

Vergleich von LCKW-Grundwassersanierungen durch „Pump and Treat“ und „Reaktive Systeme“ - Verfahren und Kosten -

Dr. Hans Dieter Stupp

1. Einleitung

Das in der Vergangenheit am häufigsten angewandte Verfahren zur Sanierung von LCKW-Grundwasserschäden ist das Pump and Treat-Verfahren („**Pump and Treat**“ nachfolgend **PT**). Hierbei wird eine hydraulische Massnahme in Form der Grundwasserentnahme mit der Reinigung des geförderten Grundwassers durch eine geeignete On-Site-Behandlungsanlage kombiniert. Als Reinigungsverfahren werden in den meisten Fällen Aktivkohleadsorption und Desorption (=Strippen) eingesetzt. Kennzeichnend für die **PT**-Massnahmen sind in den meisten Fällen sehr lange Sanierungszeiträume. Diese sind in erster Linie auf die vergleichsweise geringen Löslichkeiten der meisten LCKW in Verbindung mit dem Auftreten von LCKW-Phasenkörpern in der gesättigten Zone zurückzuführen. Veranlasst durch diese nicht befriedigenden Resultate wurde in den letzten Jahren verstärkt nach neuen Verfahren gesucht. Bei einer vergleichenden Analyse der verschiedenen untersuchten Alternativen haben die **Reaktiven Systeme** (nachfolgend **RS**) neben der Sanierungsstrategie „Monitored Natural Attenuation“ die größte Bedeutung erlangt. Bei den **RS** handelt es sich im Gegensatz zum **PT**-Verfahren um eine passiv arbeitende Technologie, bei der keine Grundwasserförderung erforderlich ist. Wirkungsbezogen handelt es sich eher um eine Sicherungsmaßnahme, die ein Abströmen von Schadstoffen mit der Grundwasserströmung unterbinden soll.

Neben der Herausarbeitung der technischen Vor- und Nachteile der möglichen einsetzbaren Alternativen haben **kostenmäßige Betrachtungen** bei Sanierungsvorhaben vor dem Hintergrund der allgemein gestiegenen Anforderungen an Kostenoptimierungen stark an Bedeutung gewonnen. Hierbei sind heute unter einem prognostischen Ansatz alle Kosten, bestehend aus Investitions-, Betriebs- und Finanzierungskosten, in die Entscheidungsfindung über das kostenseitig „optimale“ Sanierungsverfahren einzubeziehen. Als Folge sind nach der Durchführung von Sanierungsuntersuchungen und Machbarkeitsstudien die für die Sicherung/Sanierung einer Grundwasserverunreinigung infrage kommenden Verfahren einer fundierten, kritischen Analyse zu unterziehen. Vor diesem Hintergrund werden **PT**-Verfahren und die aktuell diskutierten **RS** einer technisch und kostenmäßig vergleichenden Betrachtung unterzogen. Auszüge dieses Betrages wurden in der TerraTech 2/2000 veröffentlicht.(1).

Verwendete Abkürzungen:

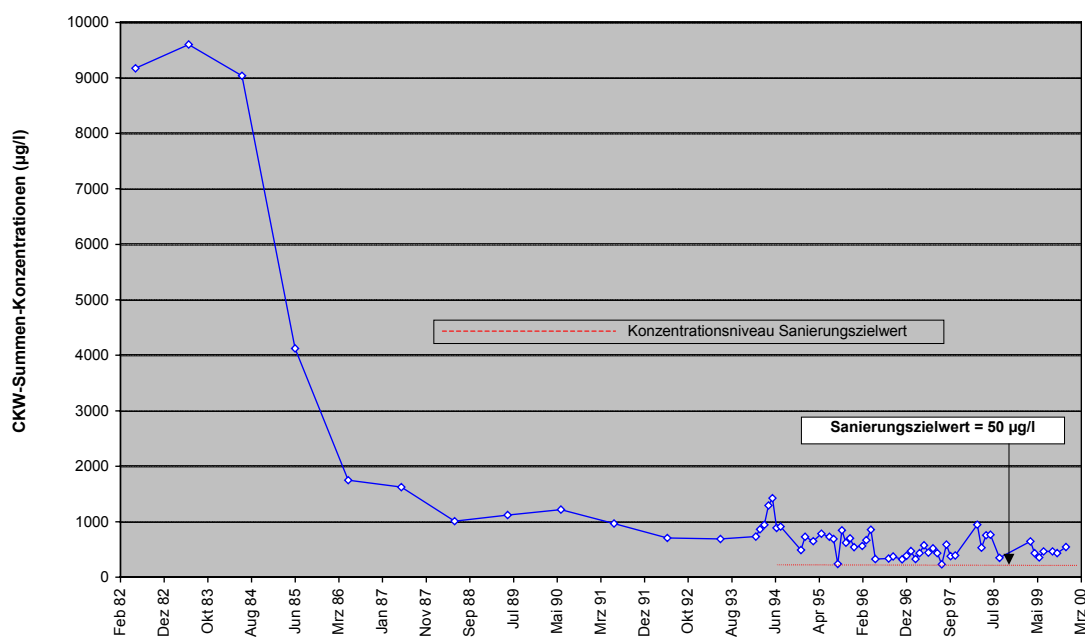
LCKW	Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (C1/C2-Alkane/Alkene mit Siedepunkten < 150 ° C)
DNAPL	Dense non aqueous phase liquids
MNA	Monitored Natural Attenuation
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe (hier: Diesel, Heizöl EL)
BTEX	Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol (leichtflüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe)
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCE	Tetrachlorethen (= Tetrachlorethylen = Perchlorethen = Per)
TCE	Trichlorethen (= Trichlorethylen = Tri)
Cis-1.2-DCE	cis-1.2-Dichlorethen
VC	Vinylchlorid (= Chlorethen)
TCA	1.1.1-Trichlorethan
TCM	Trichlormethan

2. Problemstellung

Das überwiegend zur Entfernung von schädlichen Grundwasserinhaltsstoffen eingesetzte Verfahren ist **PT**. Dabei wird durch die Entnahme von Grundwasser über Brunnen oder Drainagen ein Absenkrichter aufgebaut, in dessen Entnahmebereich das kontaminierte Grundwasser strömt.

Heute liegen etwa 20 Jahre Erfahrung über die hydraulische Sanierung (**PT**) von LCKW-Langzeitsanierungsprojekten vor. Diese Erfahrung lehrt, dass bei vielen und insbesondere grösseren LCKW-Schäden sehr **lange Zeiträume zur Sanierung** erforderlich sind. Die ältesten von der Gerling Consulting Gruppe (GCG) betreuten LCKW-Sanierungsprojekte sind seit 1982 in kontinuierlichem Betrieb. Der Grund für die lange Dauer der Sanierungen ist darin zu sehen, dass mit fortschreitender Sanierungszeit keine oder nur noch eine langsame Abnahme der LCKW-Gehalte im Förderwasser der Sanierungsbrunnen erfolgt. Dieser Effekt der nur äußerst langsamen Reduzierung der LCKW-Gehalte in Sanierungsbrunnen wird in der Literatur als Tailing-Effekt beschrieben (2). Zur Veranschaulichung ist in der Abb. 1 ein Beispiel eines von der GCG betreuten Projektes gegeben, das die Entwicklung der LCKW-Gehalte eines seit 1983 in Betrieb befindlichen Sanierungsbrunnens zeigt.

Abb. 1: Entwicklung der CKW-Konzentrationen im Rohwasser des Sanierungsbrunnens
Tailing-Effekt bei einer "pump and treat" Maßnahme



Die wesentlichen Gründe für das **Tailing** sind auf Grund der in den letzten beiden Jahrzehnten gewonnenen Erfahrungen bekannt. Die wichtigsten Erkenntnisse sind nachfolgend zusammengefaßt:

- Die Wasserlöslichkeit der verbreitetsten LCKW ist mit Werten zwischen 150 und 1.500 mg/l relativ gering.
- Die LCKW besitzen aufgrund ihrer hohen Dichte, niedrigen kinematischen Viskosität und niedrigen Oberflächenspannung ein hohes vertikal gerichtetes Migrationspotential als

Schwerphase. Dies führt in der gesättigten Zone dazu, dass LCKW bevorzugt in feinkörnigeren Aquiferpartien akkumulieren. Diese feinkörnigeren Partien sind den advektiven Prozessen, die durch **PT**-Massnahmen induziert werden, nicht oder nur eingeschränkt zugänglich.

- LCKW werden in starkem Maße an Aquifermaterial mit sorptiver Wirkung gebunden. Hierfür stehen in Grundwasserleitern insbesondere organisches Material, aber auch Tonminerale, Huminstoffe sowie Oxide und Hydroxide von Eisen und Mangan zur Verfügung. Die Desorption läuft unter Ungleichgewichtsbedingungen ab und erfordert ausgesprochen lange Zeiträume. Für weitergehende Informationen wird auf die Fachliteratur verwiesen (2).
- LCKW sind im Vergleich zu halogenfreien Kohlenwasserstoffen, wie Heizöl, Diesel und Vergaserkraftstoff schlecht und nur unter besonderen Milieubedingungen überhaupt biologisch abbaubar (3).

