

600 Reaktive Systeme

600.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche / technische Grundlagen)

Durch Reaktive Systeme soll der Grundwasserstrom i. d. R. passiv und ohne oberirdische Anlagentechnik, wie sie bei konventionellen Pump-and-Treat-Maßnahmen erforderlich ist, in-situ gereinigt werden.

Reaktive Wände werden deshalb senkrecht zur Grundwasserfließrichtung im Abstrom der zu sanierenden Altlast angeordnet. Das Grundwasser muss sie also zwangsläufig passieren. Die Abreinigung des Wassers wird durch Adsorption, Absorption, Fällung, Abbau oder Umwandlung der Kontaminanten mittels Applikation von geeigneten Materialien in der Reaktiven Wand erreicht (siehe hierzu Kap. 6.1.6). Dadurch kann eine signifikante Absenkung der Schadstoffkonzentration nach Durchtritt des Grundwassers durch die Wand erreicht werden. Somit wird der reaktive Anteil des Reinigungsverfahrens in-situ vorgenommen; eine kostenintensive, aktive Förderung des Grundwassers entfällt und auch die zum Teil hohen Einleitungsgebühren bei Ableitung in das Kanalnetz werden vermieden. Aufgrund der im allgemeinen sehr langsamen Grundwasserströmung muss allerdings bei diesen passiven hydraulischen Maßnahmen im Vergleich zu aktiven hydraulischen Maßnahmen mit einer längeren Betriebszeit gerechnet werden, die zum Teil mehrere Jahrzehnte oder darüber hinaus betragen kann.

Bei großflächigen Schadensfällen kann eine detaillierte Erkundung zur Ermittlung des Schadensherdes ggf. reduziert werden. Um die Dauer der Maßnahme abschätzen zu können, sind jedoch ausreichende Informationen zur Quellstärke der Kontamination erforderlich. Entscheidend ist, dass die Konzentrationen der Schadstoffe im Grundwasserabstrom bekannt sind, da hiervon die Wahl des reaktiven Materials und die einzubringende Menge abhängt. Außerdem muss die hydrogeologische Standortsituation bekannt sein, um das Reaktive System genau im Abstrom des Grundwassers zu platzieren.

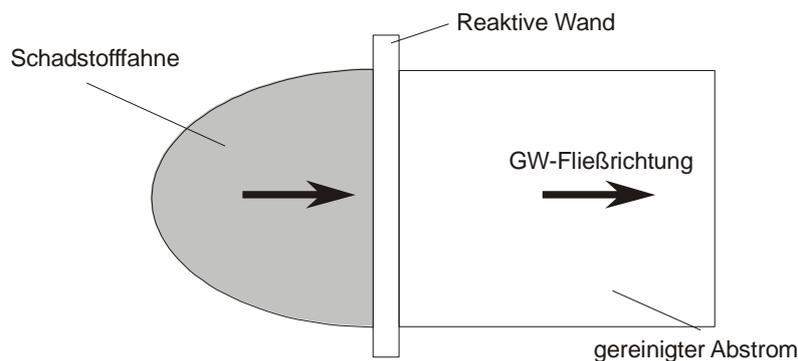
Zur Anpassung des Systems an die jeweilige hydrogeologische Situation (z.B. Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit, Mächtigkeit und Heterogenität des Aquifers usw.) sowie an die grundsätzlichen Standortbedingungen und das Schadstoffinventar sind mehrere Varianten dieser Technik entwickelt worden. Sie unterscheiden sich sowohl in der bautechnischen Konstruktion als auch in der Wirkungsweise der Schadstoffentfernung.

Im Mai 2000 wurde auf Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung der Forschungsverbund „Anwendung von Reinigungswänden für die Sanierung von Altlasten“ eingerichtet - RUBIN genannt (Reaktionswände und -barrieren im Netzwerksverbund; www.rubin-online.de). Ziel von RUBIN ist es, die ökologischen und ökonomischen Potentiale reaktiver Systeme umfassend zu erforschen. Dabei geht es neben der Grundlagenforschung insbesondere um die innovative Weiterentwicklung und Anpassung bestehender Systeme sowie um weitere großtechnische Implementierungen. Die Ergebnisse des Vorhabens werden in einem Handbuch dargestellt. Das Handbuch erläutert die Anforderungen an die Planungsgrundlagen und die Qualitätssicherung für die unterschiedlichen Reaktiven Systeme. Die Einsatzgrenzen der einzelnen Verfahren werden beschrieben und Hinweise zu Kostenansätzen und Kosteneinflussfaktoren gegeben.

600.1.1 Vollflächig durchströmte Wand

Die vollflächig durchströmte Wand stellt neben dem Funnel-and-Gate System die gängigste Bauform der passiven Grundwasser-Abstromreinigung dar. Die gesamte Wand wird hierbei als Reaktor ausgebildet und kann über ihre vollständige Länge und Tiefe als in-situ Reaktionszone betrachtet werden. Dabei ist bei dieser Ausführung besonders hervorzuheben, dass der natürliche Grundwasserstrom außer in der Bauphase nicht oder nur geringfügig beeinflusst wird.

Um die Funktionsfähigkeit der Wand sicherzustellen, ist darauf zu achten, dass die hydraulische Durchlässigkeit während der gesamten Betriebszeit deutlich größer ist als die des Aquifers, in die sie eingebracht wurde. Nur so kann eine Veränderung der Grundwasserströmung, die zu einer Umläufigkeit der Wand führen kann, vermieden werden. Dabei sind auch eventuelle Ausfällungsprodukte in der reaktiven Zone zu berücksichtigen. Zur Herstellung einer vollflächig durchströmten Wand stehen sämtliche Verfahren des Tiefbaus bzw. Spezialtiefbaus zur Verfügung. So kann das reaktive Material, je nach Standortbedingungen und Wandgeometrie in einem einfachen Graben, in Bohrpfähle oder Schlitzwände eingebracht werden.

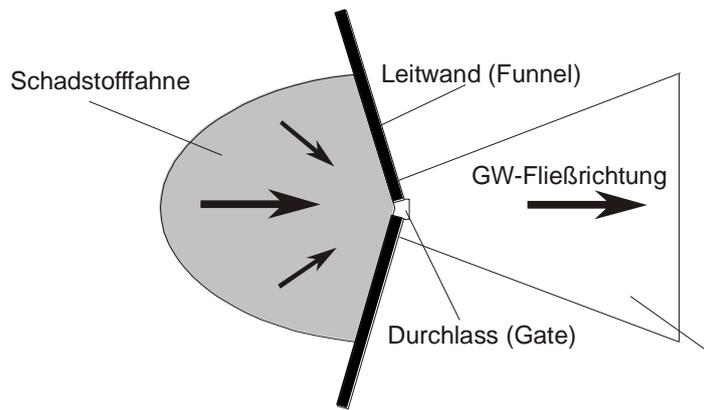


Grundriss eines vollflächig durchströmten Wandsystems

Für eine nähere Beschreibung der Bauverfahren wird auf Kapitel 60.1.7 verwiesen. Aufgrund der oft erheblichen Wandlänge kann es dabei durchaus wirtschaftlich sein, sowohl die Tiefe als auch die Mächtigkeit der Reaktionszone zu variieren. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass ein Austausch des reaktiven Materials während der Betriebszeit nicht stattfinden kann, da dies mit den heutigen Verfahren des Tiefbaus auf einen kompletten Neubau der Wand hinauslaufen würde. Sollten also Regenerierungen notwendig werden, so sind entsprechende Einbauten (z. B. Lanzen, Brunnen usw.) schon bei Einrichtung der Wand anzuordnen.

