entfernungen, Abflüsse)
 - Angaben zu Eigentümer / Sanierungsträger / Zuständige Behörde
 - Angaben zu Betroffenen (Eigentümer, Flurstücke)
 - Nutzung des Sanierungsgrundstücks
 - *Ehemalige Nutzung*
 - *Gegenwärtige Nutzung*
 - *Geplante Nutzung / ggf. Nutzungskonzept*
 - Sensible Nutzungen im Umfeld
 - Wasserwirtschaftliche Nutzungen im Umfeld (in relevanter Entfernung)
 - Schadstoffinventar / Schadensbild
 - *Leitschadstoffe*
 - *Weitere relevante Schadstoffe*
 - *Zeitpunkt der Schadensfeststellung*
 - Allgemeiner Grundwasserchemismus (Kennzeichnung hydrochemischer Typ)
 - Ausgangskonzentrationen in ungesättigter und gesättigter Bodenzone
 - *Ausgangskonzentrationen im Grundwasser*
 - *Hintergrundbelastung*
 - Gefahrenlage für Schutzgüter
 - Wirkungspfade / Relevante Transferpfade

- 4 **Angaben zur Geologie / Hydrogeologie**
 - Geologisches Regelprofil / Schichtaufbau
 - Relevante Grundwasserleiter
 - Wassererfüllte Mächtigkeit
 - Schwankungsverhalten
 - Wasserdurchlässigkeit
 - Nutzbare Porosität
 - GW-Flurabstand
 - GW-Fließrichtung
 - Abstandsgeschwindigkeit

Anlage 1: Checkliste zur Dokumentation von Grundwassersanierungsmaßnahmen

- 5 Angaben zum Wasserhaushalt**
 - Mittl: Jahresniederschlag
 - Mittl. Verdunstung
 - Mittl. Grundwasserneubildung (Eintragsbereich, Fahnenbereich)

- 6 Darstellung der Kontaminationssituation**
 - Abgrenzung kontaminierter Bereiche
 - *Boden (horizontal, vertikal),*
 - *Bodenluft*
 - *Grundwasser*
 - Kontaminierter Bodenkörper (Fläche / Volumen)
 - Kontaminierter Grundwasserkörper
 - *Schadherde*
 - *Fahnen*
 - *Abstrombereich*

- 7 Ausbreitungsverhalten**
 - Schadstoffeintrag in das Grundwasser
 - Schadstoffaustrag
 - Schadstofffrachten im Abstrom an versch. Bilanzschnittlinien
 - Länge/Erstreckung der Schadstofffahne (horizontal / vertikal)

- 8 Pumpversuchsergebnisse**
 - Fördermengen
 - Absenkungsverhalten
 - Ermittelte hydraulische Parameter
 - Reichweitenermittlung
 - Fließgeschwindigkeiten

- 9 Grundwassermodellierungen**
 - Vorschlag / Begründung / Zielstellungen
 - Ergebnisse Schadstofftransportmodell
 - Ergebnisse Beschaffenheitsmodellierung
 - Ergebnisse Sanierungsszenarien

- 10 Sanierungszonen / Sanierungsziele / Sanierungszielwerte**
 - Vorschlag zur Ausgrenzung von Sanierungszonen einschl. begründender Kriterien
 - Allgemeine Sanierungsziele
 - Zonierte Sanierungsziele- und -zielwerte
 - Technische Sanierungsziele- und -zielwerte
 - Reinigungsendwerte
 - Einleitwerte
 - Diskussion Verhältnismäßigkeit mit den Kriterien
 - Prognose zum Zeitbedarf (mit Begründung)

- 11 Entscheidungskriterien zum Sanierungsverfahren**
 - Fachliche Begründung des Sanierungsentscheides
 - Behördliche Begründung
 - Vorauswahl und Bewertung möglicher Verfahren
 - Auswahl und Begründung des standortspezifischen Sanierungsverfahrens
 - ggf. Vorschlag Verfahrensoptimierungen
 - ggf. Vorschläge zu Verfahrensergänzungen
 - ggf. Vorschlag Alternativverfahren
 - ggf. Vorschläge zu Schutz und Beschränkungsmaßnahmen
 - Erste Vorschläge von Beendigungskriterien

Anlage 1: Checkliste zur Dokumentation von Grundwassersanierungsmaßnahmen

- 12 Darstellung der Sanierungsmaßnahme**
 - Beschreibung / Begründung der ggf. für unterschiedliche Sanierungszonen geplanten Maßnahmen (Sicherung / Sanierung)

- 13 Verfahrensinformationen zur gewählten Grundwassersanierungsanlage**
 - Art / Anzahl / Dimensionierung der Entnahmeelemente (Brunnen, Schächte, Drainagen)
 - Technologie der Grundwasserreinigungsanlage
 - *Komponenten*
 - *Wirkungsweise*
 - *Dimensionierung der Anlage einschl. Begründung*
 - *Eingangswerte Anlage*
 - *Abgangswerte Anlage*
 - *Einsatz von Chemikalien (Art, Mengen)*
 - *Entsorgung (Art, Mengen)*
 - Verbleib des gereinigten Wassers (Reinfiltration GWL, Einleitung in Oberflächenwasser, Einleitung Kanalisation)

- 14 Kostenplanung / Kostenaufstellung**
 - Soll-Ist-Vergleiche zu
 - *Investkosten*
 - *Betriebskosten*
 - *Überwachungskosten*
 - *Entsorgungskosten*
 - *Einleitkosten*

- 15 Verlauf der Sanierung**
 - Entwicklung der Grundwasserförderraten
 - Entwicklung der Schadstoffkonzentrationen ((Austragskurven, Konzentrationsverläufe)
 - Entnommene Schadstoffmengen (schadstoffparameterbezogen, gesamt)
 - Entwicklung der Schadstofffrachten
 - Entwicklung der Betriebskosten
 - Regelmäßige Bilanzbetrachtungen (je nach Einzelfall Monate, Quartale, Jahre)
 - Zeitliche Entwicklung einschl. Prognose zum Abschluss
 - Regelmäßige Beurteilung der Effizienz des gewählten Verfahrens
 - Verfahrensänderungen / Optimierungen (Begründung / Zeitpunkt)
 - Kostenentwicklung

- 16 Sanierungsüberwachung**
 - Kriterien zur regelmäßigen Überwachung
 - Turnus der Überwachung
 - Umfang der zu überwachenden Parameter
 - Grafische und tabellarische Darstellung von Konzentrationen, Frachten, Kosten
 - Entscheidungskriterien zur Beendigung der aktiven Sanierung
 - Tolerierbarkeitsbetrachtung für verbleibende Restbelastungen

- 17 Erfolgskontrolle für erfolgreichen Abschluss von Sanierungsmaßnahmen**
 - Umfang / Parameter / Beprobungsorte
 - Kriterien zur Beendigung der Überwachung
 - Alternativen / ggf. MNA-Konzept

Anlage 2: Bewertungsmatrix Sanierungsszenarien

ANLAGE 2: BEWERTUNGSMATRIX SANIERUNGSSZENARIEN

Beispiel-Bewertungsmatrix zur fachlichen Bewertung und Vergleich von Sanierungsszenarien												
Kriteriengruppe	Nr.	Bezeichnung	Wichtung (W)	Szenario A			Szenario B			Szenario C		
				Punkte Verf. A (P)	W x P	Gesamt A	Punkte Verf. B (P)	W x P	Gesamt B	Punkte Verf. C (P)	W x P	Gesamt C
			1...10	1...10			1...10			1...10		
Wirksamkeit	1.1	Wahrscheinlichkeit des Erreichens d. Sanierungsziels	8	5	40	---		0	---		0	---
	1.2	<i>Sanierungsdauer</i>	2	5	10	---		0	---		0	---
	1.3	Flexibilität gegenüber verändertem Schadstoffspektrum	8	5	40	---						
	1.4	Flexibilität gegenüber veränderten Konzentrationen	8	5	40	---		0	---		0	---
	1.5	Entwicklungsstand/Referenzen	6	5	30	---						
Zwischensumme/ Gruppengewichtung			8	---	160	1280	---	0	0	---	0	0
Realisierbarkeit am Standort	2.1	Standortvoraussetzungen (geol./hydrogeol.)	8	5	40	---		0	---		0	---
	2.2	Flächenbedarf	6	5	30	---		0	---		0	---
	2.3	Infrastrukturbedarf	6	5	30	---		0	---		0	---
	2.4	erforderlicher Arbeits- und Emissionsschutz	4	5	20	---		0	---		0	---
	Zwischensumme/ Gruppengewichtung			6	---	120	720	---	0	0	---	0
Wartung/Überwachung	3.1	<i>Wartungsaufwand</i>	2	5	10	---						
	3.2	<i>Überwachungsaufwand</i>	2	5	10	---		0	---		0	---
	3.3	Kontrollierbarkeit d. Sanierungserfolgs	9	5	45	---		0	---		0	---
	3.4	Störanfälligkeit	6	5	30	---		0	---		0	---
	Zwischensumme/ Gruppengewichtung			8	---	85	680	---	0	0	---	0
Auswirkungen auf die Umwelt	4.1	Beeinträchtigung Anwohner/ Peripherie	6	5	30	---						
	4.2	<i>Material- und Rohstoffverbrauch</i>	2	5	10	---		0	---		0	---
	4.3	<i>Reststoffanfall</i>	2	5	10	---		0	---		0	---
	4.4	<i>Energiebedarf Herstellung/ Betrieb</i>	2	5	10	---		0	---		0	---
	Zwischensumme/ Gruppengewichtung			4	---	60	240	---	0	0	---	0
Weitere	5.1	Genehmigungsfähigkeit	6	5								
	5.2	Zusätzlicher Untersuchungsbedarf	6	5	30	---		0	---		0	---
	Zwischensumme/ Gruppengewichtung			5	---	30	150	---	0	0	---	0
Summenbewertung						3070		8		0		
Investkosten	TEUR				500							
Zeitdauer	Jahre				10							
jährl. Betr. Kosten	TEUR	Barwert !			10							
summ. Betr. Kosten	TEUR	Barwert !			100							
Ges. Kosten	TEUR				600							
Nutzen/ Kosten					5,117							
rote Schrift (kursiv) niedrige Wichtung, da Wichtung primär über die Kosten												
Punktbewertung der Verfahren: 1...10:												
positive Bewertung eines Kriteriums = hohe Punktzahl (max. 10),												
negative Bewertung eines Kriteriums = geringe Punktzahl (min. 1)												

(Download der Beispielmatrix auch als Excel-Tabelle möglich, siehe Internet LfUG, FIS Altlasten)

ANLAGE 3: Alternativverfahren zu Pump & Treat/ Verfahrenskombinationen

Die Anlage liefert eine kurze Beschreibung einzelner In situ –Sanierungsverfahren des Grundwassers. Sie fokussiert auf die wesentlichen Verfahrensprinzipien sowie jeweilige Vor- und Nachteile.

Ausführlichere Darstellungen finden Sie auf den Internetseiten des LfUG innerhalb des Programms „**ATRIUM**“, welches laufend aktualisiert wird, sowie im LfUG-Materialienband „**In situ - Sanierungsverfahren**“ (downloadbar als pdf.-Datei).

INHALTSVERZEICHNIS ANLAGE 3:

1	MIKROBIOLOGISCHE IN-SITU-SANIERUNG	73
1.1	<i>Hydraulisch-biologische In-situ-Sanierung</i>	73
1.2	<i>Grundwasserzirkulationsbrunnen (GWZB).....</i>	75
1.3	<i>Air- bzw. Bio-Sparging.....</i>	77
1.4	<i>Bioscreen-Verfahren (Bio-Barriere).....</i>	79
2	CHEMISCH-PHYSIKALISCHE VERFAHREN (IN SITU).....	80
2.1	<i>Chemische Transformation (Oxidation, Reduktion).....</i>	80
2.2	<i>Chemische Extraktion</i>	82
2.3	<i>Thermische Verfahren.....</i>	84
2.4	<i>Hydroschock-Verfahren (Fracken)</i>	85
2.5	<i>Elektrokinetische-Verfahren.....</i>	85
2.6	<i>Reaktive Systeme</i>	86

1 Mikrobiologische In-situ-Sanierung

Das Grundprinzip besteht im Einbringen von Mikroorganismen und / oder von Sauerstoff, Nährstoffen (u. a. Nitrat, Ammonium, Phosphor) und Sauerstoff-donatoren (u. a. Nitrat, Ozon, Wasserstoffperoxid) in das Grundwasser zur Stimulierung des mikrobiellen Abbaus der organischen Schadstoffe. Gegenwärtig existieren zahlreiche unterschiedliche Verfahren (hydraulische Kreisläufe, Air-/Bio-Sparging, Bioscrenn). Mikrobiologisch nicht behandelbar sind Schadstoffphasen.

1.1 Hydraulisch-biologische In-situ-Sanierung

Verfahrensprinzip / Wirksamkeit / Anwendung

Das Prinzip der hydraulisch-biologischen In-situ-Sanierung besteht in der Einrichtung eines Spülkreislaufes, indem im Abstrombereich des Schadensherdes Grundwasser über Brunnen gefördert, ggf. gereinigt

und nach Anreicherung mit Bakterien / Sauerstoff / Nährstoffen / Sauerstoffdonatoren im Bereich des Schadensherdes über Schluckbrunnen wieder in den Grundwasserleiter infiltriert wird. Dadurch werden die mikrobiellen aeroben oder anaeroben Abbauvorgänge im Grundwasser optimiert. Die Schadstoffe werden dabei im Untergrund abgebaut oder mit dem Grundwasser zusammen entnommen und in einer Wasseraufbereitungsanlage entfernt. Das Verhältnis zwischen In-situ-Abbau und hydraulischem Austrag hängt dabei von der Löslichkeit der Schadstoffe, der Abbaukinetik und der angewendeten Verfahrenstechnik ab.

Bei der Sanierung eines LCKW-Schdens wurden die Limitierungen eines laufenden Pump and Treat-Prozesses durch Belüftung der gesättigten Bodenzone unterhalb der Schadstoffe mit einem methanhaltigen Luftgemisch überwunden. Dadurch wurde die selektive Anreicherung methanotropher Mikroorganismen erreicht (ZITTWITZ 2003).

Prinzipiell können mit diesem Verfahren alle bioverfügbaren Schadstoffe abgebaut werden. Aus Kostengründen ist das Verfahren im Hinblick auf eine Minimierung der abzupumpenden Grundwassermengen zu optimieren.

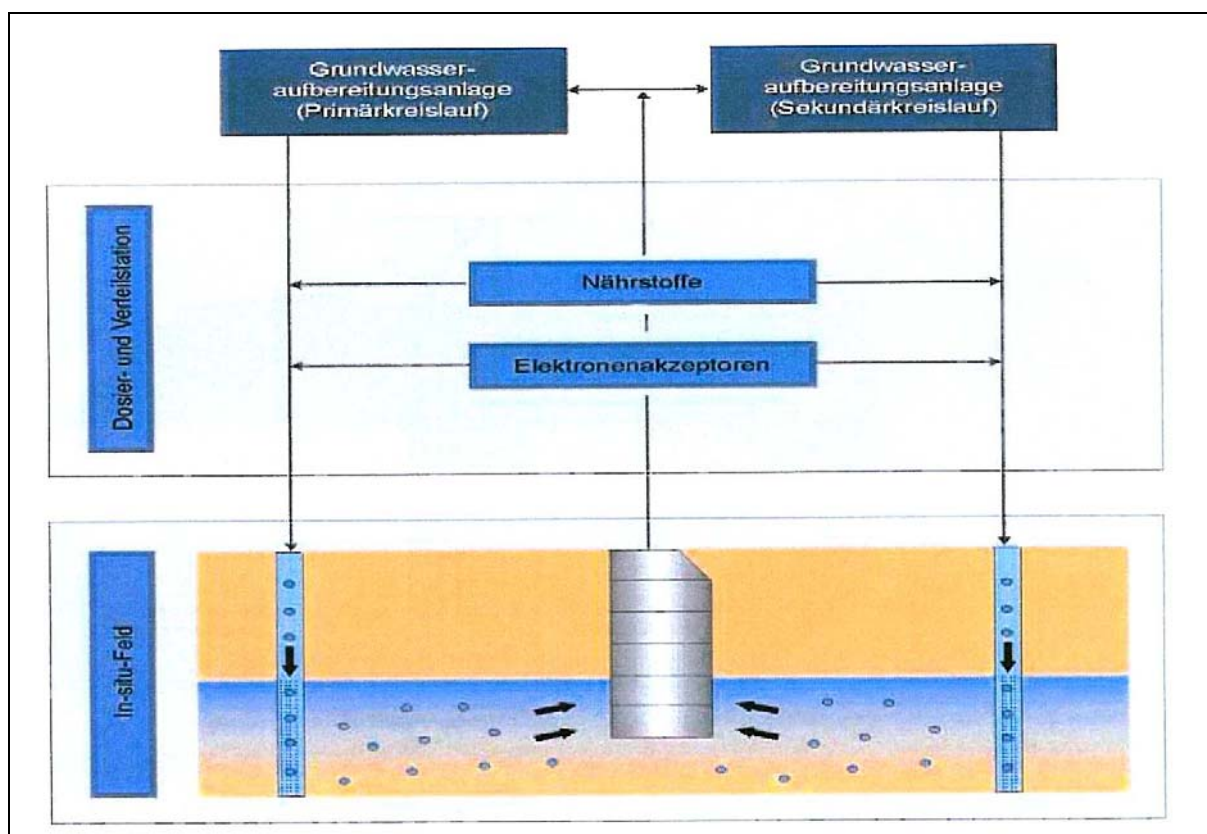


Abb. 1 Funktionsprinzip der hydraulisch-biologischen In-situ-Sanierung (www.sanierungsverfahren.de)

Vorteile

- Zwar erfordern mikrobielle In-situ-Verfahren in der Regel homogen aufgebaute GWL, doch können mit Hilfe hydraulischer Kreisläufe auch solche GWL behandelt werden, die eine gewisse Heterogeni-

tät aufweisen.

- Durch die Beeinflussung des Grundwasserströmungsregimes besitzt das Verfahren eine hohe Variabilität und Anpassungsmöglichkeit an die Standortgegebenheiten.
- Im Hinblick auf die Sanierungszeitdauer stellt das Verfahren das schnellste mikrobielle In-situ-Verfahren dar.

Nachteile

- Da durch den hydraulischen Kreislauf die Grundwasserströmungsgeschwindigkeit erhöht wird, ist eine hydraulische Mindestdurchlässigkeit des GWL von $k_f \geq 10^{-4}$ m/s erforderlich.
- Auch mit hohem Aufwand kann auf Grund der Verlangsamung der Sanierung durch Diffusions- und Stoffaustauschprozesse eine standortbedingte Mindestsanierungszeit nicht unterschritten werden.
- Das Verfahren erfordert relativ hohe Investitionskosten (Wasserbehandlungsanlage) und hohe Betriebskosten (hoher Energiebedarf, intensives Monitoring, Einsatz von Prozesschemikalien).
- Infolge verschiedener Prozesse (Verockerung, Verblockung mit Biomasse, Verschiebung des Bodenfeinkorns) kann es zu einer Verminderung des Aufnahmevermögens der Infiltrationsbrunnen kommen. Brunnenregenerierungen können erforderlich sein.

1.2 Grundwasserzirkulationsbrunnen (GWZB)

Verfahrensprinzip / Wirksamkeit / Anwendung

Grundprinzip dieser Brunnen ist die Herstellung einer vertikalen Grundwasserzirkulation innerhalb und in der Umgebung des Brunnens, was zu einem intensiven Wasserdurchsatz im umgebenden Grundwasserleiter und daher zu einer effizienten Zufuhr von eventuell zugeführter Luft und / oder Nährstoffen führt. Die induzierte Strömung kann wahlweise vom Grundwasserspiegel zur Grundwasserleitersohle oder umgekehrt gerichtet sein. Hauptaufgabe des Verfahrens ist die Strippung von leichtflüchtigen Schadstoffen innerhalb des Brunnens. Die belastete Abluft wird on site gereinigt. Bei entsprechender Modifikation kann zusätzlich das In-situ-Abbaupotenzial gefördert werden.

Spezielle Verfahren der Grundwasserzirkulationsbrunnen stellen die Unterdruck-verdampferbrunnen (UVB), In-Well-Stripping, koaxiale Grundwasserbelüftung (KGB), HydroAirlift oder BioAirlift® dar. Allen gemeinsam ist die Kombination von Grundwasserentnahme und Infiltration innerhalb des gleichen Brunnens bedingt durch zwei voneinander abgedichtete Filterbereiche in unterschiedlicher Tiefe. Zusätzlich können Luft und Nährstoffe zugeführt bzw. ein permeabler Bioreaktor in den Brunnen eingebaut werden.

Aufschwimmende Phase und bindige Zwischenschichten im Grundwasserleiter können berücksichtigt werden. Als untere Grenze der Durchlässigkeit für den Einsatz von GWZB gelten Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f) von 10^{-5} m/s. Das Verfahren ist im ungespannten und gespannten Grundwasser anwendbar. Einschränkungen der Anwendbarkeit ergeben sich bei Verunreinigungen mit nicht ausreichend eliminierbaren Stoffen, bei unvollständig erfassten uneinheitlichen Untergrundverhältnissen und bei rasch fließendem Grundwasserstrom.

Die Sanierungsdauer ist abhängig von der Art und Stärke der Kontamination sowie den Standortbedingungen. Im Mittel kann mit einer Reduktion der Kohlenwasserstoffe von 1.000 – 1.500 mg/kg pro Jahr gerechnet werden (PHILIPP 2006).

Von (PHILIPP 2006) werden Kosten in Höhe von 41 – 93 €/m³ behandelten Boden angegeben.

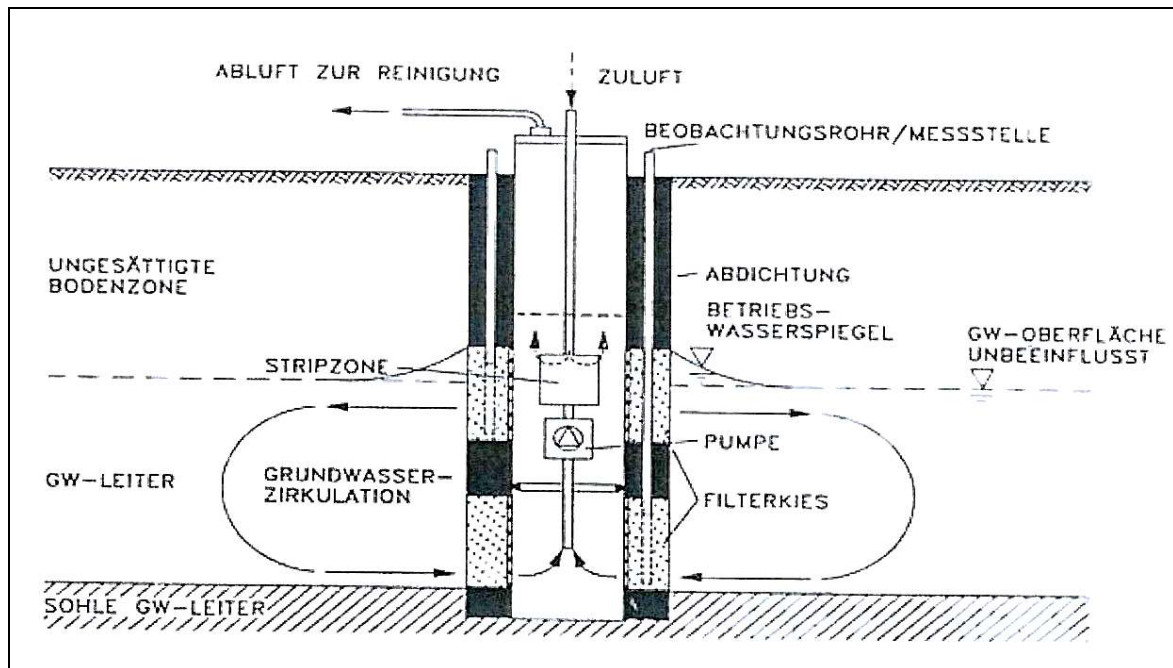


Abb. 2 Funktionsprinzip des Koaxialen Grundwasserbelüftung (www.sanierungsverfahren.de)

Vorteile

- Bei dem Verfahren können verschiedene Prozesse (Stripung, hydraulische Ausspülung, mikrobiologischer Abbau) kombiniert werden.