Die wesentliche Problematik der unbefriedigend langen Laufzeiten vieler hydraulischer Sanierungen liegt in dem besonderen Verhalten der LCKW als Schwerphasen begründet. Im anglo-amerikanischen Sprachgebrauch werden organische Stoffe mit über 1 g/cm^3 liegenden Dichten (deutsch: Schwerphasen) als **dense non aqueous phase liquids (DNAPL)** bezeichnet. Insofern ist dieser Terminus übergeordnet zu den LCKW zu sehen und beschreibt das Verhalten organischer Flüssigphasen, die schwerer sind als Wasser. Das **besondere Verhalten der LCKW-Phasen** besteht darin, dass diese bei Überchreitung des Eintrittskapillar-Widerstandes der Gesteine durch entsprechenden Phasennachschub tief in den Grundwasserleiter eindringen und im „Worst Case“ bis auf die Sohle des Aquifers migrieren (Bildung sog. „Pools“). Folge dieser Ausbreitung ist ein räumlich bis an die Grenze des Vorstellungsvermögens differenzierter Phasenkörper mit einem ausgesprochen grossen Verhältnis von Phasenoberfläche zu Phasenvolumen. Darüber hinaus können starke vertikale Zonierungen in der Zusammensetzung der LCKW-Phasen vorliegen, wobei die niedriger viskosen Phasen häufig bis in größere Tiefen gelangt sind. Als Ergebnis des LCKW-Phasenverhaltens entstehen extrem differenzierte Phasenkörper in der gesättigten Zone, deren Abreicherungen im wesentlichen über Lösungsprozesse ablaufen. Für weitergehende Informationen zu den Grundlagen der Stoffausbreitung wird auf die Fachliteratur verwiesen (4).

Im Gegensatz zu den als Sicherungsverfahren wirkenden **RS** beinhalten **PT**-Maßnahmen sowohl die Elemente der **Sicherung** als auch der **Sanierung**. Bei Vorliegen von stärkeren Phasenkörpern im Aquifer trägt jedoch auch die **PT**-Technologie eher den Charakter einer Sicherung als den einer Sanierung. Diese allgemein anerkannte Problematik der sehr langen Betriebszeiträume bei hydraulischen Sanierungen führte zur Entwicklung von alternativen Technologien. Diese Aktivitäten gingen seit Beginn der 90er Jahre insbesondere von Nordamerika aus. Dabei werden als derzeit wichtigste alternative Verfahren die **RS** diskutiert. In dieser Arbeit werden aus gutachterlicher Sicht die Vor- und Nachteile der **PT**- und **RS**-Verfahren unter Berücksichtigung neuer Entwicklungen einander gegenübergestellt. Damit eröffnet sich für die von LCKW - Grundwasserschäden Betroffenen die Möglichkeit zu einem orientierenden Vergleich bei der Planung entsprechender Sanierungsverfahren.

3. Sanierungsverfahren nach dem Stand der Technik

Bei den heute bekannten Sanierungsverfahren können grundsätzlich **aktive** und **passive Verfahren** differenziert werden. Die aktiven Verfahren unterscheiden sich von den passiven dadurch, dass hier durch induzierte Maßnahmen unter Einbringung von Energie in verschiedener Form kontinuierliche oder diskontinuierliche Eingriffe auf das Grundwasser

erfolgen (z.B. Wasserentnahme durch Pumpen bei **PT**-Maßnahmen, Injektion von Luft in den Aquifer bei Air Sparging). Eine Zusammenstellung der verschiedenen zur Verfügung stehenden Verfahren zeigt die Tab. 1. Da eine Beschreibung der einzelnen Verfahren den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, wird der interessierte Leser auf die weiterführende Fachliteratur verwiesen (5, 6).

Tab. 1: Verfahren zur Sanierung/Sicherung von verunreinigtem Grundwasser

Aktive Verfahren	Passive Verfahren
Pump and Treat	Vertikale Abschirmung
UVB-Verfahren	- Dichtwand
GZB-Verfahren	- Schmalwand
In-situ-stripping	- Spundwand (etc.)
Geoschock-Verfahren (in Verbindung mit hydraulischer Maßnahme)	Reaktive Systeme
Elektrokinetische Verfahren	- Reactive Wall
Mikrobiologische in-situ-Sanierung (in Verbindung mit hydraulischer Maßnahme)	- Funnel and Gate
	- Funnel and Reactor
	Monitored Natural Attenuation

3.1 Grundzüge des Pump and Treat-Verfahrens

Bei **PT**-Maßnahmen wird durch die **Entnahme von Grundwasser** aus einem oder mehreren Brunnen das Strömungsbild des Grundwassers in der Weise beeinflusst, dass die im Grundwasser enthaltenen Schadstoffe dem Brunnen zufließen. Das verunreinigte Grundwasser wird zutage gefördert und durch eine entsprechende Behandlung gereinigt. Als wichtigste Behandlungsverfahren für LCKW sind Aktivkohlefiltration und Desorption (Strippen) zu nennen. Bei höheren Gehalten an **Störstoffen** (Eisen, Mangan, Carbonat, Schwebstoffe) kann eine vorherige Entfernung der unerwünschten Inhaltsstoffe notwendig werden. In solchen Fällen steigt der anlagenbedingte Aufwand durch die notwendigen Vorreinigungsanlagen stark an und führt zu einer erheblichen Verteuerung der Investitions- und Betriebskosten.

Unter dem Gesichtspunkt der Aufrechterhaltung der Grundwasserbilanz wird heute die Wiederversickerung des von Schadstoffen befreiten Grundwassers angestrebt. In den Fällen, in denen eine Reinjektion auf Grund von Standortgegebenheiten oder störender Wasserinhaltsstoffe - beispielsweise hohe Carbonat-, Eisen- und Mangangehalte - nicht möglich ist, wird das Grundwasser dem Vorfluter (Direkteinleitung) bzw. dem Regenwasser- oder Schmutzwasserkanal (Indirekteinleitung) zugeführt.

3.2 Grundzüge der Reaktiven Systeme

Die Diskussion über den Einsatz von **RS** zur Sicherung / Sanierung von Grundwasserverunreinigungen wird in der BRD seit ca. vier Jahren mit zunehmender Intensität geführt. Die Entwicklung von reaktiven Materialien zur Behandlung LCKW-haltiger Grundwässer geht auf die vor ca. 10 Jahren begonnenen Arbeiten von Gillham zurück. Dabei postulierten Gillham und O'Hannesin den Einsatz von 0-valentem Eisen zur Dehalogenierung von LCKW (7).

Nach dem heutigen Entwicklungsstand stehen im Wesentlichen drei unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, die als „**Reactive Walls**“, „**Funnel and Gate**“ und „**Funnel and Reactor**“ bezeichnet werden. Der gemeinsame Ansatz dieser Varianten ist darin zu sehen, dass das Grundwasser nicht gefördert wird, sondern die Reinigung passiv in Reaktoren mit geeigneten Materialien abläuft.

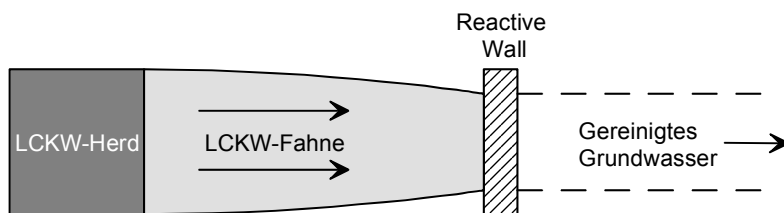
Bei der **Reactive Wall** durchströmt das verunreinigte Grundwasser eine vertikal in den Untergrund eingebrachte reaktive Wand (Abb. 2a). Bei dem **Funnel and Gate**-Verfahren wird das mit Schadstoffen beladene Grundwasser zunächst mittels eines vertikalen Dichtelementes gefasst und durch ein mit reaktiven Materialien gefülltes „Tor“ geleitet (Abb. 2b). Analog hierzu wird beim **Funnel and Reactor**-Prinzip anstelle des Tors ein Reaktor eingesetzt (Abb. 2c). Wird dieser Reaktor als Untertagebauwerk vorgesehen, kann das gesamte System passiv betrieben werden. Dagegen ist bei Anwendung von übertage installierten Reaktoren der Einsatz von Pumpen erforderlich, womit bei dieser Variante der passive Charakter des Gesamtsystems nicht mehr erfüllt ist.