600.1.2 Funnel-and-Gate System

Diese patentierte Bauform wurde im Pilotmaßstab erstmals im Jahre 1991 in Kanada eingesetzt. Es besteht aus zwei Komponenten: Der Funnel (Trichter) ist eine als Schlitz- oder Spundwand ausgebildete hydraulische Sperre, die den Grundwasserstrom unterbricht und ihn zu einem oder mehreren Durchlässen umlenkt, den sogenannten Gates (Toren). Die Reinigung des Grundwassers erfolgt beim Durchtritt durch das mit Reaktionsmaterial gefüllte Gate, welches als in-situ Reaktor dient. Dies stellt den größten Vorteil dieser Variante dar, da durch die Begrenzung der Reaktionszone auf die relativ geringe Fläche des Gates ein späterer Austausch der Reaktorfüllung möglich wird. Zudem kann durch die Anordnung mehrstufiger Gates das Grundwasser von verschiedenen Schadstofftypen gereinigt werden. Dazu werden unterschiedliche Reaktionszonen hintereinander angeordnet. Gleichzeitig ist auch eine bessere Überwachung der Funktion und des Abreinigungserfolges gegeben.



Grundriss des Funnel-and-Gate Systems

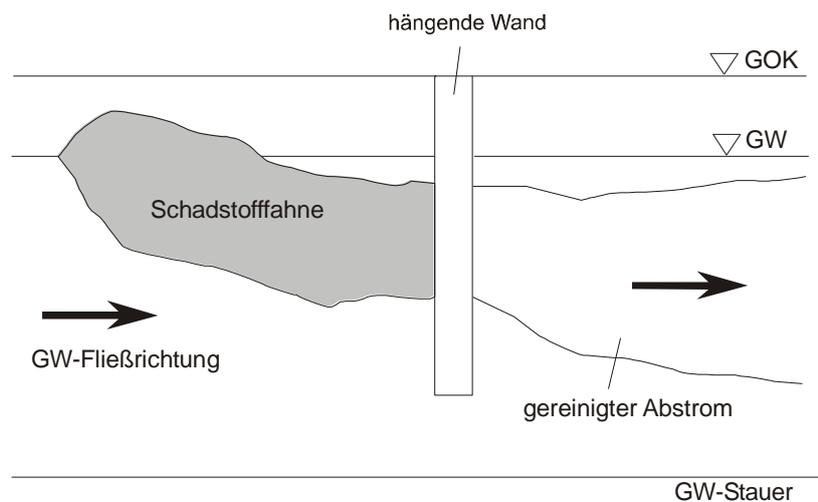
Dabei ist besonderes Augenmerk auf Einhaltung der für die Abreinigung erforderlichen Verweilzeiten des Grundwassers im Gate zu legen da durch die Veränderung der Grundwasserströmung in den Reaktoren grundsätzlich größere hydraulische Gradienten als bei vollflächig durchströmten Wänden vorhanden sind. Wie bei vollflächig durchströmten Wänden so ist auch bei Funnel-and-Gate Systemen auf eine höhere hydraulische Durchlässigkeit im Bereich des Reaktors im Vergleich zum umgebenden Aquifer zu achten. Um diese Voraussetzungen zu erfüllen, ist die Anwendung numerischer Strömungsmodelle zur Dimensionierung sowohl der Reaktoren als auch der Strömungsleitwände unverzichtbar. Insbesondere durch die Wahl geeigneter Öffnungswinkel der Leitwände und Variation der Anzahl der Durchlässe kann eine standortspezifische Optimierung von Funnel-and-Gate Systemen erreicht werden.

Ein Nachteil ergibt sich durch den nicht unerheblichen Eingriff in das Grundwasserregime, der auch nach Ablauf der Sanierungsmaßnahme nur bedingt wieder rückgängig gemacht werden kann. Eine Möglichkeit diesen Nachteil zu minimieren, besteht darin, als hydraulische Sperre - falls die Kontamination es zulässt - Spundwände zu verwenden, und diese nach Ende der Sanierung wieder aus dem Boden zu entfernen. In der Praxis traten zudem häufig hydraulische Probleme, wie z.B. die seitliche Umströmung des gesamten Systems auf. Des weiteren muss der Anschluss von Dichtwand und Reaktor als Schwachpunkt und Nachteil des Systems angesehen werden. Durch Setzungserscheinungen der Reaktorkonstruktion beispielsweise ist die Dichtigkeit nicht immer gewährleistet, wodurch es zu einem Durchtritt von kontaminiertem Grundwasser kommen kann. Deshalb ist dieser Anschluss bei der Bauausführung mit besonderer Sorgfalt herzustellen.

600.1.3 Sonderkonstruktionen

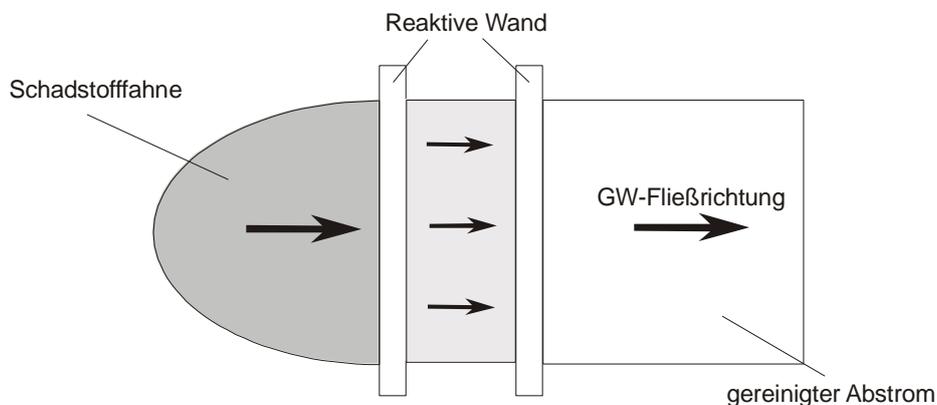
Zur Anpassung sowohl der vollflächig durchströmten Wände als auch der Funnel-and-Gate Systeme an die unterschiedlichen Schadensfälle und die geologischen Gegebenheiten sind verschiedene Sonderkonstruktionen und Modifikationen der beiden Systeme entwickelt worden, von denen die Wichtigsten im Folgenden vorgestellt werden.

Für die Beseitigung von Schadstoffen mit einer niedrigeren Dichte als Wasser - LNAPL-Schadensfälle - ist es ggf. nicht erforderlich, die Reinigungswand bzw. das Funnel-and-Gate System wie sonst üblich in den Grundwasserstauer einzubinden. Aufgrund des Dichteunterschiedes erreicht die Kontamination die Basis des Grundwasserleiters nicht, so dass eine sogenannte hängende Wand angeordnet werden kann, bei der nur der obere Teil des Grundwasserleiters von dem Reaktiven System erfasst wird. Um ein mögliches Abtauchen der Kontamination unter der Wand hindurch ausschließen zu können, ist zu beachten, dass die horizontale Durchlässigkeit des Aquifers wesentlich größer als die vertikale sein muss.