Nachteile

- Bei Inhomogenitäten im geologischen Aufbau des Untergrundes sowie bei zu großem Abstand des Infiltrations- und des Grundwasserentnahmepunktes wird unter Umständen keine geschlossene Zirkulationsströmung erreicht. Dabei kann es zudem durch radiale Verdrängung zu einer Verfrachtung der Schadstoffe in nichtkontaminierte Bereiche kommen.
- Bei hohen Eisengehalten im Grundwasser ist mit einer wesentlichen Verockerung des Systems zu rechnen. Brunnenregenerierungen können erforderlich sein.
- Zur vollständigen Erfassung der Kontamination kann eine sehr dichte Installation der Brunnen erforderlich sein, woraus entsprechend hohe Kosten resultieren.

1.3 Air- bzw. Bio-Sparging

Verfahrensprinzip / Wirksamkeit / Anwendung

Air- / Bio-Sparging bezeichnet die Injektion von atmosphärischer Luft über Brunnen in den Grundwasserleiter. Dadurch werden die Desorption leichtflüchtiger Schadstoffe (In-situ-Strippen) und der mikrobielle Abbau durch Anreicherung des Grundwassers mit Sauerstoff gestartet bzw. beschleunigt. Zusätzliche Nährsalze zur Beschleunigung des mikrobiellen Abbaus können mit dem gleichen Air-/Bio-Sparging-Pegel oder mit separaten Infiltrationspegeln eingebracht werden.

Da leichtflüchtige Schadstoffe in die ungesättigte Bodenzone verfrachtet werden, wird das Verfahren gewöhnlich mit einer Bodenluftabsaugung kombiniert.

Das Verfahren ist sowohl zur Entfernung leichtflüchtiger als auch schwerflüchtiger Schadstoffe (Benzin- und Dieselschäden, niedermolekulare PAK, BTEX) geeignet. Beim Vorliegen schwerflüchtiger, aber aerob abbaubarer Schadstoffe dient das Sparging im Wesentlichen zur Heranführung des für den mikrobiellen Abbau erforderlichen Sauerstoffes und ggf. von Nährsalzen. Im Idealfall werden biologisch abbaubare Kohlenwasserstoffe gänzlich zu Kohlendioxid und Wasser mineralisiert.

Nicht einsetzbar ist das Verfahren bei gespanntem Grundwasser. Einschränkungen der Anwendbarkeit ergeben sich bei Vorhandensein einer aufschwimmenden Phase (muss vor Beginn des Air- / Bio-Sparging entfernt werden) und sowie bei rasch fließendem Grundwasserstrom. Die Mächtigkeit der gesättigten Zone unterhalb der Kontamination sollte $> 2 - 3$ m betragen.

Von der VEGAS werden die Kosten für das Verfahren mit durchschnittlich 180 €/m^3 behandelten Bodens abgeschätzt. In (PHILIPP 2006) werden Kosten zwischen 41 und 93 €/m^3 behandelten Bodens abgeschätzt.

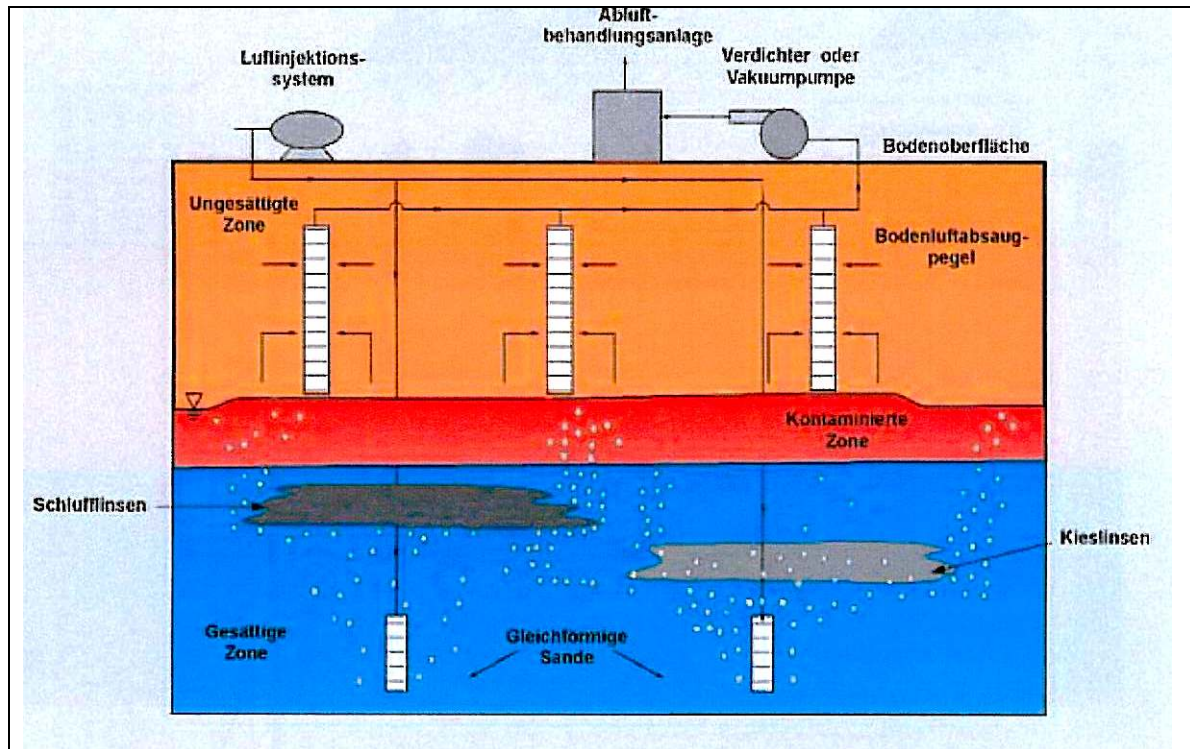


Abb. 3: Funktionsprinzip des Air- / Bio-Sparging-Verfahrens (aus www.sanierungsverfahren.de)

Vorteile

- Air-/Bio-Sparging stellt ein kostengünstiges Verfahren dar.
- Die Förderung der Desorption erhöht zusätzlich die Geschwindigkeit der Schadstoffelimination.
- In der ungesättigten Bodenzone erfolgt durch die Sauerstoffanreicherung eine Förderung des mikrobiellen Abbaus.

Nachteile

- Es ist ein sehr homogen aufgebauter GWL ohne bindige Zwischenschichten erforderlich. Die hydraulische Durchlässigkeit sollte bei $k_f > 10^{-4}$ m/s liegen. Geringdurchlässige Schlufflinsen können die entstehenden Luftströmungskanälchen umleiten, so dass der darüber liegende Bodenbereich nicht erreicht wird. Andererseits führen Bereiche mit höherer Durchlässigkeit dazu, dass die nach oben strömende Luft bevorzugt nur in diesen Bereichen abgeleitet wird.
- Tiefliegende Kontaminationen erfordern sehr hohe Drücke zur Überwindung der Wassersäule. Dies erfordert eine entsprechend leistungsfähige und vergleichsweise teure Anlagentechnik.
- Bei hohen Konzentrationen an gelöstem Eisen oder auch bei einem effizienten mikrobiellen Schadstoffabbau im Untergrund kann es zu einer Verblockung des GWL durch Eisenoxid bzw. Biomasse kommen.
- Durch die Luftblasen in den Porenräumen erfolgt eine Herabsetzung der Durchlässigkeit für Wasser.

1.4 Bioscreen-Verfahren (Bio-Barriere)

Verfahrensprinzip / Wirksamkeit / Anwendung

Der Begriff Bioscreen umfasst eine Vielzahl von unterschiedlichen passiven Verfahren. Allen gemeinsam ist das Wirksamwerden nahe dem Ende oder am Ende der Schadstofffahne. Sie bestehen aus definierten aktivierten Zonen, in denen Schadstoffe abgebaut werden.

Aktivierte Zonen können aus einer Reihe engstehender Brunnen bestehen, die senkrecht zur Grundwasserfließrichtung innerhalb der Schadstofffahne ausgerichtet sind. Unvollständig passive Verfahren umfassen das alternierende Abpumpen und Reinfiltrieren des Grundwassers unter Zugabe von Nährstoffen. Vollständig passive Verfahren beinhalten das Einhängen von bestimmten Stoffbehältern in die Brunnen, die über einen bestimmten Zeitraum kontinuierlich Sauerstoff, Nährstoffe oder Elektronendonatoren abgeben und anschließend durch neue Behälter ersetzt werden müssen.

Vorteile

- Das Verfahren ist auch in inhomogen aufgebauten GWL anwendbar.
- Das Verfahren ist bei großräumigen Schäden, die eine Anwendung aktiver Verfahren unzumutbar erscheinen lassen, von Vorteil.
- Während des Routinebetriebes des Verfahrens wird weder Energie noch Personal benötigt, so dass die Betriebskosten sehr gering sind.

Nachteile

- Die zu behandelnde Schadstofffracht ist bei diesen meist passiven Verfahren gering.
- Die Verfahren sind meist mit einem entsprechend langem und daher kostenintensiven Monitoring verbunden.
- Die Sanierungszeitdauer kann sehr lang sein.
- Großtechnische und langjährige Erfahrungen dieser Verfahren sind sehr begrenzt.
- Die Preise für die Substrate der vollständig passiven Verfahren sind gegenwärtig noch sehr hoch.

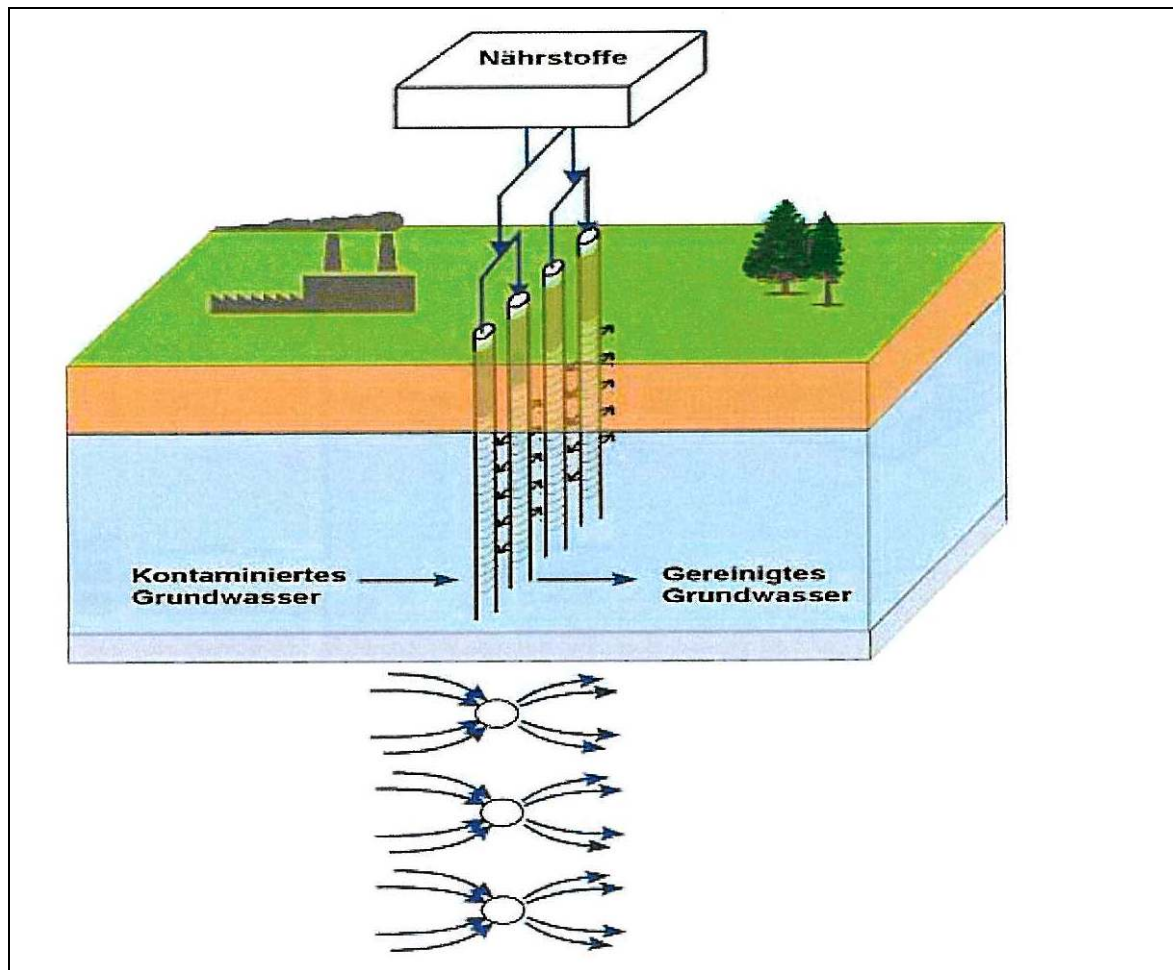


Abb. 4 Funktionsprinzip des Bioscreen-Verfahrens (www.sanierungsverfahren.de)

2 Chemisch-Physikalische Verfahren (in situ)

2.1 Chemische Transformation (Oxidation, Reduktion)

Verfahrensprinzip / Wirksamkeit / Anwendung

In den Veröffentlichungen wird im Wesentlichen die In-situ-chemische Oxidation (ISCO) beschrieben. Dabei werden chemische Oxidationsmittel als Elektronenakzeptoren über Injektionsbrunnen in den Untergrund eingebracht, um dort vorhandene organische Schadstoffe zu unschädlichen Stoffen wie Kohlendioxid und Wasser abzubauen. Das Verfahren eignet sich insbesondere für die Behandlung von Schadherden und auch für schwer abbaubare Verbindungen.

Häufig eingesetzte Oxidationsmittel sind Permanganat (MnO_4^-), Persulfat ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$), Wasserstoffperoxid (H_2O_2) und Fenton's Reagenz. Für die Behandlung von Schadstofffahnen und mäßigen Kontaminations-

niveaus können „milde“ Oxidationsmittel (Peroxide) eingesetzt werden, da beim langsamen Abbau des Oxidationsmittels Sauerstoff freigesetzt wird, der wiederum einen biologischen Abbau, ggf. bei gleichzeitiger Zugabe von Nährstoffen, unterstützt.

Nachfolgende Tabellen zeigen die Behandelbarkeit verschiedener Schadstoffe mit chemischen Oxidationsmitteln sowie die Einsatzzeichnung der Oxidationsmittel.

Tab.:1 Behandelbarkeit verschiedener Schadstoffe mit chemischen Oxidationsmitteln (SOJA 2006)

Schadstoff	Oxidationsmittel				
	MnO ₄	S ₂ O ₈	SO ₄ [•]	Fenton's	Ozone
Alkane	-	-	+	+	+
Alkene	++	++	++	++	++
Benzol	-	+	++	++	++
Chlor-Phenole	+	-	++	++	++
Nitro-Phenole	-	-	-	?	?
Chlorierte Ethene (PCE, TCE)	++	+	++	++	++
Kohlenstoff-Tetrachlorid	-	-	+/-?	+/-?	+/-?
Chlorierte Ethane	-	-	- ?	- ?	+
Toluol	++	++	++	++	++
Ethylbenzol	++	++	++	++	++
PAK	+	+	++	++	++
PCB	+	-	-	-	+ (Perozone)
MTBE	+	+/-	++	+	+

Tab.:2 Einsatzzeichnung chemischer Oxidationsmittel (SOJA 2006)

Schadstoff	Oxidationsmittel				
	MnO ₄	S ₂ O ₈	SO ₄ [•]	Fenton's	Ozone
Quellzone der Schadstoffe	++	++	++	++	++
Ausbreitzungszone	+/-	+/-	-	-	+/-
Sand, Kies	++	++	++	++	++
Schluff, Lehm	+	+	-	-	-

++ = sehr gut behandelbar, + = gut behandelbar, +/- = unsicherer Erfolg, - = schlechte Erfolgsprognose

Vorteile

- kurze Sanierungsdauer durch schnellen Abbau der Schadstoffe (einige Monate bis < 1 Jahr)
- insbesondere für hochkontaminierte Schadenszentren geeignet, bei denen auch mit dem Vorhandensein von Phase gerechnet werden muss
- geeignet auch für schwer abbaubare Verbindungen
- höheres Potenzial zur Schadstoffentfrachtung als klassisches Pump and Treat-Verfahren
- durch oxidativen Teilabbau kann die Bioverfügbarkeit von Schadstoffen erhöht werden, so dass eine Kombinierbarkeit und Unterstützungsmöglichkeit biologischer Verfahren gegeben ist

Nachteile

- zuverlässige Ermittlung der standortspezifischen Rahmenparameter vor Beginn der Sanierung bestimmt den Sanierungserfolg
- gleichmäßige und flächendeckende Verteilung der Oxidantien im Grundwasserleiter erforderlich
- Durchführung von Feldversuchen empfehlenswert
- Verfahren ist zur Behandlung großflächiger, gering kontaminierter Gebiete weniger geeignet
- die Gegenwart von Metallen können die Oxidationskraft vermindern
- besondere Sicherheitsvorkehrungen für den Umgang mit den Oxidationsmittel erforderlich (z. B. Hitze- und Gasentwicklung)

2.2 Chemische Extraktion

Verfahrensprinzip / Wirksamkeit / Anwendung

Durch Einrichtung hydraulischer Kreisläufe mittels Injektions- und Entnahmebrunnen bzw. in Grundwasserzirkulationsbrunnen werden bestimmte Stoffe (Tenside, Alkohole, Mikroemulsionen) in den Grundwasserleiter injiziert, so dass die kontaminierten Bereiche durchströmt werden.

Durch Zugabe von Tensiden ins Wasser werden die Grenzflächenspannung zwischen Schadstoff und Bodenmatrix und damit die kapillaren Haltekräfte erheblich verringert, so dass die Schadstoffe wieder fließfähig werden (Mobilisierung) und hydraulisch gefördert werden können. Bei höheren Tensidkonzentrationen (0,5 – 2 %) wird die (scheinbare) Löslichkeit der Schadstoffe um mehrere Zehnerpotenzen erhöht (Solubilisierung). Die Tensidspülung ist für organische Schadstoffe, jedoch nur für LNAPL anwendbar.

Durch die Zugabe von geeigneten, auf den Schadstoff abgestimmten Alkoholen wird ebenfalls die Löslichkeit des Schadstoffes erhöht und die Grenzflächenspannung zwischen Wasser und Schadstoff herabgesetzt. Die Alkoholspülung ist für organische Schadstoffe (LNAPL und DNAPL) anwendbar. Durch den Einsatz eines Alkohol-Cocktails mit lipophilen Anteilen ist es möglich, die Dichte des Schadstoffes derart zu verringern, dass auch ein mobilisierter DNAPL hydraulisch kontrollierbar wird. Eine aufwärtsgerichtete Grundwasserströmung (z. B. im Umfeld von Grundwasserzirkulationsbrunnen) verhindert zusätzlich ein Absinken der Schadstoffe.

Mikroemulsionen sind thermodynamisch stabile Dispersionen, die zwei nicht miteinander mischbare Flüssigkeiten (Öl, Wasser) enthalten und durch mindestens eine amphiphile Komponente (Tensid) stabilisiert werden. Vom Forschungszentrum Jülich wurde speziell für die In-situ-Sanierung eine Mikroemulsion aus Biodiesel, zwei Tensiden und Wasser entwickelt, die eine hohe Solubilisierungskapazität für organische Schadstoffe besitzt und selbst bei niedrigen Temperaturen (5 – 35 °C) noch stabil ist. Auf Grund ihrer geringeren Dichte als Wasser ist diese Mikroemulsion besonders gut für DNAPL-Schadensfälle geeignet, da eine Schadstoffverfrachtung in tiefere Bodenschichten nicht zu befürchten ist. Bei zusätzlicher Zugabe von Komplexbildnern sind auch Schwermetalle sanierbar.

Durch Modifikation konventioneller Reinigungsanlagen können kontaminierte Wässer behandelt, und die Tenside / Alkohole / Mikroemulsionen zurückgewonnen und ggf. für weitere Spülungen eingesetzt werden. Die Extraktionsverfahren sind hinsichtlich der Bodenart für Kies bis Feinsand geeignet. Es sind höhere Schadstoffaustragsraten erzielbar, als mit herkömmlichem Pump and Treat.

Bisherige Anwendungen der Extraktionsverfahren umfassen im wesentlichen Pilotprojekte.

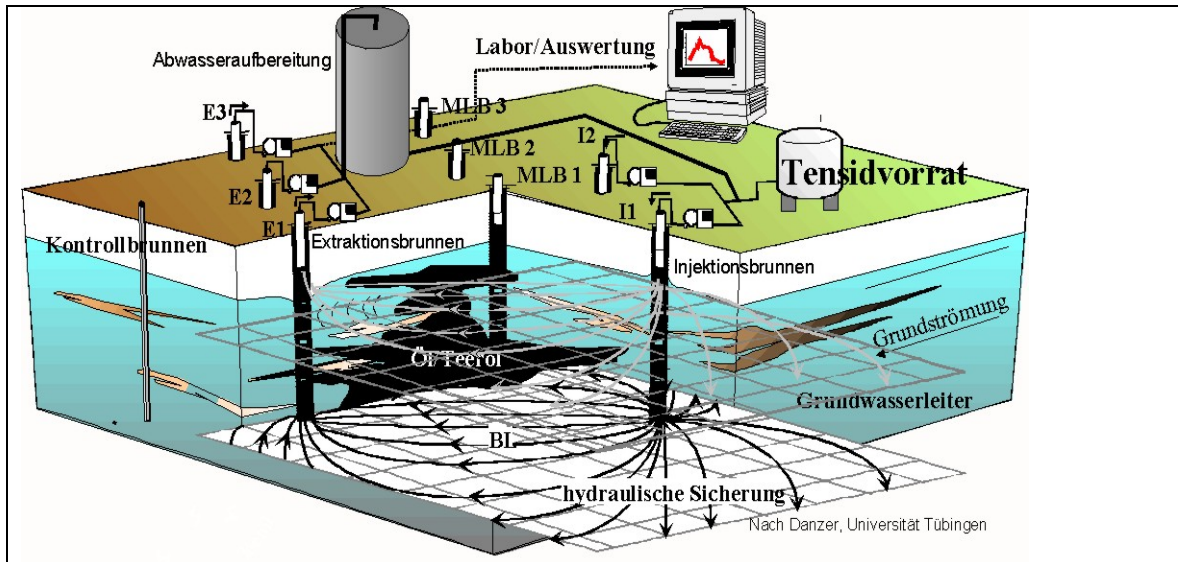


Abb. 5 Funktionsprinzip der Tensidspülung (www.iws.uni-stuttgart.de/Vegas/)

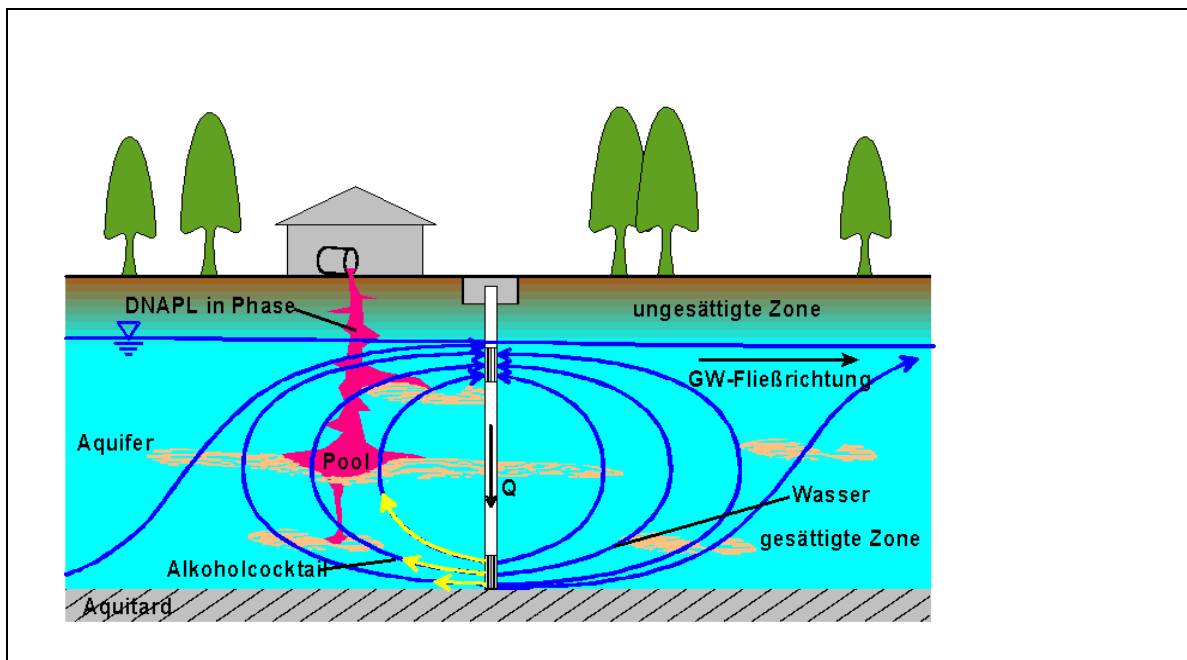


Abb. 6.: Funktionsprinzip der Alkoholspülung (www.iws.uni-stuttgart.de/Vegas/)

2.3 Thermische Verfahren

Verfahrensprinzip / Wirksamkeit / Anwendung

Mittels Injektion von Satttdampf bzw. eines Satttdampf-Luft-Gemisches (90 – 110 °C) in die wassergesättigte Zone unterhalb des kontaminierten Bereiches wird Grundwasser verdrängt und weite Teile der gesättigten und auch ungesättigten Bodenzone aufgeheizt, wodurch sich die Flüchtigkeit der Schadstoffe erhöht. Die injizierte Luft trägt die verdampften Schadstoffe in Richtung der einzurichtenden Bodenluftabsaugung. Parallel hierzu wird eine Grundwasserhaltung betrieben, um ein Abdriften der wassergelösten Schadstoffe zu vermeiden. Die Bodenluft und das geförderte Grundwasser werden in konventionellen Anlagen gereinigt.

