

ITVA

Arbeitshilfe - H 1 - 13

Stand: Juni 2010

Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



ITVA

Arbeitshilfe - H 1 - 13

Stand: Juni 2010

Innovative In-situ-Sanierungsverfahren



Impressum

Herausgeber:

Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement
und Flächenrecycling e.V. (ITVA)
Invalidenstraße 34
D-10115 Berlin
Tel.: 030 / 48 63 82 80
Fax: 030 / 48 63 82 82
E-Mail: info@itv-altlasten.de
Internet: www.itv-altlasten.de
www.teresa3.de

Erarbeitet vom Arbeitskreis „Innovative In-situ-Sanierungsverfahren“ im Fachausschuss H1 „Technologien und Verfahren“

Dipl.-Geol. Michael Altenbockum, Prof. Dr. Volker Birke, Jun.-Prof. Dr. habil. Philipp Blum, Dipl.-Ing. Martin Cornelsen, Dipl.-Geol. Andreas Feige-Munzig Dipl.-Geogr. Sabine Gier, Dipl.-Geol. Ulrike Hintzen, Dr. Ernst-Werner Hoffmann, Dr. Patrick Jacobs, Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky (Vorsitzender), Dipl.-Ing. Reiner Melzer, Dr. Manfred Nerger, Dipl.-Ing. Stefan Schroers, Dipl.-Ing. Jörg Weindl, Dr. Harald Willershausen

Mitglieder des Fachausschusses H1 „Technologien und Verfahren“

Dipl.-Geol. Michael Altenbockum, Dipl.-Ing. Martin Cornelsen, Dr. Rainer Domalski, Dr.-Ing. Peter Dreschmann, Dipl.-Geol. Andreas Feige-Munzig, Dipl.-Geol. Dietmar H. Flache, Dipl.-Geogr. Sabine Gier, Dipl.-Geol. Ulrike Hintzen, Dipl.-Geol. Karl-Joachim Hölting, Dr. Ernst-Werner Hoffmann, Dr. Frank Karg, Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky (Vorsitzender), Dipl.-Geol. Harald Kugler, Dipl.-Ing. Reiner Melzer, Dr. Manfred Nerger, Dipl.-Ing. Michael Odensaß, Dr. Christoph Olk, Dipl.-Ing. Jörg Weindl

Redaktion und Layout:
Dipl.-Geogr. Sabine Gier
Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement
und Flächenrecycling e.V. (ITVA)

Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky
VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und
Altlastensanierung, Universität Stuttgart

Die in dieser Arbeitshilfe verwandten Abbildungen wurden teilweise durch Scannen vorhandener Abbildungen gewonnen und weisen daher verfahrensbedingt qualitative Unzulänglichkeiten auf. Inhaltliche Veränderungen der Grafiken wurden nicht vorgenommen; allenfalls wurden Details ergänzt. Eventuell verbliebene Eigennamen waren auf einfachem Wege nicht entfernbar. Unterschiede in den grafischen Darstellungen sind den verschiedenen Quellen geschuldet.

Die Arbeitshilfe ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich urheberrechtlich zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Herausgebers. Dies betrifft insbesondere Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© 2010 Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e. V. (ITVA) • Berlin
Alle Rechte vorbehalten.

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Zielsetzung	1
2	Einführung	3
3	Begriffe und Definitionen	5
4	Rechtliche Rahmenbedingungen	13
5	Anwendungsvoraussetzungen	14
6	Beurteilungskriterien	17
7	Physikalische Verfahren	20
7.1	Verfahren für die ungesättigte Bodenzone	20
7.1.1	Thermisch Unterstützte Boden-Luft-Absaugung (mittels Dampf-(Luft-)Injektion) – TUBA	22
7.1.2	Thermische In-situ-Sanierung mit Festen Wärmequellen – THERIS	24
7.1.3	Multi-phase Extraction (MPE) – Mehr-Phasen-Extraktion / Dual-phase Extraction (DPE) – Zwei-Phasen-Extraktion	26
7.1.4	Elektrokinetik	28
7.2	Verfahren für die gesättigte Bodenzone	30
7.2.1	Airsparging	32
7.2.2	Dampf-Luft-Injektion in der gesättigten Bodenzone (DLI)	34
7.2.3	Alkoholspülung	36
7.2.4	Tensidspülung	38
8	Biologische Verfahren	40
8.1	Stimulierung des Abbaus nicht chlorierter Kohlenwasserstoffe	42
8.1.1	Biosparging	44
8.1.2	Wasserstoffperoxid (H ₂ O ₂)	46
8.1.3	Nitrat	48
8.1.4	Oxygen Release Compound (ORC [®])	50
8.1.5	iSOC [®] (In situ Submerged Oxygen Curtain)	52
8.1.6	Oxytec	54

8.2	Stimulierung des Abbaus chlorierter Kohlenwasserstoffe (CKW)	56
8.2.1	Melasse, organische Säuren, Alkohole – anaerober LCKW-Abbau (reduktive Dechlorierung)	58
8.2.2	HRC [®] (Hydrogen Release Compound) – anaerober LCKW-Abbau (reduktive Dechlorierung)	60
8.2.3	Methan-Biostimulation – aerober LCKW-Abbau	62
9	Chemische Verfahren	64
9.1	In-situ-chemische-Oxidation – ISCO	64
9.1.1	Kalium-/Natriumpermanganat	68
9.1.2	Fentons Reagenz	70
9.1.3	Persulfat	72
9.1.4	Ozon	74
9.2	In-situ-chemische-Reduktion - ISCR	76
9.2.1	Eisen-Partikel	78
9.2.2	In-situ-Reduktion von Chrom(VI)	80
10	Durchströmte Reinigungswände (Permeable Reactive Barriers – PRB)	82
10.1	Definition	82
10.2	Verfahrensprinzip und Anwendungsmöglichkeiten	83
10.3	Einsatzgebiete und -grenzen	83
10.4	Planungsvoraussetzungen	84
10.5	Bauliche Ausführung	84
10.5.1	Vollflächig durchströmte Reinigungswände – Continuous Reactive Barriers (CRB)	85
10.5.2	Durchströmte Reinigungswände mit gelenktem Grundwasserstrom (Funnel-and-Gate-Systeme, Drain-and-Gate-Systeme)	86
10.6	Reaktive Materialien und deren Einsatzmöglichkeiten	88
10.6.1	Elementares Eisen	88
10.6.2	Aktivkohle	89
10.6.3	Weitere Materialien	89
10.6.4	Langzeiteffektivität des reaktiven Materials	90

10.7	Verknüpfung mit anderen Verfahren	91
10.8	Vor- und Nachteile durchströmter Reinigungswände (PRB)	91
10.9	Referenzstandorte und Literaturhinweise	92
10.10	Bewertung durch den Arbeitskreis	92
11	Fazit und Ausblick	92
12	Literatur	97
13	Glossar	119

Anhang

Anhang 1: Zusammenfassung der Verfahrensbewertungen durch den Arbeitskreis

Anhang 2: Verzeichnis relevanter Rechtsnormen und Regelwerke

Anhang 3: Arbeitsschutz bei Arbeiten in kontaminierten Bereichen

Tabellenverzeichnis

Tabelle 6.1:	Übersicht der vorgestellten Verfahren	17
Tabelle 8.1:	Reaktionsgleichungen für den Abbau aromatischer Kohlenwasserstoffe unter aeroben und anaeroben Bedingungen am Beispiel von Benzol	41
Tabelle 9.1:	Schadstofftypen und Boden-/Prozessparameter für die Anwendung verschiedener ISCO-Verfahren, geändert nach Keijzer et al. (2004)	64

Abbildungsverzeichnis

Abb. 7.1:	Einsatz thermischer In-situ-Verfahren bei inhomogenen Untergrund: Dampf-Luft-Injektion in der gesättigten und ungesättigten Zone in Kombination mit THERIS für den Bereich geringer Durchlässigkeit	29
Abb. 8.1:	Kombination aus hydraulischer Förderung mit physikalischer On-site-Wasserreinigung und biologischem In-situ-Sanierungsverfahren	38
Abb. 8.2:	Biologischer Abbau von Chlorkohlenwasserstoffen (Chloethenen)	55
Abb. 9.1:	ISCO mit Natriumpermanganat (NaMnO_4) oder Natriumpersulfat (NaS_2O_8)	65
Abb. 10.1:	Prinzip Permeable Reaktive Wand (PRB) (aus RUBIN-Handbuch)	80
Abb. 10.2:	Prinzip vollflächig durchströmte Reaktive Wand (PRB) (aus RUBIN-Handbuch)	83
Abb. 10.3:	Prinzip Funnel-and-Gate-System (gelenkter Grundwasserstrom) (aus RUBIN Handbuch, modifiziert)	84
Abb. 10.4:	Prinzip Drain-and-Gate-System (aus RUBIN Handbuch, modifiziert)	85
Abb. 10.5:	Prinzip Drain-and-Gate-System mit Eingriffs-(Steuer)möglichkeit (EC-PRB) (aus RUBIN Handbuch, modifiziert)	85

Arbeitshilfe – H 1 – 13**Stand: Juni 2010**

Innovative In-situ-Sanierungsverfahren

1 Veranlassung und Zielsetzung

In den letzten Jahren werden zunehmend „innovative“ In-situ-Sanierungsverfahren angeboten, um insbesondere bereits lang laufende und nicht erfolgreiche Sanierungen, die kostenintensiv mit konventionellen Verfahren durchgeführt wurden, erfolgreich zu beenden. Diese Verfahren machen sich komplexe physikalische, chemische und biologische Vorgänge zu Nutze und stellen einen hohen Anspruch an den Planer und an die Genehmigungsbehörden. Sie bieten – einen sorgfältigen und sachgerechten Einsatz vorausgesetzt – ein hohes Potential, die genannten Probleme zu lösen. Sie stellen jedoch keine Patentlösungen dar, vielmehr müssen die Auswahl und der Einsatz in jedem Einzelfall sorgfältig erfolgen. Dies ist häufig anhand der Firmenunterlagen der Anbieter und auf Grund mangelnder Referenzen nicht möglich. Die Anwendungsbereiche, Anwendungsvoraussetzungen und -grenzen der Verfahren sind oft nicht eindeutig beschrieben, eventuelle Risiken werden nicht erkannt oder genannt. Auch muss der Einsatz in Deutschland unter Berücksichtigung der rechtlichen Rahmenbedingungen erfolgen und abgewogen werden. Hierzu bedarf es daher einer genauen, bisher leider oft fehlenden Kenntnis der Verfahren.

Eine komplexe wissenschaftliche Auswertung und Bewertung des Erfolgs der in Deutschland – oftmals unter speziellen Randbedingungen und eingebunden in Forschungsprojekte – unter Einsatz innovativer In-situ-Verfahren realisierten Sanierungsmaßnahmen liegt noch nicht vor. Einen ersten Ansatz bietet die im Rahmen des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser, Boden und Abfall“ durchgeführte „Auswertung von fünf Fällen mit In-situ-Anwendungen in der gesättigten Bodenzone bei der Altlastenbearbeitung“.¹

¹ http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb_prod/WaBoAb/Vorhaben/LABO/B_5.07/index.jsp

Der Arbeitskreis „Innovative In-situ-Sanierungsverfahren“ im ITVA-Fachausschuss H1 „Technologien und Verfahren“ hat sich daher zum Ziel gesetzt, den Entwicklungsstand und die bisherigen Erfahrungen bei der Anwendung innovativer In-situ-Sanierungsverfahren und ihre Einsatzmöglichkeiten und -grenzen kritisch zu prüfen und zu würdigen. Die vorliegende Arbeitshilfe soll – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – einen unabhängigen und ausgewogenen Überblick vermitteln. Es werden vorrangig Verfahren berücksichtigt, die hinsichtlich ihres Entwicklungsstandes zumindest in einer Pilotanwendung im Feld getestet wurden und hinreichend dokumentiert sind.

Ausgehend von einer Einführung in die Problematik werden die wesentlichen mit der Thematik verbundenen Fachbegriffe definiert und auf die rechtlichen Grundlagen verwiesen. Die grundsätzlichen Anwendungsvoraussetzungen bzw. Planungsgrundlagen werden erläutert. Das zentrale Element der Arbeitshilfe bildet die systematische Beschreibung und Darstellung der ausgewählten innovativen In-situ-Sanierungsverfahren mittels standardisierter Verfahrensblätter, die Angaben zu wirksamen Prozessen, technischem Aufbau (Verfahrenskomponenten und besondere Verfahrenscharakteristika), spezifischen Planungsgrundlagen, Anwendungsbereichen und -grenzen, Besonderheiten, Risiken, Entwicklungsstand, Referenzen, relevanten Fundstellen aktueller Literatur sowie Einschätzungen bzw. kritische Wertungen des Arbeitskreises enthalten.

Abschließend werden die bisherigen Erfahrungen bei der Anwendung der vorgestellten innovativen In-situ-Sanierungsverfahren aus Sicht des Arbeitskreises bewertet sowie Defizite und der weitere Entwicklungsbedarf aufgezeigt.

Die Arbeitshilfe richtet sich an Fachleute und Sachverständige in Ingenieurbüros und Behörden sowie an Sanierungspflichtige. Sie soll dazu beitragen, die Prüfung der Eignung innovativer In-situ-Sanierungsverfahren im jeweiligen Einzelfall zu erleichtern, um eine qualifizierte Anwendung zu ermöglichen und insgesamt die Akzeptanz der In-situ-Sanierungsverfahren zu erhöhen.

Die Anwendung der Arbeitshilfe steht jedermann frei. Rechtliche Ansprüche aus der Anwendung ergeben sich nicht.

2 Einführung

In-situ-Verfahren beruhen sowohl auf physikalischen, chemischen als auch auf biologischen Prozessen. Physikalische und chemische Prozesse führen zu einer Entfernung, Umwandlung (Oxidation, Reduktion) oder Immobilisierung (zum Beispiel Fällung, Sorption) der Schadstoffe im Untergrund. Biologische Prozesse können nicht nur abbaubare Schadstoffe eliminieren, sondern auch physikalisch-chemische Prozesse initiieren oder unterstützen. Umgekehrt können biologische Abbaureaktionen auch als "Sekundäreffekte" beim Einsatz physikalischer oder chemischer Verfahren auftreten.

In-situ-Sanierungsverfahren können zur Sanierung in der ungesättigten Bodenzone, im Grundwasserschwankungsbereich und in der gesättigten Bodenzone (Aquifer) eingesetzt werden. Es handelt sich zum einen um Methoden zur Leistungssteigerung klassischer Verfahren, zum anderen aber auch um weitgehend eigenständige Verfahren zur Schadensherd-sanierung oder zur Abstromsicherung.

Unter dem Begriff „**Innovative In-situ-Sanierungsverfahren**“ sammeln sich In-situ-Techniken und -Technologien, die zwar noch nicht immer den allgemein anerkannten Regeln der Technik und / oder dem Stand der Technik entsprechen, aber einen Entwicklungsstand erreicht haben, der eine praktische Eignung im Sinne einer umweltverträglichen, effizienten Anwendung gesichert erscheinen lässt.

Zur Unterstützung hydraulischer und pneumatischer Verfahren wurden Techniken zur Erhöhung des Schadstoffaustrags und damit zur Verkürzung der Sanierungsdauer entwickelt, insbesondere mit der Zielsetzung, Schadensherde (Schadstoffquellen) gezielt beseitigen und nachhaltig sanieren zu können.

So stehen für die Bodenluftabsaugung – als konventionelle Grundtechnologie – insbesondere thermische Verfahren zur Steigerung des Schadstoffaustrags – wie zum Beispiel Dampf-Luft-Injektionen oder der Einsatz fester Wärmequellen zum Aufheizen des Bodens – zur Verfügung. Für hydraulische Verfahren auf der Basis des klassischen Pump-and-Treats (P&T) wurden zur Steigerung der Austragsraten Verfahren zur Mobilisierung oder zur Erhöhung der Löslichkeit (Solubilisierung) entwickelt.

Allen diesen Verfahren ist gemein, dass mit ihrer Hilfe die Schadstoffe im Untergrund verstärkt freigesetzt werden und diese dann wie beim P&T noch mit einer geeigneten Technik aus dem entnommenen Grundwasser oder der Bodenluft entfernt und entsorgt werden müssen.

Einen völlig anderen Ansatz verfolgen die chemischen und mikrobiologischen In-situ-Sanierungsverfahren, die auf der In-situ-Umwandlung der Schadstoffe in unschädliche Produkte

beruhen. Allerdings sind die Einsatzmöglichkeiten biologischer Verfahren im Schadensherd aufgrund der zum Teil sehr hohen Schadstoffgehalte begrenzt. Diese Verfahren eignen sich vorwiegend zur so genannten Fahnenanierung. Hierzu wurden Substrate und Substanzen entwickelt, die stoffspezifisch das vorhandene natürliche Abbaupotential so weit steigern, dass ein wirksamer Schadstoffabbau und eine Begrenzung der Schadstoffausbreitung (stationäre Schadstofffahne bzw. abnehmende Fahne) erreicht werden können (ENA = Enhanced Natural Attenuation).

Als neue Verfahren zur Abstromsicherung und Grundwassersanierung werden Reaktive Wände eingesetzt.

Gemäß der verschiedenen oben beschriebenen Wirkprinzipien werden die in der vorliegenden Arbeitshilfe vorgestellten Verfahren wie folgt gegliedert:

- Physikalische Verfahren
 - Verfahren für die ungesättigte Bodenzone
 - Verfahren für die gesättigte Bodenzone
- Biologische Verfahren
 - Stimulierung des Abbaus nicht chlorierter Kohlenwasserstoffe
 - Stimulierung des Abbaus chlorierter Kohlenwasserstoffe (CKW)
- Chemische Verfahren
 - In-situ-chemische-Oxidation - ISCO
 - In-situ-chemische-Reduktion - ISCR
- Durchströmte Reinigungswände, PRB (Permeable Reaktive Barriere)

Die Entscheidung, ob eine Sanierung mit In-situ- oder On-site-/Off-site-Verfahren durchgeführt werden soll, ist nicht nur von den Schadstoffen, sondern auch von den Untergrundverhältnissen, der Lage der Kontamination im Untergrund und den planerischen und örtlichen Randbedingungen abhängig. Grundsätzlich ist bei einer sanierungsbedürftigen Grundwasserunreinigung zwischen Quellen- und Fahnenanierungen zu differenzieren. Hier unterscheiden sich die Verfahrenstechnologien in ihren Einsatzorten einer Kontamination. Es handelt sich immer um eine Einzelfallentscheidung unter Berücksichtigung der Aspekte Sanierungsdauer, Verhältnismäßigkeit (Geeignetheit, Erforderlichkeit, Angemessenheit), Ökonomie, Nachhaltigkeit und Ökobilanz.