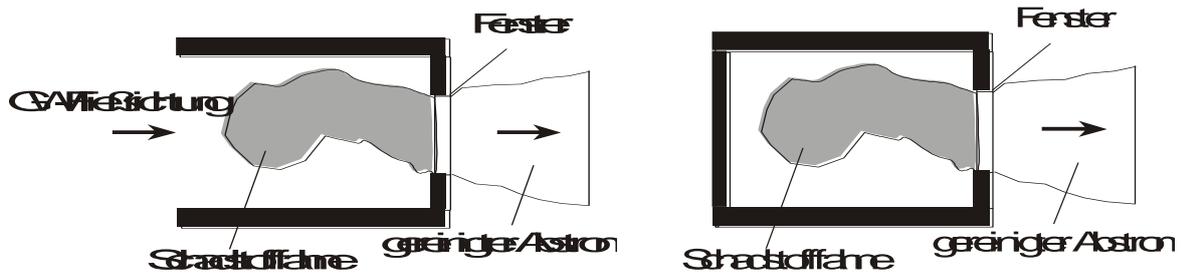
Querschnitt einer hängenden Wand

Da bei den meisten Sanierungsverfahren mehr als ein Schadstoff im Grundwasser angetroffen wird, kann zur Reinigung auch mehr als eine Reaktion bzw. Reaktionszone nötig werden. Die Lösung dieses Problems liegt ggf. in mehrstufigen Wandsystemen bzw. in Reihe geschalteten Gates, die mit unterschiedlichen reaktiven Materialien gefüllt werden. Dadurch kann eine stufenweise Reinigung des Grundwasserstroms erreicht werden.



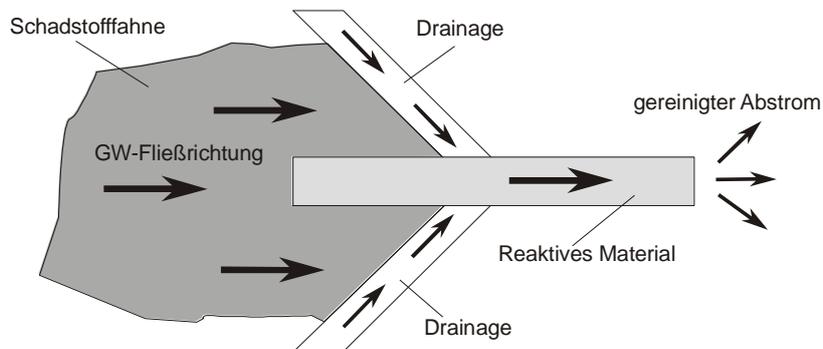
Grundriss eines mehrstufigen vollflächigen Wandsystems

Ebenso kann es erforderlich werden, die Wassermenge, die durch den Schadensherd fließt, zu reduzieren. Dazu bieten sich Reinigungswände oder Gates in Kombination mit Einkapselungsmaßnahmen an. Durch Teileinkapselung kann der Grundwasserstrom seitlich eingegrenzt und somit das Einzugsgebiet der Reinigungsmaßnahme reduziert werden. Bei Volleinkapselung stellt die Reaktionszone den einzigen permeablen Bereich innerhalb der Umschließung dar; dies bietet sich besonders bei hohen Schadstoffkonzentrationen und wechselnden Grundwasserfließrichtungen an, da man hierbei eine vollständige Trennung der Kontamination vom Grundwasserregime erreicht. Das durch den reaktiven Bereich tretende Wasser stammt in diesem Fall nur aus der Grundwasserneubildung innerhalb der Einkapselung.



Grundriss einer Teil- und Volleinkapselung mit reaktivem Fenster

Unter bestimmten Randbedingungen kann es auch sinnvoll sein, den reaktiven Bereich parallel zur Grundwasserfließrichtung anzuordnen. Dies ist vor allem bei feinkörnigen und gering durchlässigen Böden zu empfehlen. Durch diese Bauform kann eine Drainagewirkung erzielt werden, die durch zusätzliche, senkrecht zur Grundwasserfließrichtung eingebrachte Drägen noch verstärkt werden kann. Dadurch lässt sich u. a. ein schnellerer Abfluss der Schadstoffe erreichen.



Anordnung einer Reaktiven Wand senkrecht zur Kontamination

Darüber hinaus sind auch Bauformen denkbar, bei denen der Grundwasserstrom von der horizontalen in eine vertikale Richtung abgelenkt wird und die Reaktionszone somit vertikal durchströmt wird. Somit ist es möglich, auch Grundwasser aus größerer Tiefe oberflächennah und damit kostengünstig abzureinigen.

<p>Seitlich und hintereinander versetzte Bohrpfähle</p>	<p>Wechselnde Wandstärken</p>
<p>Durchgehende Wand mit Öffnungen</p>	<p>Vertikal durchströmte Reaktionszone</p>

Weitere Konstruktionsformen Reaktiver Systeme

600.1.4 Injektionsverfahren

Der Vorteil von Injektionsverfahren gegenüber vollflächig durchströmten Wänden und den Funnel-and-Gate Systemen liegt in der hohen Flexibilität bezüglich der Tiefe und Geometrie der zu schaffenden Reaktionszone, so dass auch Kontaminationsherde erfasst werden können, die mit der konventionellen Technik nicht oder nur bedingt erreicht werden können. Durchmesser und Reichweite dieser Brunnen sind abhängig vom Porenraum des anstehenden Bodens, wobei der Durchlässigkeitsbeiwert k_f , bei dem nur noch reine Flüssigkeitsinjektionen möglich sind, bei ungefähr 1×10^{-5} m/s liegt.

Die bisher häufigste Anwendung finden Injektionsbrunnen in der Trinkwassergewinnung, bei der durch Injektion von Sauerstoff oder Luft in den Untergrund eine Ausfällung von Eisen (Fe(III)) und Mangan(Mn(IV))-Hydroxiden erreicht wird und so eine spätere Enteisenung entfallen kann. Die Problematik dieses Verfahrens liegt jedoch in den Standzeiten solcher injizierten stationären Reaktionszonen. Sie reichen, in Abhängigkeit von der anstehenden Sedimentmatrix, von mehreren Wochen bis hin zu ein oder zwei Jahren. Die Sedimentmatrix beeinflusst auch maßgeblich die Homogenität der eingebrachten Reaktionszone, welche bei dieser Bauform nur schwer zu gewährleisten und darüber hinaus sehr schwer zu überprüfen ist.

Die Injektion von Wasserstoff- oder Sauerstoff freisetzenden Suspensionen (z.B. HRC, ORC) zur gezielten Herbeiführung lokal reduzierender oder oxidierender Milieus im Grundwasserleiter ist aus Nordamerika für viele Standorte beschrieben. In Deutschland gibt es bisher erst sehr wenige Anwendungsfälle.