Das Verfahren eignet sich insbesondere für die Anwendung im Schadensherd und für leicht- bis mittel-flüchtige Schadstoffe. Hinsichtlich der Bodenart ist das Verfahren auch in Feinsanden bis sandigen Schluffen anwendbar.

Von der VEGAS werden die Kosten für das Verfahren mit 50 – 120 €/m³ behandelten Bodens abgeschätzt.

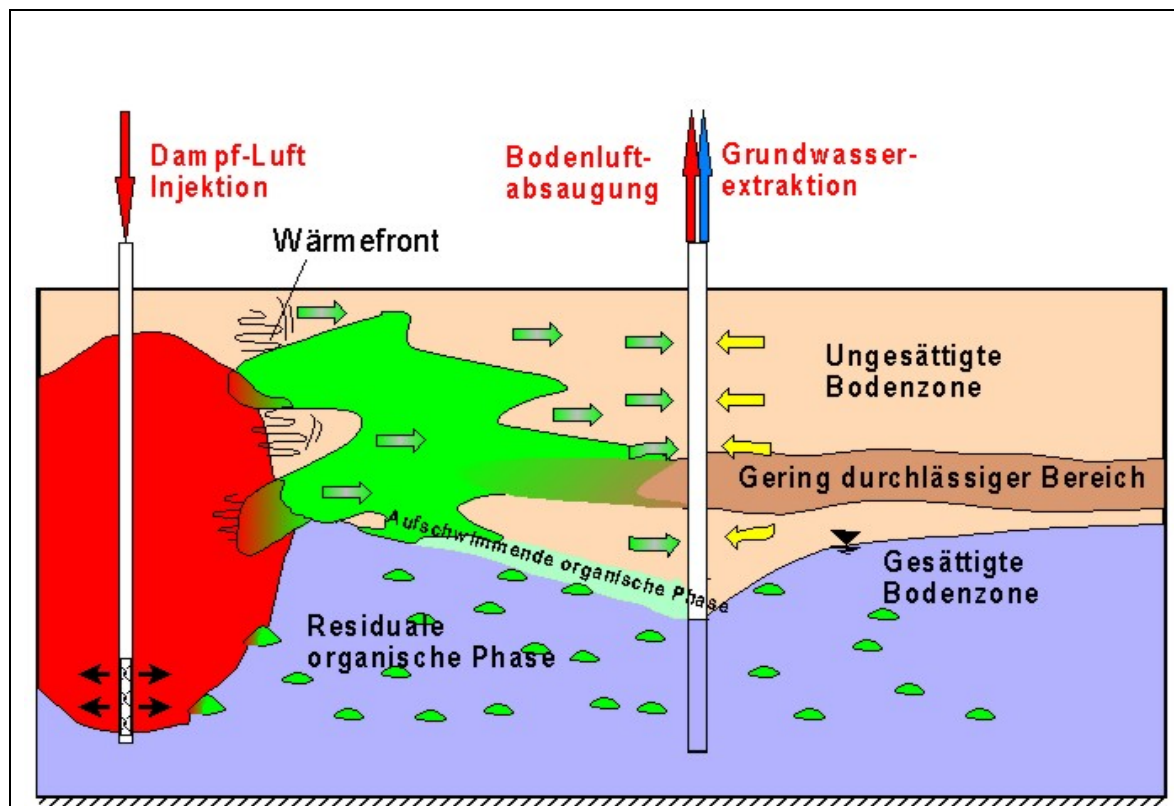


Abb. 7.: Funktionsprinzip der Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone (aus www.iws.uni-stuttgart.de/Vegas/)

Vorteile

- Das Verfahren ist auch in stark inhomogen aufgebauten und geringer durchlässigen GWL anwendbar.
- Es ist ein höherer Masseaustrag der Schadstoffe erzielbar im Vergleich zur normalen (kalten) Air-Sparging-Methode.
- Die Sanierungsdauer (einige Monate) verkürzt sich beträchtlich.
- Das Verfahren ist auch an überbauten Standorten anwendbar.

Nachteile

- Das Verfahren ist insbesondere für lokal begrenzte Schäden geeignet.
- Es fallen hohe Energiekosten an.

2.4 Hydroschock-Verfahren (Fracken)

Verfahrensprinzip / Wirksamkeit / Anwendung

Das Hydroschock-Verfahren beruht auf der dynamischen Mobilisierung der in die wassergesättigte Bodenzone eingedrungenen Stoffe durch den Eintrag von kinetischer Energie in den Grundwasserleiter. Dabei werden in einem speziell ausgebautem Bohrloch mittels Energiequellen (Innenrüttler, Druckluftimpulse, Akustik-Log-Geräte) Wellen erzeugt, die sich in Abhängigkeit von den jeweiligen Eigenschaften des Aquifers mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausbreiten können bzw. absorbiert werden.

Durch die Schwingungen sollen innerhalb des Korngerüsts von sandig bis kiesig ausgebildeten Grundwasserleitern neue Wegsamkeiten für das Grundwasser geschaffen werden und somit vermehrt Schadstoffe über eine Grundwasserförderung aus dem Untergrund ausgetragen werden. Durch die Druckwellen wird des Weiteren ein Ausgasen von leichtflüchtigen Schadstoffen begünstigt. Mit dem Verfahren sind Bereiche behandelbar, die ansonsten nicht zu sanieren wären

2.5 Elektrokinetische-Verfahren

Verfahrensprinzip / Wirksamkeit / Anwendung

Durch den Einsatz von Strom ermöglichen elektrokinetische Prozesse einen gezielten Transport von Schadstoffen (Schwermetalle, polare organische Verbindungen).

Zur Ausführung werden Elektrodenpaare in den kontaminierten Untergrund eingebracht und an eine Gleichstromquelle angeschlossen. Das dabei induzierte elektrische Feld bewirkt einen gezielten Transport des Grundwassers und der darin gelösten mobilen Schadstoffe zu den Elektroden. An den Elektroden können die Schadstoffe gesammelt, immobilisiert und / oder entfernt werden.

Als Haupttransportvorgänge treten die Elektromigration (Iontentransport), die Elektroosmose (eine durch ein elektrisches Feld verursachte gerichtete Grundwasserströmung) und die Elektrophorese (Migration geladener Partikel in der Porenlösung zum entgegengesetzt geladenen Pol) auf.

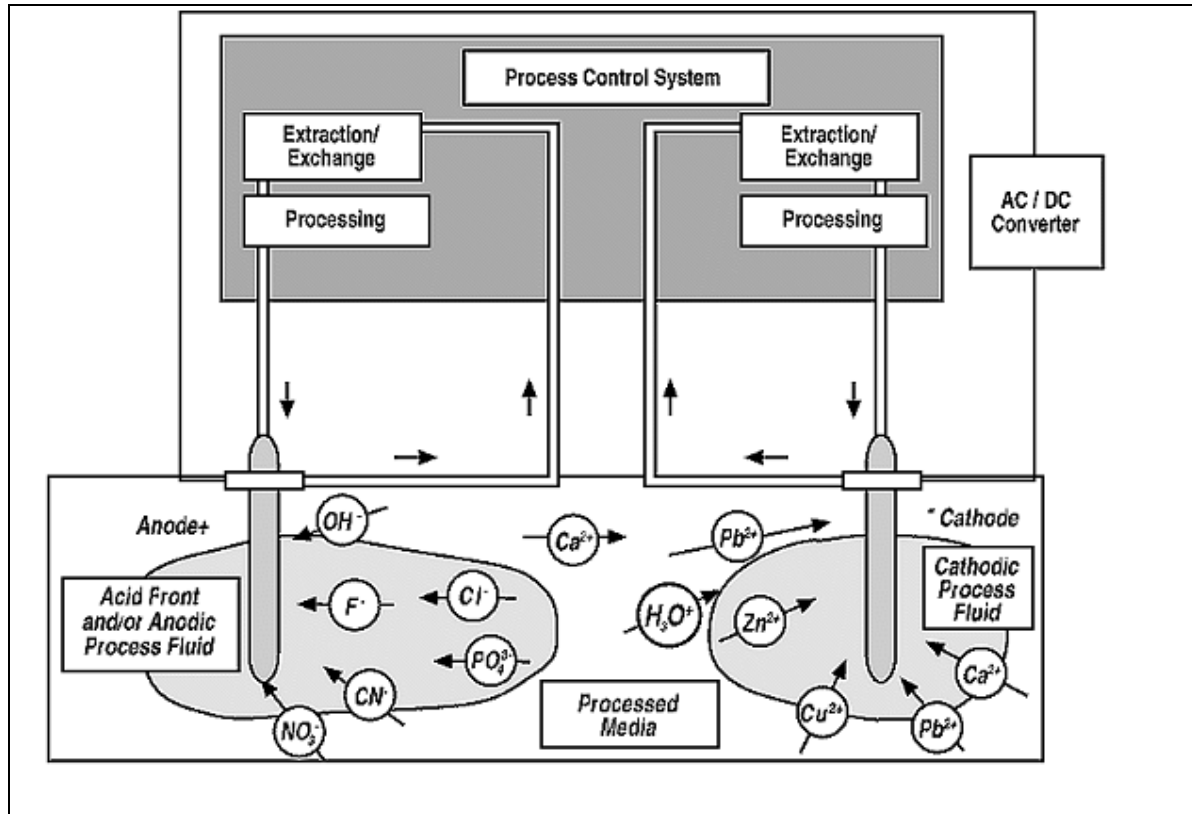


Abb. 8 Funktionsprinzip der elektrokinetischen Verfahren (aus www.iws.uni-stuttgart.de/Vegas/)

Die elektrokinetischen Verfahren befinden sich noch in der Entwicklung. Die vorliegenden Veröffentlichungen berichten überwiegend von experimentellen Untersuchungen im Labor- und Feldmaßstab.

Elektrokinetische Verfahren eröffnen die Möglichkeit einer kostengünstigen und Erfolg versprechenden In-situ-Sanierung auch feinkörniger hochkontaminierter Grundwasserleiter.

2.6 Reaktive Systeme

Verfahrensprinzip / Wirksamkeit / Anwendung

Reaktive Systeme sind unterirdisch vom Grundwasser durchströmte, meist quer zur Strömungsrichtung angelegte, mit Füllmaterialien (reaktive Medien) ausgestattete, durchlässige wandförmige Bauelemente. Sie bewirken entweder eine Rückhaltung der Schadstoffe im Füllmaterial (Adsorption) oder eine Reaktion der Schadstoffe mit den Füllmaterialien (Abbau, Fällung).

Je nach Geometrie der durchströmten Bauelemente, die von den Standortrandbedingungen abhängt, un-

terscheidet man Kombinationsbauweisen von vertikalen Leitwänden mit durchlässigen, mit reaktiven Materialien gefüllten „Toren“ („Funnel and Gate“, „Funnel and Reaktor“) von der Bauweise mit vollständig durchströmten Wänden („Reaktive Wall“). Als reaktive Materialien stehen heute in erster Linie 0-valentes Eisen in Form von Eisengranulat und Eisenschwamm sowie Aktivkohle zur Verfügung. In ca. 50 % der weltweiten Anwendungsfälle handelt es sich um durchströmte Wände mit Eisenmaterial zur Reduktion von LCKW. Behandelbar sind u. a. LCKW, BTEX, unpolare organische Schadstoffe, PCB, DDT, Schwermetalle.

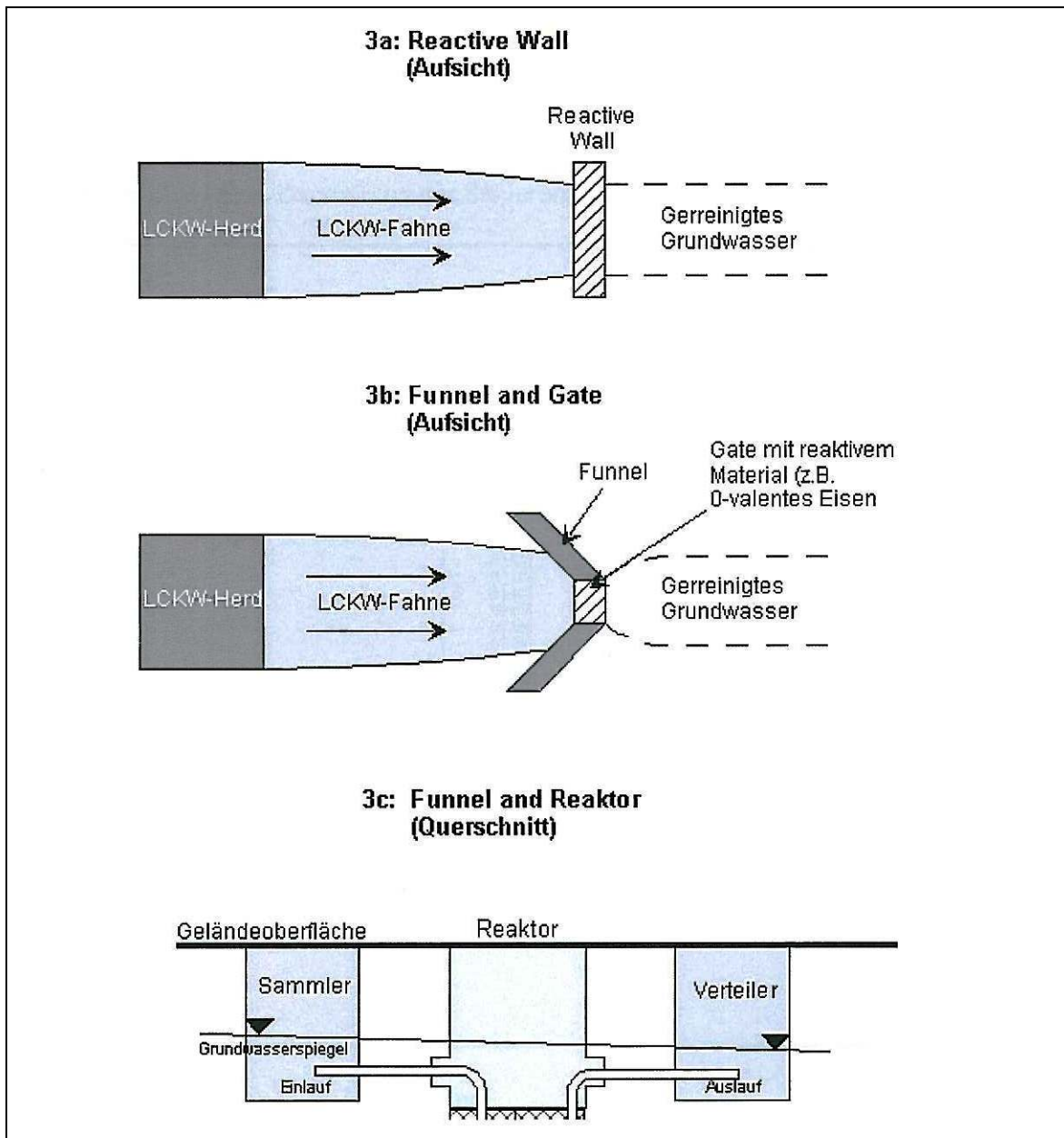


Abb. 9: Funktionsprinzip des Bioscreen-Verfahrens (www.sanierungsverfahren.de)

Vorteile

- Das Verfahren ist auch in inhomogen aufgebauten GWL anwendbar.
- Das Verfahren ist bei räumlich definierten Schäden, die eine Anwendung aktiver Verfahren unzumutbar erscheinen lassen, von Vorteil.
- Diese Systeme besitzen eine hohe Lebensdauer.
- Es entstehen nur geringe Betriebskosten (keine zusätzliche Energiezufuhr, geringer Wartungs- und Reparaturaufwand).
- Die Sanierungsfläche kann weitgehend genutzt werden, da sich die Wände am Rande der Fläche befinden. Insgesamt besteht ein geringer Flächenbedarf.

Nachteile

- Für komplexe Schadstoffgemische im Grundwasser liegen weder geeignete Füllmaterialien noch entsprechende Erfahrungswerte vor.
- Für den Einbau der Wände macht sich in der Regel Bodenaushub einschließlich Baugrubenwasserhaltung erforderlich.
- Für breite Schadstofffahnen werden entsprechend dimensionierte und damit kostenintensive Wände benötigt.
- Die zu behandelnde Schadstofffracht ist bei diesem passiven Verfahren gering.
- Zur Überwachung der Permeabilität der Wände (Ausfällungsreaktionen können zur Abnahme der Durchlässigkeit führen) ist ein Online-Monitoring, das entsprechende Kosten verursacht, erforderlich.
- Eine Regenerierung / Erneuerung der Wände ist schwer einschätzbar.
- Die Kosten der eingesetzten Füllmaterialien für die Hauptkontaminanten sind gegenwärtig sehr hoch.
- Die Sanierungszeitdauer kann sehr lang sein.
- Großtechnische und langjährige Erfahrungen dieser Verfahren sind sehr begrenzt.

Ein spezielles Verfahren stellt der Dichtwand-Heber-Reaktor (DHR) dar, bei dem ein vorhandenes ausreichendes Grundwassergefälle ($> 0,5 - 1 \%$) zur Förderung des Grundwassers nach dem bekannten Heberprinzip genutzt wird. Das kontaminierte Grundwasser wird je nach Art und Menge der Schadstoffe in verschiedenen Reaktoren, welche in das Hebersystem integriert sind, gereinigt. Das Verfahren ist für alle mobilen und gelösten Schadstoffe und sowohl für Locker- als auch Kluftgrundwasserleiter geeignet. Auch die Sanierung mehrerer Grundwasserstockwerke ist möglich.

Als erster Anwendungsfall wird das DHR-Verfahren in Kraichgau seit 2001 als Ersatz für die vormals betriebene mittels Pump and Treat eines CKW-Schadens eingesetzt. Bisher ist ein störungsfreier und erfolgreicher Sanierungsbetrieb zu verzeichnen.

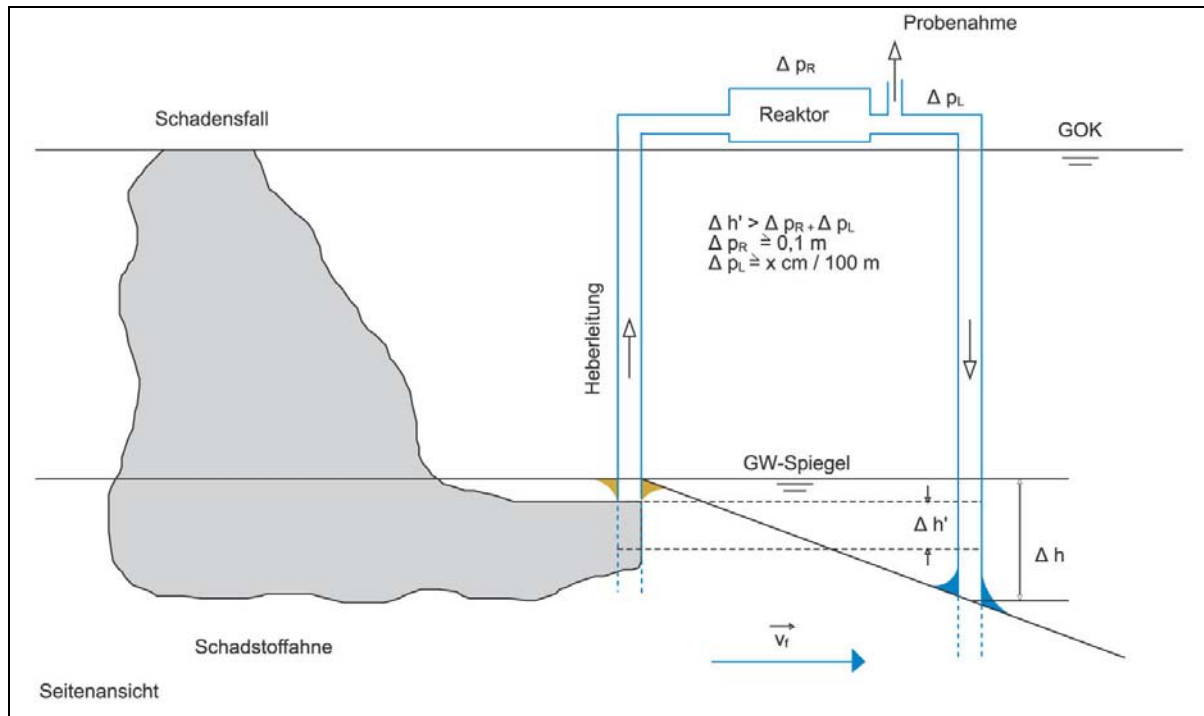


Abb. 10.: Funktionsprinzip des Dichtwand-Heber-Reaktors (www.iws.uni-stuttgart.de/Vegas/)

Vorteile

- kaum Energiekosten, da keine Pumpen zur Grundwasserförderung erforderlich
- sehr hohe Funktionssicherheit
- geringe Wartungskosten
- der Sanierungserfolg ist einfach kontrollierbar

Nachteile

- ausreichendes Grundwassergefälle erforderlich
- nur bei geringen Grundwasserflurabstand (< 8 m) einsetzbar
- Gewährleistung der Funktionsfähigkeit der Reaktoren ist entscheidend
- Kavitationen sind zu vermeiden

ANLAGE 4: Zusammenfassender Bericht der Fallanalysen

INHALTSVERZEICHNIS ANLAGE 4:

1	EINLEITUNG	90
2	RECHERCHE UND BEWERTUNG AUSGEWÄHLTER PUMP AND TREAT- FÄLLE	90
2.1	<i>Methodische Vorgehensweise bei der Fallrecherche.....</i>	90
3	AUSWERTUNG DER AUSGEWÄHLTEN SANIERUNGSFÄLLE	93
3.1	<i>Fälle mit BTEX bzw. BTEX/MKW als Leitschadstoff.....</i>	93
3.2	<i>Fälle mit LHKW als Leitschadstoff.....</i>	101
3.3	<i>Fälle mit anderen organischen Kontaminanten.....</i>	110
3.4	<i>Fälle mit anorganischen Kontaminanten.....</i>	112

1 Einleitung

Zur Beurteilung der Effizienz von Pump and Treat- Sanierungen wurde durch das LfUG die Erarbeitung einer Entscheidungshilfe beauftragt, welche den Anwendern die Prüfung laufender oder in Planung befindlicher Grundwassersanierungen erleichtern soll. Der Teil Entscheidungshilfe enthält die Ergebnisse der Fallanalysen in einer zusammengefassten Form, die detaillierte Zusammenstellung erfolgt im hier vorliegenden Anhang.

Die Aufgabenstellung sah vor, auf der Grundlage einer umfassenden Fallrecherche und -auswertung sowie dem Stand der Technik aller für eine Grundwassersanierung erforderlichen Leistungsteile sowohl technisch-ökologische als auch betriebswirtschaftliche Kriterien zu formulieren, welche die Anwender in die Lage versetzen, objektivere und nachhaltige Entscheidungen für die Optimierung laufender und die Planung neuer Grundwassersanierungen zu treffen.