Als reaktive Materialien stehen heute in erster Linie **0-valentes Eisen** in Form von Eisengranulat und Eisenschwamm sowie Aktivkohle zur Verfügung. Darüber hinaus werden Entwicklungen mit Adsorberharzen und veredelten Harzen, beispielsweise mit Palladium dotierten Harzen, verfolgt (8). Eine interessante Entwicklung ist auch in der Kombination von Aktivkohle und Mikrobiologie zu sehen (9). Einen Überblick über die im Labor untersuchten Materialien vermittelt die Tab. 2.

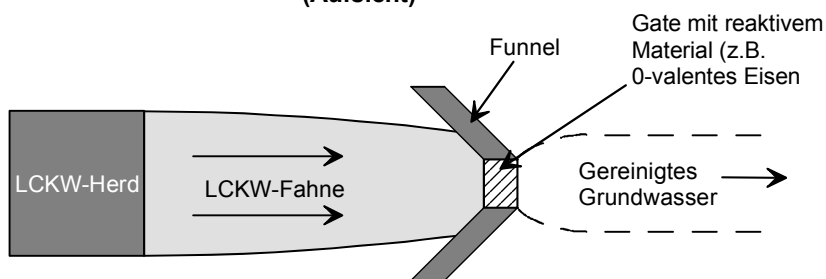
Für detaillierte Informationen über den Entwicklungsstand reaktiver Materialien und die bauliche Ausführung von RS wird auf die weiterführende Literatur verwiesen (10).

Abb. 2a-2c: Typen Reaktiver Systeme

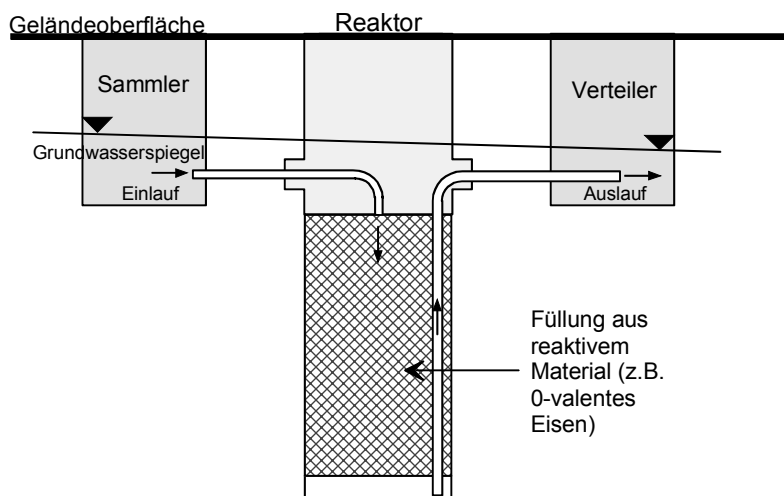
2a: Reactive Wall (Aufsicht)



2b: Funnel and Gate (Aufsicht)



2c: Funnel and Reaktor (Querschnitt)



4. Vorteile und Limitierung der Verfahren

4.1 PT-Verfahren

Die komplette textliche Abhandlung aller Vor- und Nachteile der beiden Verfahren würde den Rahmen dieses Beitrags überschreiten. Infolgedessen wurden die wichtigsten Gesichtspunkte in den Tab. 3 und 4 zusammengestellt. Nachfolgend wird auf einige wesentliche Punkte Bezug genommen.

Tabelle 2: Potentielle und bereits eingesetzte reaktive Materialien

Barriermaterial	Kontaminant	Prozess
Fe ⁰ , Fe ⁰ /Al ⁰ , Fe ⁰ /Pd-Gemische Fe ⁰ /Pyrit-Gemische	CKW, FCKW, z. T. chlorierte Aromate	abiotisch, reduktive Dehalogenierung
Fe ⁰ und methanotrophe Bakterien	CKW	abiotisch, reduktive Dehalogenierung und mikrobieller Abbau
Zeolithe und methanotrophe Bakterien	CKW	Sorption gekoppelt mit mikrobiellem Abbau
Pd-dotierte Zeolithe	CKW	abiotisch, reduktive Dehalogenierung
Beschichtete Pd-Katalysatoren	CKW	abiotisch, reduktive Dehalogenierung
Oxidative Vollmetallkatalysatoren	CKW	abiotisch, reduktive Dehalogenierung
CdS	CKW	abiotisch, reduktive Dehalogenierung
ZnS	CKW	abiotisch, reduktive Dehalogenierung
FeS	CKW	abiotisch, reduktive Dehalogenierung
ORC (oxygen releasing compounds)	BTEX	oxidativer Abbau, mikrobiell
Aktivkohle	PAK	Sorption mit möglichem mikrobiellem Abbau
Fe ⁰	CrO ₄ ²⁻	Reduktion und Fällung
Ni	CKW	abiotisch, reduktive Dehalogenierung
Cu	CKW	abiotisch, reduktive Dehalogenierung
Chromit (Spinell-Typ)	CKW	abiotisch, reduktive Dehalogenierung
Hydroxylapatit	Pb ²⁺	Fällung
Hydroxylapatit	Zn ²⁺	Sorption, Mitfällung
Hydroxylapatit	Cd ²⁺	Mitfällung
gelöschter Kalk, Flugasche	UO ₂ ²⁺	Mitfällung
Fe ⁰	UO ₂ ²⁺	Reduktion und Fällung
Fe ⁰	TcO ₄	Reduktion und Fällung
Torf, Fe(III)-Oxide	MoO ₄ ²⁻	Sorption, Mitfällung
Zeolithe	⁹⁰ Sr ²⁺	Sorption
Fe ⁰	NO ₃	Reduktion
Sägespäne	NO ₃	Reduktion

Quelle:

Aktualisierung Literaturstudie für "Reaktive Wände"

Landesanstalt für Umweltschutz Baden Württemberg, Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung, 33/97, Prof. A. Dahmke ergänzt durch Autor

Eine vergleichende Betrachtung beider Verfahren führt schnell zu der Erkenntnis, dass das **PT-Verfahren** seit über 20 Jahren zur LCKW-Sanierung eingesetzt wird und **umfangreiche Erfahrungen** über diese Technologie vorliegen. **PT-Verfahren** können grundsätzlich als sichere Verfahren eingestuft werden, mit denen Schadzentren und Kontaminationsfahnen langfristig saniert und die Schadstoffe unter dem Aspekt der Gefahrenabwehr an der weiteren Ausbreitung im Grundwasser gehindert werden. In Ergänzung hierzu sind **PT-Massnahmen** mit der Erhöhung der Grundwasserfließgeschwindigkeit im Gebiet des Schadensherdes verbunden. Hierdurch erfolgt gegenüber den natürlichen, unbeeinflussten Verhältnissen eine Beschleunigung der Lösungsprozesse. Im Gegensatz zu den passiv arbeitenden **RS-Anwendungen** führen **PT-Massnahmen** zu einer Verkürzung der notwendigen Sanierungszeiträume.

Tabelle 3: Vorteile beider Verfahren

PUMP AND TREAT	REAKTIVES SYSTEM
größere Praxiserfahrung	keine aktive Wasserentnahme
große Zahl von Anlagelieferanten	geringerer Überwachungsaufwand des Anlagenbetriebes
hohe Verfahrenssicherheit	Einsatz auch bei schlecht durchlässigen Sedimenten ($K_f < 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$) und in der Nähe von Vorflutern
breites Stoffspektrum	keine bodenmechanischen negativen Auswirkungen auf die unmittelbare Umgebung durch GW-Absenkungen (Setzungen, Trockenfallen)
flexibel und anpassungsfähig an die Sanierungsentwicklung	bessere Umweltverträglichkeit durch nicht vorhandenen oder geringen Energiebedarf (Ökobilanz)
Variationen der Grundwasserfließrichtung wirken nicht limitierend auf Verfahren	Bei Einsatz von 0-valentem Eisen keine Entsorgung von Sorptionsmitteln oder Konzentraten
geringer baulicher Eingriff in die Standortsituation und quasi überall einsetzbar	keine anlagebedingten Restemissionen in andere Umweltmedien
niedrigere Investitionskosten	Keine Störung des Grundwasserhaushaltes durch Grundwasserentnahme
niedrigere Planungskosten	niedrigere Betriebskosten
höhere Akzeptanz durch Behörden	bei langfristigen Vorhaben geringere Gesamtsanierungskosten wahrscheinlich (abhängig von jeweiliger PT-Auslegung)

Der Einsatz ist relativ unabhängig von den lokalen Grundwasserverhältnissen, und jahreszeitliche Variationen der Grundwasserfließrichtung können bei sachgemäßer Konzeption des Sanierungsvorhabens sicher beherrscht werden. Zur grundsätzlichen Anwendbarkeit sind jedoch bestimmte **Mindest-Durchlässigkeiten** der wasserführenden Sedimente mit k_f -Werten von möglichst $> 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ erforderlich, da ansonsten eine unproblematische und kontinuierliche Wasserentnahme nicht gewährleistet ist.