Beim Einsatz innovativer In-situ Sanierungsverfahren können aufgrund der einzelfallspezifischen Randbedingungen (Heterogenität des Untergrundes, Art und Verteilung der Schadstoffe, etc.) im Einzelfall große Einschränkungen bzgl. der Wirksamkeit bestehen.

3 Begriffe und Definitionen

In der Praxis wird im Regelfall gefordert, dass alle Sanierungsmaßnahmen gemäß § 2 Abs. 7 BBodSchG entsprechend den anerkannten Regeln und dem Stand der Technik durchzuführen sind. Da sich hierzu im allgemeinen Sprachgebrauch eine Vielzahl ähnlicher Formulierungen findet, werden nachfolgend die wichtigsten Begriffe erläutert und definiert.

Sanierungsmaßnahmen im Sinne des Bodenschutzrechts (§ 2 Abs. 7 BBodSchG) sind:

- Dekontaminationsmaßnahmen (Maßnahmen zur Beseitigung oder Verminderung der Schadstoffe)
- Sicherungsmaßnahmen (Maßnahmen, die eine Ausbreitung der Schadstoffe langfristig verhindern oder vermindern, ohne die Schadstoffe zu beseitigen)
- Maßnahmen zur Beseitigung oder Verminderung schädlicher Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Bodens

Die Sanierungsverfahren werden nach dem Ort der Behandlung grundsätzlich unterschieden:

- On-site (vor Ort)
- Off-site (nach Abtransport)
- In-situ-Behandlung (in natürlicher Lage)

Technische Regeln

Technische Regeln sind im weitesten Sinne Empfehlungen, Handlungsempfehlungen oder Vorschläge, die einen Weg zur Einhaltung eines Gesetzes, einer Verordnung oder eines technischen Sachverhaltes aufzeigen. Beispiele für Technische Regeln sind DIN-Normen, VDE-Bestimmungen, VDI-Richtlinien, Technische Regeln für Gefahrstoffe, Regeln zum Arbeitsschutz auf Baustellen (RAB), Regeln der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfachs (DVGW-Regeln) sowie die Arbeitsstättenrichtlinien (ASR). Technische Regeln dienen im Wesentlichen der technischen Sicherheit von Leben, Gesundheit und Sachgütern, dem Schutz der Umwelt, der Sicherung der Vergleichbarkeit und der Kompatibilität sowie der Sicherung der Qualität von Produkten und Dienstleistungen.

In Gesetzen und Verordnungen werden in zunehmendem Maße nur noch Ziele wie Sicherheit, Mängelfreiheit, Gesundheitsschutz, Luftdichtheit etc. festgelegt. Die Entwicklung der Technik in den einzelnen Bereichen ist so schnell und so unterschiedlich, dass der Gesetzgeber auf im Einzelnen technisch konkret ausgeführte Anforderungsketten mit allen erforderlichen technischen Einzelheiten im Regelfall verzichtet und die Anforderungen an Produkte,

Verfahren oder Stoffe zum Erreichen der Ziele nur noch durch grundlegende Formulierungen wie "allgemein anerkannte Regeln der Technik" "Stand der Technik" oder "Stand von Wissenschaft und Technik" umschreibt.

Vom Gesetzgeber wurden diese Begriffe nicht allgemein verbindlich definiert. Daher werden sie als "unbestimmte Rechtsbegriffe" bezeichnet. Technische Regeln, die einen bestimmten Stand an Erkenntnissen von Wissenschaft und Technik widerspiegeln und sich unter anderem durch technische Normen und wissenschaftliche Veröffentlichungen definieren, können diese unbestimmten Rechtsbegriffe ausfüllen und zu deren Konkretisierung dienen. Es gibt im deutschen Sprachraum drei hauptsächliche Stufen²:

- Allgemein anerkannte Regeln der Technik
- Stand der Technik
- Stand von Wissenschaft und Technik

Sie werden im Folgenden erläutert. Ergänzend werden der Begriff „Beste verfügbare Technik“ und weitere Stadien von Forschung und Entwicklung definiert.

Allgemein anerkannte Regeln der Technik

Normenorganisationen, technisch-wissenschaftliche Vereine und andere technisch legitimierte Organisationen können schneller, wirksamer und auch bei Änderungen konkreter arbeiten, als dies im langwierigen Verfahren durch inhaltlich zutreffende Rechtsnormen (Gesetze, Verordnungen und so weiter) möglich wäre.

Die allgemein anerkannten Regeln der Technik (aaRdT) stellen das allgemein eingeführte, bekannte und bewährte Fachwissen dar zum Lösen technischer Aufgaben. Sie sind:

- von der Mehrheit der Fachleute anerkannt,³
- wissenschaftlich begründet und
- haben sich in der Praxis als richtig und als brauchbar bewährt⁴.

Allgemein anerkannte Regeln der Technik/Baukunst müssen Mosaiksteine eines allgemeinen, in sich schlüssigen technischen Regelwerkes sein.

² <http://www.hwk-muenchen.de/74,0,127.html>

³ Bender et al. 1995: 346, RNR. 6/114

⁴ Werner, U.; Pastor, W.; Müller, K. (2000): Baurecht von A-Z. Lexikon des öffentlichen und privaten Baurechts, 7., neubearbeitete und stark erweiterte Auflage. C.H. Beck Verlag, München, Köln

Stand der Technik

Der Stand der Technik geht über den in allgemein anerkannten Regeln der Technik ausgewiesenen hinaus und bezeichnet das bei Fachleuten verfügbare Fachwissen. Ausführungen nach dem Stand der Technik:

- basieren auf gesicherten wissenschaftlichen und technischen Erkenntnissen,
- sind wirtschaftlich machbar,
- lassen eine praktische Eignung gesichert erscheinen,
- sind aber noch nicht langjährig erprobt.

Die betreffenden Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen müssen noch nicht allgemein anerkannt, d.h. in der Form von Regeln als Mosaikstein für ein umfassendes Regelwerk kodifiziert zu sein. Vorausgesetzt wird aber ein Entwicklungsstand, der die praktische Eignung im technischen Maßstab gesichert erscheinen lässt. Was Stand der Technik für einzelne Produkte, Verfahren und Dienstleistungen ist, wird durch Sachverständigengutachten, Vergleichsverfahren, Auswerten des Schrifttums und von Kongressen und anderen Fachveranstaltungen nachgewiesen. Es wird aus dem Vergleich von Produkten, deren Wirksamkeit und Zuverlässigkeit im Einzelfall für einen bestimmten Zeitpunkt und die jeweilige Anwendung abgeleitet und begründet.

Während die allgemein anerkannten Regeln der Technik eine Mehrheitsmeinung der Praxis darstellen, ist der Stand der Technik nicht von der herrschenden Auffassung unter Praktikern abhängig. Er bestimmt sich vielmehr danach, was an der Front des technischen Fortschritts für geeignet, notwendig oder angemessen gehalten wird. Mithin bedeutet Stand der Technik den technisch und wirtschaftlich realisierbaren Fortschritt.

Der Begriff **Stand der Technik** stammt ursprünglich aus dem Umweltrecht⁵. Er ist in den verschiedenen Umweltvorschriften⁶ wie folgt gesetzlich definiert:

„Stand der Technik ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zum Schutz der Gesundheit, zur Sicherung der Beschäftigten und zur Begrenzung von Umweltschäden gesichert erscheinen lässt.“

⁵ § 3 (6) BImSchG, Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW/AbfG). Weitere Beispiele sind § 3 Abs. 10 Gefahrstoffverordnung (GefStoffV), § 14 Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (GPSG)

Eine Abweichung besteht nur bei der gesetzlichen Definition nach § 3 Nummer 11 des Wasserhaushaltsgesetzes vom 31. Juli 2009 (WHG), die sich an internationalen, insbesondere europarechtlichen Vorgaben orientiert und von den abfall- und immissionsrechtlichen Definitionen abweicht. Das WHG konkretisiert hier wie folgt:

"der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Begrenzung von Emissionen in Luft, Wasser und Boden, zur Gewährleistung der Anlagensicherheit, zur Gewährleistung einer umweltverträglichen Abfallentsorgung oder sonst zur Vermeidung oder Verminderung von Auswirkungen auf die Umwelt zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt gesichert erscheinen lässt."

In der Anlage 1 zu § 3 Nummer 11 WHG sind die Kriterien zur Bestimmung des Standes der Technik aufgeführt (Fundstelle: BGBl. I 2009, 2614):

Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit zwischen Aufwand und Nutzen möglicher Maßnahmen sowie des Grundsatzes der Vorsorge und der Vorbeugung, jeweils bezogen auf Anlagen einer bestimmten Art, insbesondere folgende Kriterien zu berücksichtigen:

1. Einsatz abfallarmer Technologie,
2. Einsatz weniger gefährlicher Stoffe,
3. Förderung der Rückgewinnung und Wiederverwertung der bei den einzelnen Verfahren erzeugten und verwendeten Stoffe und gegebenenfalls der Abfälle,
4. vergleichbare Verfahren, Vorrichtungen und Betriebsmethoden, die mit Erfolg im Betrieb erprobt wurden,
5. Fortschritte in der Technologie und in den wissenschaftlichen Erkenntnissen,
6. Art, Auswirkungen und Menge der jeweiligen Emissionen,
7. Zeitpunkte der Inbetriebnahme der neuen oder der bestehenden Anlagen,
8. die für die Einführung einer besseren verfügbaren Technik erforderliche Zeit,
9. Verbrauch an Rohstoffen und Art der bei den einzelnen Verfahren verwendeten Rohstoffe (einschließlich Wasser) sowie Energieeffizienz,
10. Notwendigkeit, die Gesamtwirkung der Emissionen und die Gefahren für den Menschen und die Umwelt so weit wie möglich zu vermeiden oder zu verringern,
11. Notwendigkeit, Unfällen vorzubeugen und deren Folgen für den Menschen und die Umwelt zu verringern,

12. Informationen, die von der Kommission der Europäischen Gemeinschaften gemäß Artikel 17 Absatz 2 der Richtlinie 2008/1/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Januar 2008 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (ABl. L 24 vom 29.1.2008, S. 8) oder von internationalen Organisationen veröffentlicht werden.

Mit der Vorgabe des Standes der Technik soll zum einen gewährleistet werden, dass das jeweils beste Verfahren zur Anwendung kommt, zum anderen ist der Stand der Technik ein Kriterium zur Beurteilung des Entwicklungsstandes von Immissionen ausstoßenden Anlagen.

Im Unterschied zu dem im Baurecht verwendeten Maßstab der Regeln der Technik ist der Stand der Technik gekennzeichnet durch das Fehlen einer langjährigen Erprobung.

Stand von Wissenschaft und Technik

Im Gegensatz zum Stand der Technik bezeichnet der Stand von Wissenschaft und Technik einen technischen Entwicklungsstand, bei dem Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen wissenschaftlich begründet sind und sich in Versuchs- und Pilotanlagen als technisch durchführbar erwiesen haben. Eine Umsetzung bzw. praktische Eignung im großtechnischen Betrieb steht dabei allerdings noch aus.

Der Stand von Wissenschaft und Technik stellt damit die höchste Stufe des Anwendens externen Wissens dar. Gefordert wird er aber nur dort, wo sehr hohe bis höchste Risiken für Leben, Gesundheit, Umwelt und Sachgüter bestehen wie in der Kernenergietechnik, Pharmazie, Medizintechnik oder Gentechnik.

Der Stand von Wissenschaft und Technik wird charakterisiert durch:

- gesicherte und überprüfte wissenschaftliche Erkenntnisse,
- hat sich technisch als durchführbar erwiesen,
- kann ohne praktische Bewährung sein,
- ist öffentlich zugänglich und
- gilt ohne räumliche Grenzen – weltweit.

Beste verfügbare Technik

Der Begriff Beste Verfügbare Technik (best available technology - BAT) ist eine europäische Technikklausel. Der Rechtsbegriff wurde vor allem durch das Gemeinschaftsrecht der Europäischen Union, unter anderem die Richtlinie 96/61/EG des Rates vom 24. September 1996 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie), in das nationale Recht der Mitgliedsstaaten eingeführt. Gemäß der IVU-Richtlinie müs-

sen in der Europäischen Union die besonders umweltrelevanten Industrieanlagen auf der Basis der Besten Verfügbaren Techniken (BVT) genehmigt werden. Auch ältere (bestehende) Anlagen müssen seit dem 30. Oktober 2007 auf Grundlage der BVT betrieben werden. Um ein hohes Schutzniveau für die Umwelt zu sichern, ist die IVU-Richtlinie darauf ausgerichtet, sämtliche Emissionen einer Anlage in die Luft, das Wasser und den Boden zu erfassen und dabei abfallwirtschaftliche Belange, Aspekte der Ressourcen- und Energieeffizienz sowie der Vorbeugung von Unfällen zu berücksichtigen. Sie orientiert sich am Leitbild der nachhaltigen Produktion.

Die IVU-Richtlinie setzt dabei auf das Konzept der besten verfügbaren Techniken (BVT), die dem in Deutschland traditionell verwendeten Konzept des Standes der Technik entsprechen. Die besten verfügbaren Techniken werden für jede betroffene Branche in einem Informationsaustausch zwischen Mitgliedstaaten, Industrie und Umweltverbänden erarbeitet und in BVT-Merkblättern festgelegt⁷

Gemäß Artikel 2, Abs. 12, der IVU-Richtlinie bezeichnet der Begriff „beste verfügbare Techniken“ den effizientesten und fortschrittlichsten Entwicklungsstand der Tätigkeiten und entsprechenden Betriebsmethoden, der spezielle Techniken als praktisch geeignet erscheinen lässt, grundsätzlich als Grundlage für die Emissionsgrenzwerte zu dienen, um Emissionen in und Auswirkungen auf die gesamte Umwelt allgemein zu vermeiden oder, wenn dies nicht möglich ist, zu vermindern:

- a) „Techniken“ sowohl die angewandte Technologie als auch die Art und Weise, wie die Anlage geplant, gebaut, gewartet, betrieben und stillgelegt wird;
- b) „verfügbar“ die Techniken, die in einem Maßstab entwickelt sind, der unter Berücksichtigung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses die Anwendung unter in dem betreffenden industriellen Sektor wirtschaftlich und technisch vertretbaren Verhältnissen ermöglicht, ganz gleich, ob diese Techniken innerhalb des betreffenden Mitgliedstaats verwendet oder hergestellt werden, sofern sie zu vertretbaren Bedingungen für den Betreiber zugänglich sind;
- c) „beste“ die Techniken, die am wirksamsten zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt sind.

Bei der Festlegung der besten verfügbaren Techniken sind die in Anhang IV der Richtlinie aufgeführten Punkte besonders zu berücksichtigen.

⁷ <http://www.bvt.umweltbundesamt.de/>

In Entwicklung

Die Zielvorstellung ist festgelegt. Das Material/die Methode/das Verfahren befindet sich in theoretischer (und eventuell praktischer Erprobung). Die Verwendungsparameter sind noch nicht definiert. In dieser ersten Phase des Entwicklungsablaufs ist die Einsatzfähigkeit in der Praxis noch nicht gegeben.

Im Versuchsstadium

Die praktische Entwicklung ist fortgeschritten, es wird daran gearbeitet, die Verwendungsparameter (Nutzen/Risiko) zu definieren. Es wird im kontrollierten Laborversuch getestet, ob die an Material/Methode/Verfahren gestellten Anforderungen erfüllt werden. Die Erprobung wird vorbereitet.

In Erprobung

Die Charakteristika des Materials/der Methode/des Verfahrens im Hinblick auf die der Entwicklung zugrundeliegenden Zielvorstellungen wurden in engem Rahmen überprüft. Die Entwicklung ist so weit fortgeschritten, dass die praktische Erprobung unter streng kontrollierten wissenschaftlichen Bedingungen stattfinden kann. Ziel ist, die Verwendungsparameter genauer zu definieren und die Leistungsmerkmale auf einer breiteren Basis zu überprüfen.

Praxisreif, anwendungsreif

Leistungsmerkmale sind bekannt, Verwendungsparameter sind klar definiert. Material/Methode/Verfahren ist einsatzbereit für die Praxis.

Praxiserprobt

Material/Methode/Verfahren wurde auf breiter Basis in der Praxis eingesetzt. Die Verwendungsparameter sind bekannt.

Unbedenklich

Die Anwendung des Materials/der Methode/des Verfahrens lässt nach dem jeweiligen Wissensstand keinen Schaden erwarten.

Pilotanlage

Erste Anlage ihrer Art, mit der eine neue Technologie hinsichtlich Funktionsfähigkeit und Einsatzmöglichkeiten untersucht und getestet werden kann.

Pilotphase

Probephase eines Projektes mit einer neuen Technologie.

Pilotversuch

Erster Versuch unter realen Bedingungen (Praxis).

Pilotprojekt

Erstes Projekt seiner Art, bei dem neue Methoden erprobt werden sollen.

Stand der Wissenschaft

Der Stand der Wissenschaft ist die wissenschaftstheoretische und philosophische Zusammenfassung der jeweils gegenwärtigen Erkenntnisse einer Wissenschaft oder aller Wissenschaften. Er repräsentiert gegenwärtige Erkenntnisse in beweisbarer und überprüfbarer Beziehung zur Wirklichkeit. Daraus ergibt sich die besondere Bedeutung für globale politische Entscheidungen und zukunfts wichtige Technologien, für die öffentliche Diskussion und Wissensvermittlung, soweit sie Folgen für das Leben vieler Menschen haben. Der ideale Stand der Wissenschaft wird durch jede neue wissenschaftliche Erkenntnis direkt weiterentwickelt und ergibt sich ständig neu aus einer Gesamtheit von Forschung, Publikationen und wissenschaftlicher Fachdiskussion (Vorträge auf Fachkongressen, interne Informationen). Für ihre eng begrenzte Einzelwissenschaft können somit gut informierte Wissenschaftler den Stand darstellen.

Innovativ

Innovationen betreffend, schaffend, beinhaltend.