2 Recherche und Bewertung ausgewählter Pump and Treat- Fälle

2.1 Methodische Vorgehensweise bei der Fallrecherche

2.1.1 Datenerhebung

Die Fallrecherche umfasst einen ausgewählten Teil der Fälle der Datenbank GWKON sowie Sanierungsfälle aus der eigenen Bearbeitung. Die Fallauswahl für die weitere Datenermittlung effizienzrelevanter Angaben aus GWKON- Sanierungsfällen erfolgte nach dem Kriterium, ob bereits Angaben zu Kosten gemacht wurden. Es wurde davon ausgegangen, dass in diesen Fällen die Verfügbarkeit weiterer Kostangaben noch am wahrscheinlichsten ist. Für die weitere Recherche wurden diejenigen Länderbehörden, welche die Falldaten in die Datenbank bereits eingepflegt hatten, um Mitwirkung gebeten.

Für die ergänzende Erhebung wurde ein entsprechender Fragenkatalog mit folgenden Ergänzungsfragen zur Datenerfassung der Datenbank GWKON (UBA (2003) an die jeweiligen Länderbehörden übergeben. Nachfolgend sind die Ergänzungsfragen aufgelistet:

1. Fragen zur Datenlage Standort/ Grundwasser/ Schadstoffsituation

	ja	nein
• Günstige Infrastrukturbedingungen vorhanden (Medienanbindung, Energieversorgung, Verkehrserschließung z.B. innerhalb eines bestehenden Industriegebiets)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Sonderbedingungen Abfallentsorgung mit Kostenrelevanz (z.B. Mitverbrennung, Mitbehandlung in eigener Kläranlage)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Grundwassermodellierung durchgeführt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Gesichertes geologisches Standortmodell	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Schadstofftransportmodell	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Modell im Sanierungsverlauf fortgeschrieben	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Modellierungsergebnisse zur Verfahrensdimensionierung verwendet?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Modellierungsergebnisse zur Verfahrensoptimierung verwendet? (z.B. Anpassung Brunnenstandorte, Durchsätze etc. im Sanie- rungsverlauf)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Falls vorhanden, Präzisierung bzw. nähere Angaben zur Modellierung		
• Angabe der Haupteinzelstoffe aus den Leitparametergruppen sowie reinigungsrelevanter Begleit- stoffe (Eisen, Mangan, Härtebildner)		
• Hinweise/ Indizien zu bereits im Untergrund ablaufenden Abbauprozessen anhand von Parametern, wie z.B. Abbauprodukte, hohe Gehalte an Eisen, Mangan, Sulfid etc.,		
• Hinweise/ Indizien zu bereits im Untergrund ablaufenden Abbauprozessen anhand von Angaben zu Reaktionspartnern für einen biologischen Abbau, wie z.B. Sauerstoff, Nitrat, Sulfat etc.		
• Einschätzung der Relevanz des Abbaus für alternative Behandlungsverfahren		

2. Fragen zu Prognose der Sanierungsdauer bis Erreichen Sanierungszielwert

- Angabe der prognostizierten Zeitspanne bis zum Erreichen des Sanierungszieles in Jahren (ggf.
auch im Verlauf korrigierter Wert)
Rechenweg/ Prognosemethode (falls verfügbar)

3. Kostenangaben

- Investkosten (einmalig bei Errichtung oder mehrfach bei evtl. Nachrüstungen/ Umstellungen)
- Betriebskosten mit klaren Grenzen (Betriebsmittel, wie Energie, Hilfsstoffe, Chemikalien, Aktivkohle etc.) Die Kosten müssen nicht auf die einzelnen Positionen aufgeschlüsselt werden, es müssen jedoch alle Kosten der entsprechenden Kategorien erfasst werden. Angabe der Betriebskosten in Jahresscheiben.
- Entsorgungskosten (z.B. Schlämme, Abfälle, nicht regenerierbare Aktivkohlen etc.) Es gelten die Anmerkungen aus dem Vorpunkt. Angabe der Entsorgungskosten in Jahresscheiben

4. Fragen zu Rahmenbedingungen/ zur Reinigungstechnologie

- Beschreibung evtl. Veränderungen/ Optimierungen in der Reinigungstechnologie mit Zeitpunkt und Art der Änderung
- wurde eine Verfahrensoptimierung im qualitativen Sinne vorgenommen (Ersatz von P&T durch Alternativverfahren, z.B. ENA o.ä.) und wenn ja mit welchem Erfolg?

5. Fragen zu Entscheidungsprozess / -kriterien bei Verfahrensauswahl

- Technische Entscheidungskriterien (z. B. Schadstoffkonzentrationen, Schadstoffart, lokale Schadstoffausbreitung, Sanierungsziel etc.)
- Angabe der geprüften Varianten und Bearbeitungstiefe der Variantendiskussion (Anzahl Kriterien, Kosten-Nutzen-Betrachtung etc.)
- monetäre und nichtmonetäre Rahmenbedingungen (auch subjektive Kriterien, AG, Behördenfestlegung, vorhandene kostengünstige / kostenneutrale Teilkomponenten)
- Entscheidungszeitpunkt für Technologie (Jahr)
- Begründung der Entscheidung für P & T

Der gleiche Fragenkatalog wurde bei der Auswertung der Fälle aus der eigenen Bearbeitung verwendet. Um den Vorteil der bereits bestehenden Datenbank hinsichtlich einer variablen Auswertbarkeit der Falldaten zu nutzen, wurde die Datenbankversion GWKON 1.4 für die Erfassung des beschreibenden Teils der erhobenen Falldaten aus der eigenen Bearbeitung verwendet. Es waren hierfür jedoch nicht alle Datenabfragen der Datenbank erforderlich. Weggelassen wurden von vornherein die Detailangaben zu boden- und Bodenluftsanierungen. Es wurde ebenfalls nicht das Ziel verfolgt, eine Schadstoffbilanzierung vorzunehmen.

Einschränkend muss allerdings festgestellt werden, dass die Nichtbelegung von Datensätzen im Verlauf der Dateneingabe zu häufigen Fehlermeldungen bei der Dateneingabe geführt hat, welche nur mit Neustart des Programms umgangen werden konnten. Das Problem war nicht behebbbar ohne programmtechnisch einzugreifen. Die Auswertung durch die vorprogrammierten Datenbankabfragen wurde ebenfalls nicht verwendet, da die Schlüsselnummernbelegung bei der Eingabe nach dem Leitschadstoff erfolgte und nicht korrigierbar war; die in der Datenbank vorhandenen Fälle jedoch PK-Nummern nach Bundesländern bzw. Landesbehörden enthalten, was nicht zu identischen Abfrageergebnissen führt.

Insgesamt wurden 25 Fälle aus der eigenen Bearbeitung, überwiegend aus dem Bereich der Altlastenfreistellung ausgewertet. Aus dem Datenbestand von GWKON 1.4 wurden 37 Fälle ausgewählt, so dass insgesamt 62 Fallbeispiele in die Auswertung einbezogen waren.

2.1.2 Datenumfang und -qualität

Der Rücklauf zur Beantwortung der ergänzenden Fragen zu den GWKON- Fällen umfasste nur eine teilweise Beantwortung der formulierten Fragen. Insbesondere der Informationsgewinn zu Kostenangaben konnte nicht in dem Maße erreicht werden wie beabsichtigt. Die Verfügbarkeit von Sanierungskostenangaben zurückliegender Fälle ist sowohl aus objektiven als auch aus subjektiven Gründen eingeschränkt.

Dies betrifft auch die Sanierungsfälle aus der eigenen Bearbeitung, da eine Verwendung von Sanierungsfalldaten nicht in allen für die Auswertung vorgesehenen Fällen durch die Sanierungspflichtigen freigegeben wurde.

Der verfügbare Datenumfang ist bei den recherchierten Fällen sehr differenziert. Daten, welche in den verfügbaren Unterlagen nicht vorhanden bzw. nicht ermittelt waren, wurden in der Bearbeitung nicht nacherhoben oder berechnet. Dieser Sachverhalt geht als Dokumentationsmangel in die Bewertung des jeweiligen Falls ein.

3 Auswertung der ausgewählten Sanierungsfälle

Der Schadstoffaustrag (Anlagendurchsatz, mittlere Konzentration) der einzelnen Sanierungsfälle wurde entsprechend der Datenlage in Jahresscheiben (ggf. geringere Intervalle) erfasst. Dabei sollten die Intervallgrößen möglichst konform zu den erfassten Kosten sein. Darüber hinaus wurden die Schadstoffentwicklungen im Aquifer je nach Datenlage (Bestimmungsort abhängig von Sanierungsziel) in die Datenbank aufgenommen. So weit sinnvoll, wurden diese fallabhängig mit dargestellt.

Die Kosten der Pump & Treat- Sanierungen wurden soweit möglich, getrennt in Investitionskosten, Betriebskosten und Überwachungskosten aufgenommen.

Die Überwachung umfasst dabei die Überwachung der Behandlung (Input, Output, Betriebsparameter) und die Überwachung der Schadstoffkonzentrationen im Aquifer, wobei letzteres im Idealfall von den Anforderungen des Sanierungsziels abhängig sein sollte (Ort des Nachweises).

Für die Bewertung der Effizienz der jeweiligen Pump & Treat- Maßnahme wurden für alle recherchierten Fälle die spezifischen Kosten ermittelt. Hierbei wurden die Betriebskosten ins Verhältnis zur entfernten Schadstoffmenge gesetzt. Da die Datenqualität der erfassten Fälle hinsichtlich der Kostenzuordnung erhebliche Unschärfen besitzt, sind die ermittelten spezifischen Kosten ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet.

3.1 Fälle mit BTEX bzw. BTEX/MKW als Leitschadstoff

Die Gesamtkosten je kg entnommener Schadstoff liegen bei den untersuchten BTEX/MKW- Fällen innerhalb einer Spannweite von 151 – 3.147 EUR/kg (s. Abb. 5). Zumindest bei den untersuchten Fällen erreichen diejenigen mit der insgesamt oder bisher noch kurzen Sanierungsdauer im Bereich von 2-3 Jahren niedrigere spezifische Kosten als Fälle mit Sanierungsdauern von 4-6 Jahren.

Nachfolgend werden an Fällen, für welche ausreichend Daten zur Verfügung standen, die Entwicklung der ausgetragenen Schadstoffmengen (Jahresscheibe/kumulativ), die spezifischen Kosten pro entnommene Schadstoffmenge (Jahresscheibe) sowie die Entwicklung der durchschnittlichen spezifischen Kosten dargestellt. Es wurden nur Fälle grafisch dargestellt, bei denen mehr als drei Werte in Jahresscheiben zur Verfügung standen.

ANLAGE 4: Zusammenfassender Bericht der Fallanalysen

1. Fall: ARC 3 – ehemaliges Tanklager, Sanierung seit 2003, Entscheidung für unterstützende Maßnahmen auf Grund nur geringer Wirksamkeit der Maßnahme in 2006 (Variantenvergleich)

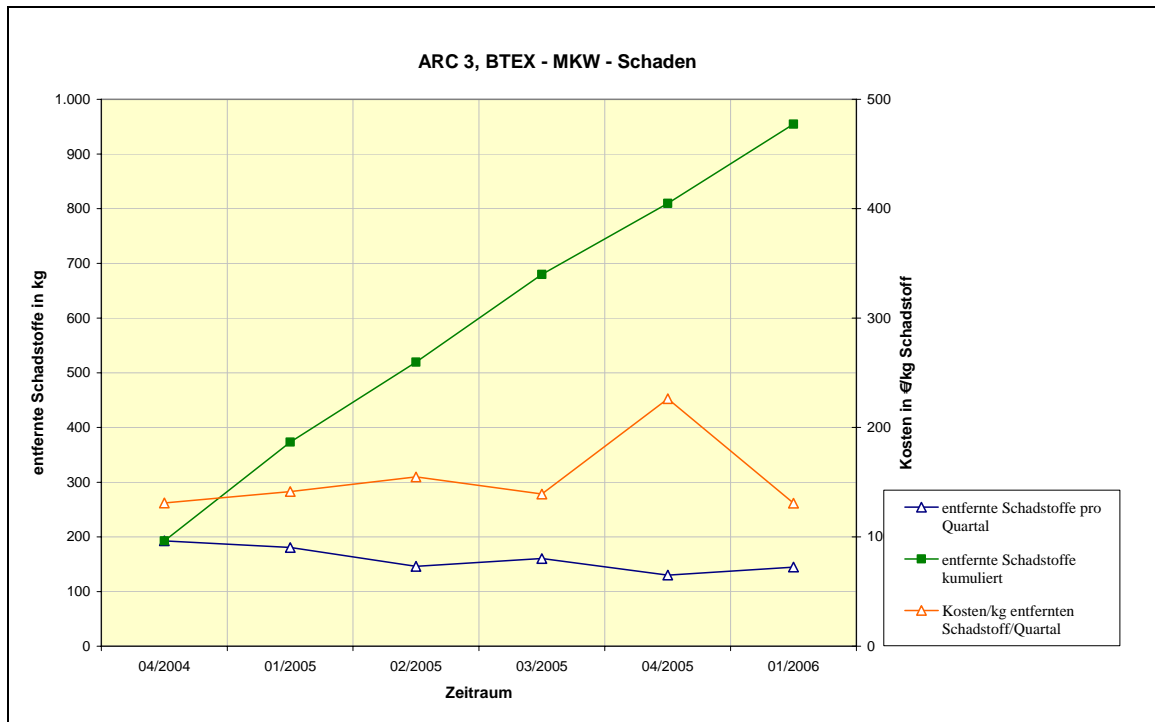


Abb.1: Effizienz Fall ARC 3, BTEX-MKW, Kosten bis Entscheidung ca. 140.000 EUR

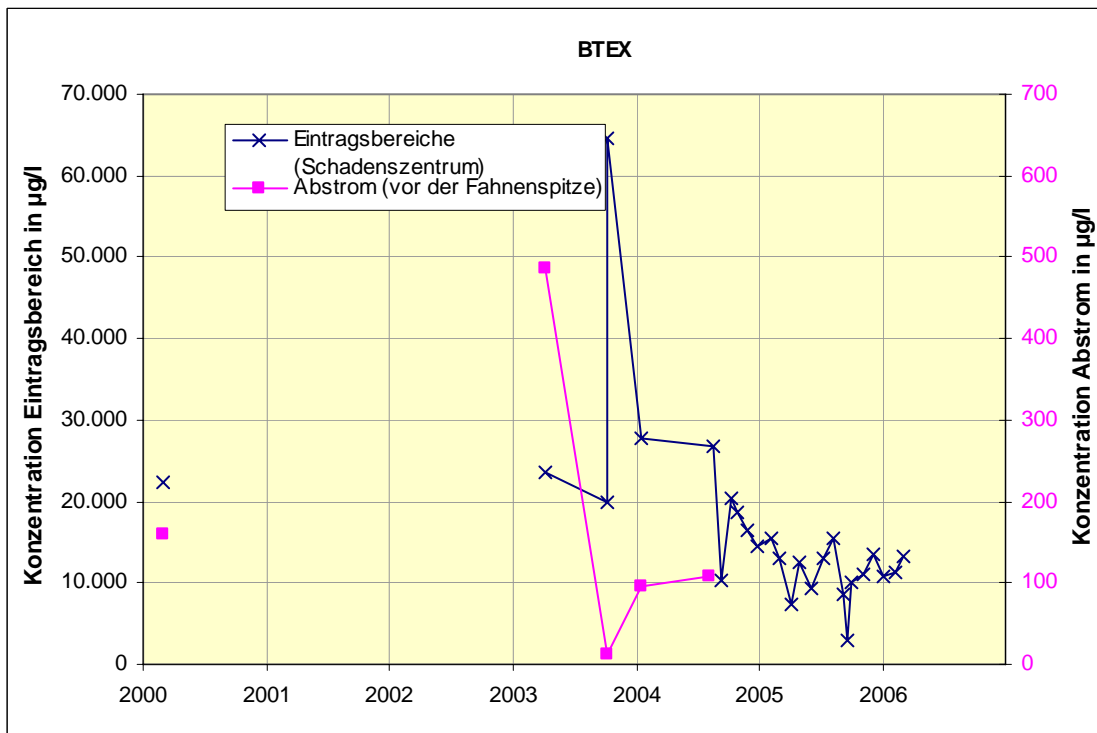


Abb.2: Konzentrationsverlauf Fall ARC 3, Sanierungszielwert 60 µg/l BTEX

ANLAGE 4: Zusammenfassender Bericht der Fallanalysen

2. Fall: DGC 2 – ehemalige Tankstelle, Sanierung seit 2002, Boden/BL saniert, starker Kostenanstieg 2004-2005, große Schwankung der Konzentration um Sanierungszielwert, Sanierung noch nicht abgeschlossen

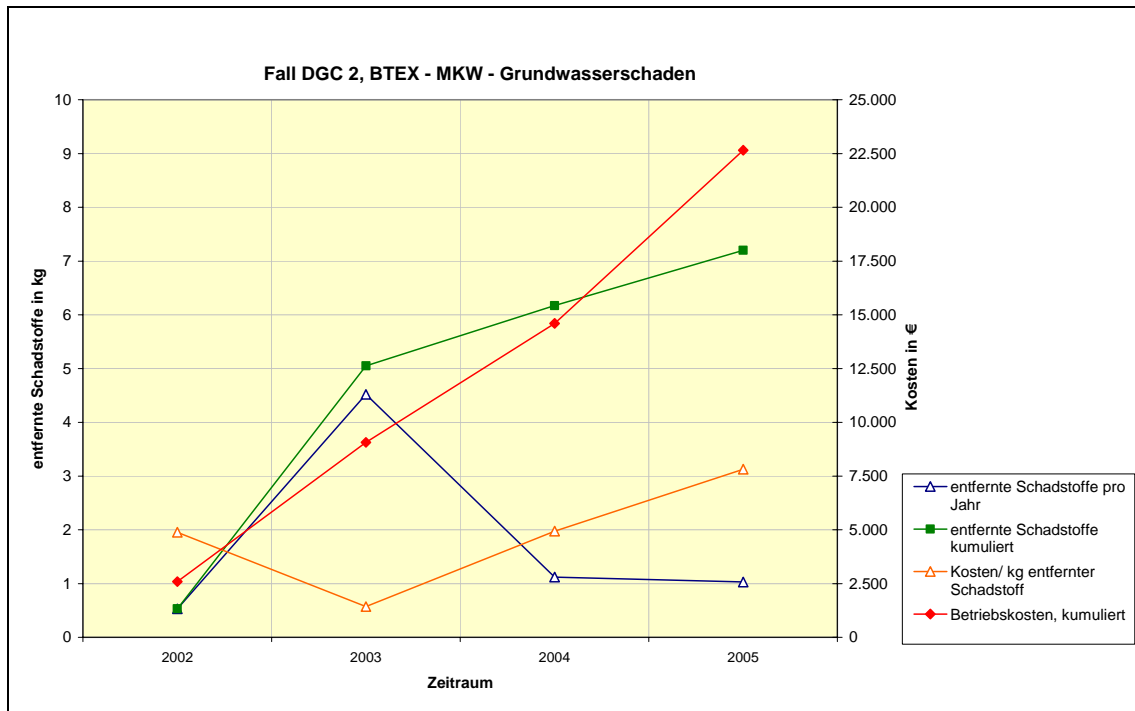


Abb.3: Effizienz Fall DGC 2, Kostenanstieg 2004-2005

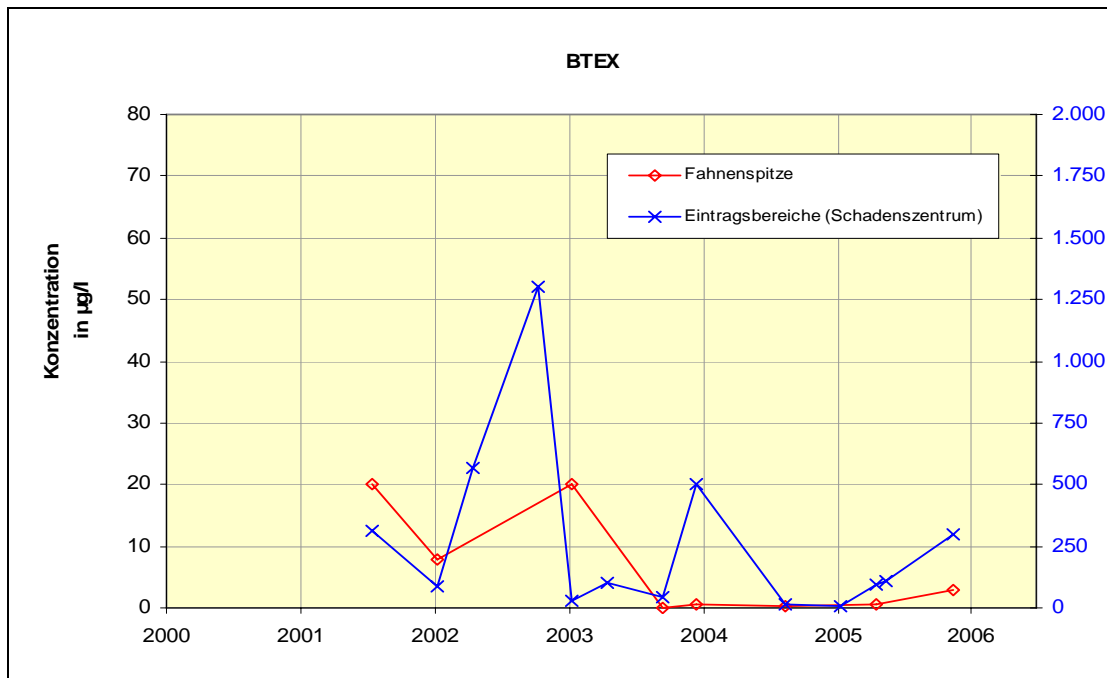


Abb.4: Konzentrationsverlauf BTEX Fall DGC 2, Sanierungszielwert 30 µg/l

3. Fall: ARC 1– ehemalige Tankstelle, Sanierung 1995 - 2001, Boden/BL saniert, starker Kostenanstieg im Jahr 1999 durch verringerte Austragsmengen/Fördervolumen bei unveränderter Anlage, in 2000 Anhebung Sanierungszielwert von 30 auf 120µg/l BTEX

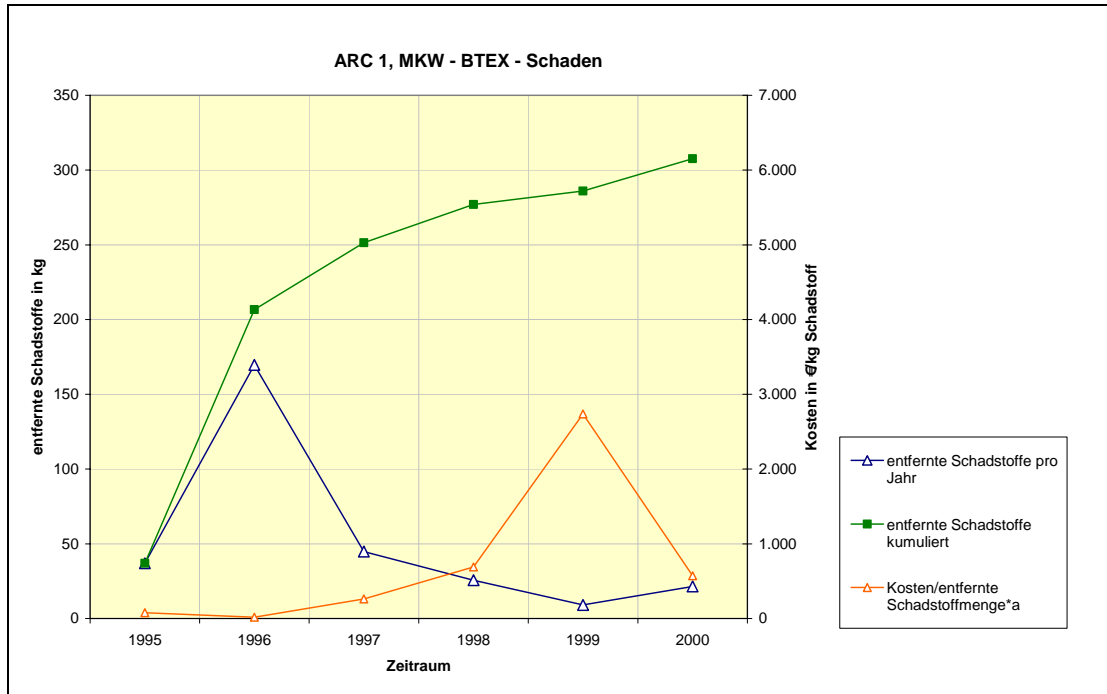


Abb.5: Effizienz Fall ARC 1, durch Anstieg der Austragsmenge bei weiter geringem Fördervolumen wieder Verbesserung der Situation, danach Abbruch bestätigt