Ein nicht zu übersehender Vorteil besteht darin, dass ein sehr **großes Spektrum von organischen Inhaltsstoffen** behandelt werden kann. Hierbei ist hervorzuheben, dass zur Grundwasseraufbereitung bis vor wenigen Jahren im Wesentlichen nur die Standardverfahren Aktivkohle-Adsorption und Desorption zur Verfügung standen.

Tabelle 4: Nachteile beider Verfahren

PUMP AND TREAT	REAKTIVES SYSTEM
für ein aktives Verfahren lange Sanierungszeiträume erforderlich	geringere Praxiserfahrung
höherer Aufwand des Anlagenbetriebes	Verfahrenssicherheit ist durch Vor-Untersuchungen sicherzustellen (Risiken = Verringerung der Aktivität und Durchlässigkeit reaktiver Materialien)
höherer Energiebedarf führt zu ungünstigerer Ökobilanz	Noch geringe Zahl von Anbietern
Entsorgung von Sorptionsmitteln oder Konzentraten erforderlich	weniger breites Spektrum von Organika behandelbar
anlagebedingte Restemissionen in andere Umweltmedien möglich	lange Betriebszeiträume erforderlich (passives Verfahren)
bei Direkt- oder Indirekt-Ableitung des gereinigten GW Störung des GW-Haushaltes	größere bauliche Eingriffe in die Standortsituation und nur bei entsprechendem Platzangebot umsetzbar
je nach Standortsituation negative Auswirkungen auf die unmittelbare Umgebung durch GW-Absenkungen möglich (Setzungen, Trockenfallen)	Voraussetzung für Anwendung sind: Existenz einer geringer durchlässigen Schicht in zugänglicher Tiefe (bis 25 m u. GOK) <u>und</u> konstante GW-Fließrichtung
Einsatz nur bei durchlässigen Sedimenten sinnvoll ($k_f > 5 \times 10^{-5}$ m/s)	weniger flexibel und anpassungsfähig an Entwicklungen
höhere Betriebskosten	höhere Investitionskosten
Höherer Aufwand für den Sanierungspflichtigen während des gesamten Sanierungsvorhabens	Bei erforderlichem Rückbau des RS treten hohe Kosten in der Endphase des Projektes auf
bei langfristigen Vorhaben höhere Gesamtsanierungskosten wahrscheinlich (abhängig von jeweiliger PT-Auslegung)	Patentschutz ist zu beachten

Mit diesen Verfahren können jedoch nicht alle chlorierten Verbindungen behandelt werden. In den letzten Jahren wurde das Spektrum der Reinigungstechnologien durch die Verfahren Naßoxidation, Harzadsorption, Flüssig-Flüssig-Extraktion (MPPE) und Elektronenstrahl-Technik (HVEA) ergänzt. Insbesondere bei größeren Schadenfällen und bei Grundwasserschäden mit einem großen Spektrum verschiedener Verbindungen sind diese neuen Entwicklungen interessant.

So werden **Harzadsorption** und **MPPE-Verfahren** seit längerer Zeit bei entsprechenden Grundwasserschäden, insbesondere unter Kostengesichtspunkten, mit Erfolg eingesetzt. Mit beiden Technologien sind Halogenorganika, die für die konventionellen Verfahren Aktivkohleadsorption und Desorption als Problemstoffe zu bezeichnen sind, sicher bis unter die behördlich geforderten Einleitengrenzwerte beherrschbar. Derartige Problemstoffe sind beispielsweise 1,2-Dichlorethan, Vinylchlorid und chlorierte Ether. Über das **HVEA-Verfahren** liegen ermutigende Reinigungsergebnisse von Grundwässern komplexer Organika-Zusammensetzung vor, die eine praktische Umsetzung wahrscheinlich machen.

Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass auf Grund neuerer Entwicklungsarbeiten auch **mikrobiologische Reinigungsverfahren** interessant erscheinen. In diesem Zusammenhang wird auf den Einsatz von Ethen als Hilfssubstrat zur Dehalogenisierung von LCKW verwiesen (11).

Als nachteilig für **PT**-Verfahren ist zu bewerten, dass bei Vorliegen von signifikanten LCKW-Mengen in der gesättigten Zone von sehr langen Sanierungszeiträumen auszugehen ist. In diesem Kontext betreut die GCG mehrere Vorhaben, die seit Anfang der 80er Jahre saniert werden und für die z. T. noch von Sanierungszeiträumen von über 10 Jahren auszugehen ist. Bei solchen Konstellationen fallen aufgrund der langen Zeiträume **sehr hohe Gesamtbetriebskosten** an. Als weitere Nachteile sind das anlagebedingte mögliche Auftreten von Restemissionen und das Anfallen von beladenen Sorptionsmitteln bzw. von Schadstoffkonzentraten anzusehen. Unter ungünstigen Standortbedingungen können die Grundwasserabsenkungen auch zu Setzungen und damit zu Schäden an Gebäuden und Anlagen führen. Ein weiterer Nachteil von **PT** besteht ökologisch in der Entnahme hoher Wassermengen aus der Naturressource Grundwasser.

4.2 Reaktive Systeme

Die Erfolg versprechende Anwendbarkeit von **RS** ist im Vergleich zu den **PT**-Massnahmen in stärkerem Maße an bestimmte Voraussetzungen und Bedingungen geknüpft. Die wichtigsten derartigen Vorbedingungen und Anforderungen sind nachfolgend zusammengestellt:

- Der geologische Aufbau des Untergrundes muss so beschaffen sein, dass eine gering durchlässige Schicht bis zu einer Tiefe von ca. 25 m unter Gelände ausgebildet ist, in die das Vertikalsystem eingebunden werden kann.
- Die jahreszeitlichen Variationen der Grundwasserfließrichtung sollten nur gering sein.
- Durch Modellierungen ist abzusichern, dass die Vertikalsysteme nicht um -bzw. unterströmt werden.
- Unter Berücksichtigung des LCKW-Spektrums ist sicherzustellen, dass alle LCKW - Einzelstoffe bis unterhalb der zulässigen Abstromwerte abgereinigt werden können. Als kritischere Komponenten gelten cis-1.2- DCE und Vinylchlorid.
- Bei der Planung der Systeme müssen im Hinblick auf die meist unregelmäßige dreidimensionale LCKW-Verteilung im Grundwasserleiter die Aquiferpartien mit prädestinierten LCKW-Migrationskanälen („LCKW-Röhren“ mit Maximalfracht !) bekannt sein, so dass das System zielgerichtet auf diese Aquiferabschnitte ausgelegt werden kann.
- Die Langzeitfunktion des Reaktiv-Systems ist sicherzustellen.
- Der erforderliche Platzbedarf zur Installation des Systems muss gegeben sein.
- Es ist durch geeignete Voruntersuchungen abzuklären, ob in Abhängigkeit der Zusammensetzung der reaktiven Materialien oder durch im reaktiven Material ablaufende Reaktionen Freisetzungen von unerwünschten Inhaltsstoffen in den Aquifer auftreten können (Einflüsse auf den Grundwasserabstrom).
- Es sollte bekannt sein, ob das Reaktive System nach dem Abschluß der Sanierung zurückzubauen ist (wichtiger Kostengesichtspunkt).

Im Gegensatz zu dem **PT**-Verfahren bestehen in der BRD mit **RS** derzeit noch **keine Langzeiterfahrungen**. Die ersten Systeme wurden 1998 installiert und in Betrieb genommen.

Zur Erforschung der ökologischen und ökonomischen Potentiale der **RS** ist im Frühjahr 2000 ein **großes Forschungsvorhaben** des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) angelaufen. Dabei werden insgesamt neun unterschiedlich ausgerichtete Vorhaben gefördert. Detaillierte Informationen hierzu sind der Tab. 5 zu entnehmen (12).

Da es sich um passiv arbeitende Verfahren handelt, die vom Ansatz eher einer Sicherungs- als einer Sanierungsmaßnahme entsprechen, muss die **Funktionsfähigkeit langfristig ausgerichtet** sein. Je nach Einzelfall ist hier von Zeiträumen bis zu mehreren Dekaden auszugehen, möglichst, ohne dass ein Austausch des reaktiven Materials erforderlich wird.

Grundsätzlich sind negative Auswirkungen auf die Langzeitwirkung in erster Linie durch folgende Prozesse denkbar:

- Verringerung der Aktivität des reaktiven Materials (z. B. 0-valentes Eisen) durch Mineralausfällungen oder organische Beläge. Beispielsweise können höhere Sulfatgehalte des Grundwassers zur Bildung von sulfidischen Mineralien führen, die die Eisenpartikel "umkrusten" und somit die Aktivität der Dehalogenierung reduzieren.
- Verringerung der Durchlässigkeiten des reaktiven Systems durch chemische Ausfällungen oder biologische Prozesse.