- Es sind keine Pumpen zur Grundwasserförderung erforderlich. Damit entfallen die Kosten für die Wartung, Reparatur und / oder den Ersatz der Pumpen sowie die Energiekosten für den Pumpenbetrieb über lange Zeiträume.
- Kostenersparnis durch die Einrichtung einfach zugänglicher, oberirdischer Reaktoren (im Vergleich zu teuren Untertagereaktoren wie z.B. Funnel and Gate).
- Kostenvorteile bei der Funktionsüberwachung des Systems (Reinigungskontrolle im Ablauf) sowie beim Austausch der reaktiven Materialien in den oberirdischen Reaktoren.
- Die wesentlichen Anlagenteile des DHR-Verfahrens wurden im Rahmen anderer Anwendungen bereits langfristig eingesetzt und sind technisch erprobt.
- Hohe Betriebssicherheit aufgrund des einfachen Verfahrenprinzips.
- Das DHR-Verfahren befindet sich in der Verfahrensumsetzung. Eine Sanierungsanlage ist im Kraichgau seit 2001 in Betrieb, weitere Anwendungsfälle sind in Planung.

600.1.6 Abreinigungsverfahren und Materialien

Grundsätzlich können aufgrund der unterschiedlichen Prozesse der Abreinigung des Grundwasserstroms drei verschiedene Typen von Reaktiven Systemen unterschieden werden:

- Sorptions-Reaktive Systeme
- Fällungs-Reaktive Systeme
- auf chemischer und/oder biologischer (Abbau-) Reaktion basierende Reaktive Systeme.

Die Sorptions-Reaktiven Systeme bewirken eine Abreinigung des Grundwassers durch Austausch der Schadstoffe aus der flüssigen Phase an die feste Phase des eingebrachten Sorptionsmaterials. Das Prinzip der Fällungs-Reaktiven Systeme besteht in der Verschiebung der Löslichkeitsgrenze der Schadstoffe im Grundwasser. Die dabei am weitesten verbreitete Methode ist die Anhebung des pH-Wertes durch das Zufügen einer Base. Nur bei der dritten Gruppe von Reaktiven Systemen wird der Schadstoff tatsächlich durch eine abiotische und/oder biotische Reaktion zu geringer schädlichen Verbindungen abgebaut und somit zerstört.

Die nachfolgende Tabelle (nach HdA 2003, Kap. 5958 Birke/Burmeier/Rosenau, Tab. 3 und 4) zeigt eine Übersicht über die reaktiven Materialien, die bei organischen und anorganischen Grundwasserkontaminationen zum Einsatz kommen.

Organische Schadstoffe (Labor- und/oder halbtechnischer Maßstab)		
Material	Mechanismus	Kontaminanten
Elementares Eisen	Chemische Reduktion	DDT, Nitroaromaten, einige Pestizide, Azofarbstoffe, 1,2-Dibromethan
Eisendispersionen / -emulsionen	Chemische Reduktion	LCKW
Bimetallisches Eisen	Chemische Reduktion	Chlorierte Aliphaten, chlorierte Aromaten
Zn (und Apatit)	Chem. Reduktion / Dehalogenierung (anschl. Zn-Fällung)	PCE
Mg, Sn, Zn, Al	Chemische Reduktion	Chlorierte Aliphaten
Bimetalle, Mg/Pd, Al/Cu	Chemische Reduktion	Chlorierte Aliphaten
H ₂ /Palladium	Chemische Reduktion	Chlorierte Aliphaten, chlorierte Aromaten, PAK
Eisenminerale (Oxide, Hydroxide, Sulfid)	Chemische Reduktion	Nitroaromaten, chlorierte Aliphaten
Tensid-modifizierte Böden, Tone, Zeolithe	Sorption	Unpolare organische Schadstoffe
Oberflächenmod. Diatomit, Zeolithe	Sorption	PAK, organ. Schadstoffe
Aktivkohle, Kohle, Torf, Sägemehl	Sorption	Benzol
Huminstoffe	Sorption	PAK, Hetero-PAK, Phenole, BTEX
Braunkohle mit natürlichen oder zudotierten Mikroorganismen	Sorption + Mikrobiologie	PAK, MKW; Chlorbenzole, Pestizide
Elementares Eisen und Aktivkohle	Abbau und Sorption	TCE, Monochlorbenzol
Elementares Eisen und organ. Material	gekoppelter abiotischer / biotischer Abbau	LCKW, PAK, BTEX
Elementares Eisen und ORC™	Abiot. Abbau + Mikrobiologie / Oxidation	TCE, chlorierte Aromaten
Aktivkohle und Mikrobiologie	Sorption + Mikrobiologie	CKW, LCKW
Makroporöse Polymere	Sorption	PAK, BTEX, MKW, Phenole
Makrozyklische Komplexbildner	Sorption	Aromatische Schadstoffe
Boden / Bentonit + elementares Eisen	Reduktive Dehalogenierung (beschleunigt)	TCE
Nährstoffe	Biotischer Abbau	LCKW
Sauerstoff	Biotischer Abbau	MKW, PAK

Anorganische Schadstoffe (Labor- und/oder halbtechnischer Maßstab)		
Material	Mechanismus	Kontaminanten
Elementares Eisen	Erniedrigung des Redoxpotentials, Metallfällung	Saure Grubenwässer („Acid Mine Drainage“ AMD)
Elementares Eisen	Redoxfällung	U, As, Cr
Eisenoxidhydroxid	Sorption	U, Mo, As, Cr
Torf	Sorption	U
Torfmoos	Sorption	Cr, Cu, Zn, Ni, Cd, U, Mo
Zeolithe, natürliche und modifizierte	Sorption	Pb, Cr, Se, Sulfat, Cd, Cu
Chitosan	Sorption	Hg, U, Cd, Pb, V, Ni, Mo, Ti, Se
Podsol	Sorption	As
Sägemehl, Braunkohle, Kohle	Sorption	Mo, U
Titandioxid, Titanoxidhydrat	Sorption	Mo, U; U, As
Eisen (III)-chlorid mit Kalkstein	Sorption	U
Eisen (III)-nitrat, Eisen (III)-sulfat	Sorption	Mo
Hydroxyapatit, natürlicher Apatit	Fällung	Pb
Eisen (III)-sulfat, Calciumchlorid, Bariumchlorid	Fällung	Mo, U
Branntkalk	Fällung	U
Ofenschlacke	Sorption / Fällung	As
Eisen-Mineralien	Chemische Reduktion	Nitrat, Chromat
Organ. Material / Nährstoffe	Mikrobielle Reduktion	Nitrat, Chlorat

Kostenansätze für den Einsatz ausgewählter reaktiver Füllmaterialien sind im Kapitel 60.2 zusammengestellt.