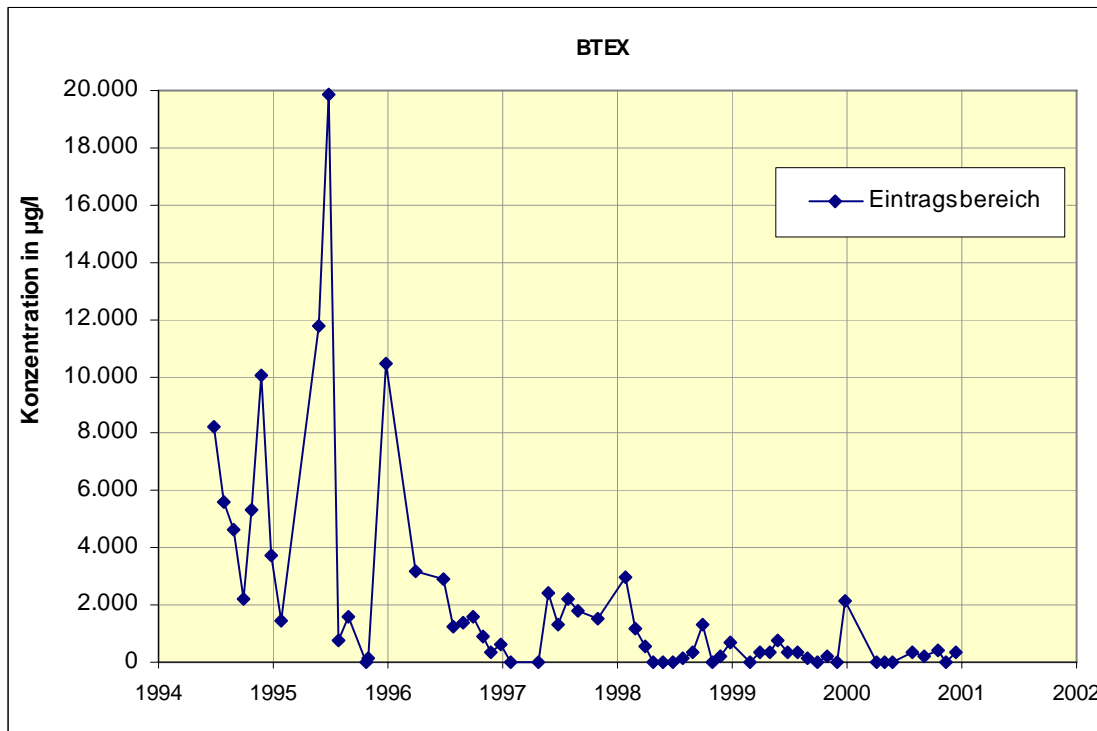


Abb.6: Konzentrationsverlauf Fall ARC 1, Abschluss trotz Schwankung um SZ-Wert

4. Fall: DGC 5– ehemalige Tankstelle, Sanierung seit 2002, Boden/BL saniert, Kostenanstieg, Trend zum Erreichen des Sanierungszielwerts (80 µg/l BTEX) nicht erkennbar, noch keine Entscheidung über weiteren Betrieb getroffen

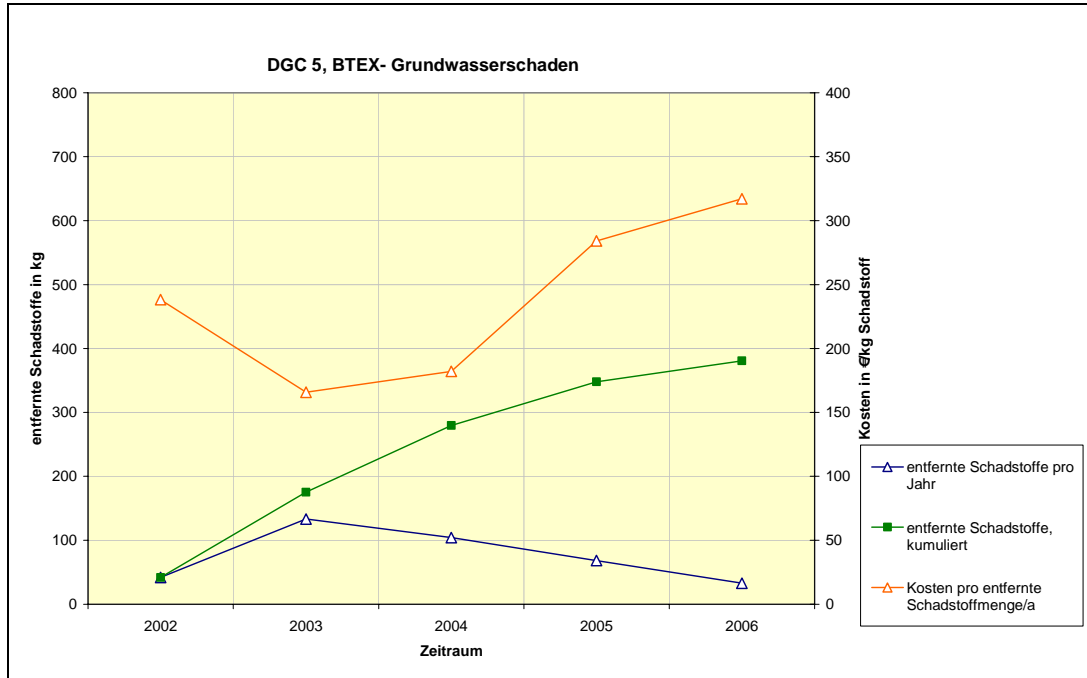


Abb. 7: Effizienz Fall DGC 5, Anstieg der spezifischen Kosten, Entscheidungsbedarf

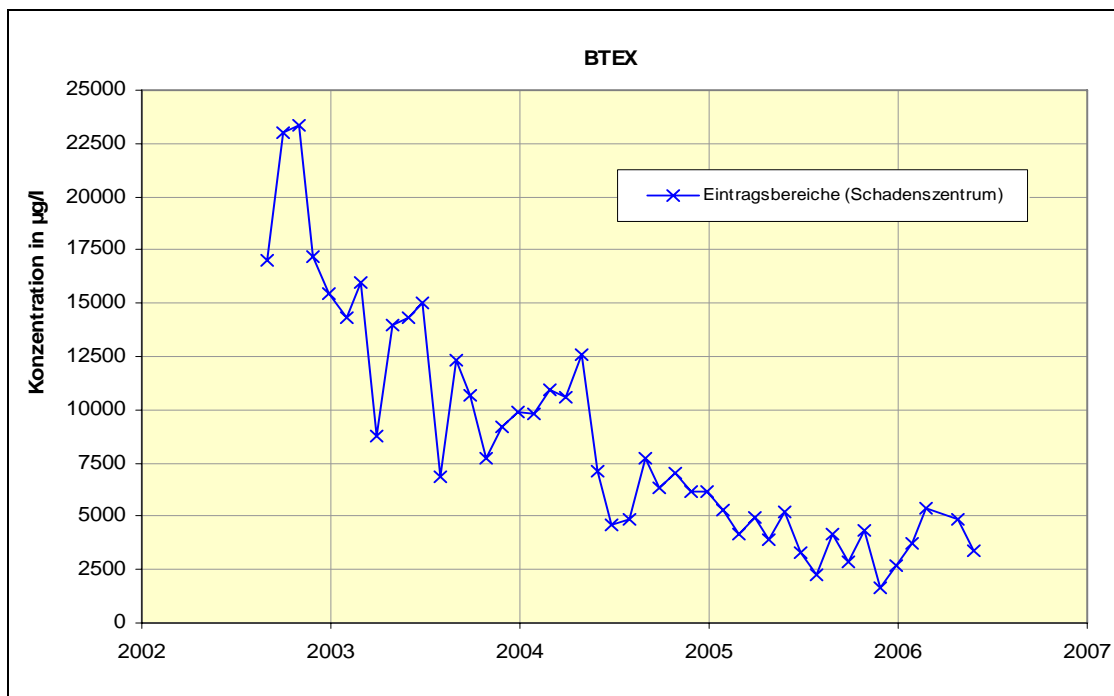


Abb.8: Konzentrationsverlauf Fall DGC 5, Erreichen SZ 80 µg/l BTEX noch nicht erkennbar

5. Fall: ARC 5– Gewerbebetrieb Farben/Lacke, Sanierung seit 2000, Abbruch Pump&Treat 2003 wegen zu geringem Sanierungseffekt, Weiterbetrieb einer Phasenabschöpfung, Aufnahme weiterer Untersuchungen zur effektiveren Gestaltung der Sanierung

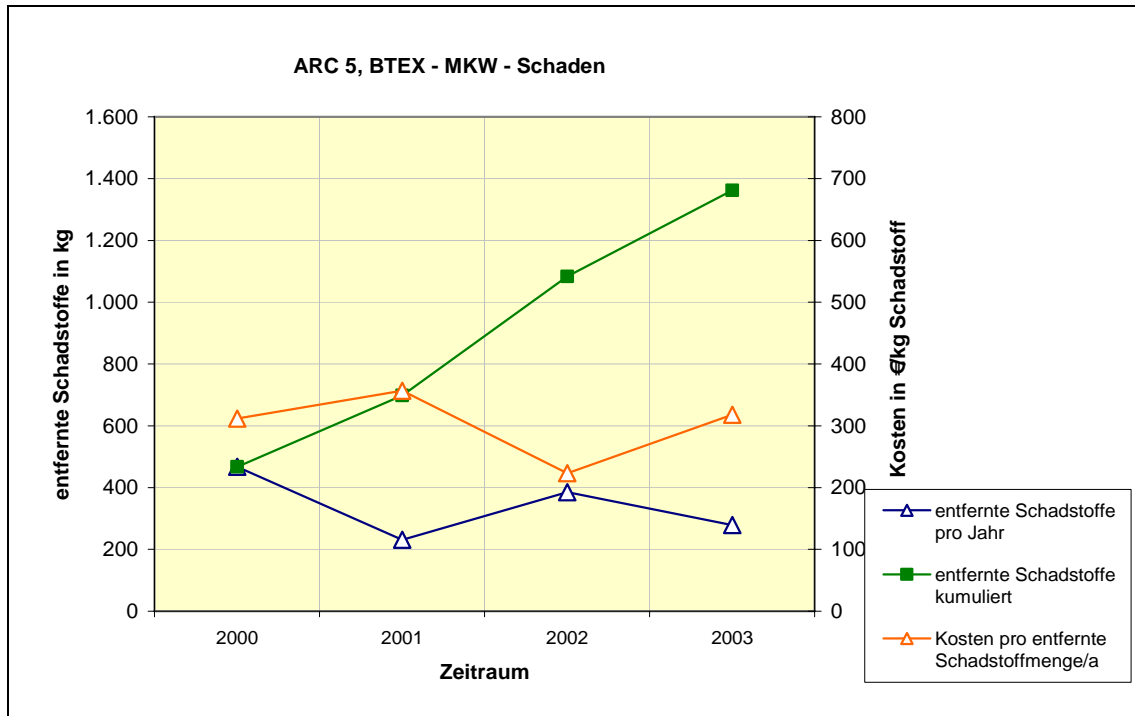


Abb. 9: Effizienz Fall ARC 5, Anstieg spezifische Kosten noch gering, jedoch kaum Sanierungseffekt

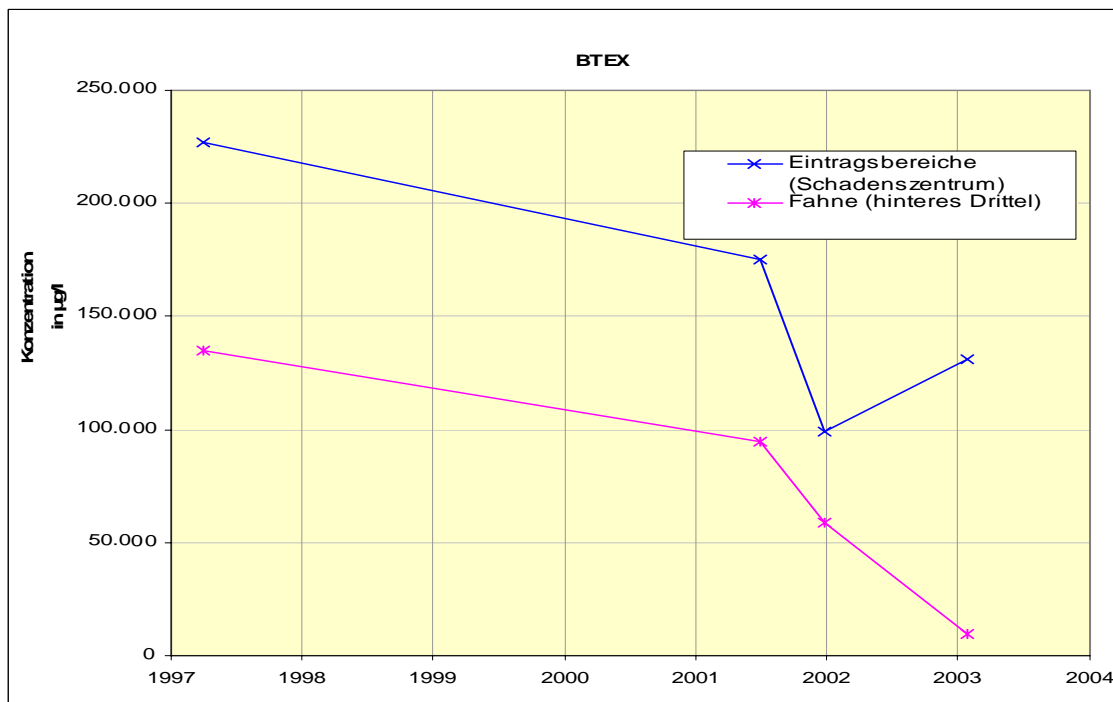


Abb.10: Konzentrationsverlauf Fall ARC 5, Erreichen SZ 120µg/l BTEX noch nicht erkennbar

6. Fall: ARC 4– Gewerbebetrieb Farben/Lacke, Sanierung seit 1995, extreme Verringerung der ausgetragenen Schadstoffmengen, Sanierung noch nicht abgenommen, Prüfung weiterer Maßnahmen

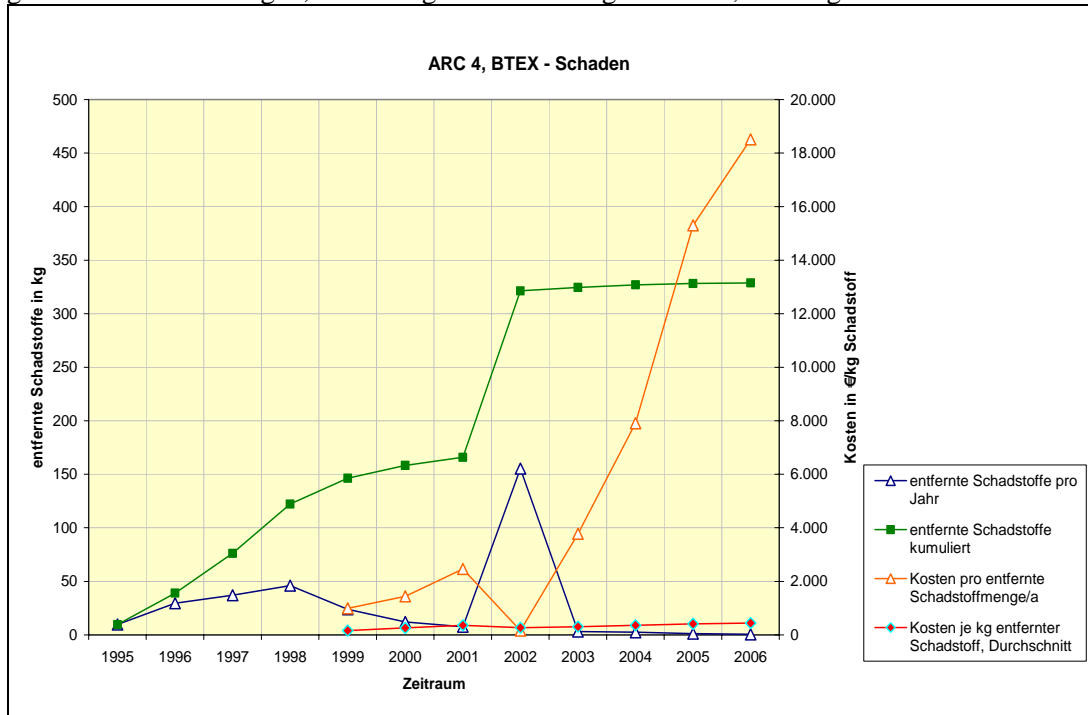


Abb. 11: Effizienz Fall ARC 4, Anstieg spezifische Kosten durch gesunkene Schadstoffmengen

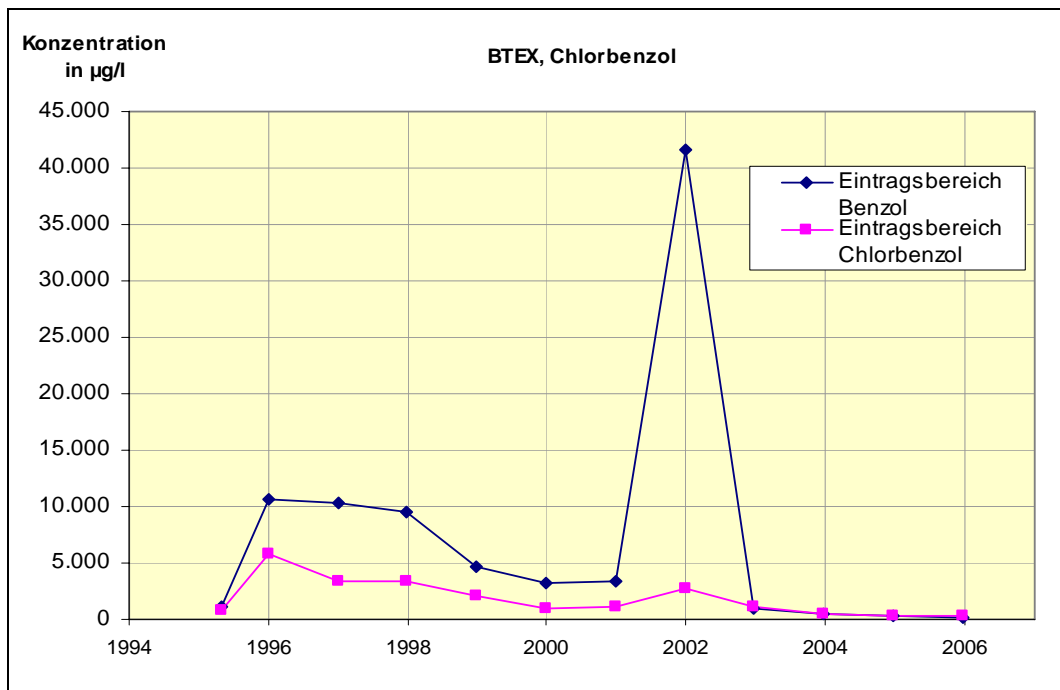


Abb.12: Konzentrationsverlauf Fall ARC 4, SZ noch nicht erreicht

7. Fall: ARC 6– ehemalige Tankstelle, Sanierung seit 1998, keine Boden/BL-Sanierung, abnehmende Wirksamkeit, starker Anstieg der spezifischen Kosten in 2002, Sanierungszielwert 50µg/l BTEX nicht erreichbar, Entscheidung für Quellensanierung Ende 2003, Weiterbetrieb als Gefahrenabwehr, Bodensanierung in Ausführung

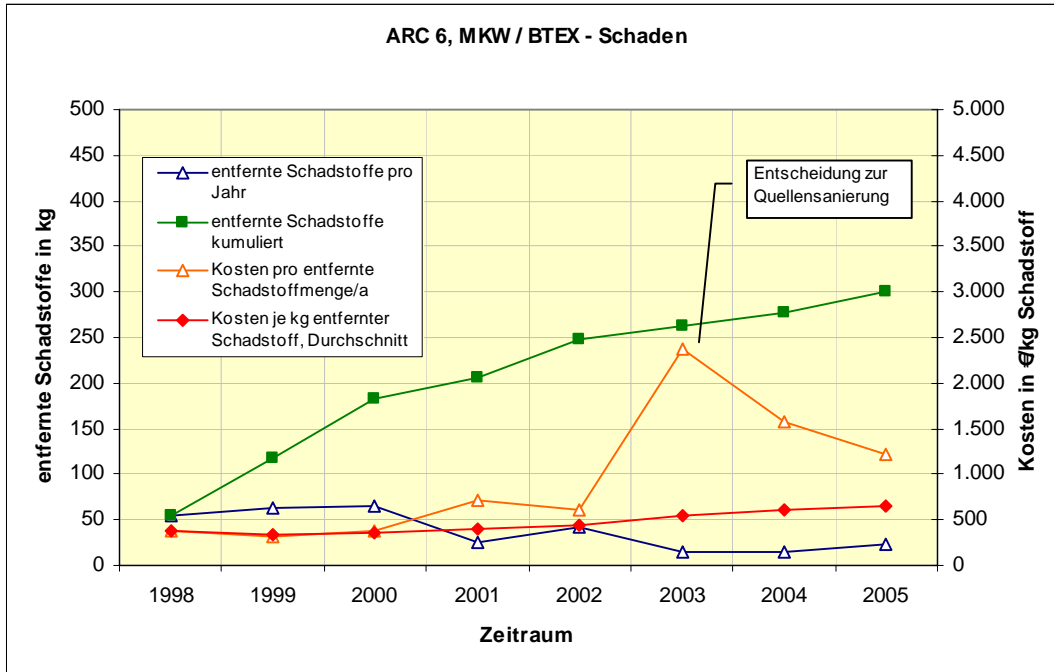


Abb. 13: Effizienz Fall ARC 6, starker Anstieg der spezifischen Kosten in 2002

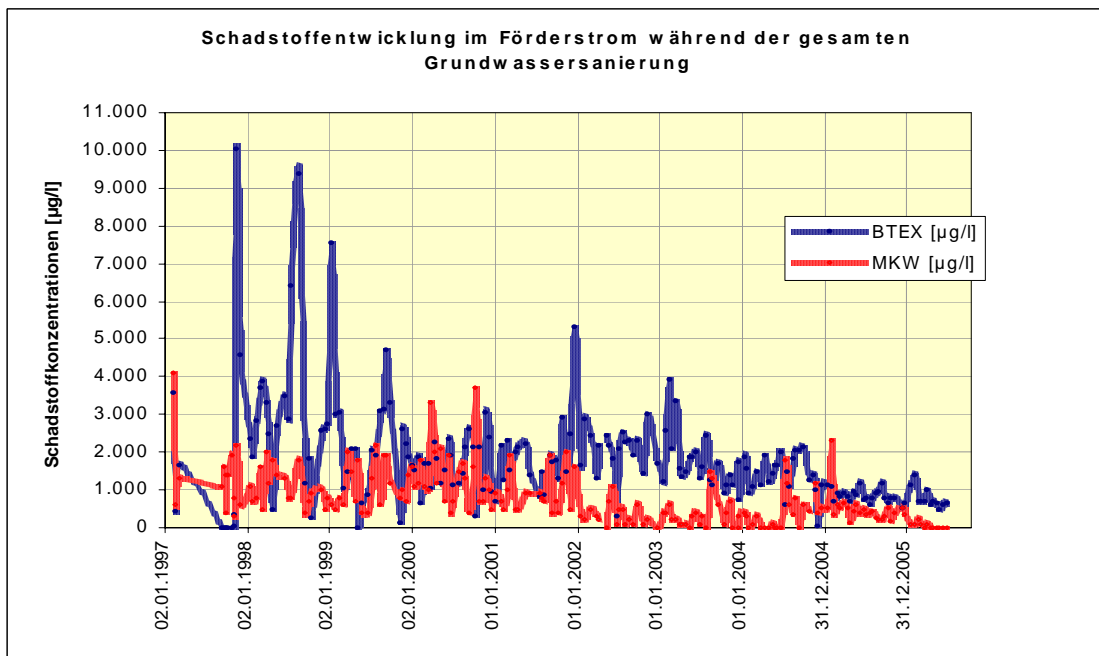


Abb.14: Konzentrationsverlauf im Förderbrunnen Fall ARC 6, SZ 50 µg/l noch nicht erreicht, große Konzentrationsschwankungen

3.2 Fälle mit LHKW als Leitschadstoff

Die Gesamtkosten je kg entnommener Schadstoff liegen bei den untersuchten LHKW- Fällen innerhalb der Spannweite von 166 – 7.896 EUR/kg (s. Abb. 19). Auch bei den untersuchten LHKW-Fällen erreichen diejenigen Fälle mit einer insgesamt oder bisher noch kurzen Sanierungsdauer im Bereich 2-4 Jahre niedrigere spezifische Kosten als Fälle mit Sanierungsdauern von >4 Jahren. Insgesamt liegt das Niveau der spezifischen Kosten bei dieser Schadstoffgruppe höher als bei BTEX- Sanierungsfällen. Der dargestellte Extremfall mit 7.896 EUR/kg (Fall Nr.19) ist in der nachfolgenden Verlaufsdarstellung nicht mit aufgeführt, die hohen spezifischen Kosten resultieren aus der Fallspezifika mit geringen entfernten Schadstoffmengen und Unklarheit des Quellenbereichs. Darüber hinaus wurden gegenüber den erfassten BTEX- Fällen bei den LHKW- Fällen deutlich mehr „Langläufer“- Sanierungen (>10 Jahre) ermittelt.