Schlussfolgernd sollte vor der Umsetzung von **RS** Sicherheit darüber vorliegen, ob mit **funktionsstörenden Prozessen** zu rechnen ist. Diese Anforderung setzt eine detaillierte Kenntnis der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers und Abschätzung der wahrscheinlichen Reaktionen von Wasserinhaltsstoffen im **RS** voraus.

Vorteilhafte Aspekte von **RS** bestehen auf Grund der unterbleibenden Entnahme und Aufbereitung des Grundwassers darin, dass zu deren Betrieb **keine Energie** erforderlich ist. Darüber hinaus wird die **Bilanz des Grundwasserhaushaltes nicht gestört**, und je nach der Art des reaktiven Materials sind **keine mit Schadstoffen beladenen Sorptionsmittel** oder **Schadstoffkonzentrate zu entsorgen** (z.B. bei 0-valentem Eisen). **Restemissionen** in andere Umweltmedien sind ebenfalls **nicht gegeben**. Im Hinblick auf die Durchlässigkeiten wasserführender Sedimente sind **RS** im Gegensatz zu **PT**-Maßnahmen auch und gerade bei deutlich **geringeren Kf-Werten als $5 \cdot 10^{-5}$ m/s einsetzbar**.

Tabelle 5: Projekte des BMBF-Forschungsvorhabens "Anwendung von Reinigungswänden für die Sanierung von Altlasten"

Thema	STANDORTE								
	Edenkoben	Dassel	Rheine	Wiesbaden	Offenbach	Dresden	Denkendorf	Braunschweig	Bemau
Kontaminations-ursache	Produktionsprozesse mit Lösemitteln (LCKW), bereits vor längerer Zeit Untergrund und Grundwasserstrom kontaminiert	Frühere Verunreinigungen durch Mineralalkoholwasserstoffe (MKW) und chlorierte KW (CKW), Kfz-Zubehörfließmittel	Kontamination beruht auf einer Verunreinigung durch eine ehemalige Wäscherei	Ehemalige chem. Fabrik Lembach und Schleier in Wiesbaden-Bleibert	Ehemaliges Werksgelände der Teerfabrik Lang in Offenbach/Main	Industrielle Abseleanlage Halde A der ehemaligen Uranerzverarbeitung	6 Schadensfälle (CKW) auf dem Gelände des Gewerbeparks Denkendorf	Verfüllung einer ehemaligen Kiesgrube mit verschiedenen Abfallstoffen (70er Jahre), u. a. Gewerbemüll	In den 60er Jahren gebaute chemische Reinigung
Schadstoffgruppe	LCKW	LCKW	LCKW	As-Verbind. Arsenite Arsenate z. T. Arsenik, Arsenpentoxid leichtflüchtige Arsenide	BTEX, PAK	Uran	LCKW	LCKW	LCKW
Einzelne Hauptkontaminanten	Im Mittel: 20 % TCE 50 % cDCE 30 % 1.1.1.-TCA 10 % PCE	PCE, TCE, CKW-Abbauprodukte cDCE, vor allem VC)	PCE (Hauptkontaminante) TCE cDCE		Benzol im Abstrombereich Naphthalin Acenaphthen z.T. Teerlipoids	Neben Uran noch andere Schwermetalle und Arsen	Hauptkontaminanten: TCE PCE cDCE TCA	PCE, TCE cDCE (vor allem im Abstrombereich) VC als Abbauprodukt	Hauptkontaminante > 90 % TCE
Reaktives System	Funnel-and-Gate (vertikale Durchströmung), ca. 15 m tief	Doppelwandiges permeables Behandlungsbett max. 4 m tief	Vollflächig durchströmte Wand, etwa 6 m tief	Reaktionswand im Zustrom, Funnel & Gate im Abstrom, ca. 3 - 5,5 m tief	Funnel-and-Gate (Mikrobiologie + A-Kohle)	Auf der Grundlage der Ergebnisse des FuE-Vorhabens noch zu planen	Drain and Gate, bis zu 6 m tief	Vollflächig durchströmte reaktive Wände, ca. 8 m tief	Funnel-and-Gate (horizontale Durchströmung "Scheuse") bis zu 11 m tief
Reaktives Material	Fe ²⁺ -Spähne Ausnahme: Im bereits bestehenden Gate wird nur der Zustrombereich gefüllt Aktivkohle: Im Abstrombereich des vorhandenen Gates	Eisengranulat zur reaktiven Denaturierung A-Kohle zur adsorptiven Rückhaltung der Schadstoffe Mischung aus Eisengranulat und A-Kohle	Eisenschwamm ES Graußeisen-Perikies-Gemisch GR	Vorhaben 1: leicht oxidable Corg -Phasen, evtl. Sulfat-Festphasen (beides S -emittierend) Vorhaben 2: Eisenoxid zur adsorptiven Bindung von Arsenat (V) nicht redox-sensitive Sorbentien, modifizierte Eisenoxide	Zudosierung der notwendigen Elektrodenkathoden für mikrobiellen Abbau A-Kohle	Alternative Adsorbentien (z. B. Braunkohle, Braunkohlekoks, Zeolithe) Natürliche Komplexbildner (z. B. Humine und Fulvosäuren) Technische Komplexbildner (z.B. EDTA)	Palladiumdotierte Zeolithe, pelletiert und hydrophob Zudosierung von Wasserstoff oder Fe ²⁺ -Zugabe erforderlich	Elementares Eisen (Fe ²⁺)	Elementares Eisen (Fe ²⁺)

5. Kosten

In den letzten Jahren haben **betriebswirtschaftliche Aspekte** bei der Entscheidungsfindung über den Einsatz von "konkurrierenden" Sanierungsverfahren an Bedeutung gewonnen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich unter Bezug auf die komplexe Entwicklung der Weltwirtschaft, gekennzeichnet durch die Schlagworte Globalisierung und Shareholder-Value, die betriebswirtschaftlichen Ansätze für Kostenberechnungen von Sanierungsverfahren geändert haben. Während sanierungspflichtige Unternehmen früher die Entscheidung über ein bestimmtes Sanierungsvorhaben eher unter dem Gesichtspunkt der „Gesamtkosten über den Gesamtsanierungszeitraum“ trafen, steht heute mehr die Bereitstellung des Kapitals unter dem Aspekt eines „**möglichst niedrigen Investments**“ im Vordergrund. Das zum Betrieb einer Sanierung notwendige Kapital kann somit in Form einer entsprechenden Kapital-Rückstellung als Finanzanlage über die aus dem Kapital erwirtschafteten Renditen finanziert werden. In Ergänzung hierzu spielt die jeweilige steuerliche Situation der sanierungspflichtigen Unternehmen eine wichtige Rolle. Naturgemäß fließen solche Entwicklungen im Sinne einer **Optimierung des Kapitalmanagements** in sehr starkem Maße in die Sanierungsplanung ein. Dabei sind neben der Definition der **Investitionskosten** unter Berücksichtigung der Schätzung möglichst realistischer Sanierungszeiträume insbesondere die mit verschiedenen Techniken verbundenen **Betriebskosten** zu ermitteln. Zu den Investitionskosten zählen alle mit der Errichtung der Sanierungsanlage verbundenen Kosten für Entnahmesysteme (Brunnen, Drainagen), Reinigungsanlagen, Leitungen, sonstigen infrastrukturellen Installationen sowie Untersuchungs- und Planungskosten. Die Betriebskosten umfassen die Kosten für Energie, Verbrauchsmaterial, Entsorgung von Konzentraten etc., Personal, Beprobungen, Analysen und Gutachter. Bei den Kostenberechnungen wurde weiter davon ausgegangen, dass in Analogie zu der üblichen Praxis die Betriebskosten aus den Erlösen der Unternehmen erwirtschaftet werden.

Nachfolgend wird unter Anwendung der vorherigen Erläuterungen für ein konkretes Sanierungsprojekt auf der Grundlage des Ergebnisses einer Machbarkeitsstudie für ein **RS** und eines Kostenvergleichs mit einer **PT**-Massnahme das Ergebnis der **vergleichenden Kostenbetrachtung** vorgestellt. Dabei wurde ein Projekt ausgewählt, das aus der praktischen Erfahrung von den grundsätzlichen Rahmendaten vergleichsweise häufig gegeben ist. Unter Rahmendaten werden die Menge des zu reinigenden Grundwassers, die LCKW-Konzentration und die LCKW-Zusammensetzung verstanden. Im konkreten Fall liegt die erforderliche Fördermenge für die **PT**-Massnahme bei 6 m³/h, die LCKW-Konzentration beträgt 10 mg/l und als Hauptkontaminant liegt PCE vor. Die Systeme zur Sicherung/Sanierung würden unmittelbar im Abstrom des Schadenherdes installiert. Beide Systeme werden so ausgelegt, dass eine 35 m breite LCKW-Kontaminationsfahne erfasst und ein weiteres Abströmen von kontaminiertem Grundwasser unterbunden wird.