Sorptions-Reaktive Systeme

Das Prinzip der Sorptions-Reaktiven Systeme basiert auf einer Verlagerung der Schadstoffe aus dem Grundwasser an die Oberfläche eines Feststoffes. Die Schadstoffe werden dadurch nicht zerstört oder abgebaut, sondern lediglich immobilisiert. In der Gruppe der Sorptionsmechanismen kommt der Adsorption die größte Bedeutung zu, dabei kann man auf eine lange Erfahrung der adsorptiven Schadstoffentfernung aus dem Bereich der Trinkwasseraufbereitung zurückgreifen. Eine Adsorption auf molekularer Ebene kann aufgrund von insgesamt drei Mechanismen eintreten:

- Hydrophobe Wechselwirkungen
- Elektrostatische Anziehung (Physiosorption)
- Oberflächenkoordinierungsreaktionen (Chemisorption)

Der bei der Entfernung von organischen Verbindungen am häufigsten angetroffene Mechanismus ist die Sorption infolge hydrophober Wechselwirkungen.

Ein Vorteil der Sorptions-Reaktiven Systeme besteht darin, dass keine schädlichen Abbauprodukte bei der Abreinigung des Grundwassers entstehen. Nachteilig ist jedoch, dass die Systeme nur ein endliches Rückhaltepotential haben und folglich das Sorptionsmaterial in bestimmten Zeitintervallen auszutauschen ist. Der Hauptnachteil liegt aber darin, dass der Prozess reversibel sein kann und es durch Veränderungen der geochemischen Randbedingungen zu einer Desorption der Schadstoffe kommen kann und somit zu einem Durchbruch der Kontamination durch die Wand.

Fällungs-Reaktive Systeme

Fällungsreaktionen beruhen auf dem Prinzip der Bildung eines Feststoffes aus einer Lösung (Ausfällung). Diese Reaktionen treten ein, wenn die Löslichkeitsgrenze einer Verbindung in der Lösung überschritten wird. Typischerweise wird diese Art von Reaktion dazu benutzt, um Schwermetalle aus wässrigen Lösungen zu entfernen. Grundsätzlich sind dabei zwei verschiedene Methoden der Manipulation der Löslichkeitsgrenzen zu unterscheiden. Zum einen bedient man sich einer pH-Wert Anhebung durch die Zugabe einer Base wie z. B. gelöschtem Kalk oder Kalkstein (CaCO_3), aber auch gebranntem Kalk (Calciumoxid, CaO). Dabei ist jedoch zu beachten, dass jede Schwermetallverbindung einen anderen optimalen pH-Wert-Bereich besitzt, bei der sie die geringste Wasserlöslichkeit aufweist. Dies erschwert die gleichzeitige Entfernung von mehreren Schwermetallen aus dem Grundwasser. Zum anderen kann man auch durch Zugabe von überschüssigen Ionen eine Verschiebung der Löslichkeitsgrenze erreichen.

Der Vorteil der Fällungs-Reaktiven Systeme im Vergleich zu den Sorptions-Reaktiven Systemen liegt in der geringeren Abhängigkeit der Abreinigungsreaktion von den vorliegenden Grundwasserverhältnissen. Nachteilig kann sich jedoch auswirken, dass die Schwermetalle, die als schwerlösliche Hydroxide und Carbonate ausfallen, die Oberflächen des reaktiven Materials belegen und damit zu einer Verminderung der Reaktion und gleichzeitig auch zu einem Verlust der hydraulischen Leistungsfähigkeit führen. Vergleichbar den Sorptions-Reaktiven Systemen besteht auch hier die grundsätzliche Möglichkeit einer Remobilisierung der gefällten Kontaminanten. Deshalb muss eine Veränderung der geochemischen Verhältnisse im Grundwasser während der Sanierung verhindert werden. Um eine dauerhafte Entfernung aus dem Grundwasser sicherzustellen, sollten die Fällungsendprodukte nach erfolgter Sanierung aus dem Untergrund entfernt werden.

Reduktive Dehalogenierung von LHKW

Der Abbau von höher chlorierten Verbindungen geschieht über mehrere Zwischenprodukte, die zum Teil ihrerseits toxisch sein können. Es handelt sich um eine Reaktion (pseudo-)erster Ordnung. Für die Gruppe der chlorierten Ethene gilt, dass der Abbau umso schneller erfolgt, je höher die Chlorierung ist. Je niedriger also der Chlorierungsgrad ist, desto größer ist die Halbwertszeit. Da die Halbwertszeit auch von der verwendeten Eisensorte abhängt, ist diese Tatsache auch für die spätere Bemessung der reaktiven Wandsysteme von entscheidender Bedeutung. Zusammen mit der Schadstoffeingangskonzentration kann dann die notwendige Halbwertszeit bis zum Erreichen der Sanierungsziele abgeschätzt werden. Da die in der folgenden Tabelle aufgeführten Daten aus verschiedenen US-amerikanischen Projekten stammen, sind für manche Stoffe mehrere Werte angegeben.

Organische Verbindungen	Reines Eisen $t_{1/2}$ (h)	Kommerzielles Eisen $t_{1/2}$ (h)
<u>Methan</u> Tetrachlormethan Chloroform Bromoform	0,02; 0,003; 0,023 1,49; 0,73 0,041	0,31-0,85 4,8
<u>Ethan</u> Hexachlorethan 1,1,2,2-Tetrachlorethan 1,1,1,2-Tetrachlorethan 1,1,1-Trichlorethan 1,1-Dichlorethan	0,013 0,053 0,049 0,065; 1,4 Daten nicht verfügbar	Daten nicht verfügbar Daten nicht verfügbar Daten nicht verfügbar 1,7-4,1 Daten nicht verfügbar
<u>Ethen</u> Tetrachlorethen Trichlorethen 1,1-Dichlorethen <i>trans</i> -1,2-Dichlorethen <i>cis</i> -1,2-Dichlorethen Vinylchlorid	0,28; 5,2 0,67; 7,3-9,7; 0,68 5,5; 2,8 6,4 19,7 12,6	2,1-10,8; 3,2 1,1-4,6; 2,4; 2,8 37,4; 15,2 4,9; 6,9; 7,6 10,8-33,9; 47,6 10,8-12,3; 4,7
<u>Andere organische Schadstoffe</u> 1,1,2-Trichlortrifluorethan (Freon113) 1,2,3-Trichlorpropan 1,2-Dichlorpropan 1,3-Dichlorpropan 1,2-Dibrom-3-chlorpropan 1,2-Dibrommethan <i>n</i> -Nitrodimethylamin (NDMA)	1,02 Daten nicht verfügbar Daten nicht verfügbar Daten nicht verfügbar Daten nicht verfügbar Daten nicht verfügbar 1,83	Daten nicht verfügbar 24,0 4,5 2,2 0,72 1,5-6,5 Daten nicht verfügbar
Nitrobenzol	0,008	Daten nicht verfügbar
<u>Kein sichtbarer Abbau</u> Dichlormethan 1,4-Dichlorbenzol 1,2-Dichlorethan Chlormethan	Daten nicht verfügbar Daten nicht verfügbar Daten nicht verfügbar Daten nicht verfügbar	Daten nicht verfügbar Daten nicht verfügbar Daten nicht verfügbar Daten nicht verfügbar