1. Fall: ARC 8 – LHKW-Schaden im Anstrom eines Wasserwerks, Sanierung seit 1986, Optimierung in 2002, Boden/Bodenluftsanierung durchgeführt, Sanierungszielwert trotzdem nur partiell erreicht, 2005 Prüfung weiterer unterstützender Maßnahmen

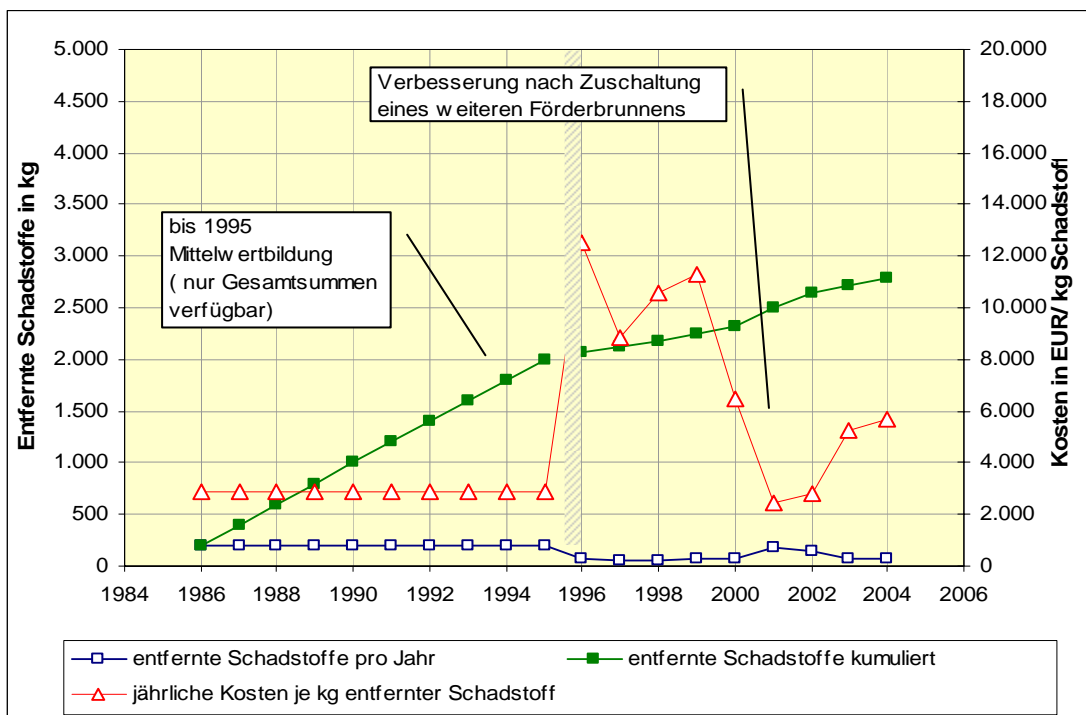


Abb. 15: Effizienz Fall ARC 8, LHKW-Schaden, ungünstige Quellsituation, Optimierung nur partiell erfolgreich

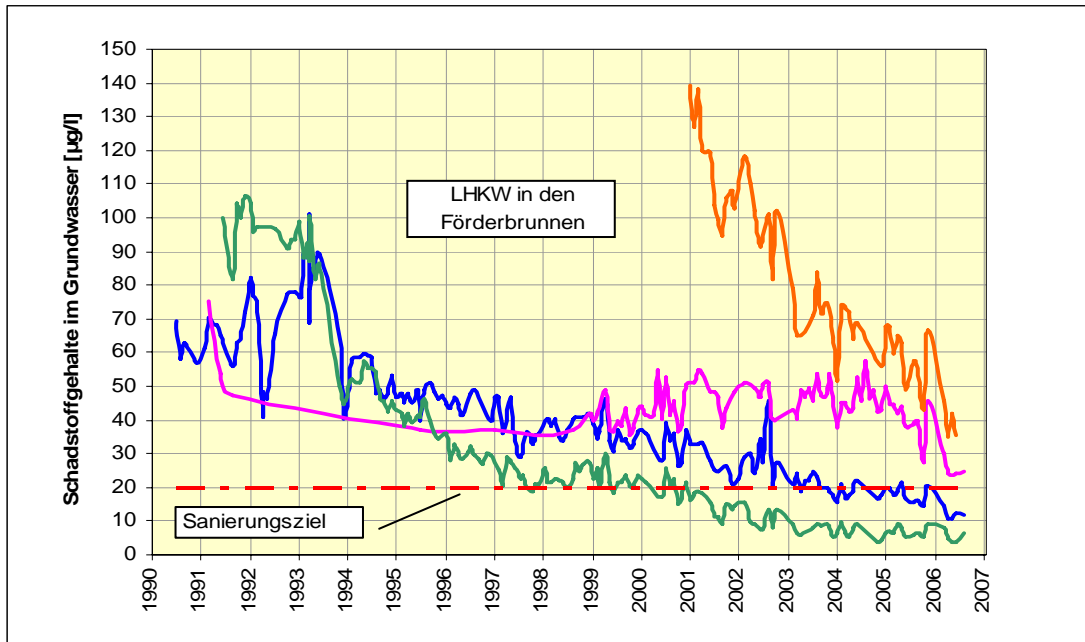


Abb. 16: Fall ARC 8 - Konzentrationsverlauf in den Sanierungsbrunnen, Sanierung noch nicht abgenommen

ANLAGE 4: Zusammenfassender Bericht der Fallanalysen

2. Fall ARC 9 – LHKW-Schaden im Anstrom eines Wasserwerks, Sanierung seit 2000, trotz Optimierung sinkende Effizienz, komplexer Standort, weitere Optimierung der Förderraten und Brunnenstandorte vorgesehen, ungünstiger Chemismus, Sanierungszielwert $100\mu\text{g/l}$ nicht erreicht

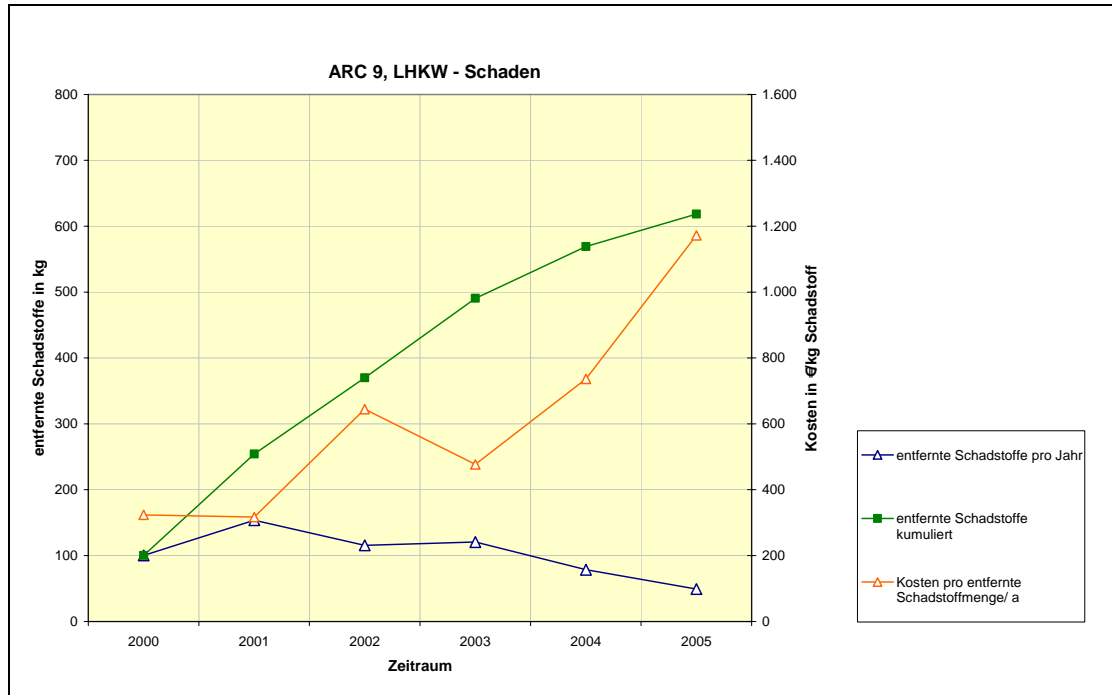


Abb. 17: Effizienz Fall ARC 9, LHKW-Schaden, trotz Optimierung sinkende Effizienz

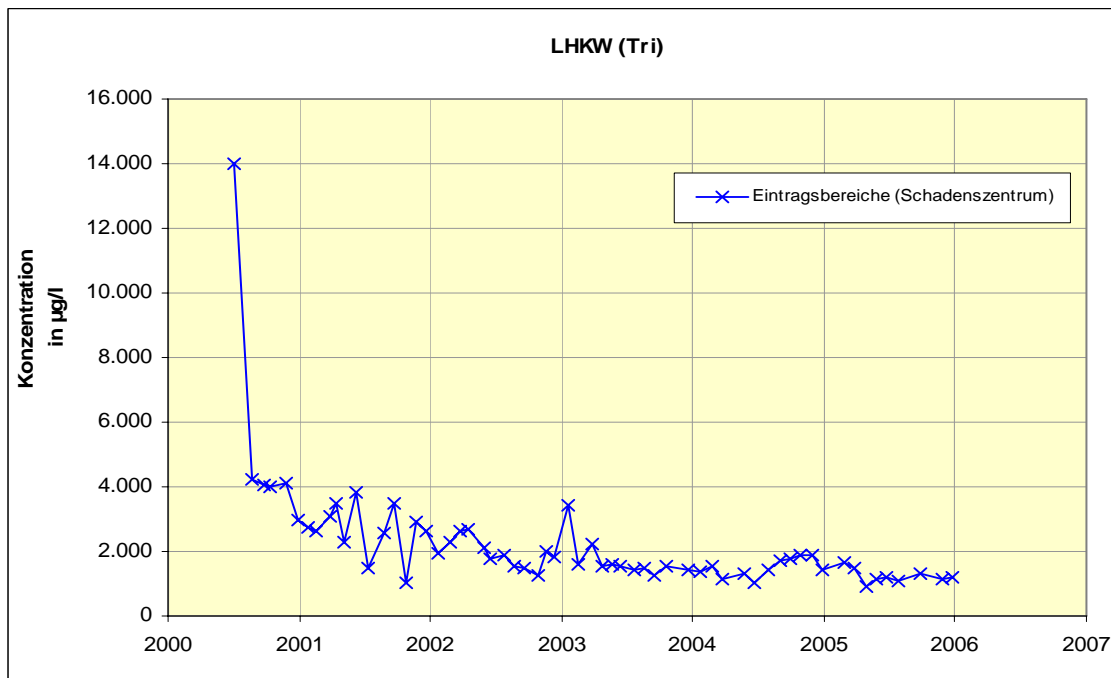


Abb. 18: Fall ARC 9 – LHKW, Konzentrationsverlauf, noch große Differenz zum SZ-Wert ($100\mu\text{g/l}$)

3. Fall: DGC 8 – LHKW-Schaden Gewerbestandort, Sanierung seit 1991, optimierte Anlage seit 1998 (begrenzte Verfügbarkeit von Daten), tlw. Bodensanierung durchgeführt, Sanierungszielwert bereichsweise erreicht, weitere Quellenentfernung vorgesehen

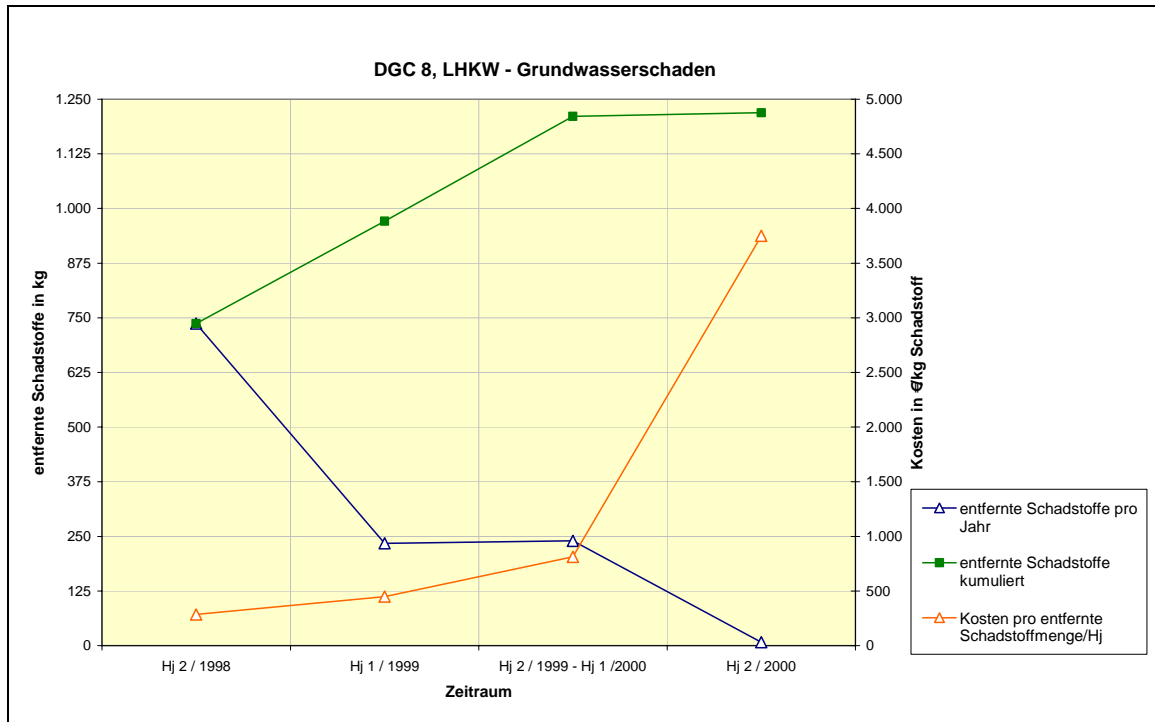


Abb. 19: Effizienz Fall DGC 8, LHKW-Schaden, Darst. Abschnitt sinkender Effizienz,

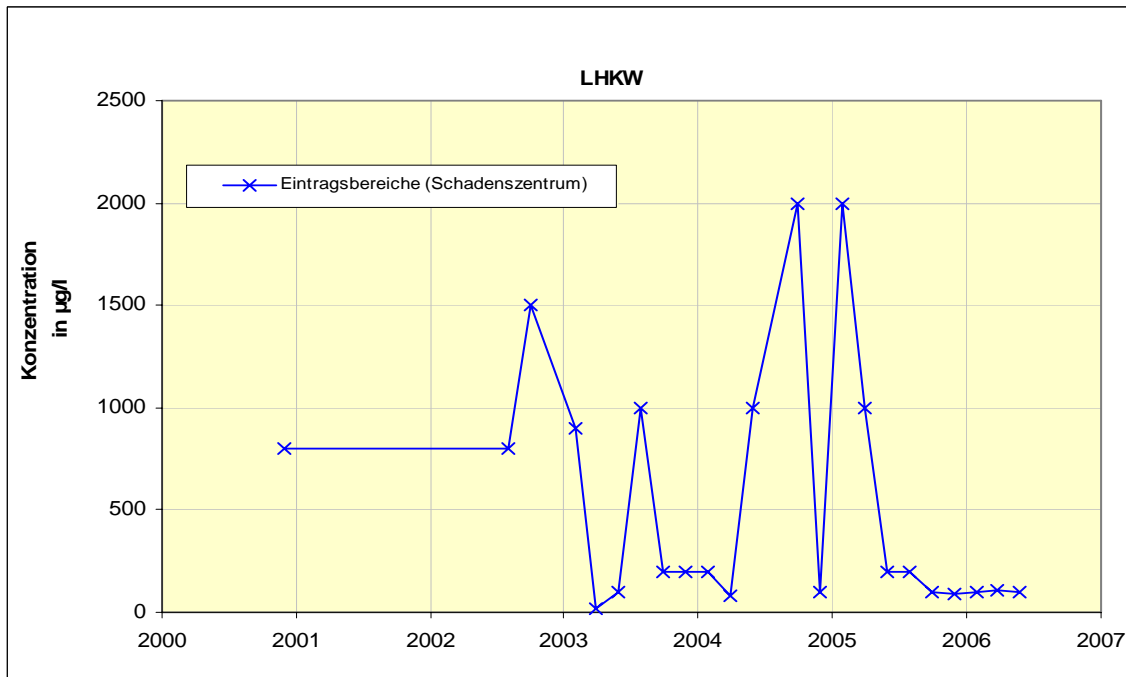


Abb. 20: Fall DGC 8 – LHKW, Konzentrationsverlauf, Sanierungszielwert (50µg/l) noch nicht erreicht

4. Fall: DGC 7 – LHKW-Schaden chem. Reinigung, Sanierung 2001-2004, Boden/Bodenluftsanierung durchgeführt, Abschluss trotz Nichterreichen Sanierungszielwert $30 \mu\text{l}$, akzeptierter Abbruch bei Anstieg der spezif. Kosten durch Rückgang der ausgetragenen Schadstoffmenge

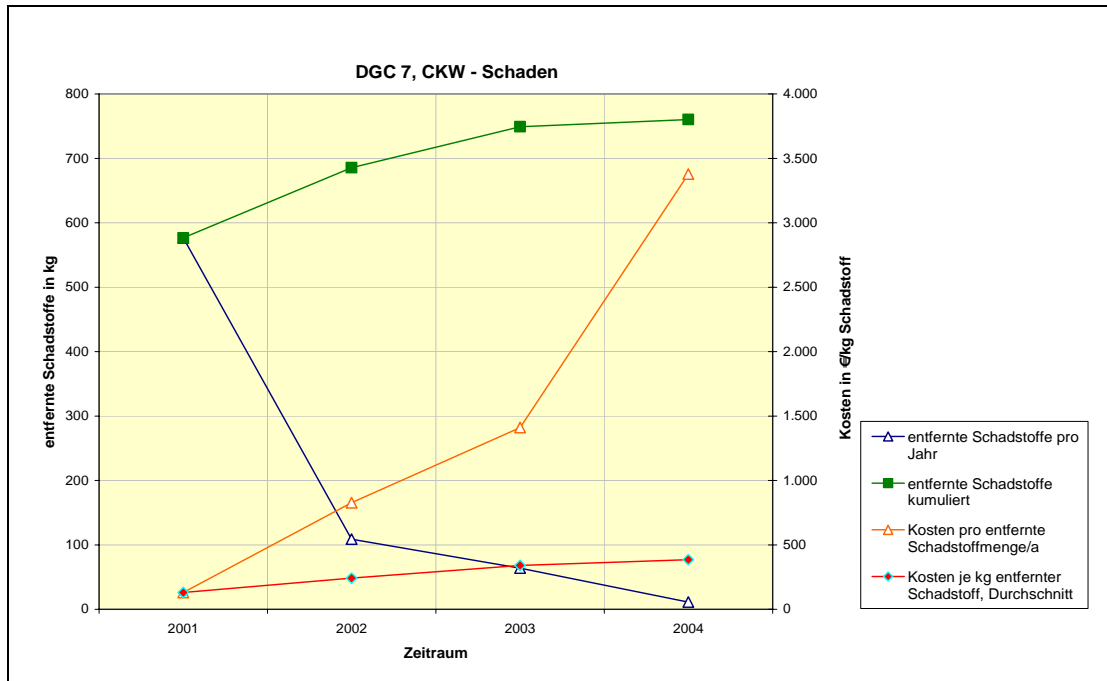


Abb. 21: Effizienz Fall DGC 7, LHKW-Schaden, starker Anstieg der spezif. Kosten, Unverhältnismäßigkeit akzeptiert

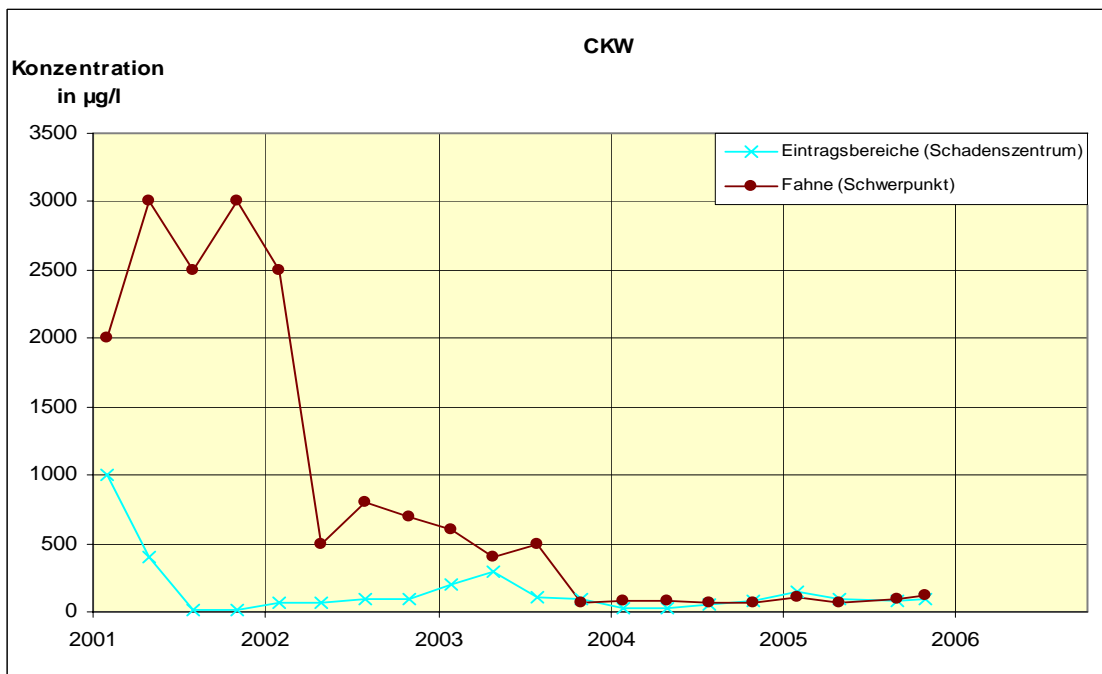


Abb. 22: Fall DGC 7 – LHKW, Konzentrationsverlauf auf konstant tiefem Niveau, keine Verbesserung mehr, Abbruch obwohl Sanierungszielwert ($30\mu\text{g/l}$) nicht erreicht

5. Fall: ARC 11 – LHKW-Schaden Metallverarbeitung, Sanierung 1998-2001, Abbruch (überwiegend Schadensverlagerung), weitere Untersuchung erforderlich/zunächst Beobachtung, Kosten noch relativ niedrig