Da bei **PT**-Massnahmen grundsätzlich verschiedene Konfigurationen in Abhängigkeit der jeweiligen Standortsituation möglich sind, wurden drei in der Praxis häufiger anzutreffende Sanierungsplanungen kostenmäßig aufbereitet. Bei allen **drei Szenarien** wurde von Strippanlagen zur Grundwasserreinigung ausgegangen, da dieses Verfahren gegenüber der Aktivkohleadsorption bei derartig gelagerten Schadenfällen kostenmäßig vorteilhaft ist. Die verschiedenen Sanierungskonzepte unterscheiden sich im wesentlichen in den je nach Bedarf notwendigen Vorreinigungen zur Entfernung von Störstoffen sowie in der Art der Ableitung des gereinigten Grundwassers. Dabei handelt es sich um:

- keine Vorreinigung und Reinjektion in den Aquifer
- keine Vorreinigung und Ableitung in den Regenwasserkanal
- Vorreinigung und Reinjektion in den Aquifer

Tabelle 6: Berechnungsgrundlagen Reaktives System

Typ:	Funnel and Gate
Gate-Material	0-valentes Eisen
Länge Funnel	40 m
Tiefe Funnel	15 m
Breite Gate	5 m
Bauweise Funnel	Schlitzwand
inklusive:	
Beprobung + Analytik von 3 Abstrompegeln in 2-monatigen Intervallen	
Gutachterkosten (EU 7.700/a)	

Tabelle 7: Berechnungsgrundlagen "Pump and Treat":

Fördermenge	6 m ³ /h
Aufbereitungsverfahren	Desorption (2-stufig) mit Abluftreinigung über Aktivkohle
Kosten	Energie = EU 0,13/kWh Aktivkohle = EU 3,6/kg RWK*-Ableitung = EU 0,51/m ³
Inklusive:	
Energie, Aktivkohle, Wartung, Reparatur, Gutachter, Eigenpersonalaufwand Betreiber	
Beprobung + Analytik Sanierungsbrunnen und 3 Abstrompegel	
Berücksichtigung sinkender Betriebskosten mit Sanierungszeit (Energie + Aktivkohle)	

RWK*: Regenwasserkanal

Beim **RS** wurde Funnel and Gate kalkuliert, wobei als reaktives Material Eisenspäne geplant wurden.

Die Rohdaten der Kostenberechnungen sind den Tab. 6 und 7 zu entnehmen.

Bei den Kostenberechnungen wird sowohl die Frage nach den **Gesamtkosten über den Gesamtsanierungszeitraum** als auch die Entwicklung der Sanierungskosten bei **Vernachlässigung und Einbeziehung kaufmännischer Belange (Kapitaldienst)** erfasst. Die Abschreibung unter steuerlichen oder bilanztechnischen Aspekten wurde aufgrund der für die einzelnen Sanierungspflichtigen stark unterschiedlichen Bedeutung und der sich hieraus ergebenden Komplexität nicht berücksichtigt.

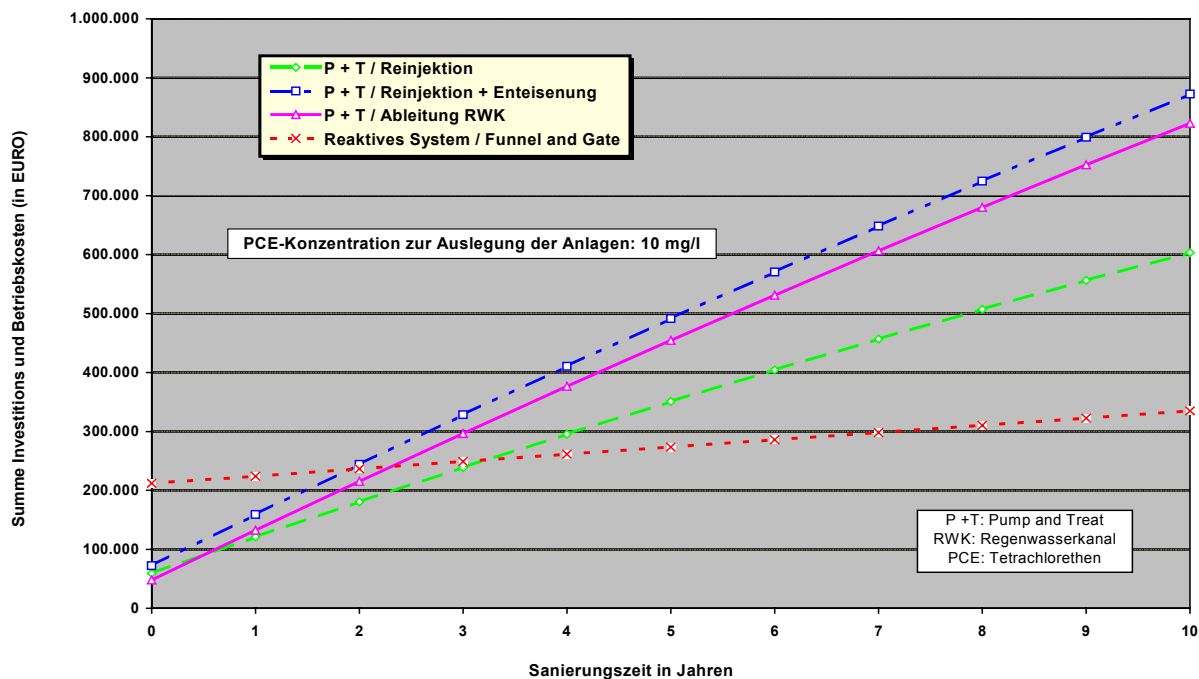
Nach den heutigen Denkmustern werden bei Sanierungsplanungen in der Regel **Zeiträume von maximal 10 Jahren** betrachtet. Folglich ist das Resultat der Kostenkalkulation in den Abb. 3 und 4 für einen Zeitraum von 10 Jahren veranschaulicht, wobei die Abb. 3 die Kostenentwicklung ohne Kapitaldienst und die Abb. 4 mit Kapitaldienst aufzeigt.

5.1 Kostenentwicklung ohne Kapitaldienst

Zunächst ist zu beachten, dass die Investitionskosten des **RS** mit ca. 212.000 Euro (nachfolgend 212 TEU) erheblich über den Investitionskosten der verschiedenen **PT**-Alternativen liegen. Die Spannweite der Investitionskosten der verschiedenen **PT**-Verfahren beträgt 59 – 72 TEU.

Im Hinblick auf die zehnjährige Kostenprognose geht aus der Abb. 3 eindeutig hervor, dass sich das **RS** im Vergleich mit **PT** durch **signifikant geringere Betriebskosten** auszeichnet. Unter Bezug auf die nach 10 Jahren eingetretenen Gesamtkosten würden diese für die verschiedenen **PT**-Varianten zwischen 603 und 872 TEU liegen. Dagegen würden sich die Gesamtaufwendungen für das **RS** auf ca. 335 TEU belaufen. Dabei liegt der "Break-Even-Point", d.h. die Zeitspanne ab dem **RS** günstiger wird als **PT**, je nach **PT**-Variante zwischen ca. 2 und 3 Jahren. Diese Befunde indizieren, dass bei der konventionellen Kostenbetrachtung ohne Kapitaldienst die **Vorteile des RS** offensichtlich sind.

Abb. 3: Entwicklung der Sanierungskosten verschiedener Verfahren zur Grundwassersanierung
Vergleich Pump and Treat und Reaktives System
Grundlage: Summe Investitions- und Betriebskosten ohne Kapitaldienst