600.1.7 Bauverfahren

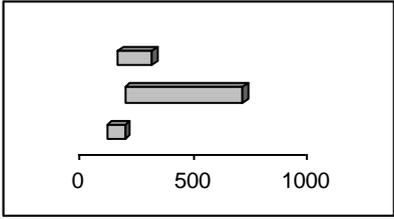
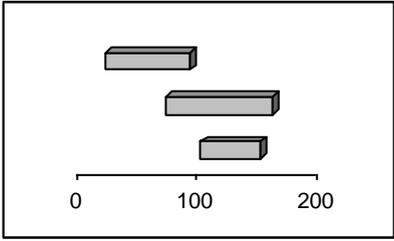
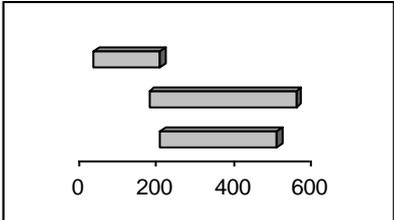
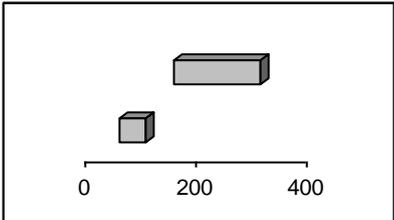
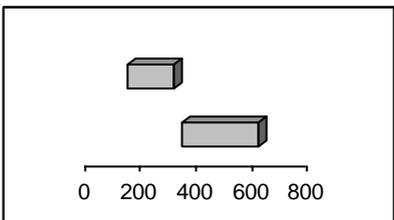
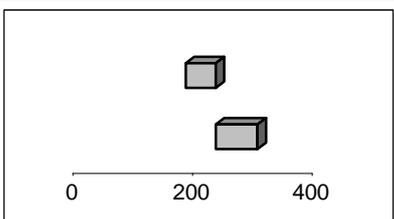
Zur Zeit stehen diverse Verfahren des Spezialtiefbaus zur Verfügung, für die schon die praktische Anwendbarkeit im Bereich der Herstellung Reaktiver Systeme nachgewiesen wurde. Dafür ergeben sich die nachfolgenden Einsatzmöglichkeiten und Grenzen:

	Schlitzwand	Schmalwand	Bohrpfahlwand	Löffelbagger	Spundwand	gefräste Wände
Wanddicke	zwischen 60 und 120 cm	6 bis 20 cm	Durchmesser von 60 bis 300 cm meist 90 bis 120 cm	beliebig	beliebig	30 cm
Tiefe	bis ca. 30 m in Sonderfällen bis 80 m (100 m)	abhängig vom anstehenden Boden ca. 15 bis 25 m	abhängig vom Durchmesser ca. 30 bis 60 m	bis ca. 6m in Sonderfällen 10m	bis ca. 20 m	bis ca. 8 m
Vorteile	große Tiefe erreichbar, Wandintegrität durch Vermessung des Schlitzes sicherstellbar	schnelles Bauverfahren, kein (kontaminierter) Bodenaushub	universell in allen Böden, jedes Reaktormaterial einsetzbar	einfache Ausrüstung	schnelles Bauverfahren	kostengünstig, schnell
Nachteile	spezielles Stützmedium erforderlich (z.B. Biopolymere)	rammbarer Boden erforderlich, nur pumpbare Reaktormaterialien einsetzbar, Anschluss zur Nachbarlamelle muss gewährleistet sein	wegen Überschneidung teilweises wieder-ausbohren von Reaktormaterial	begrenzte Tiefe, Kurzzeitstandfestigkeit des Bodens erforderlich	rammbarer Boden erforderlich, oder Auflockerungs-Bohrungen, ggf. spezielle Schlossdichtungen	nur für Lockergestein

Eignung der Bauverfahren für die Ausführung von ...	Funnel-Elementen	Gate-Elementen	vollflächigen Reinigungswänden
Spundwände/Verbaukästen	+	+	O
Schlitzwände			
Einphasen	+	-	O *
Zweiphasen	+	-	-
Gerammte	O	-	O
Schmalwände	+	-	O
Bohrpfähle	O	O	+
Mixed-in-Place	O	-	O
Schlitzwandfräse	O	-	+
Injektionsverfahren			
Einpressungen	-	-	O
Düsenstrahlverfahren	O	O	O
gefräste Wände (Dränagefräse)	-	O	+
Legende: + : gut geeignet; O : geeignet; - : weniger geeignet * : abbaubare Stützflüssigkeit erforderlich			

Standortfaktoren und ihr Einfluss auf:	Vollflächig durchströmte Wandsysteme	Funnel-and-Gate Systeme	Die Wahl des Bauverfahrens
Mächtigkeit der Fahne			
bzgl. der Tiefe	+	O	+
bzgl. der Breite	+	O	-
Schadstoffkonzentration/-fracht	+	+	-
Schadstoffinventar	O	O	-
Mächtigkeit des Aquifers / Anzahl	+	O	+
Heterogenität des Untergrundes	+	O	O
Grundwasserströmungsverhältnisse	+	+	O
Durchlässigkeit des Untergrundes	O	O	-
Hydrochemie	+	O	-
Lage / Zugänglichkeit / Infrastruktur	-	-	+
Sanierungsziele	+	+	-
Legende: + : sehr bedeutend; O : bedeutend; - : weniger bedeutend			

Pump-and-Treat	Reaktive Systeme
Vorteile	
praxiserprobtes Verfahren (>20 Jahre) hohe Verfahrenssicherheit anpassungsfähig bzgl. - Hydrogeologie - Variationen der GW-Fließrichtung - Sanierungsentwicklung breites Schadstoffspektrum geringer baulicher Eingriff niedrige Planungs- / Investitionskosten sehr gute Reinigungsleistung	Erfassung großflächiger Schäden geringer Eingriff in den GW-Haushalt Einsatz auch bei K_f -Werten $< 1 \times 10^{-5}$ m/s niedrige Betriebskosten geringe Nutzungseinschränkungen keine Setzungen / kein Trockenfallen keine Restemissionen geringer Flächenbedarf
Nachteile	
hohe Betriebskosten Schadensherd verbleibt häufig im Untergrund lange Sanierungszeiträume (Tailing) Rebound-Effekte möglich erheblicher Eingriff in den GW-Haushalt Entsorgung von Reststoffen erforderlich Einsatz nur ab K_f -Werten $> 1 \times 10^{-5}$ m/s Setzungen / Trockenfallen möglich Einleitkosten	geringe Praxiserfahrung Schadensherd verbleibt im Untergrund Erfahrungen nur mit „Monoschäden“ hohe Investitionskosten lange Sanierungszeiträume Langzeitverhalten unbekannt großer baulicher Eingriff, ggf. Rückbau Veränderung des GW-Chemismus große Konzentrationsschwankungen sind nicht erfassbar evtl. Patentschutz beachten

Bauverfahren	Kostenspannen €/m ² Wandfläche	
Spundwand	150 – 300 ²⁾ 180 – 700 ³⁾ 100 – 180 ¹⁾	
Schlitzwand		
1-Phasen	Bagger 20 – 90 ³⁾ Schlitzwandgreifer 70 – 160 ³⁾ 100 – 150 ²⁾	
2-Phasen	Bagger 25 – 200 ³⁾ Schlitzwandgreifer 170 – 550 ³⁾ 200 – 500 ²⁾	
Schmalwand	150 – 255 ⁴⁾ 50 – 100 ¹⁾	
Bohrpfahlwand	130 – 360 ¹⁾ 325 – 600 ⁵⁾	
Injektionen	180 – 230 ²⁾ 230 – 300 ²⁾	

1) aus Edel & Voigt, (2001); 2) Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1995); 3) Gavaskar et al. (1997); 4) aus Jansen & Grotehorst (1999), 5) aus Möller (1998)

600.2 Kostenermittlung

Die Kostenermittlung für die Arbeiten des Spezialtiefbaus erfolgt über die Leistungsregister im Leistungsbereich 72 „Vertikale Dichtung“.