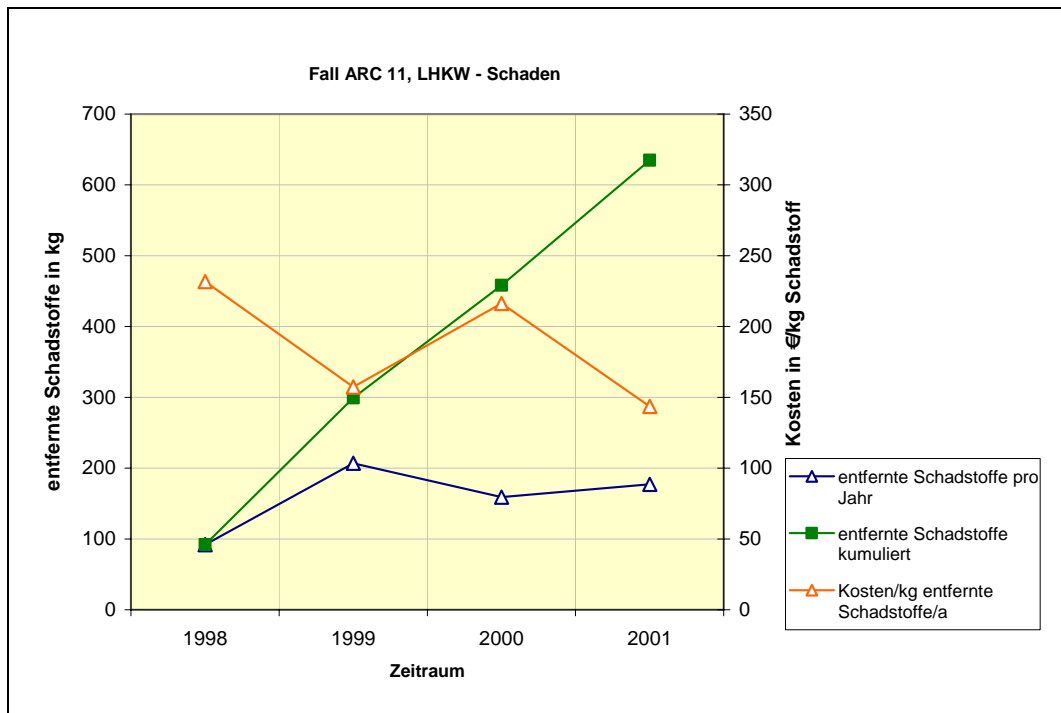


Abb. 23: Effizienz Fall ARC 11, LHKW-Schaden, Abbruch

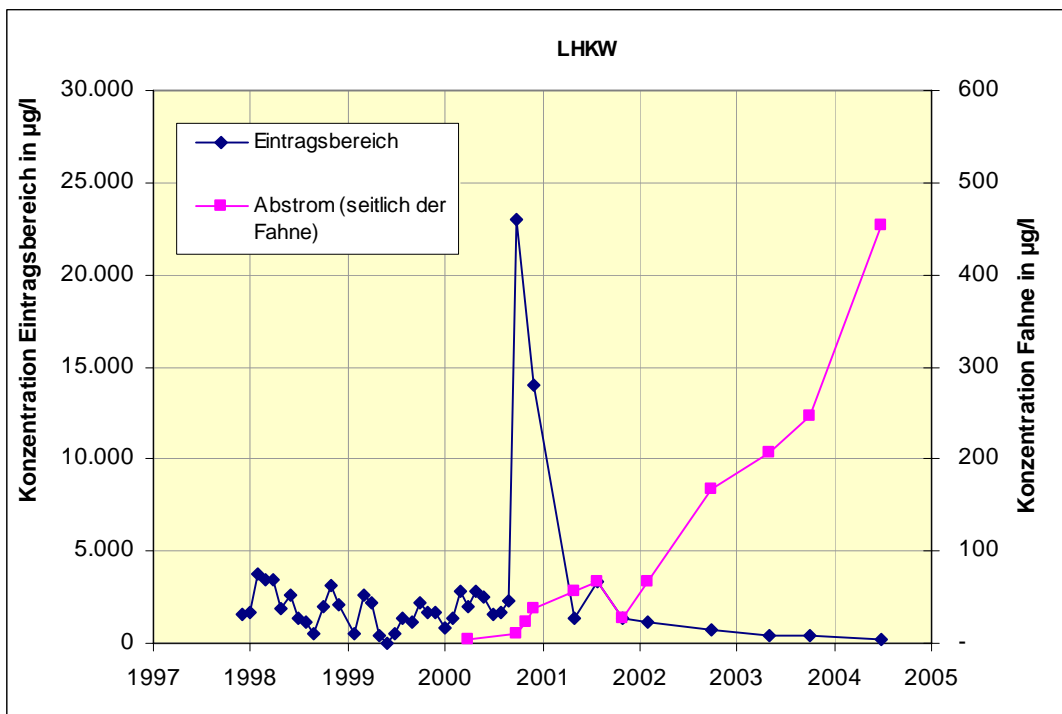


Abb. 24: Fall ARC 11 – LHKW, Konzentrationsverlauf (Schadensverlagerung), Abbruch

Für weitere LHKW-Fälle, für die jedoch nur Gesamtbetriebskostenangaben zur Verfügung standen, sind nachfolgend die Konzentrationsverläufe dargestellt:

ANLAGE 4: Zusammenfassender Bericht der Fallanalysen

6. Fall: 7000 – LHKW-Schaden chem. Reinigung, Sanierung 1995-1998, Bodenluftsanierung durchgeführt, Anerkennung Abschluss GW-Sanierung mit Annäherung an Sanierungszielwert 10 µg/l, hohe spezifische Gesamtkosten von 2.800 €/kg entfernter Schadstoff

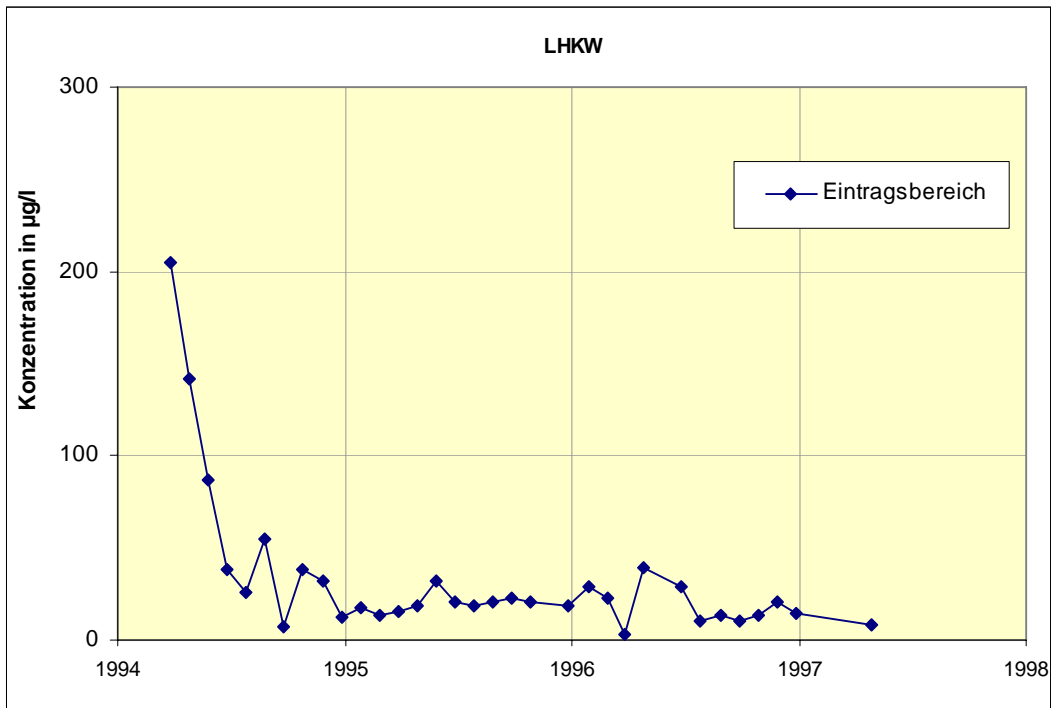


Abb. 25: Fall 7000 – LHKW, Konzentrationsverlauf

7. Fall: 7001 – LHKW-Schaden ehemalige chem. Reinigung, GW- Sanierung seit 1988, parallele Boden- und Bodenluftsanierung, Sanierungszielwert 10 µg/l teilweise, jedoch noch nicht erreicht im Schadenszentrum, ungünstige Randbedingungen (Zugänglichkeit, Geologie, rechtl. Verhältnisse), spezifische Gesamtbetriebskosten 1.800 €/kg entfernte LHKW (1993-2004):

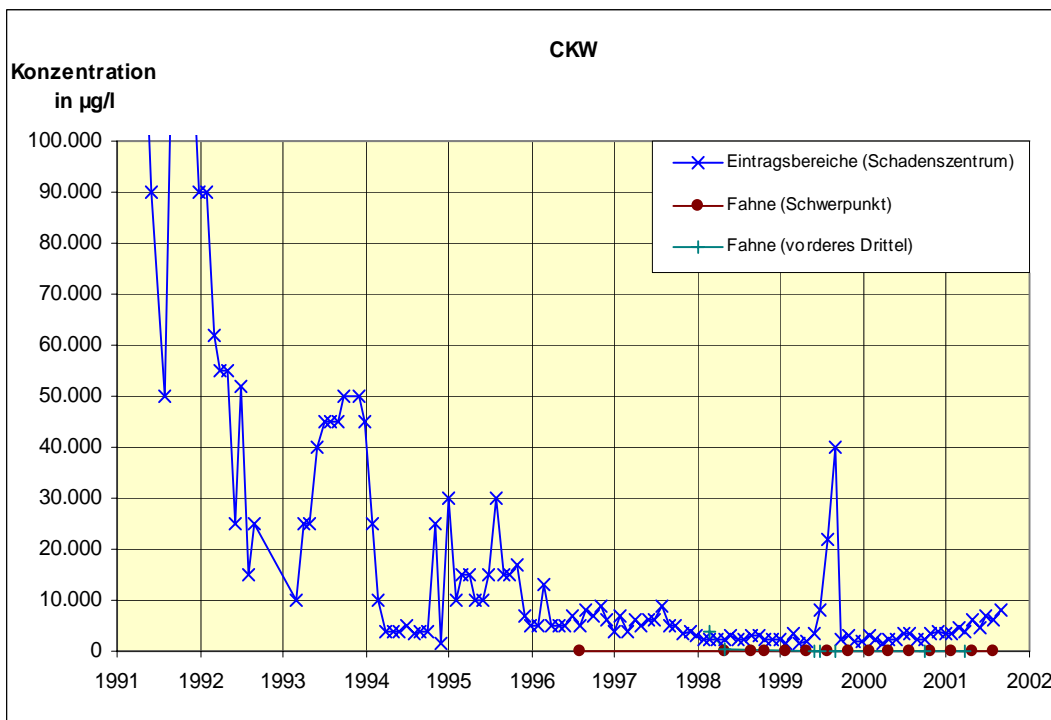


Abb. 26: Fall 7001 – LHKW, Konzentrationsverlauf im Schadenszentrum

ANLAGE 4: Zusammenfassender Bericht der Fallanalysen

8. Fall: 7002 – LHKW-Schaden ehemalige chem. Reinigung, GW- Sanierung 1996-2004, parallel Bodenluftsanierung, Sanierungszielwert 10 µg/l nicht erreicht, Einstellung aus Verhältnismäßigkeitsgründen, bereits hohe spezifische Gesamtkosten von 2.600 €/kg erreicht

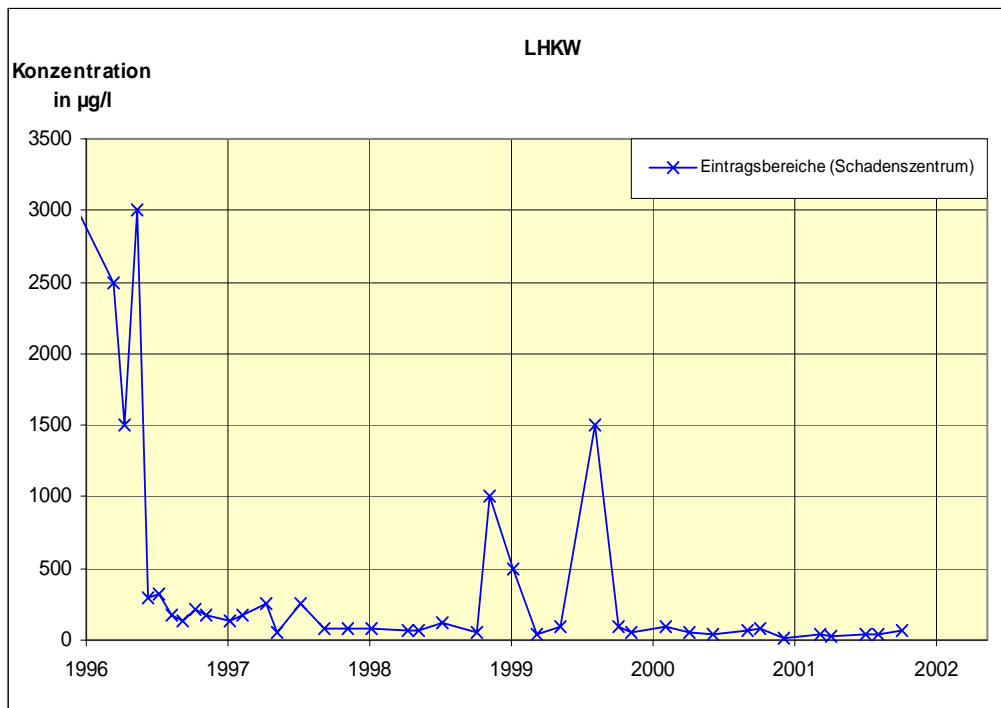


Abb. 27: Fall 7002 – LHKW, Konzentrationsverlauf im Schadenszentrum

9. Fall: 7007 – LHKW-Schaden durch metallverarbeitenden Betrieb, GW- Sanierung 1991-2003, parallele Bodenluftsanierung, Sanierungszielwert 40 µg/l nicht erreicht, Einstellung aus Verhältnismäßigkeitsgründen und vorläufige Weiterbeobachtung durch Monitoring, spezifische Gesamtkosten von 1.800 €/kg erreicht.

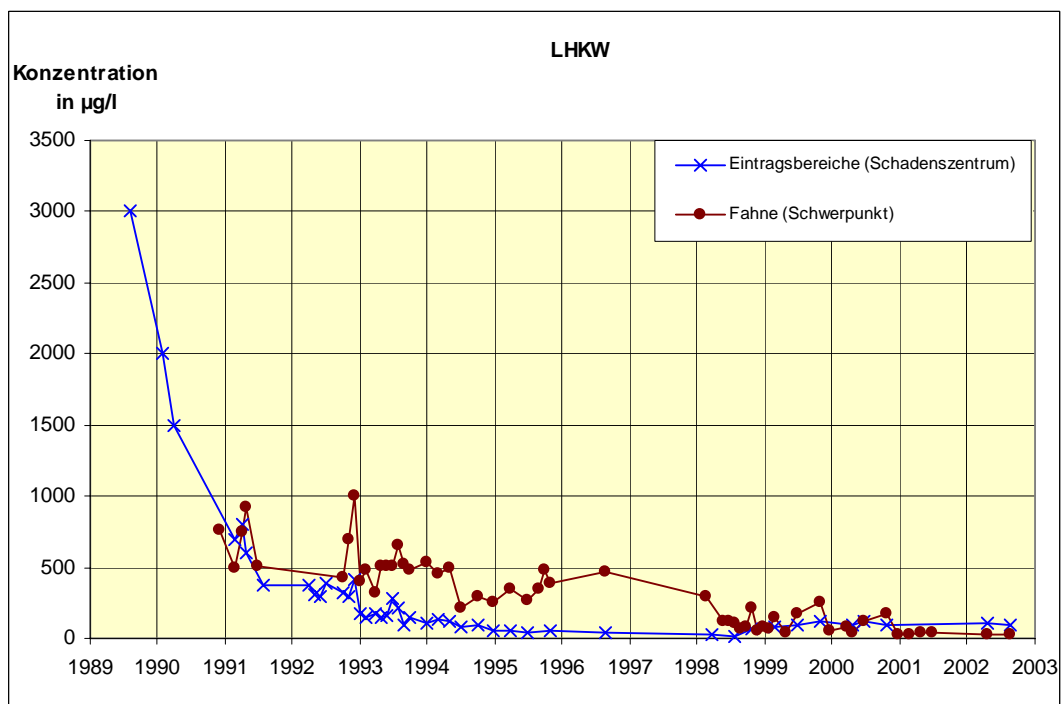


Abb. 28: Fall 7007 – LHKW, Konzentrationsverlauf im Schadenszentrum

ANLAGE 4: Zusammenfassender Bericht der Fallanalysen

10. Fall: 7013 – LHKW-Schaden durch ehem. textilverarbeitenden Betrieb, GW- Sanierung 1992-2004, parallel Boden-/Bodenluftsanierung, Erreichen Sanierungszielwert 10 µg/l weit entfernt, bereits hohe spezifische Gesamtkosten von 3.770 €/kg erreicht, Optimierungsbedarf ermittelt

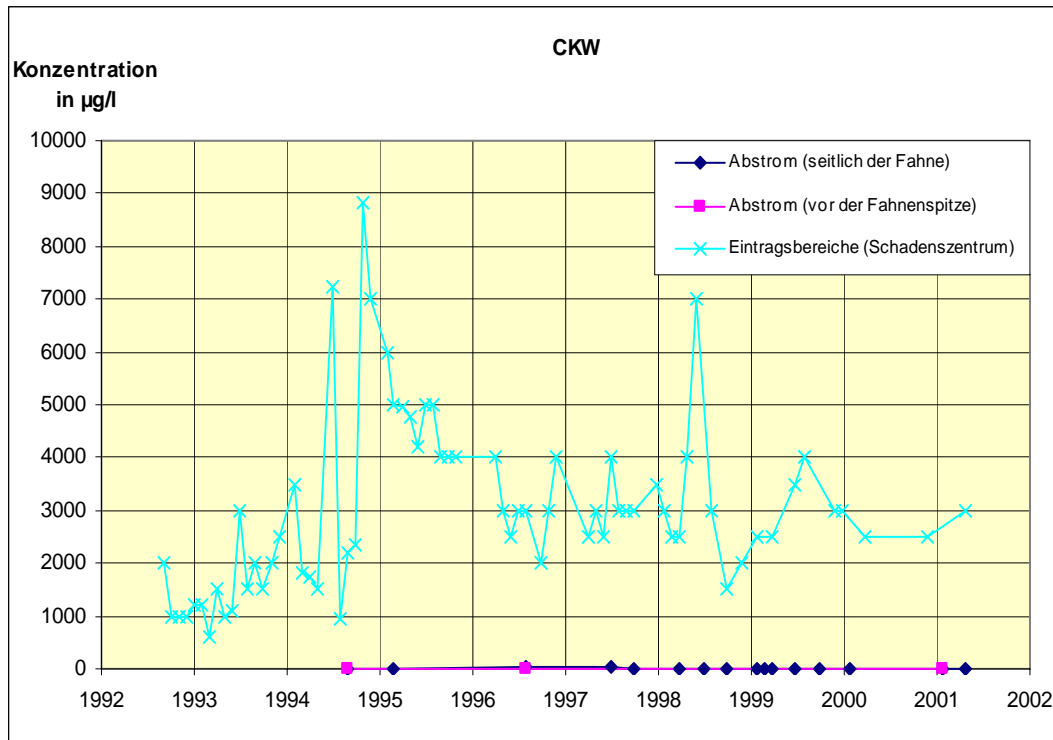


Abb. 29: Fall 7013 – LHKW, Konzentrationsverlauf im Schadenszentrum und in der Fahne

11. Fall: 7010 – LHKW-Schaden durch Textilhersteller, GW- Sanierung 1988-1993, parallel Bodenluftsanierung, Sanierungszielwert 5 µg/l trotz Optimierung nicht erreicht, aus Verhältnismäßigkeitsgründen Beendigung der Sanierung anerkannt, spezifische Gesamtkosten von 1.800 €/kg erreicht

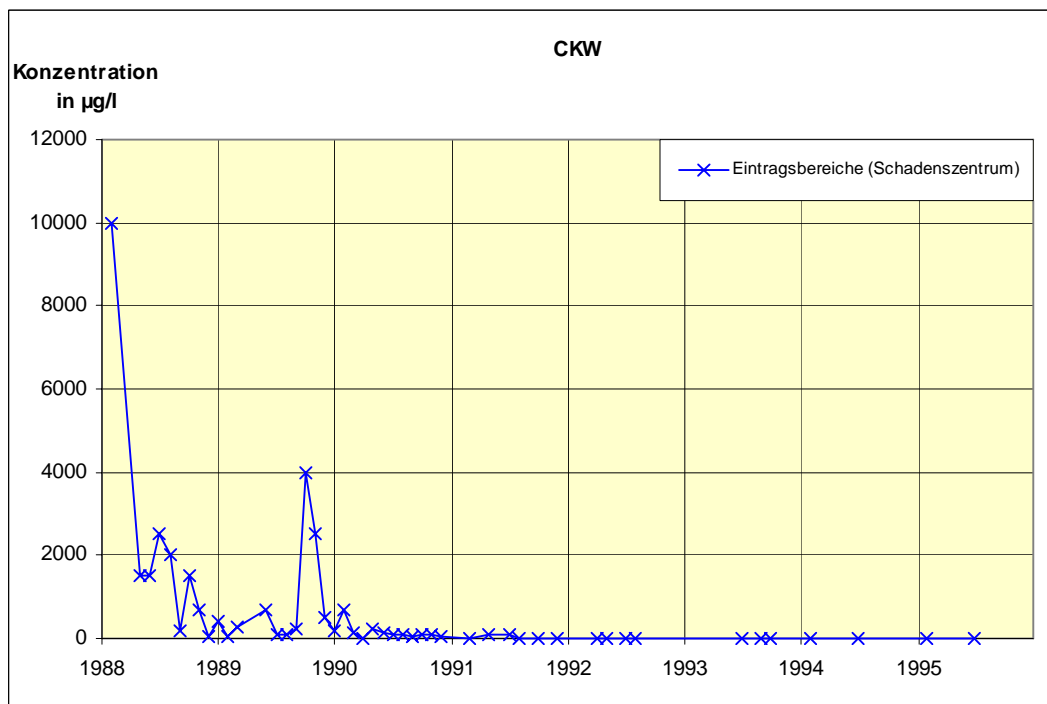


Abb. 30: Fall 7010 – LHKW, Konzentrationsverlauf im Schadenszentrum

3.3 Fälle mit anderen organischen Kontaminanten

1. Fall: ARC 13 – Phenole/PAK, ehemaliger Schwelanlagenstandort, P&T in Kombination mit Bodenaushub, Zielstellung lediglich Quellenverringderung (nur 4 Monate):

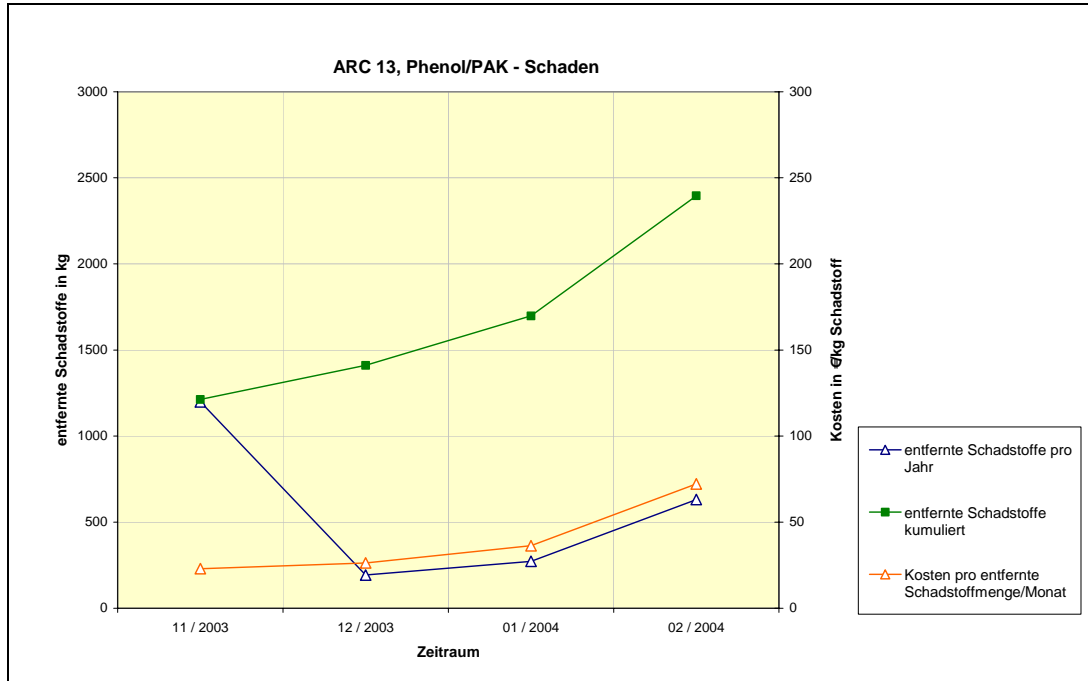


Abb. 31: Effizienz Fall ARC 13, Kombination mit Bodenaushub (kurze Dauer), niedrige spezifische Kosten