Innovation

Erneuerung; Neuerung durch Anwendung neuer Verfahren und Techniken, Entwicklung neuer Ideen, Techniken, Produkte oder ähnlich.⁸

⁸ *“Innovation is the process of **transforming knowledge into new products**, processes and services which, in turn, **generate new economic benefits**. For this process to succeed, a complete system must be available that supports the movement of a new idea from initial concept, through research and development to a **ready-for market product**”* [WESTERN ECONOMIC DIVERSIFICATION CANADA, [HTTP://WWW.WD.GC.CA/INNOVATION/](http://www.wd.gc.ca/innovation/)]

Innovative Sanierungsverfahren

Innovative Sanierungsverfahren sind Verfahren, die einen Entwicklungsstand erreicht haben, der eine praktische Eignung im Sinne einer umweltverträglichen, effizienten Anwendung gesichert erscheinen lässt, aber noch nicht den allgemein anerkannten Regeln der Technik und/oder dem Stand der Technik entspricht.

Zu innovativen Sanierungsverfahren werden auch Vorgehensweisen gezählt, bei denen eine Kombination mehrerer Verfahren angewandt wird, die neuartig ist. Innovative Verfahren sollten durch gezielte, gut dokumentierte Anwendungen zum Stand der Technik bzw. zu allgemein anerkannten Regeln geführt werden.

In-situ-Sanierungsverfahren

Verfahren, mit deren Hilfe Kontaminationen direkt im Untergrund biologisch, chemisch oder physikalisch behandelt werden, um – ggf. in Kombination mit anderen Verfahren – sie aus dem Boden oder Grundwasser zu entfernen, in unschädliche Stoffe umzuwandeln oder deren Ausbreitung zu verhindern.

4 Rechtliche Rahmenbedingungen

Grundlage für die Bearbeitung von Altlasten sind das Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) und die Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) in Verbindung mit den jeweiligen landesrechtlichen Regelungen.

Für die Durchführung von In-situ-Sanierungen kommt genehmigungsrechtlich in der Regel das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) zum Tragen. Gemäß § 8 Abs. 1 WHG bedarf die Benutzung eines Gewässers der Erlaubnis oder der Bewilligung, soweit nicht durch das Gesetz oder auf Grund des Gesetzes erlassener Vorschriften etwas anderes bestimmt ist. Die Anwendung physikalischer, biologischer und chemischer Sanierungsverfahren sowie die Errichtung und der Betrieb von Reinigungswänden erfüllt die Benutzungstatbestände von § 9 Abs. 1 und 2 WHG. Gemäß § 10 Abs. 1 WHG gewährt die Erlaubnis die Befugnis, die Bewilligung das Recht, ein Gewässer zu einem bestimmten Zweck in einer nach Art und Maß bestimmten Weise zu benutzen. Zuständig für die Erteilung einer wasserrechtlichen Erlaubnis sind die Landkreise und Kreisfreien Städte als untere Wasserbehörde.

Je nach Art der durchgeführten Maßnahme können weitere Regelungsbereiche – vorrangig die Rechtsgebiete des Immissionsschutz-, des Bauordnungs-, des Abfall- und des Naturschutzrechts – berührt und eine Reihe der damit verbundenen behördlichen Genehmigungen

erforderlich sein. Darüber hinaus sind die gesetzlichen Anforderungen an den Gesundheits- und Arbeitsschutz einzuhalten (vgl. Anhang 3).

Die zu erarbeitenden Planungsunterlagen müssen die Vorgaben und Genehmigungserfordernisse der einschlägigen Gesetze und Verordnungen des Bundes und der Länder, der Technischen Regelwerke, Unfallverhütungsvorschriften, Berufsgenossenschaftlichen Richtlinien, Sicherheitsregeln, Grundsätze, Merkblätter und DIN-Normen in der jeweils gültigen Fassung berücksichtigen. Ein Verzeichnis relevanter Rechtsnormen und Regelwerke findet sich in Anhang 2.

Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind jeweils im Einzelfall mit den zuständigen Behörden abzustimmen.

5 Anwendungsvoraussetzungen

Vor der Entscheidung für den Einsatz eines innovativen In-situ-Sanierungsverfahrens sind zwingend ausreichende Vorkenntnisse über die lokalen Rahmenbedingungen (hydraulische, hydrogeologische und hydrochemische Standort- und Milieuverhältnisse) sowie detaillierte Kenntnisse über die Schadenssituation (Art, Ausbreitung und räumliche Verteilung, Menge, physikalische und chemische Eigenschaften, ggf. biologische Abbaubarkeit und Bioverfügbarkeit etc. der Schadstoffe) erforderlich. Die Anwendung von In-situ-Sanierungsverfahren kann eingeschränkt werden durch:

- Inhomogenitäten des Aquifers bzw. der ungesättigten Zone, verbunden mit dem Problem der gezielten Verteilung von Reagenzien/Energieeinträgen etc.
- Matrixeffekte des Bodens, mit der Erfordernis stark überstöchiometrischer Reaktionsmittelzugaben
- unerwünschte Sekundäreffekte wie Mobilisierung (beispielsweise von Schwermetallen durch Oxidation, Reduktion oder pH-Wertänderungen), Metabolitenbildung, Stripp-effekte etc.

Deswegen ist die Kenntnis:

- der Bodenstruktur (Aggregation, Vorhandensein von Makroporen),
- der Bodentextur (Korngrößenverteilung),
- der Porosität/Lagerungsdichte, des Wassergehaltes sowie
- des Gehaltes an organischer Substanz

von besonderer Bedeutung. Durch diese Bodenfaktoren wird einerseits die Luftdurchlässigkeit, andererseits das Sorptionsverhalten des Bodens beeinflusst. Zudem ist die Kenntnis der

relativen Lage der Kontamination zum Grundwasser, die ggf. technische Schutzmaßnahmen (Schutzinfiltrationen, Spundwände etc.) erforderlich macht, von wesentlicher Wichtigkeit.

Diese Kenntnisse sind sowohl zur sachgerechten Auswahl eines für die Standortbedingungen geeigneten Verfahrens als auch genehmigungsrechtlich für den Nachweis der Schadlosgigkeit des Verfahrens am Standort unerlässlich. Sie können grundsätzlich nur durch vorgeschaltete Labor-, Technikums- und/oder Feldversuche (Pilotversuch) sowie eine zielorientierte Standorterkundung gewonnen werden.

Abhängig von dem eingesetzten Verfahren können diese Versuche Informationen liefern:

- zu Wirkungsradien zum Beispiel von Luftinjektionen/Luftabsaugung und erzielbaren Über- bzw. Unterdrücke in räumlicher Verteilung,
- zur Dynamik der Schadstoffübergänge zwischen fester, flüssiger und gasförmiger Phase,
- zum zeitlichen Verlauf von Schadstofffrachten, die aus dem Untergrund extrahiert werden können,
- zur Kinetik des biologischen Schadstoffabbaus,
- zu Matrixeffekten sowie
- zu den Auswirkungen auf andere Schutzgüter.

Auf diese Weise werden die spezifischen Standortverhältnisse vor Ort bei der verfahrenstechnischen Planung berücksichtigt. Pilotversuche bieten ferner die Grundlage für Prognosen zum erreichbaren Sanierungsziel und zur Sanierungsdauer und erlauben damit auch eine fundierte Kostenabschätzung und insbesondere eine zuverlässige Auslegung der Sanierung.

Anlagentechnik und -betrieb bedürfen bei In-situ-Sanierungsverfahren einer intensiven Überwachung. Bei einigen Verfahren ist eine Online-Überwachung erforderlich zur optimalen und damit auch wirtschaftlichen Anlagensteuerung. Die Wartungs- und Überwachungsmaßnahmen sind in einem festgelegten Zeitraster – mit kürzeren Intervallen in der Anfangsphase – durchzuführen, Messergebnisse und Tätigkeitsbeschreibungen sind zu dokumentieren.

Die sachgerechte Planung, die Erstellung sowie der sichere Betrieb sämtlicher Anlagenteile sowie der Gesamtanlage sind durch Einhaltung der einschlägigen gesetzlichen Vorschriften und Sicherheitsrichtlinien zu gewährleisten. Beim Einsatz von Chemikalien sind die entsprechenden Sicherheitsdatenblätter zu beachten, der sachgerechte Umgang mit den Chemikalien sicherzustellen sowie eine angemessene Anlagentechnik für den Einsatz der Chemikalien vorzuhalten.

Beim Umgang mit brennbaren Substanzen und explosionsfähigen Atmosphären (zum Beispiel beim Vorhandensein von BTEX, Kraftstoffen, Methan) muss die Anlagentechnik zudem den Anforderungen des Explosionsschutzes entsprechen. Dieses gilt gleichermaßen bei dem Einsatz von Wirkstoffen (zum Beispiel Sauerstoff, Methan), der Einbringung von Energie bei Vorliegen brennbarer und/oder explosionsfähiger Substanzen sowie bei der Möglichkeit, dass brennbare und/oder explosionsfähige Substanzen aus Abbau- bzw. Umbauprozessen entstehen könnten.

Zur Kontrolle des Sanierungserfolgs ist bei allen Verfahren während der gesamten Sanierungsmaßnahme ein Monitoring erforderlich, das nach einem in der Planung festgelegten Monitoringkonzept durchgeführt werden muss. Hinsichtlich des Sanierungserfolgs ist zu differenzieren zwischen der Wirksamkeit (Effektivität) des Verfahrens und dessen Wirkungsgrad (Effizienz). Beides ist Voraussetzung, dass der Sanierungserfolg bzw. der Abschluss einer Sanierungsmaßnahme zeitgerecht, d.h. im geplanten Sanierungszeitraum erreicht werden kann. Zur Planung des Monitoringkonzeptes ist daher im Rahmen der Erkundung insbesondere auch die Abgrenzung der Schadstofffahne bedeutsam.

Die zu untersuchenden Kompartimente (Boden, Grundwasser und Bodenluft) sowie Art und Umfang des Monitorings richten sich nach den jeweiligen Verfahren. Ebenso werden Nährstoffgehalte und etwaige Randparameter (zum Beispiel Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalt in der Bodenluft) ermittelt. Je nach Verfahrensart kommen folgende Maßnahmen bei der Überwachung und Steuerung einer In-situ-Sanierung zur Anwendung:

- Überwachung von Grundwassermessstellen auf Schadstoffe und Grundwasserstand,
- Online-Überwachung der Untergrundtemperatur und der Temperaturentbreitung,
- Online-Überwachung der Anlagenbetriebsparameter und Anlagensteuerung inklusive Fehlermeldung
- Online-Monitoring des Schadstoffaustrags
- Entnahme von Bodenproben im Sanierungsgebiet und deren Untersuchung auf Schadstoffkonzentrationen und Abbauaktivitäten,
- Überwachung von Grundwasser- und Bodenluftkontrollpegeln zum Erkennen von etwaigen Schadstoffverlagerungsprozessen.

Bezüglich der Einhaltung immissionsschutzrechtlicher Anforderungen und Auflagen ist die eingesetzte Abluftreinigungstechnik durch Emissions- und Wirkungsgradmessungen zu überprüfen. Im Rahmen der Überwachung des Anlagenbetriebes wird festgelegt, welche Immissionsschutzmessungen (Parameter, Messpunkte) durch wen (Eigenkontrolle des Betreibers oder Messstelle nach §§ 26,28 BImSchG) durchgeführt werden.

Hinsichtlich des Arbeitsschutzes sind u.a. die berufsgenossenschaftlichen Regel 128 „Kontaminierte Bereiche“ und die Technische Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 524 „Schutzmaßnahmen für Tätigkeiten in kontaminierten Bereichen“⁹ in der aktuellsten Fassung sowie für den Betrieb der Anlagen die BetrSchV – im Kontext dieser Arbeitshilfe in Verbindung mit der GefStoffV oder der BioStoffV – heranzuziehen. Umfangreiche Informationen zum Arbeitsschutz bei Arbeiten in kontaminierten Bereichen sind in Anhang 3 aufgeführt. Ein Sicherheitsplan bzw. ein Arbeitsschutzkonzept ist für jede Sanierungsmaßnahme zu erstellen.

Nach der erfolgreichen Beendigung der Sanierung sind nachsorgende Überwachungsmaßnahmen gemäß BBodSchG durchzuführen. Zur Überprüfung der Nachhaltigkeit der Sanierungsergebnisse sind im Rahmen eines fortführenden Monitorings an entsprechenden Kontrollmessstellen nach Stillstand der Anlage über einen ausreichenden Zeitraum weitere Beprobungen und Schadstoffanalysen durchzuführen.

Zur optimalen Planung der Sanierungsmaßnahme und Erstellung eindeutiger Ausschreibungsunterlagen sind verschiedene Planungsgrundlagen zu erarbeiten. Die einzelnen Planungskriterien und der notwendige Umfang der Untersuchungen sind für jeden Sanierungsfall und jede geplante Maßnahme einzelfall- und standortspezifisch festzulegen. In der Konsequenz bedeutet dies, dass der Planungs- und Gutachteraufwand bei der Konzeption von In-situ-Maßnahmen im Vergleich zu konventionellen Maßnahmen als erhöht einzustufen ist.

6 Beurteilungskriterien

Die ausgewählten Verfahren werden in den anschließenden Kapiteln gemäß der in Kap. 2 erläuterten Gliederung in Form kurz gefasster, systematischer Datenblätter dargestellt und bewertet. Wichtige Gesichtspunkte sind hierbei die Verfahrensprinzipien, die technische Beschreibung der Verfahren, die Anwendungsbereiche, die Anwendungsgrenzen, die über die in Kap. 5 genannten zwingend erforderlichen Kenntnisse hinaus für die Erarbeitung der Planungsgrundlagen erforderlichen speziellen Informationen sowie Praxiserfahrungen bei der Anwendung. Die vorgestellten Verfahren sind zum Teil patentrechtlich geschützt.

⁹ TRGS 524 – Schutzmaßnahmen für Tätigkeiten in kontaminierten Bereichen, **Ausgabe: Februar 2010, GMBI Nr. 21 vom 1. April 2010, S. 419**; <http://www.bgbau-medien.de/site/asp/dms.asp?url=/tr/trgs524/titel.htm>. Die vorliegende TRGS ist eine Fortschreibung der TRGS 524 und beruht auf der berufsgenossenschaftlichen Regel "Kontaminierte Bereiche" (BGR 128).

Der Beurteilung der grundsätzlichen Anwendbarkeit der in dieser Arbeitshilfe vorgestellten innovativen In-situ-Sanierungsverfahren werden folgende Kriterien zugrunde gelegt:

- Eignung zur Sanierung von Schadstoffquelle oder Schadstofffahne,
- Bodenzone (ungesättigte Bodenzone, GW-Schwankungsbereich, gesättigte Bodenzone / Grundwasser),
- Art, Vorkommen und Umfang der Kontamination (Schadstoffe),
- Geologie und Hydrogeologie des Standortes,
- Geochemische und hydrochemische Standortbedingungen.

Die fachliche Bewertung durch den Arbeitskreis erfolgt unter anderem unter Berücksichtigung der Aspekte:

- Genehmigungsfähigkeit,
- Sanierungsdauer,
- Risiken,
- Entwicklungsstand,
- Praxiserfahrungen.

Zu den einzelnen Verfahren sind in den Verfahrensblättern in der Regel maximal fünf aktuelle Literaturfundstellen aufgeführt. In diesen Schriften sind Hinweise auf Sekundärliteratur zu finden. Adressen von Anbietern der Sanierungstechniken werden aus wettbewerbsrechtlichen und Aktualitätsgründen nicht aufgeführt.

Tabelle 6.1: Übersicht der vorgestellten Verfahren

Physikalische Verfahren
Verfahren für die ungesättigte Bodenzone
Thermisch Unterstützte Boden-Luft-Absaugung mittels Dampf-(Luft-)Injektion (TUBA)
Thermische In-situ-Sanierung mit Festen Wärmequellen (THERIS)
Mehr-Phasen-Extraktion (Multi-phase Extraction) / Zwei-Phasen-Extraktion (Dual-phase Extraction)
Elektrokinetik
Verfahren für die gesättigte Bodenzone
Airsparging
Dampf-Luft-Injektion in der gesättigten Bodenzone (DLI)
Alkoholspülung
Tensidspülung
Biologische Verfahren
Stimulierung des Abbaus nicht chlorierter Kohlenwasserstoffe
Biosparging
Wasserstoffperoxid (H ₂ O ₂)
Nitrat
Oxygen Release Compound (ORC [®])
iSOC [®] (In situ Submerged Oxygen Curtain)
Oxytec
Stimulierung des Abbaus chlorierter Kohlenwasserstoffe (CKW)
Melasse, organische Säuren, Alkohole – anaerober LCKW-Abbau (reduktive Dechlorierung)
HRC [®] (Hydrogen Release Compound) – anaerober LCKW-Abbau (reduktive Dechlorierung)
Methan-Biostimulation – aerober LCKW-Abbau
Chemische Verfahren
In-situ-chemische-Oxidation - ISCO
Kalium-/Natriumpermanganat
Fentons Reagenz
Persulfat
Ozon
In-situ-chemische-Reduktion - ISCR
Eisen-Partikel
In-situ-Reduktion von Cr(VI)
Durchströmte Reinigungswände, PRB (Permeable reactive barriers)

7 Physikalische Verfahren

Physikalische Vorgänge können zur Änderung der Lage und der Art des Vorliegens eines Stoffes führen. Dabei kann es sich um die Änderung des Aggregatzustandes, die Mobilisierung oder die Solubilisierung (in Lösung gehen von Stoffen) handeln. Mit Hilfe von physikalischen In-situ-Sanierungsverfahren können organische Stoffe aus der ungesättigten und aus der gesättigten Bodenzone entfernt werden.

Im Gegensatz zu den biologischen und chemischen In-situ-Sanierungsverfahren, bei denen durch Umbau- oder Abbauprozesse bereits im Untergrund die Masse der Schadstoffe verringert wird, führt die Anwendung aller physikalischer In-situ-Sanierungsverfahren zu einer Erhöhung der Mobilität (im weitesten Sinne) der Schadstoffe im Untergrund. Ziel ist es, die Schadstoffe besser und mit erhöhten Raten austragen zu können. Im Gegensatz zu den biologischen und chemischen In-situ-Sanierungsverfahren findet die eigentliche Massenreduzierung der Schadstoffe aus der Umwelt dann erst on-site statt.