Kostenansätze für die Füllmaterialien reaktiver Systeme können Kapitel 60.2.1 entnommen werden.

Für die in anderen Leistungsbereichen nicht erfassten Injektions- und Einpressverfahren wurde ein Leistungsregister als Ausschreibungshilfe erstellt (s. Kap. 60.2.2). Kostenansätze für die aufgeführten Positionen liegen nicht vor.

600.2.1 Reaktive Füllmaterialien

Die nachfolgend aufgeführten Kostenansätze wurden aus abgeschlossenen und laufenden Vorhaben ermittelt. Weltweit gibt es rund 50 Pilot- und Full Scale-Implementierungen, jedoch sind verwendbare Kostendaten nur aus deutlich weniger Fällen abzuleiten. Die in den folgenden Tabellen zusammengestellten Kostendaten beziehen sich auf Standorte in den USA und Kanada, für Standorte aus Deutschland liegen derzeit noch keine verwendbaren Daten vor. Die ursprünglichen Kostenansätze in US-Dollar wurden in Euro umgerechnet (Kurs vom August 2004: 1 € = 1,2 \$).

Vollflächige Reaktionswände			
Reaktives Material	Masse	Maßstab	Kostenansatz € / t
Nullwertiges Eisen	450 t	Full Scale	370 € / t
Nullwertiges Eisen	166 t	Pilot	440 € / t
Nullwertiges Eisen	720 t	Full Scale	415 € / t
Nullwertiges Eisen	742 t	Full Scale	403 € / t
Nullwertiges Eisen	400 t	Full Scale	278 € / t
Organisches Material	425 t	Full Scale	29 € / t
Nullwertiges Eisen	1750 t	Full Scale	286 € / t
Ofenschlacke	400 t	Full Scale	17 € / t

Funnel & Gate			
Reaktives Material	Masse	Maßstab	Kostenansatz € / t
Nullwertiges Eisen	220 t	Full Scale	644 € / t
Nullwertiges Eisen	75 t	Pilot	438 € / t
Nullwertiges Eisen	59 t	Pilot	664 € / t
Nullwertiges Eisen	70 t	Full Scale	595 € / t
Nullwertiges Eisen	2518 t	Full Scale	292 € / t
Nullwertiges Eisen	108 t	Full Scale	370 € / t

600.2.2 Injektionsverfahren

Die Ausführung, Planung und Prüfung der Injektionsarbeiten erfolgt gemäß DIN 4093 und DIN 18309.

600.3 Literatur

- Barczewski, B.; Memminger, B.: Das Heber-Reaktor-Verfahren – eine innovative und kostengünstige Technologie zur Grundwassersanierung – dargestellt an Praxisbeispielen, in Tagungsband: Boden und Altlasten Symposium 2002, Berlin.
- Bauer und Mourik Umwelttechnik GmbH & Co, Schrobenhausen, Projektinformationen unter www.bauer-mourik.de.
- Bayer, P.; Morio, M.; Bürger, C.; Seif, B.; Finkel, M.; Teutsch, G.: Funnel-and-Gate vs. Innovative pump-and-treat systems: a comparative economic assessment, IAHS Publication 275, 2001, Seite 235-244, ISBN 1901502864.
- Birke, V.; Burmeier, H.; Rosenau, D.: Sanierung kontaminierter Grundwasserleiter mittels durchströmter Reinigungswände: Stand der Entwicklung in Deutschland 2002, in Altlasten Spektrum 6/2002, S. 304-311.
- Birke, V.; Burmeier, H.; Rosenau, D.: Aquifersanierung mit durchströmten Reinigungswänden, in Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement, V. Franzius, K. Wolf, E. Brandt, M. Altenbockum, eds. 6/2002, Vol. 5958, 2003.
- Birke, V.; Burmeier, H.; Rosenau, D.: PRB Technologies in Germany: Recent Progress and New Developments. – In: Gavaskar, A.R. & Chen A.S.C. (Eds.): Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds – 2002. Proceedings of the Third International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds (Monterey, CA, May 2002) (ISBN 1-57477-132-9): CD-ROM, Columbus, Ohio.
- Birke, V.; Burmeier, H.; Rosenau, D. (2003): Design, Construction and Operation of Tailored Permeable Reactive Barriers. – Pract. Periodical of Haz., Toxic, and Radioactive Mgmt., ASCE 7 (4), S. 264-280.
- Birke, V.; Burmeier, H.; Rosenau, D.: Erfahrungen zur Leistungsfähigkeit, Entwicklungstrends sowie grundlegende planerische Voraussetzungen bei durchströmten Reinigungswänden, Manuskript zum BEW-Seminar, Juni 2004, Essen.
- Burmeier, H.; Birke, V.; Rosenau, D. (2002): Current R & D Needs and Tailored Projects for Solving Technical, Administrative and Other Issues Concerning Permeable Reactive Barrier Implementation in Germany. – In: Simon, F.G., Meggyes, T., McDonald, C. (Eds.): Advanced Groundwater Remediation Active and Passive Technologies (ISBN 0727731211): 45-73; London.
- Cantrell, K. J.; Kaplan, D. I.; Gilmore, T. J.: Injection of Colloidal Size Particles of Fe₀ in Porous Media with Shearthinning Fluids as a Method to Emplace a Permeable Reactive Zone, Land Contamination and Reclamation Vol.5, Nr.3, 1997, Seite 253-257.
- Dahmke, A.: Aktualisierung der Literaturstudie “Reaktive Wände” pH-Redox-reaktive Wände, Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung LfU Baden-Württemberg, 1997, ISSN 0944-3304.
- Davis A.; Campbell J.; Gilbert C.; Ruby M. V.; Bennett M.; Tobin S.: Attenuation and Biodegradation of Chlorophenols in Ground Water at a Former Wood Treating Facility, Ground Water, Vol. 32, No. 2, Seite 248-257.
- Deutsches Institut für Normung e. V.; DIN 276, Kosten im Hochbau, Ausgabe 1993-06.
- Deutsches Institut für Normung e. V.; DIN 1045-2, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Ausgabe 2001-07.