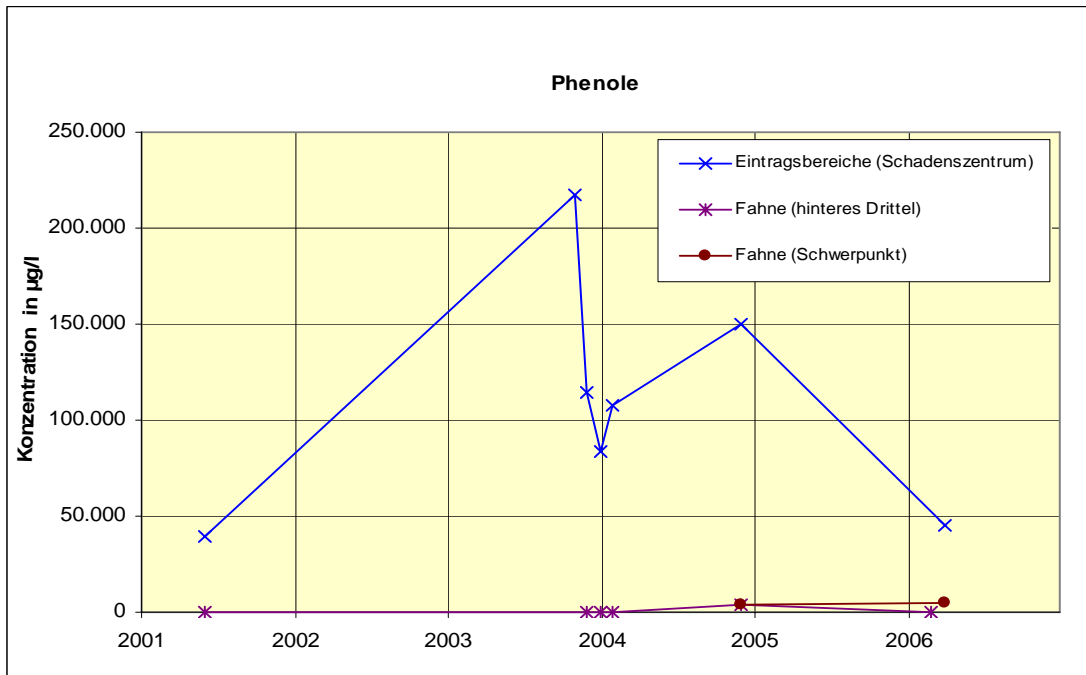


Abb. 32: Fall ARC 13: Konzentrationsverlauf Phenole, Reduzierung nach Aushubmaßnahmen

2. Fall: DGC 1 – MKW/PAK, Standort einer Metallhütte, Sanierung seit 2000, Sanierungszielwerte Phenol 100µg/l und PAK 2 µg/l, Optimierung und Zusatzmaßnahmen in Diskussion, allerdings eingeschränkte Datenverfügbarkeit

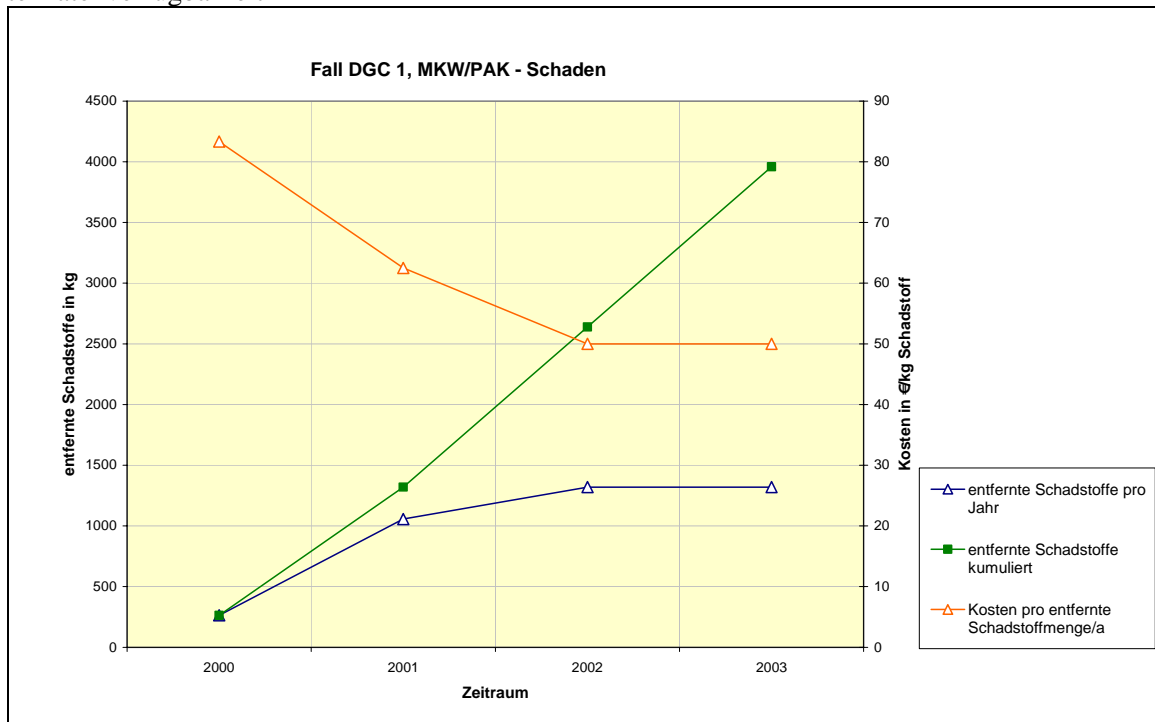


Abb. 33: Effizienz Fall DGC 1, Daten 2000-2003

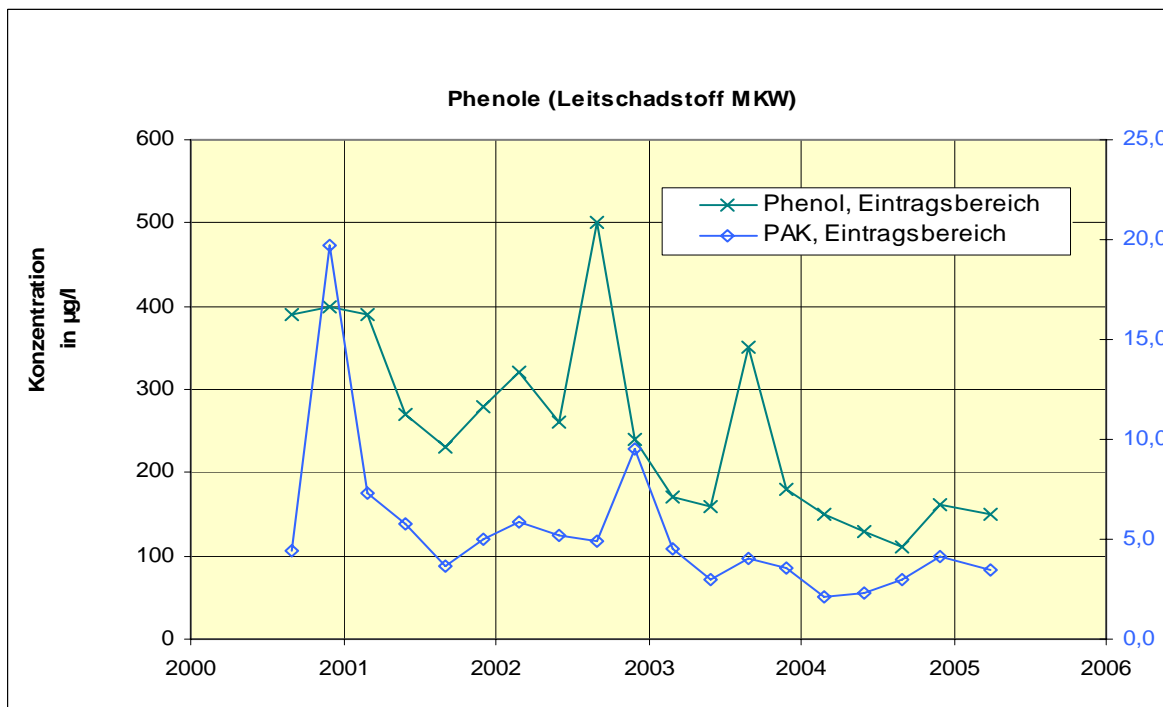


Abb. 34: Fall DGC 1: Konzentrationsverlauf 2. und 3. Leitschadstoff, Sanierungszielwerte noch nicht erreicht

Weitere P&T-Fälle mit der Schadstoffkombination PAK/Phenole sind

- DGC 9 (26.200 EUR/kg Schadstoff, ges.- mit sehr geringer ausgetragener Schadstoffmenge)
- Fall 1004 (fehlende Mengenangabe)

Die Spanne der Kosten/kg entnommener Schadstoff reicht von vergleichsweise geringen Werten < 100 €/kg bis zu einem hohen Wert von 26.200 €/kg, wobei der Extremwert der spezifischen Kosten durch die sehr geringe Schadstoffmenge weniger kg begründet ist.

3.4 Fälle mit anorganischen Kontaminanten

Als anorganische Kontaminanten wurde im Rahmen der Fallrecherche in vier Schadensfällen Chrom/Chromat, in zwei Fällen Arsen und in einem Fall Nitrat saniert.

Die spezifischen Gesamtkosten werden mit folgenden Spannen angegeben:

- Chrom/Chromat-Schadensfälle: 3.223 – 8.055 €/kg (wegen fehlender Schadstoffmengen nur zwei Angaben)
- Arsen-Schadensfälle: 1022 – 2483 €/kg
- Nitrat-Schadensfall: 2,6 €/kg

Für die recherchierten Schadensfälle mit anorganischen Kontaminanten liegen jedoch nur in drei Fällen Angaben zur Entwicklung der spezifischen Kosten im Verlauf der Maßnahme vor.

1. Fall: ARC 15- Chromatschaden, Betrieb der Elektroindustrie, Sanierung seit 2000, Bodensanierung durchgeführt, Sanierungszielwert 10 µg/l, trotz Optimierung noch nicht erreicht, Anstieg der spezifischen Kosten

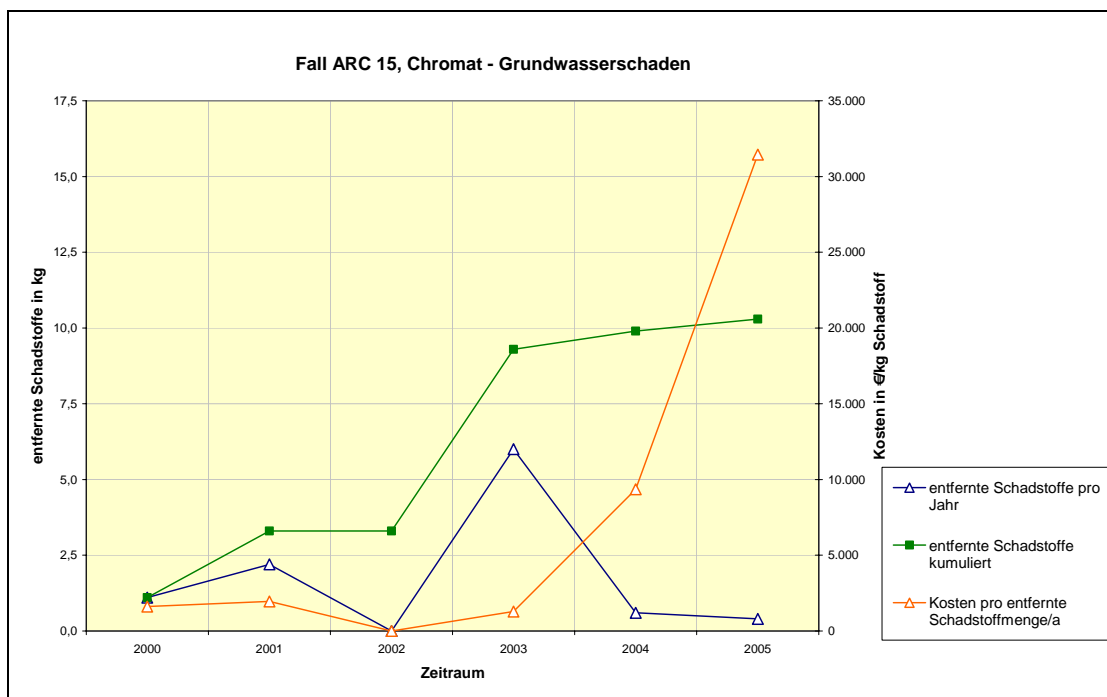


Abb. 35: Effizienz Fall ARC 15, starker Kostenanstieg

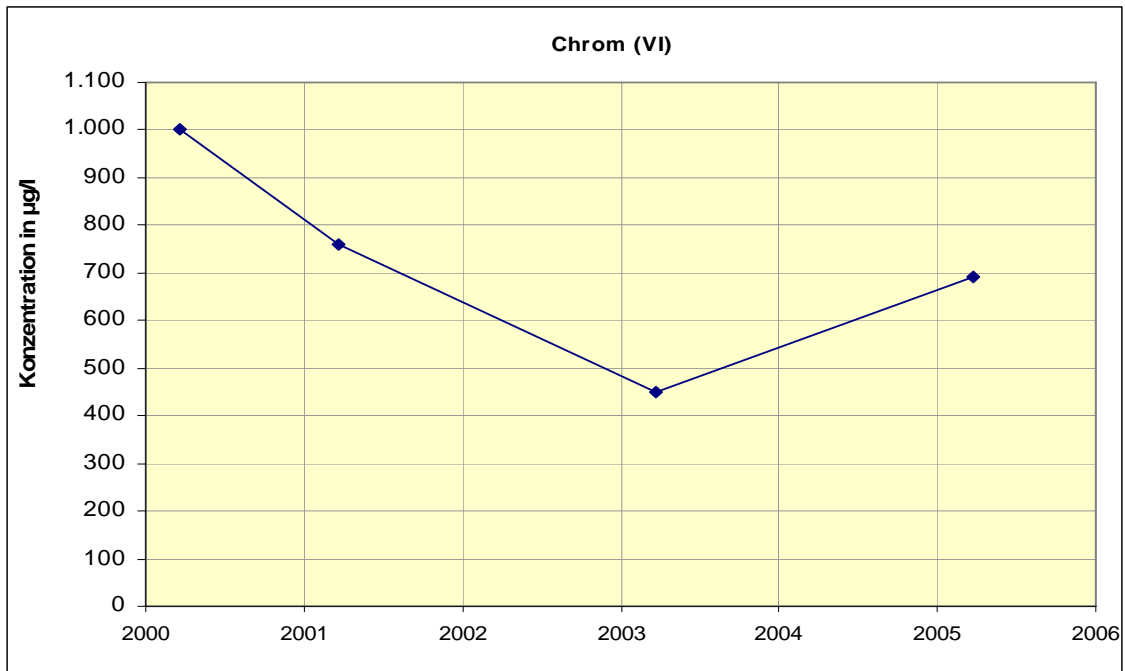


Abb. 36: Fall ARC 15: Konzentrationsverlauf Chrom (VI), Sanierungszielwert 10 µg/l noch nicht erreicht

2. Fall: ARC 12- Arsenschaden, Altstandort, Sanierung seit 2000, Bodensanierung durchgeführt, Sanierungszielwert 10 µg/l, trotz Optimierung noch nicht erreicht, Anstieg der spezifischen Kosten, Gesamtkosten bisher ca. 5,5 Mio EUR

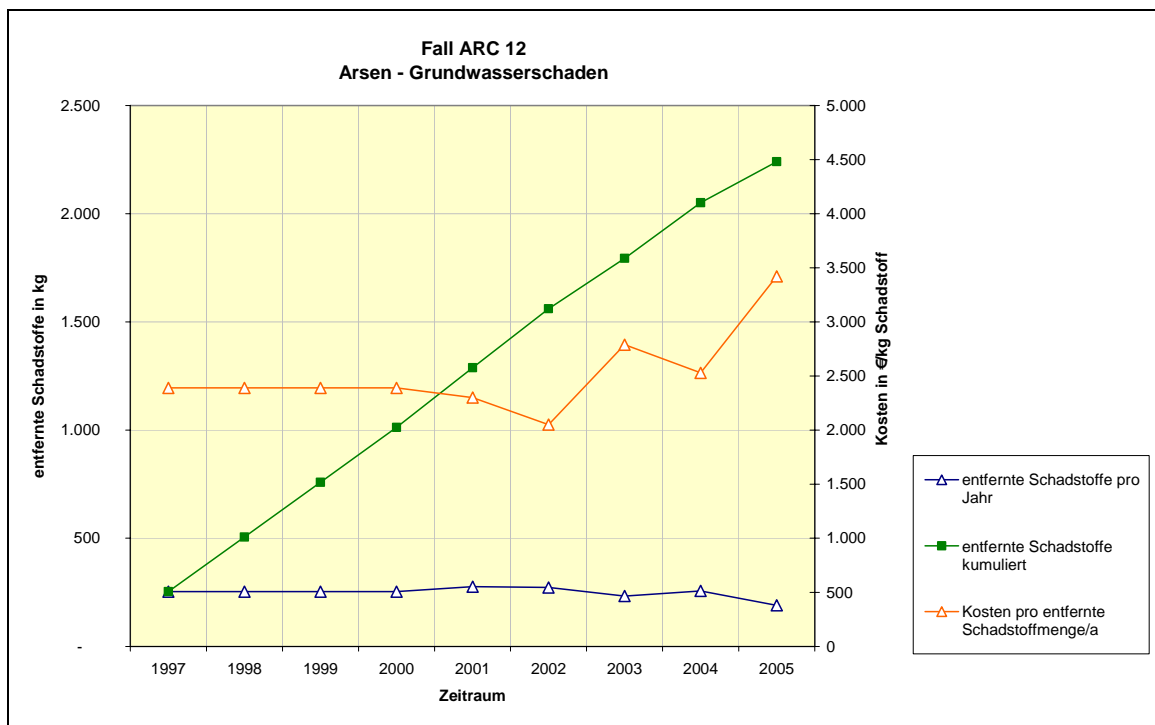


Abb. 37: Effizienz Fall ARC 12

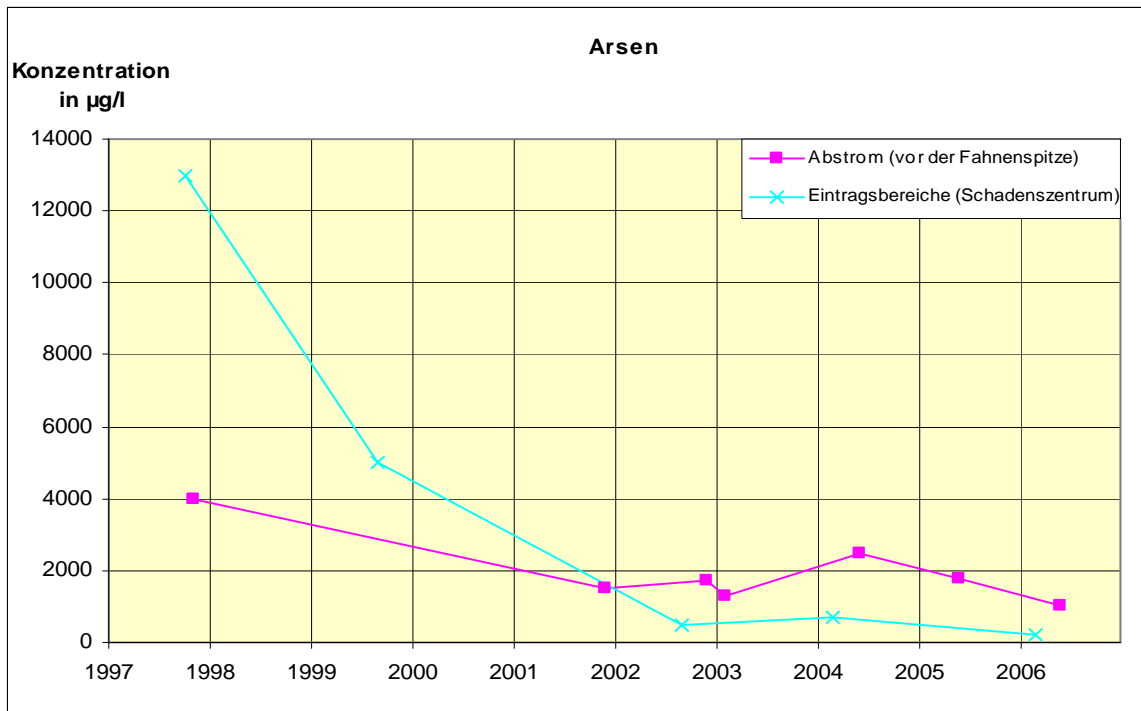


Abb. 38: Fall ARC 12: Konzentrationsverlauf Arsen, Sanierungszielwert 10µg/l noch nicht erreicht

3. Fall: ARC 2- Nitratschaden, aktueller Betriebsstandort/Verkehrsfläche, Sanierung seit 1999, Sanierungszielwert 25 mg/l, noch nicht erreicht, nur geringer Anstieg der spezifischen Kosten im Verlauf der bisherigen Sanierung, Gesamtkosten bisher ca. 7,2 Mio EUR

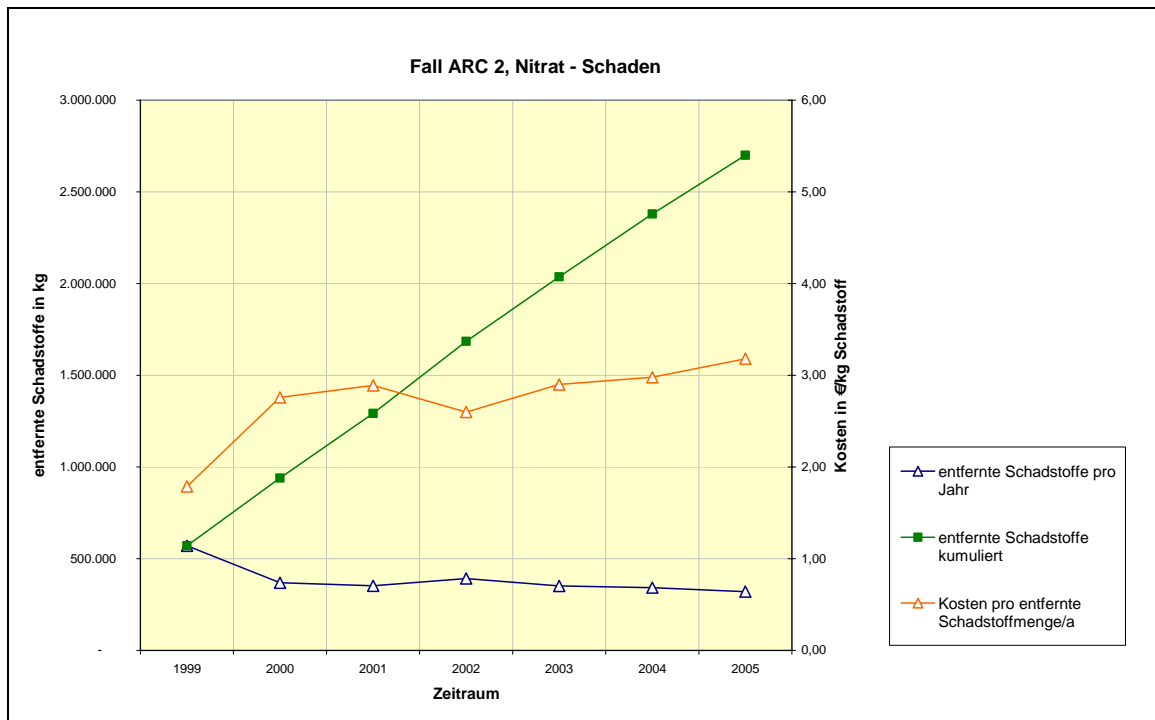


Abb. 39: Effizienz Fall ARC 2