7.1 Verfahren für die ungesättigte Bodenzone

Zur Anwendung in der ungesättigten Bodenzone stehen zur Unterstützung der konventionellen Bodenluftabsaugung (BLA) die folgenden innovativen physikalischen In-situ-Sanierungsverfahren zur Verfügung:

- Dampf-Luft-Injektion in der ungesättigten Bodenzone – TUBA Thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung
- Thermische In-situ-Sanierung mit Festen Wärmequellen – THERIS
- Multi-phase Extraction (MPE) – Mehr-Phasen-Extraktion / Dual-phase Extraction (DPE) – Zwei-Phasen-Extraktion
- Elektrokinetik

Diese Verfahren sind zur Anwendung im Bereich der Schadstoffquelle oder im Nahbereich zur Schadstoffquelle vorgesehen. Da der Dampfdruck und damit die Verflüchtigung von Flüssigkeiten mit steigender Temperatur exponentiell zunimmt, können die Austragsraten von Schadstoffen durch die Erwärmung des Bodens und damit auch der Schadstoffe erheblich gesteigert werden und mittels einer Bodenluftabsaugung aus dem Untergrund abgesaugt werden.

Flüssige organische Schadstoffe sieden bei der gleichzeitigen Verdampfung von Wasser bei der Gemischsiedetemperatur, die für viele der relevanten Schadstoffe $< 100^{\circ}\text{C}$ ist (bei Atmosphärendruck). Der Vorgang wird in der Thermodynamik als Wasserdampfdestillation bezeichnet. So liegt die Gemischsiedetemperatur für den Schadstoff Benzol in Wasser bei ca. 69°C , für PCE (PER) in Wasser bei ca. 88°C . In Analogie zu Vorgängen bei der Metallschmelze von Legierungen wird die Gemischsiedetemperatur auch als „eutektische Temperatur“ bezeichnet (Betz 1998, Winkler 2002).

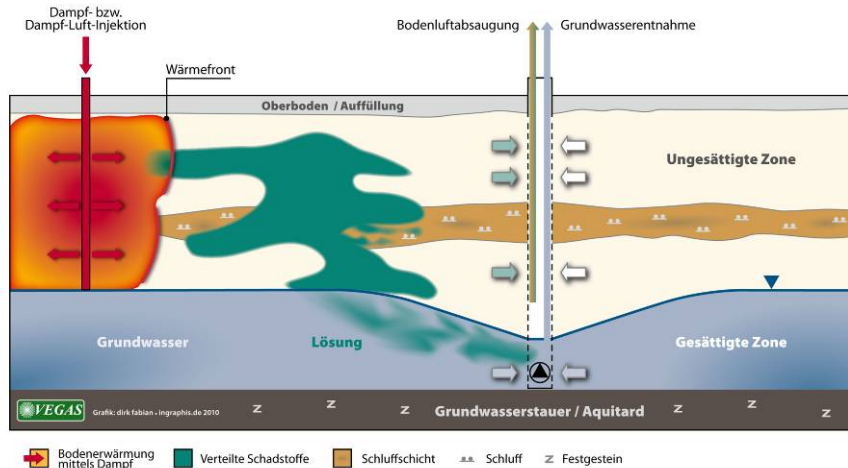
Auch bei der Multi-Phase-Extraction (MPE) wird Bodenluft aus der ungesättigten Zone abgesaugt. Durch den erzeugten starken Unterdruck können aus Brunnen, die sowohl in der ungesättigten Bodenzone (UZ) als auch im Grundwasser verfiltert sind, gleichzeitig aufschwimmende flüssige Schadstoffe (Schadstoffphase) aus dem Grundwasserschwankungsbereich bzw. der Grundwasseroberfläche abgesaugt sowie Grundwasser gefördert werden.

7.1.1 Thermisch Unterstützte Boden-Luft-Absaugung (mittels Dampf-(Luft-)Injektion) – TUBA

Thermisch Unterstützte Boden-Luft-Absaugung (mittels Dampf-(Luft-)Injektion) – TUBA

Prinzip

Bei der **Thermisch Unterstützten Boden-Luft-Absaugung**, TUBA, die auch als „heiße“ Bodenluftabsaugung bezeichnet werden kann, wird zum Aufheizen des Untergrunds bis auf die erforderliche Gemischsiedetemperatur Dampf oder ein Dampf-Luft-Gemisch in die ungesättigte Bodenzone im oder am Rand des Schadenszentrums injiziert.



Der Wärmeeintrag erfolgt konduktiv durch die Ausbreitung des Wasserdampfes. Die verdampften gasförmigen Schadstoffe werden über eine Bodenluftabsaugung abgesaugt. Letztere ist Bestandteil des Verfahrens, wobei sie gegenüber der klassischen Variante der BLA auf Grund der hohen Temperaturen verfahrenstechnisch modifiziert ist.

Dampf-Luft-Injektion in der ungesättigten Bodenzone (TUBA)

Aufbau und Beschreibung

Der injizierte Dampf kondensiert an der kalten Bodenmatrix und gibt dadurch seine Energie (Verdampfungsenthalpie) an die Bodenmatrix ab. Durch den fortlaufenden Kondensationsprozess - bis der Boden die Dampftemperatur erreicht hat - kann Dampf von der Injektionsstelle an die Dampffront strömen. Es bildet sich eine räumlich mehr oder weniger ausgedehnte Wärmefront, die sich von der Injektionsstelle aus idealer Weise (bei homogenen Verhältnissen) radialsymmetrisch ausbreitet. Im erwärmten Bereich werden die flüssigen, leicht- bis mittelflüchtigen organischen Schadstoffen verdampft und über die gleichzeitig betriebene Bodenluftabsaugung abgesaugt.

Da sich bei reiner Dampf-injektion an der Kondensationsfront Schadstoffe anreichern und in ungünstigen Fällen bis auf den Grundwasserspiegel absinken können, ist der TUBA-Einsatz mit alleiniger Dampf-injektion nur bei organischen Schadstoffen mit einer Dichte $< 1 \text{ kg/L}$ (LNAPL) möglich und bedingt den Einsatz einer Phasenabschöpfung im Grundwasser. Im Falle von „schweren“ organischen Schadstoffen (DNAPL, zum Beispiel CKW) muss ein Dampf-Luft-Gemisch injiziert werden. Die mit dem Dampf injizierte Luft wirkt als inertes Trägergas, durchdringt die Kondensationsfront und trägt die Kontaminanten gasförmig mit der Bodenluft aus.

Anlagentechnisch ist neben einem Dampferzeuger und einem Kompressor zur Erzeugung und Injektion des Dampf-Luft-Gemischs eine Anlage zur Bodenluftabsaugung erforderlich. Die Bodenluftabsaugung beinhaltet einen Wärmetauscher mit Kondensatabscheider, einen Verdichter sowie die Abluftbehandlung über Aktivkohle, TNV oder KatOx. Zur Bereitstellung von Kühlwasser bietet sich eine Grundwasserförderung an. Das Grundwasser sollte mittels Wasseraktivkohle aufbereitet werden. Eine Aktivkohleaufbereitung ist auch zur Reinigung des anfallenden wässrigen Kondensats aus der heißen Bodenluft erforderlich. Bei höher siedenden Schadstoffen kann es während der Kondensation der Bodenluft zur Bildung organischer Phase kommen. Dem Kondensatabscheider ist ein Phasenabscheider zur Trennung der wässrigen und organischen Flüssigkeit nachzuschalten. Der Phasenabscheider kann bei Einsatz einer Phasenabschöpfung an den Extraktionsbrunnen eingesetzt werden.

Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

- Informationen zur Infrastruktur am Standort (Wasser-, Strom-, Gas-, Abwasseranschluss), zur Gründung von Gebäuden, erdverlegten Leitungen und Kanäle und zu schutzbedürftigen, temperaturempfindlichen Bauteilen.

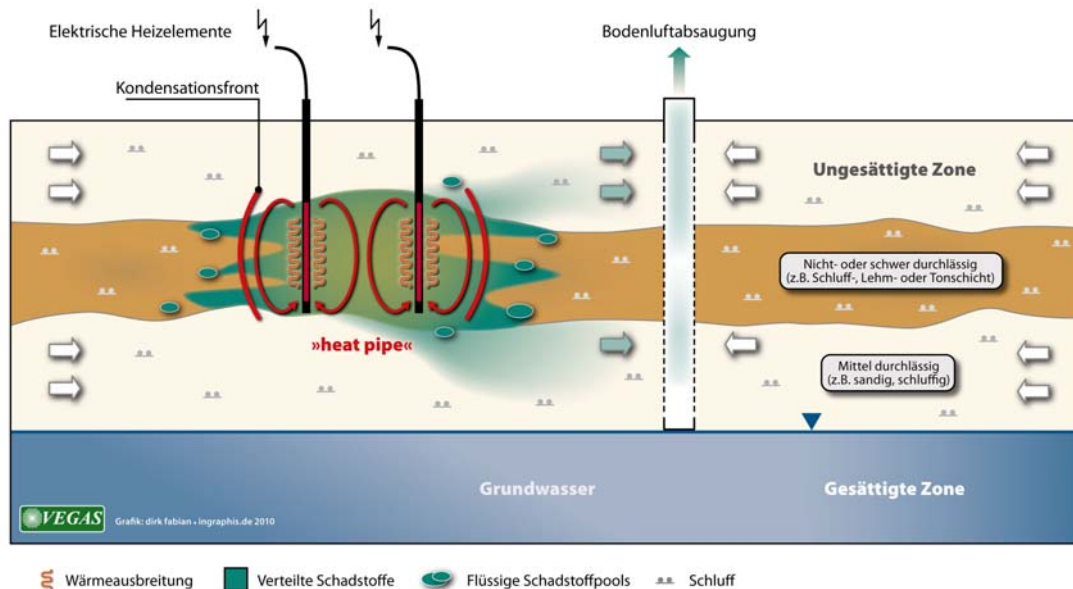
Thermisch Unterstützte Boden-Luft-Absaugung (mittels Dampf-(Luft-)Injektion) – TUBA
Anwendungsbereich <ul style="list-style-type: none"> • ungesättigte Bodenzone • Locker- und Festgesteine (klüftig) mit guter bis mäßiger Durchlässigkeit (Feinsand bis Schluff) • organische Schadstoffe LNAPL und DNAPL (nur Dampf-Luft-Injektion) • Sanierung unter Gebäuden bei Erhalt der Gebäudenutzung während der Sanierung
Anwendungsgrenzen <ul style="list-style-type: none"> • Gering durchlässige Schichten großer Mächtigkeit • schwerflüchtige Schadstoffe
Besonderheiten, Hinweise, Risiken <ul style="list-style-type: none"> • Abstand zu erdverlegten Leitungen ist zu prüfen, Anlagenbau entsprechend Chemiestandards zum kontinuierlichen Betrieb erforderlich, z.B. redundante Pumpen mit Bestimmung der maßgeblichen Stoffströme, Temperaturen und Drücke • Hohe Schadstoffaustragsraten von LNAPL und DNAPL • Deutliche Reduktion von Betriebskosten (Energiekosten) und Sanierungszeit im Vergleich zu BLA • Vollständige Reinigung der über die Gemischsiedetemperatur des entsprechenden Schadstoffs hinaus erwärmten Bereiche (Temperatur muss wenige Tage gehalten werden) • Kontrolle der Sanierung ist über Temperaturmessungen im Sanierungsfeld online gut möglich • Hydraulisch schlecht durchlässige Schichten, wie z.B. Schluff- oder Tonschichten bis zu mehreren dm Mächtigkeit können thermisch mittels konduktiver Aufheizung saniert werden. Kombination mit dem THERIS-Verfahren (Feste Wärmequellen) mit geringem Mehraufwand realisierbar, dadurch können gezielt gering leitende Schichten größerer Mächtigkeit saniert werden • Keine Flüssigmobilisierung von Schadstoffen (DNAPL und LNAPL) bei Dampf-Luft-Injektion und kontrolliertem Wärmeeintrag. Bei Sanierungen unmittelbar oberhalb des Grundwasserspiegels sollte eine Grundwassersicherung vorgesehen werden • Verfahren ist von EURODEMO als <i>Feature Technology</i> aufgenommen (http://www.eurodemo.info/feature-projects/feature-technology-tsve/), Patent DE 19707096C1
Entwicklungsstand <ul style="list-style-type: none"> • Mehrere wissenschaftlich begleitete Pilot-Anwendungen (s. Referenzprojekte) in Deutschland • Praxisreif
Rechtliche Hinweise <p>Ggf. wasserrechtliche Erlaubnis, Immissionsschutz, Arbeitsschutz. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit den zuständigen Behörden abzustimmen.</p>
Referenzprojekte / zuständige Behörden <ul style="list-style-type: none"> • Thermische Sanierung eines BTEX-Schadens: Pilotstandort Plauen 1999 / Stadt Plauen • Teilsanierung eines CKW-Schadens: Pilotstandort Mühlacker 2000/01 / Stadt Mühlacker, LUBW
Ausgewählte Literatur <ul style="list-style-type: none"> • Schmidt, R.; Färber, A.; Betz, Chr.; Koschitzky, H.-P (2000): Dampfinjektion zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Zone, Handbuch der Altlastensanierung, 2. Aufl., Dez. 2000, Nr. 5715 • Winkler, A.; Koschitzky, H.-P.; Gropper, H; Weiske, G. (2001): Statusbericht: Thermische In-situ-Sanierungstechnologien, Arbeitskreis Innovative Erkundungs-, Sanierungs- und Überwachungsmethoden, <i>altlastenforum Baden Württemberg e.V.</i>, Heft 4, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Jan. 2001. • Koschitzky, H.-P.; Hiester, U. (2005): Thermische In-situ-Sanierungen: Ökologische und ökonomische Vorteile der Verfahren TUBA und THERIS. Altlastensymposium 2005 (6. - 7. Juni 2005, Weiden i. d. OPf.), Gesellschaft zur Altlastensanierung in Bayern mbH, München, 6/2005. – S. 108-113 • Hiester, U.; Schrenk, V. (2005): In-Situ Thermal Remediation: Ecological and Economic Advantages of the TUBA and THERIS Methods. S. 1581 - 1587. - In: Uhlmann, O., Annokkée, G.-J., & Arendt, F. (2005): ConSoil 2005. Proc. 9th Int. FZK/TNO Conference on Soil-Water Systems, 3 - 7 October 2005, Bordeaux/France • Koschitzky, H.-P.; Trötschler, O.: (2008): Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung. In: Franzius, V., Altenbockum, M. & Gerhold, T. (eds.): Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement. 55. Aktual., 3. Aufl., C.F. Müller Verlag, 5/2008, 5716 ff. ISBN: 978-3-8114-9700-9
Bewertung durch den Arbeitskreis <p><i>Das Verfahren hat sich in der Erprobung als praxisreif erwiesen und kann unter entsprechenden Bedingungen als zuverlässiges, gut kontrollierbares, schnelles und kostengünstiges Verfahren eingesetzt werden. Zur zuverlässigen Dimensionierung ist allerdings Expertenwissen erforderlich. Allgemein verfügbare Dimensionierungstools liegen noch nicht vor, werden jedoch in naher Zukunft erarbeitet.</i></p>

7.1.2 Thermische In-situ-Sanierung mit Festen Wärmequellen – THERIS

Thermische In-situ-Sanierung mit Festen Wärmequellen – THERIS -

Prinzip

Bei diesem Verfahren erfolgt der Wärmeeintrag konduktiv mittels elektrisch betriebener fester Wärmequellen. Mit diesen können auch komplexe geologische Strukturen einschließlich bindiger Lagen erwärmt werden. Hierdurch werden Schadstoffe unterschiedlicher Volatilität beschleunigt in die Gasphase überführt und können so über die Bodenluftabsaugung aus dem Untergrund extrahiert werden. Diese ist Bestandteil des Verfahrens, wobei sie gegenüber der klassischen Variante der BLA auf Grund der hohen Temperaturen verfahrenstechnisch modifiziert ist.



Prinzip des THERIS-Verfahrens

Aufbau und Beschreibung

Durch den Einsatz von elektrisch betriebenen „Festen Wärmequellen“ (Betriebstemperatur mehrere hundert Grad Celsius) werden in deren Umgebung Porenwasser und Schadstoff verdampft und strömen mit der Bodenluft entlang des sich von der Wärmequelle zur kälteren Umgebung hin ausbildenden Temperaturgradienten. Mit dem Gasstrom wird Energie in Form der Verdampfungsenthalpie transportiert, die bei Kondensation in kühleren Randbereichen wieder frei wird und so eine schnelle Aufheizung des Bodenkörpers bewirkt. Gleichzeitig wird, vornehmlich in bindigen Böden, Wasser aus den kälteren, feuchten Randbereichen in Flüssigphase entgegen den Temperaturgradienten durch Kapillarkräfte in den bereits heißen Bereich transportiert und dort erneut verdampft. Im Bereich dieser Zirkulationsströmung (Heatpipe-Effekt) überwiegt durch die Strömung der Gas- und Flüssigphase der konvektive Wärmetransport, in den anderen Bereichen dominiert Konduktion. Durch die anfänglich schnelle Abnahme der Flüssigphasensättigung erhöht sich die Gasdurchlässigkeit. Infolge der Wasserdampfdestillation bei Temperaturen < 100 °C ist bei der Sanierung von leicht- und mittelflüchtigen Schadstoffen (siehe oben) zum Sanierungsende noch eine Wasserrestsättigung im Bodenkörper vorhanden. Erst nach vollständiger Trocknung des Porenraums können Temperaturen > 100 °C erreicht werden und auch schwerflüchtige Schadstoffe verdampft werden (vgl. thermische Ex-situ-Desorption). Die In-situ-Anwendung des Hochtemperaturbereiches wird in der Praxis üblicherweise aber nur für wenige, tiefliegende Schadensfälle interessant sein.

Die Reinigung der abgesaugten Bodenluft erfolgt mit konventionellen Anlagen (zum Beispiel Aktivkohlefilter, KatOx, thermische Nachverbrennung).

Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

Informationen zur Infrastruktur am Standort (vor allem Stromanschluss, u.U. hohe Leistung erforderlich), zur Gründung von Gebäuden (setzungsempfindlich?), erdverlegten Leitungen und Kanäle und zu schutzbedürftigen, temperaturempfindlichen Bauteilen.