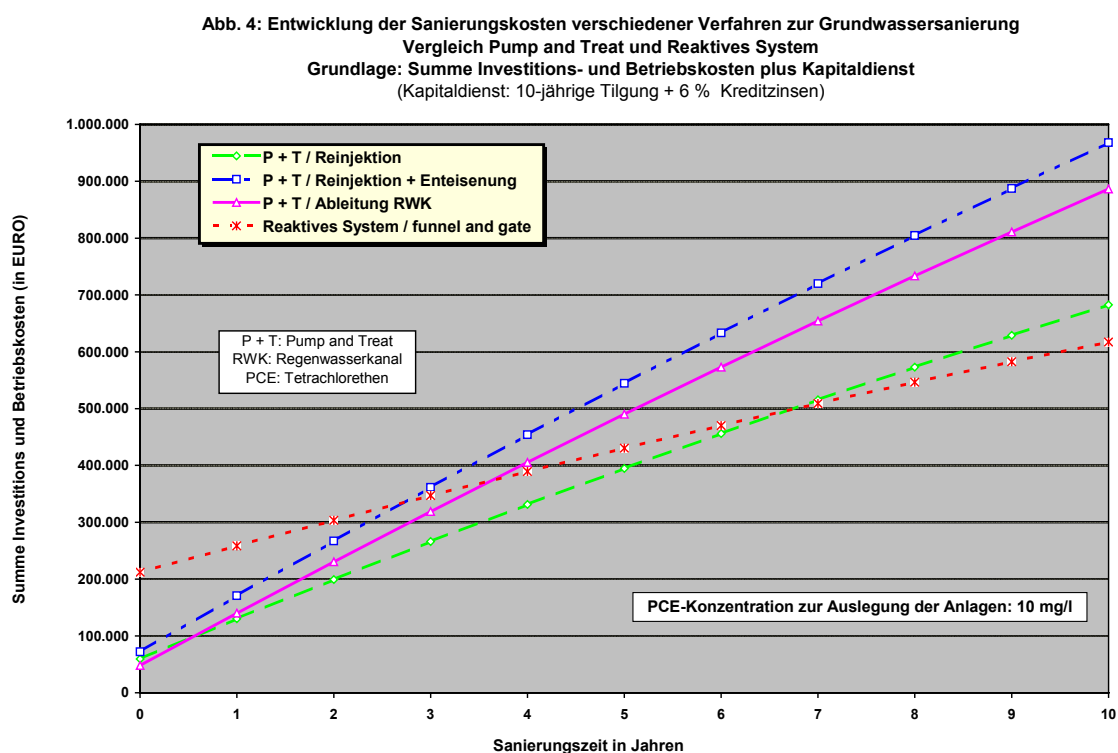


5.2 Kostenentwicklung mit Kapitaldienst

Im Unterschied zu der Abb. 3 ist in der Abb. 4 eine Kreditfinanzierung in Höhe von 6 % bei den vier betrachteten Szenarien berücksichtigt. Das entsprechende Darlehen wird über einen 10-jährigen Zeitraum getilgt (Zinsen und Tilgung, nachfolgend **Kapitaldienst**). Diese Modalitäten entsprechen den Kalkulationsgrundlagen, wie sie aus der Praxiserfahrung häufig von den betroffenen Unternehmen für die Berechnung der Kosten zugrunde gelegt werden. Die Berücksichtigung von Entwicklungen, die Zeiträume von mehr als 10 Jahren erfassen, treten bei der praktischen Bearbeitung von Sanierungsprojekten in den Hintergrund.

Eine theoretisch ebenso denkbare Kreditfinanzierung der Betriebskosten spielt in der Sanierungspraxis keine große Rolle, so dass in dem vorgestellten Kostenszenario die Abdeckung der Betriebskosten aus den Betriebsmitteln erfolgt. Die Randbedingungen der gewählten Kostenschätzung dürften somit dem in der Praxis am häufigsten von sanierungspflichtigen Unternehmen eingesetzten Kostenmodell entsprechen.

Die Einbeziehung des Kapitaldienstes führt zu einer **Verschiebung** des „**Break-Even-Points**“ über einen Zeitraum von mindestens 2,7 Jahren gegenüber der teuersten **PT**-Variante (Enteisung und Reinjektion). Im Vergleich des **RS** mit der günstigsten **PT**-Maßnahme (Reinjektion ohne Enteisung) resultiert eine Verlagerung des „Break-Even-Points“ auf einen Zeitraum von ca. 7 Jahren.

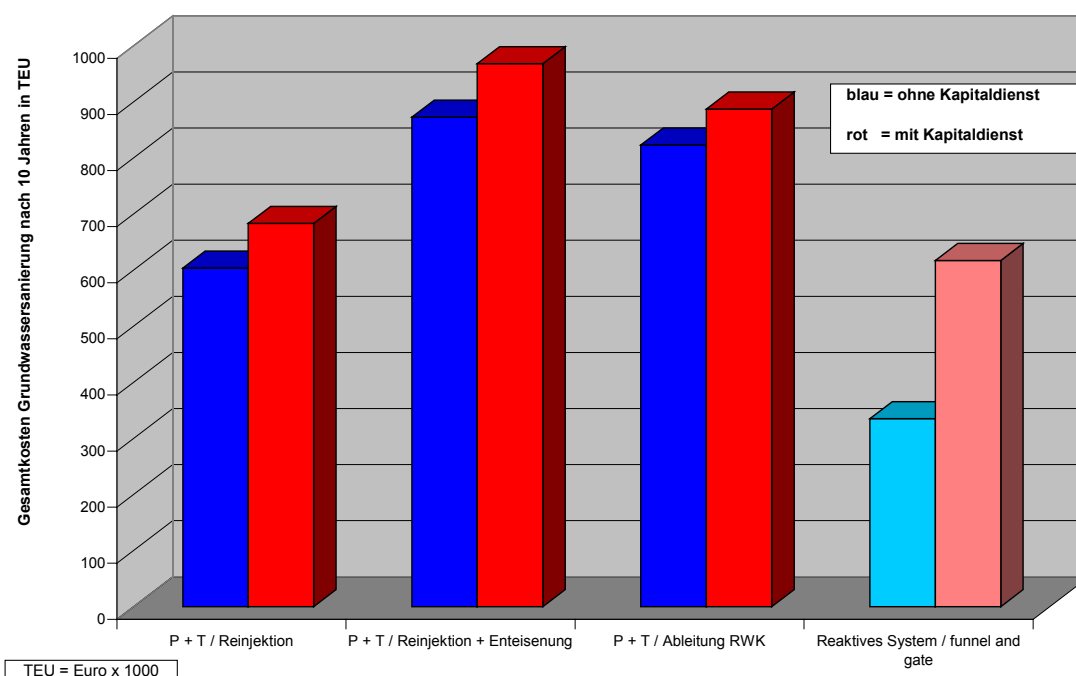


Der wesentliche Unterschied der mit beiden Technologien verbundenen Gesamtkosten über 10 Jahre wird durch die Abb. 5 veranschaulicht. Bei der **konventionellen Betrachtung** ohne Kapitaldienst besitzt **RS** gegenüber **PT** **deutliche Kostenvorteile**. Weiterhin fällt auf, dass bei den **PT**-Verfahren der Unterschied zwischen Kalkulation ohne und mit Kapitaldienst wesentlich geringer ist als bei **RS**. Der Grund hierfür ist in dem wesentlich höheren Anfangsinvestment für das **RS** begründet (vergleiche Abb. 3 und 4). Unter **Einbeziehung der Kapitalgestehungskosten** liegen die Gesamtkosten für das **RS** im Vergleich zu allen betrachteten **PT**-Varianten ebenfalls niedriger.

Diese Ausführungen verdeutlichen, dass die Kostenvorteile des **RS** bei konventioneller Betrachtung (Kalkulation ohne Kapitaldienst) offensichtlich sind. Bei **Einbeziehung des Kapitaldienstes** verschiebt sich der **Break-Even-Point** nach hinten. Folglich ist insbesondere bei dieser Kostenbetrachtung ein **möglichst genauer Kostenvergleich** des **RS**- und des **PT**-

Verfahrens sinnvoll. Als Ergebnis der Kosten-Analyse von mehreren durchgeführten Machbarkeitsstudien deutet sich an, dass bei einem etwa über dem Faktor fünf liegenden Investment für das **RS** gegenüber der **PT**-Massnahme unter Einbeziehung des Kapitaldienstes günstige Optionen der **PT**-Verfahren auch langfristig Kostenvorteile gegenüber **RS** besitzen können. Die Verfahrensentscheidung im Anwendungsfall wird davon abhängig sein, welche Option der möglichen **PT**-Verfahren umsetzbar wäre. Auch die chemische Zusammensetzung der LCKW spielt eine wichtige Rolle. So benötigen die niedriger chlorierten Ethene Cis-1.2-DCE und VC längere Reaktionszeiten zur Dehalogenierung als die höher chlorierten Verbindungen PCE und TCE. Dies führt zu aufwendigeren **RS**-Anlagen und ist mit höheren Investitionskosten verbunden. Diese Ausführungen verdeutlichen, dass die **kritische Kostenprüfung des Einzelfalles** immer im Vordergrund von Entscheidungen über Sanierungsverfahren stehen sollte.

Abb. 5: Gesamtkostenvergleich der verschiedenen Verfahren nach einer Sanierungszeit von 10 Jahren
Berechnung der einzelnen Verfahren mit und ohne Finanzierungskosten



6. Schlussbemerkung

Eine wesentliche Schlußfolgerung lautet, dass das **PT**-Verfahren **vielseitiger einsetzbar** ist und vom Standpunkt der Verfahrenssicherheit **weniger Risiken** beinhaltet. Ein Vorteil des **PT**-Verfahrens existiert weiterhin in der wesentlich **größeren Anpassungsfähigkeit** an die Entwicklung des Sanierungsfortschritts. So kann es bei langlaufenden Sanierungsvorhaben betriebswirtschaftlich sinnvoll sein, bei abnehmenden Stoffkonzentrationen im Rohwasser des/der Sanierungsbrunnen eine Optimierung der Reinigungstechnik vorzunehmen. Auf Grund des weitgehend modularen Aufbaus der Aufbereitungsanlagen ist dies in der Regel ohne größere Probleme möglich. Als Beispiel sei auf abnehmende Gehalte an VC hingewiesen. Hier bietet sich bei Einsatz einer Desorptionsanlage der Austausch einer katalytischen Anlage zur Strippluftreinigung durch eine Aktivkohleanlage an.