- Deutsches Institut für Normung e. V.; DIN 4093, Baugrund – Einpressungen in den Untergrund, Planung, Ausführung, Prüfung, Ausgabe 1987-09.
- Deutsches Institut für Normung e. V.; DIN 4094-3, Baugrund – Felduntersuchungen - Teil 3: Rammsondierungen.
- Deutsches Institut für Normung e. V.; DIN 4126-100, Ortbeton-Schlitzwände, Konstruktion und Ausführung, Ausgabe 1996-04.
- Deutsches Institut für Normung e. V.; DIN 18196, Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, Ausgabe 1988-10.
- Deutsches Institut für Normung e. V.; DIN 18300, Vergabe und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB) – Teil C, allgemeine technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV); Erdarbeiten, Ausgabe 2002-12.
- Deutsches Institut für Normung e. V.; DIN 18304, Vergabe und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB) – Teil C, allgemeine technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV); Ramm-, Rüttel- und Pressarbeiten, Ausgabe 2002-12.
- Deutsches Institut für Normung e. V.; DIN 18309, Vergabe und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB) – Teil C, allgemeine technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV); Einpressarbeiten, Ausgabe 2002-12.
- Deutsches Institut für Normung e. V.; DIN EN 10248, Warmgewalzte Spund-bohlen aus unlegierten Stählen, Ausgabe 1995-08.
- Deutsches Institut für Normung e. V.; DIN EN 10249, Kaltgewalzte Spund-bohlen aus unlegierten Stählen, Ausgabe 1995-08.
- Deutsches Institut für Normung e. V.; DIN EN 12063, Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) Spundwandkonstruktionen, Ausgabe 1999-05.
- Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen EAU, 9. Auflage, Verlag Ernst und Sohn, 1996.
- Edel, H. G.; Hussinger, C.; Hutschenreuter, O.: Grundwassersanierung – praxisrelevante Techniken und Verfahren, Entsorgungspraxis, Heft 7-8, 1997, Seite 64-68.
- Edel, H. G.; Voigt, T.: Aktive und passive Grundwassersanierung – ein Verfahren und Kostenvergleich, Terra-Tech, Nr.1, 2001, Seite 40-44.
- Gillham, R. W.; O'Hannesin, S. F.: Metal-catalyzed abiotic degradation of halogenated organic compounds. Modern trends in hydrogeology. Int. Assoc. of Hydrogeologists, Hamilton, Ontario, May 10-13.
- Gillham, R. W.; O'Hannesin, S. F.: Enhanced Degradation of Halogenated Aliphatics by Zero-Valent Iron, Ground Water, Vol. 32, Nr.6, 1994, Seite 958-967.
- Jansen, T.; Grooterhorst, A.: Reaktive Schmalwände zur passiven Grundwassersanierung, TerraTech, Nr. 3, 1999, Seite 46-48.
- Melzer, R.: Bautechnische Realisierung – Potentiale und Grenzen, ITVA – Fachtagung „Reinigungswände auf dem Vormarsch, 24.10.2001 in Magdeburg.
- Memminger, B.; Barczewski, B.: Pilotversuch zur energiesparenden, ökonomischen Reinigung kontaminierten Grundwassers im innerstädtischen Bereich mit einem Dichtwand-Heber-Reaktor am „Öl-Epple“-Areal in Stuttgart (BWD 20005), Entwurf des Abschlussberichtes, März 2003.
- Memminger, B.; Barczewski, B.; Luckner, L.: Tunnel & Gate-Systeme und ihre spezielle Gestaltung als DHR-Systemlösungen (Dichtwand-Heber-Reaktor) – in: Proceedings des GDFZ e.V., Heft Nr. 23, Selbstverlag, Dresden.

- Morrison, S. J.; Spangler, R. R.; Morris, S. A.: Subsurface Injection of Dissolved Ferric Chloride to Form a Chemical Barrier: Laboratory Investigations, Ground Water Vol.34, Nr.1, 1996, Seite 75-83.
- Möller, W.; Bau einer "Reaktiven Wand" als F+E Vorhaben in Rheine, TerraTech, Nr.4, 1998, Seite 47-48.
- Odensaß, M.; Schroers, S.: Durchströmte Reinigungswände – aktueller Kenntnisstand - , LUA-Fortbildungsveranstaltung „Gefährdungsabschätzung und Sanierung von Altlasten“ vom 2.7.-3.7.2002 beim BEW Essen.
- O'Hannesin, S.; Gillham, R. W.: Long-Term Performance of an In Situ "Iron Wall" for Remediation of VOCs, Ground Water, Vol. 36, No. 1, Seite 164-170.
- Dr. Raphael GmbH bioremediation produkts, Produktinformationen der Firma Regenesis zu ORC und HRC Anwendungen.
- Rochmes, M.: Erste Erfahrungen mit Reaktiven Wänden und Adsorberwänden in Deutschland, Boden und Altlastensymposium 2000, Franzius, V.; Lühr, H.-P.; und Bachmann, G., eds., Berlin, 2000, Seite 225-245.
- Sarr, D.: Zero-Valent-Iron Permeable Reaktive Barriers – How Long Will they Last?, Remediation, Vol. 11, T. 2, 2001, Seite 1-18.
- Schad, H.; Teutsch, G.: Reaktive Wände – aktueller Stand der Praxis-anwendung, Flächenrecycling, Nr.2, 1999, Seite 24-31.
- Smolczyk, U. [Hrsg.]: Grundbau - Taschenbuch 1-3, 5. Auflage, Ernst & Sohn Berlin, 1997, ISBN 3-433-01411-6.
- Schultz, D. S.; Landis, R. C.: Design and Cost Estimation of Permeable Reaktive Barriers, Remediation, Vol. 9, No. 1, 1998, Seite 57-67.
- Simon F.-G.; Meggyes T.: Permeable reaktive barriers for pollutant removal from groundwater, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Forschungsbericht 245, 2001.
- Stupp, H. D.: Grundwassersanierung von LCKW-Schäden durch Pump and Treat oder reaktive Systeme?, TerraTech, Nr.2, 2000, Seite 34-38.
- Stupp, H. D.: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Vergleiche Reinigungswände / "Pump and Treat", ITVA – Fachtagung „Reinigungswände auf dem Vormarsch, 24.10.2001 in Magdeburg.
- Teutsch, G.; Grathwohl, P.; Schad, H.; Werner, P.: In-situ-Reaktionswände – ein neuer Ansatz zur passiven Sanierung von Boden- und Grundwasserverunreinigungen, Grundwasser, Nr.1, 1996, Seite 12-20.
- Teutsch, G.; Schüth, C.; Melzer, R.: Reaktive Wände. Stand der Technik, Planung und Implementierung, Schriftenreihe altlastenforum Baden-Württemberg e.V., 1999, ISBN 3-510-39001-6.
- Teutsch, G.; Tolksdorff, J.; Schad, H.: The Design of in situ reactive wall systems: a combined hydraulical-geochemical-economical simulation study, Journal Land Contamination Reclamation, Nr.3, 1997, Seite 125-130.
- United States Environmental Protection Agency (EPA); Pump-and-Treat Ground-water Remediation A Guide for Decision Makers and Practitioners, EPA/625/R-95/005.
- United States Environmental Protection Agency (EPA); Permeable Reactive Barriers Technologies for Contaminant Remediation, EPA/600/R-98/125, 1998.
- United States Environmental Protection Agency (EPA); Field Applications of In Situ Remediation Technologies: Permeable Reactive Barriers, January 2002.
- Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau ZTVE-StB 94/97, Herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bauen und Wohnen.

600.4 Information über Leistungsanbieter

Kompetente Leistungsanbieter sind anhand einschlägiger Referenzen auszuwählen.