Thermische In-situ-Sanierung mit Festen Wärmequellen – THERIS -
Anwendungsbereich <ul style="list-style-type: none"> • ungesättigte Bodenzone • Anwendung für die gesättigte Zone (geringe Durchlässigkeit) unter bestimmten Bedingungen möglich • Feinsand, Schluff, Lehm, Ton, BLA muss möglich sein (z.B. auch in überlagernden Schichten) • organische leicht- bis schwerflüchtige LNAPL und DNAPL • Sanierung unter Gebäuden bei Erhalt der Gebäudenutzung während der Sanierung
Anwendungsgrenzen <ul style="list-style-type: none"> • bisher Feldanwendungen nur in der ungesättigten Zone (UZ) • Durchlässigkeit > 10⁻⁹ m/s • Abstand der Heizelemente ist projektspezifisch abhängig von (Hydro-)Geologie, Schadstoffart, Energieverlusten, Sanierungsziel, Sanierungszeit etc • Aus der max. Länge der Heizelemente (4 – 5 m) können sich u.U. Restriktionen ergeben • Leistungsgerechte BLA (hinreichende Brunnenanzahl und -ausbau, adäquate Absaugleistung)
Besonderheiten, Hinweise, Risiken <ul style="list-style-type: none"> • Abstand zu erdverlegten Leitungen und u.ä. ist zu prüfen • erhöhte Schadstoffaustragsraten von LNAPL und DNAPL auch aus bindigen Schichten • Durchlässigkeit bindiger Schichten wird nach Aufheizung (Austrocknung) erhöht • deutliche Reduktion von Betriebskosten und Sanierungszeit (im Vergleich zur BLA) • energiesparend (im Vergleich zur BLA), wartungsarm • vollständige Reinigung der erwärmten Bereiche • Kontrolle der Sanierung über Temperaturmessungen im Sanierungsfeld online für effektive Steuerung der Sanierung und Bewertung des Sanierungsfortschritts • Kombination THERIS und TUBA mit geringem technischen Mehraufwand realisierbar • In Kombination mit dem TUBA-Verfahren (Dampf-Luft-Injektion in gut durchlässige Schichten größerer Mächtigkeit) können diese gezielt aufgeheizt, die Schadstoffe verdampft und analog der oben beschriebenen BLA abgesaugt werden • Verfahren ist von eurodemo als <i>Feature Technology</i> aufgenommen (http://www.eurodemo.info/feature-projects/feature-technology-tsve/)
Entwicklungsstand <ul style="list-style-type: none"> • praxiserprobtes Sanierungsverfahren für die ungesättigte Bodenzone (UZ) • praxisreif
Rechtliche Hinweise <p>Ggf. wasserrechtliche Erlaubnis, Immissionsschutzrechtliche Anzeige, Einhaltung Betriebssicherheitsverordnung (Konformität VDE), Arbeitsschutz. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit den zuständigen Behörden abzustimmen.</p>
Referenzprojekte / zuständige Behörde <ul style="list-style-type: none"> • THERIS Feld I, IIa, IIb / Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Freie und Hansestadt HH • THERIS Oettingen / Landratsamt Donauwörth
Ausgewählte Literatur <ul style="list-style-type: none"> • Koschitzky, H.-P., Hiester, U. (2005): Thermische In-situ-Sanierungen: Ökologische und ökonomische Vorteile der Verfahren TUBA und THERIS. Altlastensymposium 2005 (6. - 7. Juni 2005, Weiden i. d. OPf.), Gesellschaft zur Altlastensanierung in Bayern mbH, München, 6/2005. – S. 108-113 • Hiester, U., Schrenk, V. (2005): In-Situ Thermal Remediation: Ecological and Economic Advantages of the TUBA and THERIS Methods. S. 1581 - 1587. - In: Uhlmann, O., Annokkée, G.-J., & Arendt, F. (2005): ConSoil 2005. Proceedings of the 9th International FZK/TNO Conference on Soil-Water Systems, 3 - 7 October 2005, Bordeaux/France. • Hiester, U., Schrenk, V., Pietscher, F. (2006): Thermische In-situ-Sanierung mit dem THERIS-Verfahren - Erfahrungen beim Einsatz unter genutzten Gebäuden. Proceedings, DECHEMA-Tagung: In-Situ Sanierung - Trends in Forschung und Praxis (23. - 24. November 2006 Frankfurt am Main), Editor: DECHEMA Frankfurt, Eigenverlag, DECHEMA, 11/2006. • Hiester, U. (2009): Technologieentwicklung zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone mit festen Wärmequellen. Mitteilungen Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart Heft 178, ISBN: 978-3-933761-82-8
Bewertung durch den Arbeitskreis <p><i>Das Verfahren hat sich in der Erprobung als praxisreif erwiesen. Es kann unter entsprechenden Bedingungen als zuverlässiges, effizientes und kostengünstiges und erprobtes Verfahren eingesetzt werden. Expertenwissen erforderlich, allgemein verfügbare Dimensionierungstools liegen noch nicht vor.</i></p>

7.1.3 Multi-phase Extraction (MPE) – Mehr-Phasen-Extraktion / Dual-phase Extraction (DPE) – Zwei-Phasen-Extraktion

Multi-phase Extraction (MPE) – Mehr-Phasen-Extraktion / Dual-phase Extraction (DPE) – Zwei-Phasen-Extraktion

Prinzip:

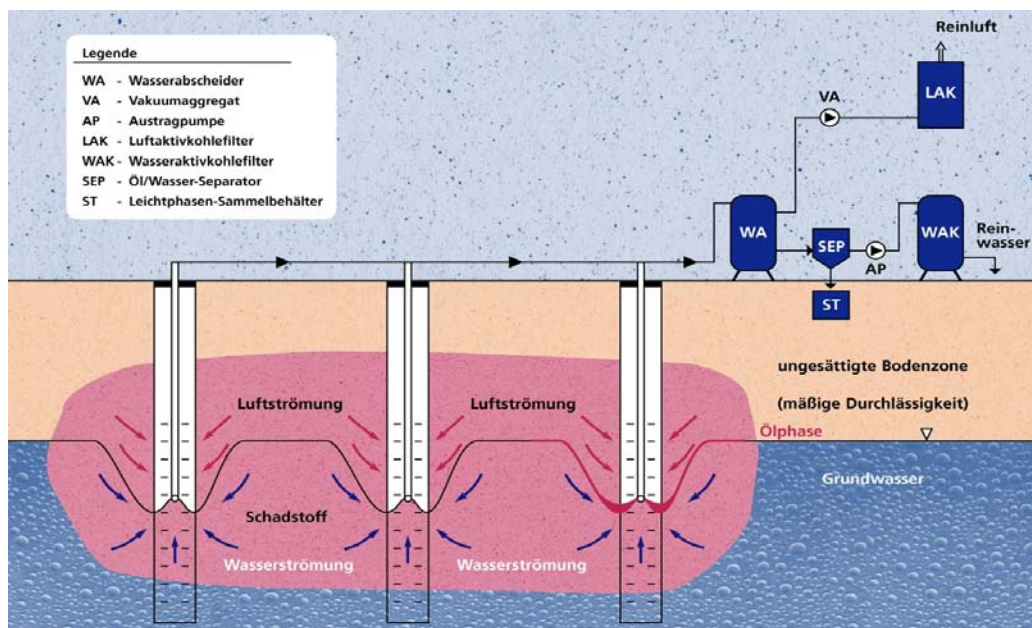
Das physikalische Prinzip des Unterdruckes, welcher im ungesättigten und gesättigten Horizont angelegt wird, bewirkt nicht nur ein Absaugen der Bodenluft, sondern auch ein Abschlüpfen des Grundwassers und - sofern vorhanden - ein Abschlüpfen einer aufschwimmenden Leichtphase.

Aufbau und Beschreibung

Unter Multi Phase Extraction (MPE), auch als Mehr-Phasen-Extraktion bezeichnet, wird die Entnahme verschiedener Fluide aus einem Brunnen mittels hohem Unterdruck (negativem Überdruck) verstanden. In der Regel wird in einem Brunnen eine dünne Sauglanze installiert, die unterhalb der Grundwasser Oberfläche endet. Ein Vakuumpumpe erzeugt einen hohen Unterdruck, so dass nach dem Strohhalm-Prinzip eine Mischung aus Grundwasser, Bodenluft und/oder aufschwimmender Leichtphase abgesaugt wird (sog. schlürfende Absaugung). Innerhalb der MPE-Anlage werden die verschiedenen Fluide in einem Flüssigkeitsabscheider wieder getrennt. Das Schlürfen führt zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels in dem Brunnen und kann u.U. geringmächtige Aquifere vollständig trockenlegen. Ein MPE-Absaugsystem saugt meist mehrere Brunnen gleichzeitig ab.

Unter Dual Phase Extraction (DPE), auch als Zwei-Phasen-Extraktion bezeichnet, wird die Absaugung bzw. Entnahme von nur zwei verschiedenen Fluiden aus einem Brunnen verstanden. Darunter kann beispielsweise die Förderung von Grundwasser bei gleichzeitiger Absaugung der Bodenluft oder die Förderung von Grundwasser bei gleichzeitiger Förderung aufschwimmender Phase verstanden werden.

Je nach Art (Gasphase, Flüssigphase, Leichtphase) der entnommenen Phase und in Abhängigkeit von deren Kontaminationsgrad werden dem MPE/DPE-Systemen entsprechende Separations- u./od. Aufbereitungsstufen nachgeschaltet (Abluftreinigung, Wasserreinigung, Öl-Wasser-Separator, Leichtphasen-Sammelbehälter). Die Technologie wird teilweise auch als vacuum-enhanced extraction bezeichnet; selten auch als Bioslurping.



Quelle: Cornelsen Umwelttechnologie GmbH, Essen

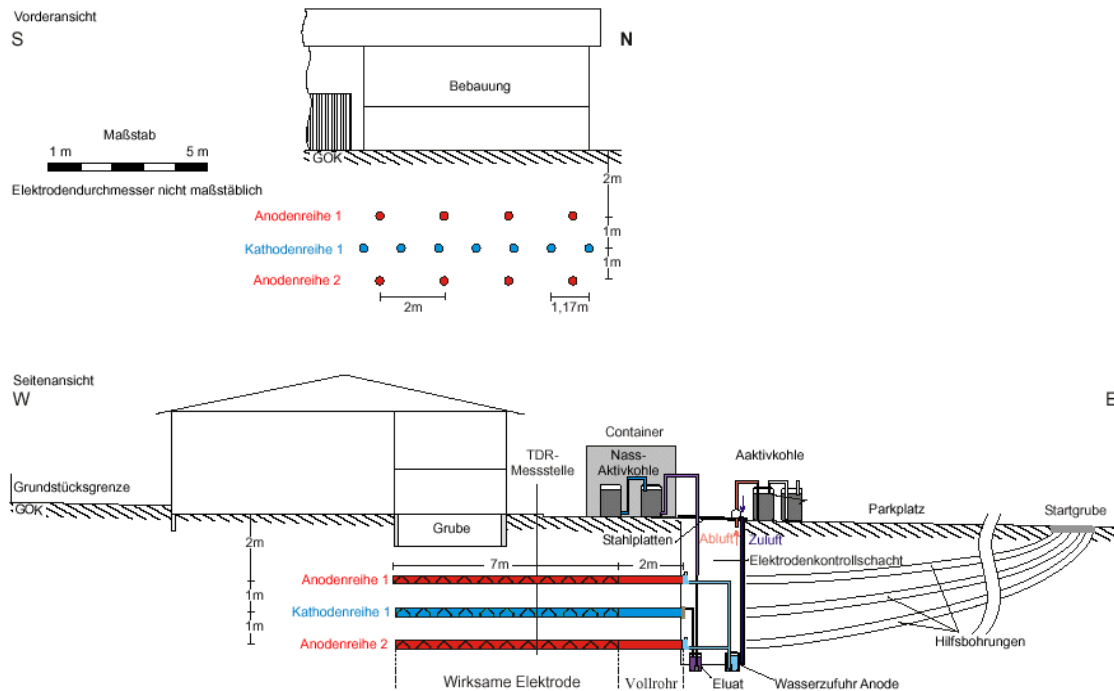
Multi-phase Extraction (MPE) – Mehr-Phasen-Extraktion / Dual-phase Extraction (DPE) – Zwei-Phasen-Extraktion
Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen Art und Eigenschaften möglicher Phase (Mächtigkeit, Ausbreitung, Konsistenz)
Anwendungsbereich <ul style="list-style-type: none"> • Quelle und deren Nahbereich • ungesättigte und gesättigte Bodenzone sowie Grundwasserwechselzone • optimal anwendbar bei mäßiger Durchlässigkeit und einer Tiefe von bis ca. 15 m • sehr geeignet zur Reinigung und Trockenlegung geringmächtiger Aquifere sowie Schicht- u. Stauwasser • gut geeignet für flüchtige organische Schadstoffe, wie zum Beispiel BTEX, Benzin, LCKW sowie aufschwimmende Produktphase (LNAPL) • aufgrund des Schadstoffspektrums kann eine Anwendung bei Tankstellenschäden und Tanklagern sinnvoll sein
Anwendungsgrenzen <ul style="list-style-type: none"> • sehr schlecht durchlässige Böden • sehr mächtige Leichtphase
Besonderheiten, Hinweise, Risiken Aufgrund der häufig zu erreichenden sehr hohen Schadstoffanreicherungen sind hohe Schadstoffgehalte in der abgesaugten Bodenluft zu erwarten. Dieses ist bei der Erstellung und dem Betrieb der MPE-Anlage und der ggf. nachfolgenden Wasser- und Gasreinigung zu beachten. Die einschlägigen Gesetze und Verordnungen für den Bau und den Betrieb solcher Anlagen bei einer Abreicherung explosionsfähiger Konzentrationen sind zu beachten.
Entwicklungsstand <ul style="list-style-type: none"> • Das Verfahren wurde in Großbritannien, Italien und in den USA bereits häufig eingesetzt und kann dort sowie auch in anderen europäischen Ländern als Stand der Technik bezeichnet werden. • In Deutschland wurde dieses Verfahren bislang jedoch nur wenig angewendet.
Rechtliche Hinweise Wasserrechtliche Erlaubnis; Ausführung nach Maschinenrichtlinie erforderlich. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit den zuständigen Behörden abzustimmen.
Referenzprojekte / zuständige Behörde <ul style="list-style-type: none"> • Bosch Gasoline Systems, Aranjuez / Provinz Madrid, Spanien • URS Belgium, Loncin / Liège / Belgien • Cornelsen Ltd., St. Athans / Wales (UK) • Pilotversuch "Preschen" (südl. der Stadt Forst, Brandenburg) der OFD Hannover / Landkreis Spree-Neiße
Ausgewählte Literatur <ul style="list-style-type: none"> • Baldwin, B. R., Nakatsu, C. H., Nebe, J., Wickham, G.S., Parks, Chr., Nies, L. (2008): Enumeration of aromatic oxygenase genes to evaluate biodegradation during multi-phase extraction at a gasoline-contaminated site. In: Journal of Hazardous Materials 163 (2009) 524-530 • Smith, J. A., Burnes, S. E. (2001): High-Vacuum Soil Vapour Extraction in a Silty-Clay Vadose Zone. In: Physicochemical groundwater remediation, Kluwer Academic/Plenum Publishers USA, ISBN 0-306-46569-8
Bewertung durch den Arbeitskreis <i>Bei geeigneten Randbedingungen, wie zum Beispiel mäßig durchlässigen Aquiferen und geringen Aquifermächtigkeiten, ist dieses Verfahren sehr gut anwendbar und zeigt im Vergleich zu konventionellen P&T-Maßnahmen und In-situ-Verfahren, die auf dem Prinzip der Injektion eines Wirkstoffes basieren, häufig bessere Resultate und deutlich verkürzte Sanierungszeiten. Dementsprechend können die Sanierungsdauer sowie -kosten bei Schadensfällen unter geeigneten Randbedingungen häufig erheblich reduziert werden.</i> <i>Die Technologie ist in zahlreichen Ländern außerhalb Deutschlands als Stand der Technik zu bezeichnen. Von daher sind umfangreiche Erfahrungswerte hinsichtlich der einzusetzenden Maschinenteknik sowie der erzielbaren Sanierungsergebnisse vorhanden.</i>

7.1.4 Elektrokinetik

Elektrokinetik

Prinzip

Das Prinzip der elektrokinetischen Bodensanierung basiert auf der Erzeugung eines elektrischen Feldes im Untergrund. Die Elektroosmose bewirkt den Transport des Porenwassers und der darin gelösten anorganischen als auch organischen Schadstoffen (zum Beispiel LCKW) im Boden. Bei der Elektrophorese wandern elektrisch geladene kolloidale Teilchen (zum Beispiel Tonpartikel) im elektrischen Feld. Die Elektrokinetik ist besonders gut für geringlässige Böden geeignet und vor allem im Bereich von Schadensherden.



Quelle: Steger (http://www.agw.kit.edu/908_958.php)

Aufbau und Beschreibung

Die Sanierungsanlage besteht aus zwei Elektroden, Anode und Kathode zwischen denen eine Gleichstromquelle angeschlossen wird. Die Elektroden sind in ein offenes oder getrenntes Zirkulationssystem integriert, in dem Wasser, die ausgetragenen Schadstoffe zirkulieren. Die Schadstoffe können in den Reservoirs angereichert, entnommen und/oder einer konventionellen Abwasserreinigungsanlage zugeführt werden.

Erforderliche Planungsgrundlagen

Eine detaillierte Erkundung des Schadensherds mit einem Raster im Meterbereich ist für die Planung unbedingt erforderlich.