Bei Entscheidungen über die Auswahl eines Sanierungsverfahrens haben **ökologische Aspekte** in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. So ist die Erfordernis einer **Ökobilanzierung** bei Bodensanierungen bereits in der 1. Technischen Anleitung (Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung) zum Bundes-Bodenschutzgesetz gefordert. Bei Grundwassersanierungen sind derartige Pflichten zwar nicht in rechtlichen Vorschriften des Bundes verankert, jedoch ist die Einbeziehung von Ökobilanzierungen in einigen Bundesländern in entsprechenden Regelwerken vorgeschrieben. Es ist davon auszugehen, dass unter Bezug auf die Forderung nach einer „nachhaltigen Entwicklung“ (sustainable development) zukünftig derartige ganzheitliche Betrachtungsansätze in noch stärkerem Maße bei Entscheidungen über Sanierungsmethoden zu berücksichtigen sind. Auf der Grundlage von im Rahmen von Machbarkeitsstudien durchgeführten Ökobilanzierungen kann abgeleitet werden, dass **RS** im Vergleich mit **PT** zu **deutlich geringeren sekundären Umweltauswirkungen** führen. Der wesentliche Grund hierfür ist in dem permanenten Energiebedarf (Strom für Anlagenbetrieb) und hohen Ressourcenbedarf (Verbrauch von Grundwasser) der **PT**-Maßnahmen begründet. Infolgedessen stellen **RS**- im Vergleich zu **PT**-Maßnahmen im Hinblick auf Umweltaspekte **schonendere Technologien** dar.

Auf der Grundlage von bisher geprüften Projekten zeichnet sich ab, dass **RS** unter Berücksichtigung der Anwendungsvoraussetzungen in 10 - 20 % der LCKW Grundwasserschäden eingesetzt werden könnten. Infolgedessen sind **RS** nicht als universelle Sanierungsverfahren einzustufen. Bei entsprechenden Vorhaben gilt es vielmehr, sorgfältig zu prüfen, ob die in Kap. 3 vorgestellten Voraussetzungen über die geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse und die chemische Zusammensetzung des Grundwassers gegeben sind. Bestehen darüber hinaus keine Risiken hinsichtlich der Beeinträchtigung der Aktivität und Durchlässigkeit des reaktiven Materials, kann die Installation von **RS** gutachterlich befürwortet werden. Da die tatsächlich anfallenden Gesamtkosten immer von den Gegebenheiten eines Einzelfalles abhängen, sind pauschale Aussagen wie „**RS** ist immer billiger als **PT**“ oder umgekehrt nicht angebracht. Dabei eröffnen sich im Hinblick auf die langfristige Kostenentwicklung interessante Perspektiven für **RS**. Bei der umfassenden Bewertung der Verfahren sollte jedoch nicht außer Acht gelassen werden, ob nach Beendigung der Sicherungs-/Sanierungsmaßnahme Aufwendungen für einen gegebenenfalls erforderlichen **Rückbau** des **RS** zu veranschlagen sind.

Zum besseren Verständnis der mit **RS** verbundenen risikorelevanten Prozesse ist eine erhebliche **Intensivierung der Forschungsarbeiten** erforderlich. Darüber hinaus ist eine aussagekräftige Datendokumentation der in der BRD angelaufenen Projekte zur Beurteilung des Sanierungserfolges zwingend notwendig. Bei Erfüllung dieser Anforderungen werden sich **RS** in den nächsten Jahren als **wichtige und sinnvolle Maßnahmen zur Sanierung von LCKW - Grundwasserschäden** entwickeln. Dabei sollte nicht vergessen werden, dass unter Bezug auf die anzustrebende ganzheitliche Betrachtung ökologische Aspekte mit der entsprechenden Gewichtung in Entscheidungen über Sanierungsverfahren einfließen sollten. **Unter ökologischen Gesichtspunkten sind RS eindeutig zu bevorzugen.**

Im Hinblick auf die Kostensituation sind zwar die hohen Investitionskosten der **RS** im Vergleich mit **PT**-Massnahmen zunächst ein erheblicher Nachteil, der sich vor allem bei Berücksichtigung des Kapitaldienstes ungünstig auf dieses Verfahren auswirkt. **In den meisten Fällen dürften RS-Systeme dennoch aufgrund der signifikant niedrigeren Betriebskosten kostenmäßige Vorteile gegenüber den PT-Massnahmen bieten.** Dies gilt sowohl für die **Kostenbetrachtung ohne und als auch mit Kapitaldienst.**

Im Hinblick auf die höheren Investmentkosten hätten weniger kostenintensive Installationen der **RS** eine Verschiebung des „Break-Even-Points“ zu Gunsten dieser Technologie zur Folge. Ein erheblicher Kostenanteil ist in dem Einbau der reaktiven Materialien durch konventionelle Bautechnik zu sehen. Sollte es gelingen, die Einbaukosten der reaktiven Materialien durch

innovative Techniken - unter Sicherstellung der nachweisbaren Funktionsfähigkeit - zu reduzieren, würde dies zu einer starken Kostenreduzierung der **RS** führen. Entsprechende Techniken, beispielsweise in Form von Injektionsverfahren, befinden sich im Erprobungsstadium. Die weitere Entwicklung bleibt abzuwarten und darf mit Spannung verfolgt werden.

Literaturverzeichnis

- (1) Stupp, H.D. (2000):
Grundwassersanierung von LCKW-Schäden durch Pump and Treat oder Reaktive Systeme ?
TerraTech 2/2000, S. 34 – 38
- (2) Grathwohl, P. (1992):
Die molekulare Diffusion als limitierender Faktor
UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox. 4 (4), S. 231-236
- (3) Scholz-Muramatsu, H. & Flemming H.-C. (1991):
Unter welchen Milieu-Bedingungen erfolgt ein Abbau leichtflüchtiger chlorierter Kohlenwasserstoffe (LCKW) ?
Wasserkalender 1991, 25. Jahrgang, Hrsg.: R. Wagner, S. 135 – 158
- (4) Stupp, H. D. & Schmidt, T.:
Verhalten von DNAPL im Untergrund unter besonderer Berücksichtigung der LCKW.
Altlastenspektrum, 6/2000 (Teil 1) und 1/2001 (Teil 2)
- (5) Edel, H.G. (1997):
Grundwassersanierung – praxisrelevante Techniken und Verfahren
Entsorgungspraxis, Heft 7-8, S. 64-68
- (6) Stupp, H.D. & Eigen, N. (1989):
Hydraulische Verfahren zur Sanierung von kontaminiertem Grundwasser
Haus der Technik, Essen, Tagungsunterlagen des workshops vom 18.10.1989
- (7) Gillham, R.W. & O'Hannesin, S.F. (1994):
Enhanced Degradation of Halogenated Aliphatics by Zero-valent Iron
Ground Water, 32 (6), 958-967
- (8) Schüth, Ch. & Reinhard, M. (1997):
Catalytic hydrodehalogenation of some aromatic compounds using palladium on different support materials
213. ACS-Meeting, April 13-17, San Francisco, Proceedings, Vol. 37, No. 1, 173-175
- (9) Werner, P. (1998):
The impact of microbial processes on the efficiency of reactive walls
Groundwater Quality: Remediation and Protection
Proceedings of the GQ'98 Conference held at Tübingen, September 1998,
IAHS Publ. No. 250, pp. 497-500
- (10) Dahmke, A., Beiting, E. (1998):

Durchströmte Wände – eine kostengünstige Alternative zu hydraulischen Grundwassersanierungsverfahren
Tagungsunterlagen BEW-Seminar der Veranstaltung vom 17.11.1998

- (11) Koziollek, P.; Bauer, S.; Bryniok, D. & Knackmuss, H.-J. (1999):
Aerobes Verfahren zur mikrobiellen Eliminierung von Dichlorethen und Vinylchlorid
In: S. Heiden (Hrsg.): Innovative Techniken der Bodensanierung – Ein Beitrag zur Nachhaltigkeit
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg – Berlin, S. 137-151
- (12) Birke, V.; Burmeier, Harald und Rosenau, Diana (2000):
Startschuss für BMBF-Forschungsverbund
„Anwendung von Reinigungswänden für die Sanierung von Altlasten“
TERRA TECH 4/2000, S. 14 - 15

**Veröffentlicht in: Handbuch der Altlastensanierung
Franzius/Wolf/Brandt
25. Ergänzungslieferung**