Anwendungsbereich

Ungesättigte Bodenzone (Schadenherd):

- gut: Blei, Cadmium, Kupfer, Phenole und Alkohole, Chrom
- bedingt: Arsen, Cyanide (komplex), Leichtflüchtige KW (BTEX), MKW (Diesel, Schmieröle), Nickel, Pestizide, Quecksilber, PAK
- gut: Feinsand, Schluffsand, Ton
- Bedingt: Mittelsand, Ungeeignet: Kies, Bauschutt

Gesättigte Bodenzone / Grundwasser (Schadenherd)

- gut Aliphatische, aromatische KW, Arsen, Blei, Cadmium, Cobalt, Cyanide (komplex), Dioxine, Furane, Kupfer, MKW (Diesel, Schmieröle), Nickel, Phenole und Alkohole, Phosphate, Zink, Zinn
- bedingt Fluoride, Leichtflüchtige KW (BTEX), LHKW, PAK (< 4 Ringe), PAK (> 4 Ringe), ungeeignet PCB, Pestizide
- gut: Feinsand, Schluffsand, Ton
- bedingt: Mittelsand, Ungeeignet: Kies, Bauschutt

Elektrokinetik
Anwendungsgrenzen <ul style="list-style-type: none"> • Der maximale Elektrodenabstand beträgt 10 m • Die maximal angelegte Spannung sollte aus Sicherheitsgründen nicht 500 V überschreiten • In der ungesättigten Zone kann die Elektrokinetik nur in tonhaltigem und schluffigem Untergrund mit einer Wassersättigung von mindestens ca. 80 % eingesetzt werden
Besonderheiten, Hinweise, Risiken <p>Für die Nutzung der Prozesse ist es erforderlich, dass die zu sanierenden Schadstoffe in mobiler oder mobilisierbarer Form vorliegen. Vorteil des Verfahrens ist gegenüber hydraulischen und pneumatischen Verfahren die prinzipielle Einsatzfähigkeit auch bei feinkörnigen Böden mit hohem Wasserrückhaltevermögen, der Einsatz bei wechsellagigen Sedimenten (zum Beispiel Tonlinse) und der Einsatz auch bei schlecht erreichbaren Schadensherden. Allerdings befindet sich das Verfahren noch weitestgehend in der Erprobung, so dass erst wenig Erfahrung vorliegt. Die bisher durchgeführten Pilot- und Technikumsanwendungen wurden zumeist im Rahmen geförderter Forschungsvorhaben finanziert. Das "VERFAHREN ZUR BODENSANIERUNG UND BAUWERK" ist patentrechtlich geschützt (http://www.patent-de.com/20070719/DE60310272T2.html)</p>
Rechtliche Hinweise <p>Wasserrechtliche Erlaubnis, Arbeitsschutz. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit den zuständigen Behörden abzustimmen.</p>
Entwicklungsstand <ul style="list-style-type: none"> • In Erprobung. • In Deutschland wurden bislang mehrere Pilotversuche durchgeführt.
Referenzprojekte <ul style="list-style-type: none"> • USA: Zahlreiche Pilot- und Feldversuche (zum Beispiel Airbase Woensdrecht, USA) • Deutschland: Pilotversuche (Hammerwerk Söllingen, Chrom; Birkenfeld, CKW; Chemnitz, Phenole, NATO-Truppenübungsplatz Bergen, Cadmium-belastete Böden, Forschungsvorhaben Elektrokinetische Bodensanierung LCKW-kontaminierter geringdurchlässiger Böden mittels Horizontalfilterelektroden auf dem Firmengelände einer Schmuckfabrik bei Pforzheim)
Ausgewählte Literatur <ul style="list-style-type: none"> • Haus, R., Zorn, R., Czurda, K., Terfehr, S. (2002): Elektrokinetische In-Situ Sanierung. Schriftenreihe <i>altlastenforum Baden Württemberg e.V.</i>, Heft 7, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart • Virkutyte, J; Sillanpää, M.; Latostenmaa, P. (2002): Electrokinetic soil remediation — critical overview. <i>Sci. Total Environ.</i>, 298, S. 97–121 • Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.) (2005): In-situ-Sanierung schadstoffbelasteter Böden mit elektrokinetischen Verfahren. Abschlussbericht zum gleichnamigen FuE-Vorhaben im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Augsburg, 77 S. • Steger, H. (2006): Elektrokinetische In-situ-Sanierung LCKW-kontaminierter gering durchlässiger Lockergesteine.- Dissertation Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
Bewertung durch den Arbeitskreis <p><i>Die Prüfung einer Anwendung sollte allenfalls in kleinräumigen Bereichen und bei geeigneten geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen in Erwägung gezogen werden.</i></p>

7.2 Verfahren für die gesättigte Bodenzone

Zur Anwendung in der gesättigten Bodenzone stehen die folgenden innovativen physikalischen In-situ-Sanierungsverfahren zur Verfügung:

- Airsparging
- Dampf-Luft-Injektion in der gesättigten Bodenzone
- Alkoholspülung
- Tensidspülung

Mit Ausnahme von Airsparging, das in der Schadstofffahne zur Anwendung kommt, sind alle genannten physikalischen Verfahren zur Anwendung im Bereich der Schadstoffquelle vorgesehen.

Organische Schadstoffe können auch aus dem Grundwasser über Verdampfung in gasförmiger Form entfernt werden. Bei der thermisch unterstützten In-Situ-Sanierung mit Dampf-Luft-Injektion (DLI) im Grundwasser wird ein heißes Wasserdampf-Luft-Gemisch in die gesättigte Zone im bzw. unterhalb des Schadenszentrums injiziert.

In einem Gemisch aus Wasser und Schadstoff(en) beginnen die Schadstoffe bereits bei Erreichen der Gemischsiedetemperatur („eutektische Temperatur“), d.h. Temperaturen unterhalb der Siedetemperatur (für Wasser 100°C bei Atmosphärendruck), vollständig zu verdampfen. Zum Beispiel liegt die Gemischsiedetemperatur des Schadstoffs PCE in Wasser bei ca. 88°C.

Die gasförmigen Schadstoffe werden dann von der injizierten Luft als „Transportmedium“ aus dem Grundwasser in die ungesättigte Zone ausgetragen und können dort abgesaugt werden. Unter Umständen zusätzlich im Grundwasser gelöste Schadstoffe werden mittels einer Grundwasserhaltung entfernt. Thermische Verfahren können insbesondere simultan in der Ungesättigten Bodenzone (UZ) und im Grundwasser (GW) bei inhomogenem Untergrund eingesetzt werden (Abb. 7.1).

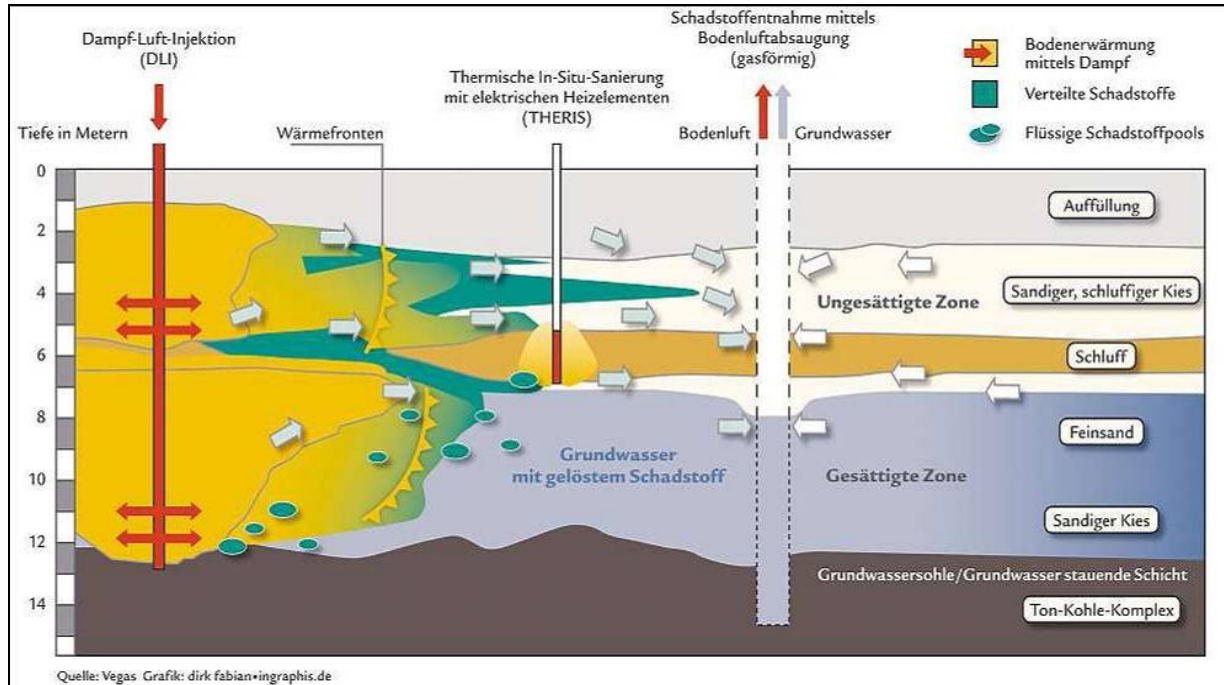


Abbildung 7.1: Einsatz thermischer In-situ-Verfahren bei inhomogenen Untergrund: Dampf-Luft-Injektion in der gesättigten und ungesättigten Zone in Kombination mit THERIS für den Bereich geringer Durchlässigkeit

Die mittels Tensidspülung oder Alkoholeinsatz im Untergrund freigesetzten Schadstoffe sind ebenfalls hydraulisch zu fassen und zu fördern, um eine unkontrollierte Ausbreitung im Grundwasserabstrom zu verhindern.

Bei diesen physikalischen Verfahren ist eine hydraulische Abstromsicherung erforderlich.

7.2.1 Airsparging

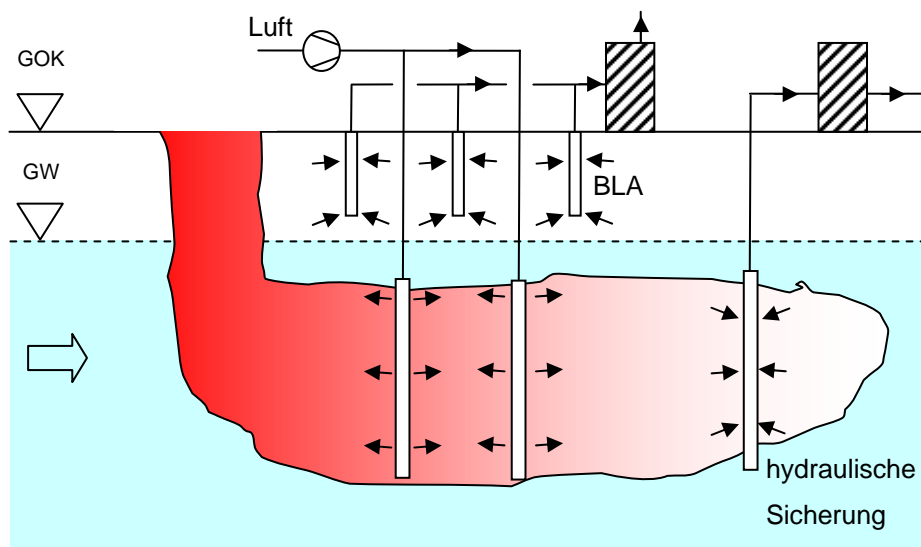
Airsparging

Prinzip

Airsparging basiert auf dem physikalischen Prinzip der Desorption. Im Grundwasser vorhandene leichtflüchtige organische Verbindungen sollen durch einen Lufteintrag in den Aquifer in die Gasphase überführt und somit aus dem gesättigten Horizont ausgetragen werden.

Aufbau und Beschreibung

Airsparging bezeichnet die Injektion atmosphärischer Luft in den Grundwasserleiter. Die Luftinjektion führt zur Ausbildung eines kegelförmigen Bereiches von fein verästelten Kanälen, durch die die Luft in die ungesättigte Bodenzone strömt. Der Übertritt schadstoffhaltiger Luft in die ungesättigte Bodenzone erfordert eine begleitende Bodenluftabsaugung, bei welcher das Absaugvolumen deutlich über dem Einblasvolumen liegt. Die zumeist diskontinuierlich durchgeführte Einblasung von Luft erfolgt meist im unteren Bereich des Aquifers bzw. unterhalb des kontaminierten Tiefenbereiches. Eine begleitende Sicherung des Grundwassers im Unterstrom ist erforderlich.



Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

- Vorhandensein möglicher Leichtphasen

Anwendungsbereich

- Gesättigte Bodenzone
- Flüchtige Schadstoffe
- Schadstofffahne

Anwendungsgrenzen

- Aufschwimmende Phase (kontaminierter Bereich könnte bzw. würde vergrößert werden; Entstehung explosionsfähiger Gemische in der wasserungesättigten Bodenzone/Brunnen)
- Hohe Eisengehalte im Grundwasser (es kann zu einer Verblockung des Aquifers kommen)
- Gespannte und stark heterogene Aquifere; schlecht durchlässige Aquifere
- Kellerräume über dem „Spargingbereich“ (niederchlorierte LCKW oder andere Schadstoffe könnten in den Keller migrieren)
- Zu Beginn der Maßnahmen kann höher belastetes GW vom Gelände abströmen (Mobilisierung von Schadstoffen)

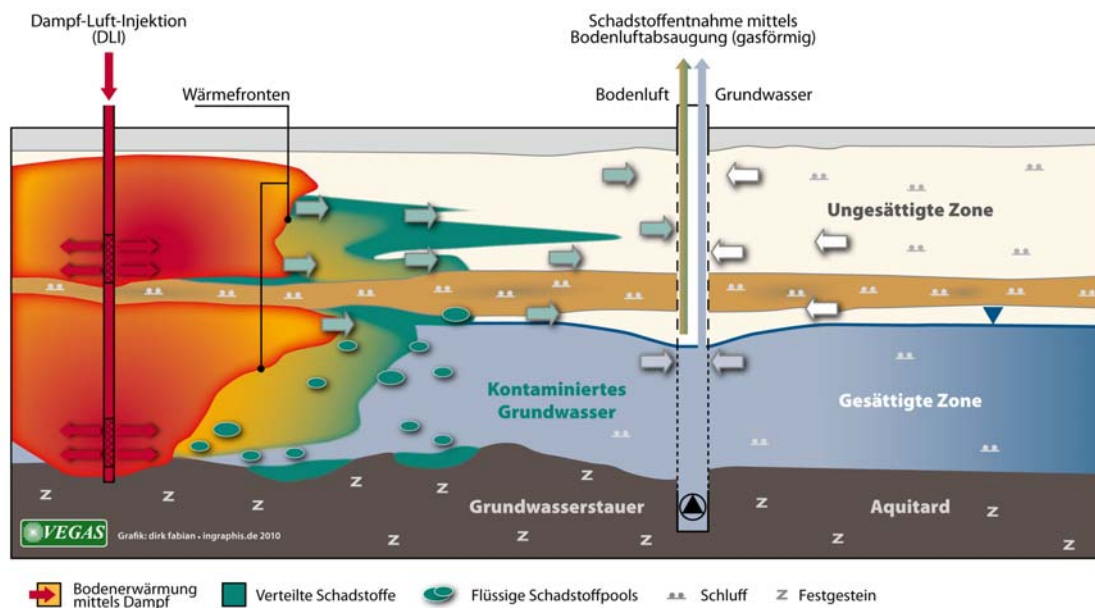
<p>Airsparging</p> <p>Besonderheiten, Hinweise, Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Im Idealfall muss das Grundwasser nicht zusätzlich über Pump-and-treat saniert werden. • Ein Problem bei der Anwendung dieses Verfahrens können bevorzugte Strömungswege für Luft sein. Dadurch ergeben sich Schwierigkeiten mit der gleichmäßigen Verteilung der Luft. Daher ist ein gut durchlässiger und homogener Aquifer Voraussetzung. • Die in die ungesättigte Bodenzone überführten Schadstoffkonzentrationen bestimmen die Ausführung und den Betrieb der begleitenden Bodenluftabsaugungsanlage. Einschlägige Gesetze und Vorschriften sind zu beachten. • Besonders in den 90-iger Jahren wurde dieses Verfahren häufiger angewendet. Daher sind ausreichende Erfahrungswerte über Möglichkeiten und Grenzen dieser Technologie vorhanden. Häufige und gute Anwendbarkeit bei typischen Tankstellenschäden sowie Tanklagern.
<p>Entwicklungsstand</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stand der Technik in Deutschland / Europa / USA; • in Deutschland weit mehr als 500 Anwendungsfälle.
<p>Rechtliche Hinweise</p> <p>Wasserrechtliche Erlaubnis. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.</p>
<p>Referenzprojekte / zuständige Behörde</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ehem. Tankstelle Düsseldorf / Stadt Düsseldorf, Umweltamt • Ehem. Raffinerie und Tanklager Düsseldorf / Stadt Düsseldorf, Umweltamt • Ehem. Tankstelle Freiburg / Stadt Freiburg, Umweltschutzamt • Ehem. Großtanklager in Dessau / Landesanstalt für Altlastenfreistellung Sachsen-Anhalt
<p>Ausgewählte Literatur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA NRW) (Hrsg.) (2001): Arbeitshilfe Bodenluftsanierung – Ergebnisse einer Recherche zum Stand der Bodenluftsanierungspraxis mit Handlungsempfehlungen für die Planung und Durchführung von Bodenluftsanierungsmaßnahmen. Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz (MALBO), Bd. 13, Essen. • Leeson, A., Johnson, P.C., Johnson, R.L., Vogel, C.M., Hinchee, R.E., Marley, M., Peagrin, T., Bruce, C.L., Amerson, I.L., Coonfare, C.T., Gillespie, R.D., McWhorter, D.B.(2002): Air Sparging Design Paradigm. Battelle, Columbus, Ohio • Fields, K., Gibbs, J., Condit, W., Leeson, A., Wickramanayake, G. (2002): Air Sparging: A Project Manager's Guide. Battelle Press, Columbus, OH, 2002, 170 pp., ISBN: 1-57477-130-2 • Karg F., Hintzen U., Portune T., Domalski, R. (2007): Feldtesterfahrungen zur Anwendung der DNBA zur Prozessoptimierung: Standort Rütgers Chemicals AG Hanau. In: <i>altlasten spektrum</i> 2/2007, S. 61-67 • Widmann, S., Karg, F., Hintzen, U., Portune, Th. (2008): Fallbeispiel „PAK-Schadensfall“. In: <i>altlasten annual</i> 2007, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden 2008. • Suttka, R., Hintzen, U., Buhl, J. (2005): Projektbeispiel: Feldversuch zum Abbau von Kohlenwasserstoffen auf einem Tanklagergelände in Hamm. In: Tagungshandbuch 7. Symposium Natural Attenuation, 21. – 22.11.2005, DECHEMA e.V., Frankfurt, Frankfurt.
<p>Bewertung durch den Arbeitskreis:</p> <p><i>Im Regelfall ist diese Methode bei vorhandener BLA und Sicherung des GW-Abstroms einfach und schnell umsetzbar. Da wenig zusätzliche Anlagentechnik notwendig ist und zumeist nur geringe Kosten für Technik und Steuerung anfallen, handelt es sich um eine preiswerte und ergänzende Sanierungsmethode. Häufig sind schnelle Abnahmen der Schadstoffkonzentrationen zu beobachten.</i></p>

7.2.2 Dampf-Luft-Injektion in der gesättigten Bodenzone (DLI)

Dampf-Luft-Injektion in der gesättigten Bodenzone (DLI)

Prinzip

Bei der Injektion des Wasserdampf-Luft-Gemisches in die gesättigte Bodenzone breitet sich - in Abhängigkeit von der injizierten Dampftrate und der Durchlässigkeit - ein geschlossener Dampfraum (im Idealfall radialsymmetrisch) mit Radien zwischen 1 – 5 m um die Injektionsstelle aus. Durch die Abgabe seiner Verdampfungsenthalpie wird der zu sanierenden Bereich erwärmt. Im dampferfüllten Bereich werden die flüssigen, leicht- bis mittelflüchtigen organischen Schadstoffen verdampft und in die Gasphase überführt. Die mit dem Dampf injizierte Luft strömt als inertes Trägergas von der Injektionsstelle bis zur Dampffront, nimmt dabei die gasförmigen Schadstoffe auf und transportiert diese aus dem Grundwasserkörper (Aquifer) nach oben in die ungesättigte Bodenzone, ähnlich dem Air-Sparging, jedoch mit erheblich größerer Beladung. Die gaseitige Entfernung der Schadstoffe erfolgt über eine Bodenluftabsaugung.



Aufbau und Beschreibung

Anlagentechnisch ist neben einem Dampferzeuger und einem Kompressor zur Erzeugung und Injektion des Dampf-Luft-Gemisches eine Anlage zur Bodenluftabsaugung erforderlich. Mit der Bodenluftabsaugung (BLA) werden die Kontaminanten aus der ungesättigten Zone abgesaugt. Die BLA beinhaltet einen Wärmetauscher mit Kondensatabscheider, einen Verdichter sowie die Abluftbehandlung (zum Beispiel Luftaktivkohle, thermische Nachverbrennung (TNV), katalytische Verbrennung (KatOx)). Erforderliches Kühlwasser kann über die hydraulische Sicherung bereit gestellt werden. Das Grundwasser sollte mittels Wasseraktivkohle aufbereitet werden. Eine entsprechende Wasseraufbereitung wird zur Behandlung des anfallenden wässrigen Kondensats aus der heißen Bodenluft eingesetzt. Dem Kondensatabscheider sollte ein Phasenabscheider zur Trennung der wässrigen und in der Regel anfallenden organischen Flüssigkeit nachgeschaltet werden. Die getrennte organische bzw. wässrige Phase ist gesondert zu behandeln bzw. zu entsorgen.

Der Betrieb einer Grundwasserhaltung sichert die Entnahme der verstärkt wassergelösten Schadstoffe und schützt vor einer abstromigen Verfrachtung.

Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

Informationen zur Infrastruktur am Standort (Wasser-, Strom-, Gas-, Abwasseranschluss), zur Gründung von Gebäuden, Leitungen und Kanäle im Untergrund und zu temperaturempfindlichen Bauteilen. Informationen zur vertikalen Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit im Aquifer zur Reichweitenabschätzung (Pumpversuche, Flowlog-Messungen), Gastracer-Versuch für UZ empfehlenswert.

Anwendungsbereich

- Schadstoffquellen in der gesättigten Bodenzone
- Lockergesteine (Feinsand bis Schluff) mit hydr. Durchlässigkeit k_f : 5×10^{-5} bis 1×10^{-3} m/s
- organische Schadstoffe LNAPL und DNAPL (leicht- und mittelflüchtig mit Siedetemp. bis 180°C)
- Sanierung unter Gebäuden bei Erhalt der Gebäudenutzung während der Sanierung

<p>Dampf-Luft-Injektion in der gesättigten Bodenzone (DLI)</p>
<p>Anwendungsgrenzen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Auf Grund der Pilotanwendungen kann bei anisotropen Schichtungen und Durchlässigkeiten im Bereich zwischen $k_f \sim 0,5 - 5 \times 10^{-4}$ m/s derzeit von einer „thermischen Reichweite“ von 3 - 5 m Radius bei einer Injektionsrate von 150 kg/h Sattedampf (1 m Filterstrecke) ausgegangen werden. • Bei BTEX-Kontaminationen sollte die Injektion zusätzlich in die ungesättigte Zone und insbesondere in den Grundwasserwechselbereich erfolgen.
<p>Besonderheiten, Hinweise, Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keine Flüssigmobilisierung von Schadstoffen (DNAPL und LNAPL) • Kontrolle der Sanierung über Temperaturmessungen im Sanierungsfeld online für effektive Steuerung der Sanierung und Nachweis der Dampfausbreitung und des Sanierungserfolgs • Hydraulisch schlecht durchlässige Schichten, wie zum Beispiel Schluff- oder Tonschichten bis zu mehreren dm Mächtigkeit, können thermisch mittels konduktiver Aufheizung saniert werden • Pilotanwendung zur Reichweitenbestimmung wird empfohlen • Geringe Sanierungszeiten bei vollständiger Reinigung der über die Gemischsiedetemperatur des entsprechenden Schadstoffs hinaus erwärmten Bereiche • Da sich der Dampf in der gesättigten Zone horizontal und vertikal nach oben im Aquifer ausbreitet, können die gesättigte und die ungesättigte Zone simultan gereinigt werden • Bei Zwischenstauer, zum Beispiel Schluff- oder Tonlinsen, strömt der Dampf unterhalb der hydraulisch schlecht durchlässigen Bereiche („steam-override“) und wärmt den darüber anstehenden Boden über flächenhafte Konduktion auf. Die Schadstoffe werden verdampft und gelangen gasförmig in die darüber liegenden Bereiche und können über die BLA erfasst werden. Etwaig kondensierte Schadstoffe werden durch die „nachrückende“ Wärme wieder verdampft • Durch Kombination mit dem THERIS-Verfahren werden gezielt geringleitende Schichten größerer Mächtigkeit in der ungesättigten Zone über Wärmeleitung auf die Gemischsiedetemperatur aufgeheizt, die Schadstoffe verdampft und die schlecht durchlässige Schicht thermisch saniert
<p>Entwicklungsstand</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mehrere wissenschaftlich begleitete Pilot-Anwendungen (s. Referenzen) in Deutschland. • Praxisreif im Porengrundwasserleiter, in Erprobung im Kluffgestein.
<p>Rechtliche Hinweise</p> <p>Wasserrechtliche Erlaubnis, Immissionsschutz, Arbeitsschutz. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit den zuständigen Behörden abzustimmen.</p>
<p>Referenzprojekte / zuständige Behörde</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thermische Sanierung eines CKW-Schadens in Albstadt mittels Dampf-Luft-Injektion (September 2003 – Februar 2004), Auftraggeber: Mettler-Toledo / Landratsamt Zollern-Alb. • Pilotanwendung Dampf-Luft-Injektion in Karlsruhe-Durlach als Grundlage der Sanierungsplanung (Juni 2005 – Oktober 2005) / Stadt Karlsruhe Umweltamt. • Thermische In-situ-Pilotanwendung ehemaliges Hydrierwerk Zeitz (Testfeld I) (Mai 2007 – Dezember 2007) / Landratsamt Burgenlandkreis. • Pilotanwendung, CKW-Sanierung im geklüfteten Festgestein: ehem. Verbrennungsplatz Biswurm, (März – Oktober 2009) / Stadtbauamt Villingen-Schwenningen
<p>Ausgewählte Literatur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Trötschler, O., Koschitzky, H.-P., Ochs, S.O., Denzel, S., Stöckl, K. (2006): Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone: Pilotanwendung zur Sanierungsplanung an einem innerstädtischen Standort im Rheintal. In: Braun, J.; Koschitzky, H.-P., Stuhmann, M. (Hrsg.), Eigenverlag, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 9/2006.-Nr.:150, S. 60-70 - ISBN: 3-933761-53-0 • Koschitzky, H.-P., Trötschler, O.; Limburg, B., Hirsch, M., Weiß, H. (2007): Pilotanwendung DLI Zeitz: Erste Ergebnisse der thermischen Sanierung des Kernbereichs eines Benzolschadens mittels Dampf-Luft-Injektion. In: Braun, J.; Koschitzky, H.-P. & M. Stuhmann (Hrsg.), Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 9/2007.-Nr.:165, S. 52 - 62 - ISBN: 3-933761-69-7 • Koschitzky, H.-P., Trötschler, O. (2008): Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung. In: Franzius, V., Altenbockum, M. & Gerhold, T. (eds.): HdA. 55. Aktual., 3. Aufl. C.F. Müller Verlag, 5/2008, 5716 ff. ISBN: 978-3-8114-9700-9
<p>Bewertung durch den Arbeitskreis</p> <p><i>Das Verfahren hat sich in der Erprobung als praxisreif erwiesen und kann unter entsprechenden Bedingungen als zuverlässiges, gut kontrollierbares, schnelles und kostengünstiges Verfahren eingesetzt werden. Zur zuverlässigen Dimensionierung ist allerdings Expertenwissen erforderlich. Allgemein verfügbare Dimensionierungstools liegen noch nicht vor, werden jedoch in naher Zukunft erarbeitet.</i></p>

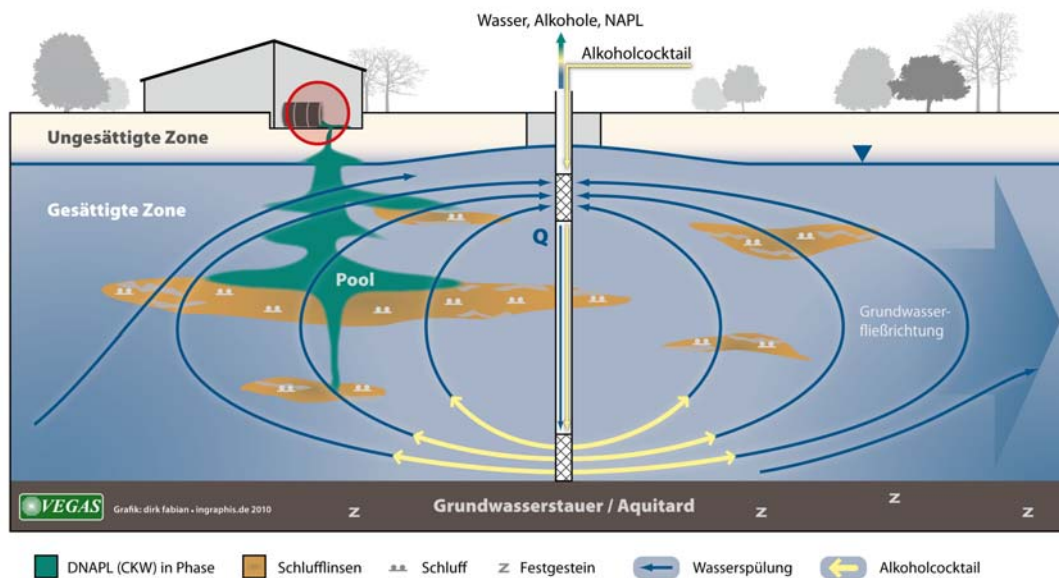
7.2.3 Alkoholspülung

Alkoholspülung

Prinzip

Zur Sanierung von DNAPL (dense NAPL) Schadensfällen eignet sich eine Mischung aus Wasser und je einem hydrophilen und lipophilen Alkohol (Alkoholcocktail). Beide Alkohole setzen die Grenzflächenspannung zwischen Wasser und dem NAPL herab. Der lipophile (schwellende) Alkohol dringt in die Schadstoffphasen ein, verringert deren Dichte wodurch aus einem DNAPL ein LNAPL wird. Der hydrophile (nicht schwellende) Alkohol ist notwendig damit der lipophile (schwellende) Alkohol wasserlöslich und der Alkoholcocktail hydraulisch kontrollierbar ist. Dadurch entsteht ein Einphasengemisch aus Alkohol-Schadstoff und Wasser, das kontrolliert abgepumpt werden kann. Dadurch wird die Gefahr einer unkontrollierten Verlagerung des DNAPL vermieden.

Zur weiteren Sicherung ist bei der Sanierung von DNAPL-Schadensfällen eine aufwärtsgerichtete Strömung notwendig.



Alkoholspülung mit Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB)

Aufbau und Beschreibung

Ziel einer wirtschaftlichen Sanierung ist der schnelle und kontrollierte Austrag von Schadstoffen entweder in gelöster Form oder als freie Phase. In Abhängigkeit der Schadstoffeigenschaften werden unterschiedliche Alkohole zur Sanierung von NAPL (non-aqueous phase liquid) Schadensfällen eingesetzt. Auf verschiedene NAPL speziell abgestimmte Alkoholmischungen solubilisieren und mobilisieren den Schadstoff. Über Brunnen(-anordnungen) oder Lanzen können diese Alkoholgemische gezielt in kontaminierte Bodenzonen zugegeben werden. Kontaminierte Bereiche werden durchspült und das Alkohol-Schadstoff-Wasser-Gemisch wird abgepumpt. Aus ökologischen und ökonomischen Gründen wird dieses „Abwasser“ aufbereitet, ein Großteil des Alkohols zurück gewonnen und für weitere Alkoholspülungen eingesetzt.

Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

- Genauer Kenntnis der Lage der Schadensherde, insbesondere von NAPL Phasenkörper ist wichtig
- Zusammensetzung der Schadstoffe (Einzelstoffe, Gemische?) zur Auswahl der Alkohole
- Einleitbedingungen zum Beispiel ins Kanalnetz

Anwendungsbereich

- Quellensanierung organische Schadstoffe, LNAPL und DNAPL
- gesättigte Bodenzone
- Lockergesteine (Kies bis Feinsand), mittlere bis gute Durchlässigkeit

Anwendungsgrenzen

Abreinigung von bindigen Schichten nicht möglich

<p>Alkoholspülung</p> <p>Besonderheiten, Hinweise, Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rückgewinnung der eingesetzten Alkohole aus wirtschaftlichen Gründen erforderlich, technisch ist dies möglich ▪ Es kann die Gefahr der unkontrollierten Schadstoffverlagerung in tiefere Bereiche im Aquifer bestehen ▪ Hydraulische Sicherung ist erforderlich, Voraussetzung für wasserrechtliche Erlaubnis
<p>Entwicklungsstand</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Verfahrensentwicklung im Technikum ist abgeschlossen durch drei Forschungsvorhaben mit Großbehälterversuchen bei VEGAS an der Universität Stuttgart und am Institut für Hydromechanik an der Universität Karlsruhe • In Erprobung, Pilot-Anwendung in Deutschland mit wissenschaftlicher Begleitung steht noch aus
<p>Rechtliche Hinweise</p> <p>Wasserrechtliche Erlaubnis. In Baden-Württemberg liegt ein mit dem Umweltministerium abgestimmtes Papier vor, das die Einleitung von Alkoholen zum Zwecke der Altlastensanierung aus wasserrechtlicher Sicht erlaubt, sofern gewisse Randbedingungen und Auflagen eingehalten werden. Interner Aktenvermerk Nr. 35, 20.12.2002, VEGAS, Universität Stuttgart, basierend LAWA-Sitzung am 17.06.1994 und Vermerk UM-BaWü 15.04.1994, Az.: 31-8984.00.</p> <p>Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.</p>
<p>Referenzprojekte / zuständige Behörde</p> <ul style="list-style-type: none"> • Noch keine Feldprojekte vorhanden, jedoch Großbehälterversuche bei VEGAS.
<p>Ausgewählte Literatur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Greiner, P., Braun, J., Schnieders, J. und H.-P. Koschitzky (2002): Injektion von Alkoholcocktails zur In-situ-Sanierung von CKW-Schadensherden in Grundwasserleitern. In: VEGAS-Statuskolloquium 2002. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Stuttgart, S. 95-102 • Braun, J., Greiner, P. Koschitzky, H.-P., Schnieders, J., Weber, K. (2003): Übersicht über Technologieentwicklungen zur NAPL-Sanierung mittels Alkoholcocktails. In: Schrenk, Batereau, Barczewski, Weber, Koschitzky (Hrsg.): Symposium Ressource Fläche und VEGAS-Statuskolloquium 2003, Mitteilungen Heft 124, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, ISBN 3-933761-27-1 • Mohrlök, U., Greiner, Ph., Heinrich, K., Trötschler, O., Schnieders, J., Jirka, G.H., Koschitzky, H.-P., Braun, J. (2005): Entwicklung einer weitergehenden Grundwassersanierungstechnologie zur Abreinigung von anthropogenen chlorierten Kohlenwasserstoffen hoher Dichte (CKW) durch Alkoholinjektion. Abschlussbericht des gleichlautenden BMBF-Projekts, Institut für Hydromechanik, Karlsruhe, Institut für Wasserbau Stuttgart • Stupp, H. D.; Bakenhus, A.; Stauffer, Lorenz, D. (2005): Sanierungsoptimierung von CKW-Grundwasserschäden – Möglichkeiten zur Reduzierung der Sanierungskosten. <i>altlasten spektrum</i> 6/2005, S.313-322.
<p>Bewertung durch den Arbeitskreis</p> <p><i>Dieses neu entwickelte Verfahren wurde bisher noch nicht unter Feldbedingungen eingesetzt. Es ist in Deutschland dem Grunde nach genehmigungsfähig (s. rechtliche Hinweise.), sofern „beherrschbare hydraulische Verhältnisse am Standort vorliegen (Sicherung), um den großräumigen Schutz des Grundwassers durch geeignete Maßnahmen zu gewährleisten“.</i></p>

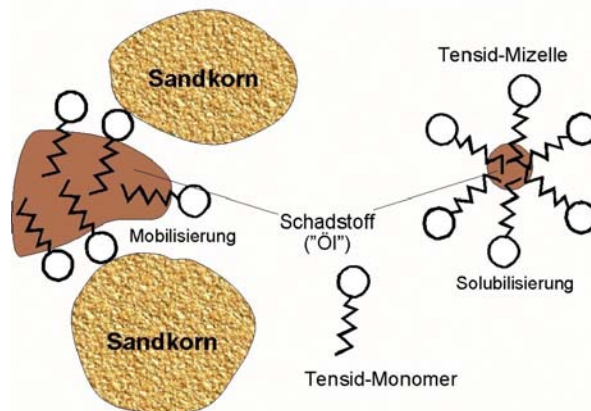
7.2.4 Tensidspülung

Tensidspülung

Prinzip

Durch die Injektion von Tensiden ins Grundwasser werden die Grenzflächenspannungen zwischen Schadstoff und Bodenmatrix und damit die kapillare Adhäsion erheblich verringert (Tensidkonzentration, kritische Mizellenkonzentration). Hierdurch können im Falle von LNAPL im Grundwasser in disperser Produktphase vorliegende Schadstoffe (Schadstoffquellen) wieder fließfähig werden (Tensidkonzentration < kritische Mizellenkonzentration = Mobilisierung) und hydraulisch gefördert (abgeschöpft) werden.

Bei höheren Tensidkonzentrationen (0,5-2 % je nach Tensid, Tensidkonzentration > kritische Mizellenkonzentration) wird die (scheinbare) Löslichkeit der Schadstoffe um mehrere Zehnerpotenzen erhöht (Solubilisierung). Dabei werden hydrophobe Schadstoffe in Mizellen eingeschlossen. Der Schadstoff wird dadurch im Wasser aufgenommen (gelöst) und kann als mizellare Lösung direkt mit dem Grundwasser abgepumpt werden.



Bildquelle: Memminger, B. (2006)

Aufbau und Beschreibung

Einbringung der Tensidlösung (anionische, nichtionische und kationische Tenside) in die gesättigte Zone mittels Injektionsbrunnen, Abpumpen der Schadstoffphase bzw. des Schadstoff-Tensid-Wassergemisches, spezielle Aufbereitung und Trennung der Phasen on-site. Die Überwachung der Tensidausbreitung durch Messung der Oberflächenspannung in Wasserproben ist möglich. Zusätzlich zu den Extraktionsbrunnen (Sanierungsbrunnen) wie beim „klassischen“ Pump & Treat, sind für die Tensidzugabe Injektionsbrunnen einzuplanen. Alternativ kann die Tensidzugabe und Verteilung im Aquifer über Grundwasserzirkulationsbrunnen erfolgen, über die dann auch die Entnahme der solubilisierten Schadstoffe erfolgen kann.

Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

- Ermittlung der hydraulischen und geochemischen (pH-Wert, Fe- und O₂-Gehalt, Feinkornanteile) Aquiferbedingungen
- Genaue Kenntnis über die Lage und Art der Schadstoffquelle (Schadensherd)
- Umfängliche Vorversuche zur Auswahl und Eignung der Tenside für die zu entfernenden Schadstoffe und Bestimmung der Wirkkonzentration
- Genaue lithologische Kenntnisse
- Ermittlung der Tensid-Verteilung im Untergrund

Anwendungsbereich

- Sanierung von Schadstoffquellen, keine Sanierung von Schadstofffahnen
- Gute bis mittlere Durchlässigkeit des Aquifers
- Lockergestein (Kies bis Feinsand)
- Organische Schadstoffe wie z.B. MKW (Mineralölkohlenwasserstoffe) in Phase und Restsättigung
- In Abhängigkeit vom Schadstoff DNAPL – LNAPL ist bei der Mobilisierung das mögliche Absinken von Schwerphase in tiefere Aquiferbereiche bzw. Aquifere zu berücksichtigen

Tensidspülung
Anwendungsgrenzen <ul style="list-style-type: none"> • Grundwassergering-/nichtleiter sowie Kluffgrundwasserleiter • Kontaminationstiefe in Abhängigkeit vom Infiltrationsdruck
Besonderheiten, Hinweise, Risiken <ul style="list-style-type: none"> • Eine begleitende hydraulische Sicherung ist zwingend erforderlich • Durch die Mobilisierung besteht insbesondere bei Schwerphasen die Gefahr der Schadstoffverlagerung in tiefere Bereiche im Aquifer oder in geringer durchlässigere Bereiche (Schichten). Aufgrund der Dichte ist dies besonders bei CKW zu beachten • Selbst wenn die Solubilisierung der CKW angestrebt wird, besteht die Gefahr des Absinkens, da vor der Solubilisierung (hohe Tensidkonzentration erforderlich) der Mobilisierungseffekt (bei kleinen Tensidkonzentrationen) einsetzt • Bei manchen Tensiden ist durch den raschen mikrobiologischen Abbau und die starke Bildung von Biomasse eine Verblockung (Clogging) des Aquifers möglich. Es kann zur Verschleimung der Brunnen- und Reinigungs-Anlage kommen • Entstehung von Metaboliten bei CKW, cometabolischer Abbau von Per zu cis wurde schon beobachtet • Tenside sind aggressiv und können zu Dichtigkeitsproblemen in der Anlagentechnik (Weichmachereffekte) führen • Die Auswahl geeigneter Tenside sollte standortspezifisch (Boden und Schadstoff) in Laborversuchen mit Standortmaterial erfolgen • Ggf. fallen Lizenzgebühren für spezielle Tenside an
Entwicklungsstand <ul style="list-style-type: none"> • Vielzahl von Pilotprojekten in den USA in den 90-er Jahren, weitgehend praxistaugliches Verfahren zur Grundwassersanierung bei MKW-Schäden (LNAPL) • Technologie nur unter gut kontrollierbaren Bedingungen einsetzbar, teilweise jedoch noch in der Entwicklung • Wenige Sanierungsanwendungen in Deutschland, vornehmlich kleinskalige Projekte
Rechtliche Hinweise Wasserrechtliche Erlaubnis. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.
Referenzprojekte / zuständige Behörde <ul style="list-style-type: none"> • CKW-Sanierung AAV-NRW; Altstandort einer chem. Reinigung in Rheine / Kreis Steinfurt • CKW-Sanierung Stadt Bremen, Altstandort einer ehem. Silberwarenfabrik / Stadt Bremen
Ausgewählte Literatur <ul style="list-style-type: none"> • Roth, U., von Mücke, T., Konertz, K., Adolphi, P. (2007): STL-Pilotversuch zur Dekontamination von CKW-Phasenverunreinigungen in der gesättigten Bodenzone. <i>altlasten spektrum</i>, 16. Jg., 06/2007, S. 257 – 263 • Schulz, P. (2005): Verfahren zur Sanierung CKW – belasteter Böden und Grundwasser – Einsatz oberflächenaktiver, mikrobiologisch wirksamer Substanzen. Fachtagung Grundwassersanierung in der Praxis, Altlastensanierungs- und Altlastenaufbereitungsverband NRW, Hattingen • Voigt, G. (2007): Gezielte Mobilisierung von CKW durch Infiltration von Tensiden auf einem Altstandort in NRW. In: Tagungsband AAV-Fachtagung „Neue Entwicklungen im Umgang mit der Ressource Boden – Ergebnisse aus aktuellen In-situ-Sanierungsvorhaben des AAV“ 06.12.2007, AAV Altlastensanierungs- und Altlastenaufbereitungsverband NRW, Hattingen • McGuire, T.M., McDade, J.M., Newell, C.J. (2006): Performance of DNAPL Source Depletion Technologies at 59 Chlorinated Solvent Impacted Sites. <i>Ground Water Monitoring & Remediation</i> 26: 73 -84 • Danzer, J., Herbert, M. (2000): Tenside zur In-situ-Grundwassersanierung – Stand der Technik, Planung, Implementierung. Schriftenreihe <i>altlastenforum Baden-Württemberg e.V.</i> Heft 3, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
Bewertung durch den Arbeitskreis <i>Verfahren zur beschleunigten Schadstoffquellensanierung unter engen Randbedingungen und unter intensiver fachgutachterlicher Begleitung. Wirkungsweise und Sanierungserfolg sind stark abhängig von der Auswahl und der Art des für den Einzelfall geeigneten Tensids.</i>

8 Biologische Verfahren

Mit Hilfe von biologischen In-situ-Sanierungsverfahren können organische Schadstoffe aus der gesättigten Bodenzone (Boden bzw. Grundwasser) entfernt werden. Es wird die Fähigkeit von im Boden vorkommenden Mikroorganismen (Bakterien, Pilze) genutzt, organische Substanzen als Kohlenstoff- und Energiequelle zu verwerten. Kennzeichen von biologischen In-situ-Sanierungsverfahren ist, dass die Schadstoffe durch die Mikroorganismen im Grundwasser abgebaut und nicht gefördert werden müssen.

Es ist sinnvoll, den biologischen In-situ-Abbau mit anderen Verfahren, wie hydraulischen Maßnahmen zur Verbesserung der Verteilung der Zusatzstoffe oder mit physikalischen Wasserreinigungstechniken zu kombinieren. Dazu wird belastetes Grundwasser mit Pumpen gefördert, mit Hilfe physikalischer oder biologischer Reinigungsverfahren on-site von den Schadstoffen befreit, das gereinigte Wasser mit Nährstoffen, Elektronenakzeptoren bzw. Cosubstraten versetzt und über ein Infiltrationssystem in den Grundwasserleiter injiziert (Abb. 8.1). Durch die zugesetzten Nährstoffe können sich die autochthonen (= am Standort vorhandenen) Mikroorganismen vermehren und somit den Schadstoffabbau beschleunigen. Im Regelfall ist kein Zusatz von gezüchteten Mikroorganismen notwendig.

Eine Grundwassersicherung ist i.d.R. erforderlich und im Einzelfall zu prüfen.

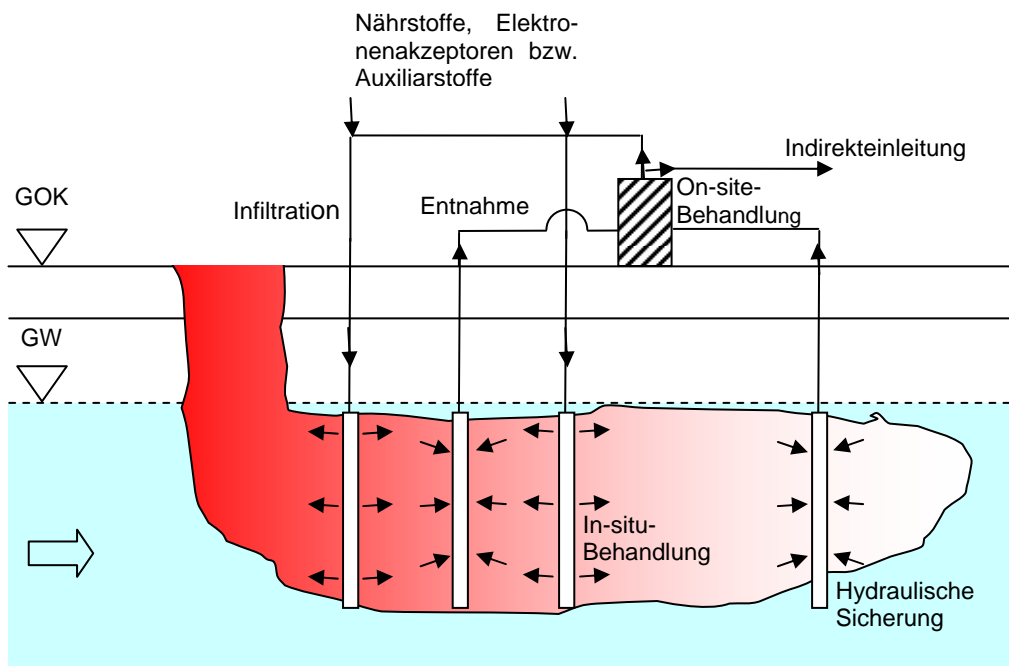


Abbildung 8.1: Kombination aus hydraulischer Förderung mit physikalischer On-site-Wasserreinigung und biologischem In-situ-Sanierungsverfahren

Daneben besteht die Möglichkeit, ohne eine Kombination mit hydraulischen Maßnahmen Nährstoffe, Elektronenakzeptoren bzw. Cosubstrate über ein Infiltrationssystem ins Grundwasser zu injizieren.

Es werden aerobe und anaerobe Prozesse unterschieden. Zur Entfernung von BTEX-Aromaten, aliphatischen Kohlenwasserstoffen (Kraftstoffe, Diesel, Heizöl) und niedrig halogenierten Kohlenwasserstoffen (cis-Dichlorethen, Vinylchlorid, Dichlormethan) werden Verfahren eingesetzt, bei denen Sauerstoff (aerob) oder Nitrat als Elektronenakzeptoren dienen.

Anaerobe Verfahren oder Kombinationen aus anaeroben und aeroben Verfahren werden zur Entfernung von hoch halogenierten Kohlenwasserstoffen (Tetrachlorethen, Trichlorethen, 1,1,1-Trichlorethan, Tetrachlorkohlenstoff) eingesetzt (Abb. 8.2). Zur Einstellung anaerober Bedingungen ist in der Regel der Zusatz von Elektronendonatoren erforderlich. Bei hohem DOC oder einer Mischkontamination aus verschiedenen organischen Schadstoffen sind häufig bereits anaerobe Bedingungen vorhanden.

Zum Aufbau ihrer Zellmasse benötigen die Mikroorganismen Nährstoffe (Stickstoff, Phosphor, Schwefel usw.). Beim biologischen Abbau von organischen Substraten dienen Nitrat, Sulfat sowie reduzierte Eisen- und Manganverbindungen als Elektronenakzeptoren.

Biologische Abbaureaktionen können daher sehr einfach an Veränderungen verschiedener hydrochemischer Prozesse erkannt werden. Deshalb sollte standardmäßig die Bestimmung von Nitrat, Ammonium, Sulfat, Phosphat, Eisen, Mangan, DOC, Redox-Potential, Sauerstoffgehalt, Temperatur und pH-Wert an mindestens einer Messstelle im Kontaminationsbereich sowie an einer weiteren, außerhalb der Kontamination durchgeführt werden. Generell sollte eine Volluntersuchung des Grundwassers erfolgen. Auf dieser Datengrundlage können die für die Sanierung notwendigen Anlagenteile optimal ausgelegt und kostenträchtige Nachrüstungen vermieden werden.

Da der biologische Sauerstoffabbau von verschiedenen Faktoren (Durchlässigkeit des Bodens, Nährstoffversorgung, Bioverfügbarkeit und Abbaubarkeit der Schadstoffe) abhängt, ist es häufig notwendig, Labor- bzw. Feldversuche durchzuführen, um die prinzipielle Eignung zu prüfen und für die Auswahl des Sanierungsverfahrens wichtige Daten zu ermitteln. Zur Identifikation der ggf. zu stimulierenden natürlichen Schadstoffminderungsprozesse und zur Identifikation / Eingrenzung der Schadstoffquelle bzw. zur Abgrenzung der Schadstofffahne mit den verschiedenen Redoxzonen kann es zweckmäßig sein, Anhang 2 des LABO-Positi-

onspapiers „Berücksichtigung der Natürlichen Schadstoffminderung bei der Altlastenbearbeitung“ in der aktuellsten Fassung vom 10.12.2009 heranzuziehen¹⁰.

Aufgrund der unterschiedlichen Wirkweise lassen sich die zur Verfügung stehenden Verfahren wie folgt einordnen:

- Stimulierung des Abbaus nicht chlorierter Kohlenwasserstoffe
- Stimulierung des Abbaus chlorierter Kohlenwasserstoffe

Diese Verfahren werden nachfolgend beschrieben.

8.1 Stimulierung des Abbaus nicht chlorierter Kohlenwasserstoffe

Zum Abbau von Kohlenwasserstoffen (BTEX-Aromaten, aliphatische Kohlenwasserstoffe und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) sind Elektronenakzeptoren notwendig. Elektronenakzeptoren wie Sauerstoff, Nitrat, Sulfat und Eisen-(III)-Verbindungen können bereits im Grundwasser vorhanden sein oder sie werden im Rahmen der Sanierungsmaßnahme (Wasserstoffperoxid, technischer Sauerstoff, Luft, Nitrat) zugesetzt.

Der Abbau der Schadstoffe erfolgt in der Regel in der Bakterienzelle bis zu Kohlendioxid und Wasser. Da die Stoffwechselwege der im Boden vorhandenen Bakterienflora variieren können, können Stoffwechselendprodukte des einen Bakteriums als Substrate für andere Bakterien dienen.

Bei hohen Schadstoffkonzentrationen können neben den gewünschten aeroben Abbauprozessen – bei ausreichendem Angebot an Elektronenakzeptoren im Grundwasser – auch anaerobe Prozesse wie Denitrifikation, Sulfat- und Eisenreduktion sowie die Methanogenese ablaufen.

Nachfolgend sind die Gleichungen für den Abbau von aromatischen Kohlenwasserstoffen unter aeroben und anaeroben Bedingungen am Beispiel von Benzol dargestellt:

¹⁰ http://www.labo-deutschland.de/documents/MNA-Positionspapier_Stand_10-12-2009_e51.pdf

Tabelle 8.1: Reaktionsgleichungen für den Abbau aromatischer Kohlenwasserstoffen unter aeroben und anaeroben Bedingungen am Beispiel von Benzol

Abbauvorgang	Reaktion
Aerobe Respiration	$7,5 \text{ O}_2 + \text{C}_6\text{H}_6 \rightarrow 6 \text{ CO}_2 + 3 \text{ H}_2\text{O}$
Denitrifikation	$6 \text{ NO}_3^- + 6 \text{ H}^+ + \text{C}_6\text{H}_6 \rightarrow 6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} + 3 \text{ N}_2$
Eisenreduktion	$60 \text{ H}^+ + 30 \text{ Fe(OH)}_3 + \text{C}_6\text{H}_6 \rightarrow 6 \text{ CO}_2 + 30 \text{ Fe}^{2+} + 78 \text{ H}_2\text{O}$
Sulfatreduktion	$7,5 \text{ H}^+ + 3,75 \text{ SO}_4^{2-} + \text{C}_6\text{H}_6 \rightarrow 6 \text{ CO}_2 + 3,75 \text{ H}_2\text{S} + 3 \text{ H}_2\text{O}$
Methanogener Abbau	$4,5 \text{ H}_2\text{O} + \text{C}_6\text{H}_6 \rightarrow 2,25 \text{ CO}_2 + 3,75 \text{ CH}_4$

In Deutschland haben biologische In-situ-Sanierungsverfahren, bei denen Luftsauerstoff oder Sauerstoffträger wie Wasserstoffperoxid zugesetzt werden, die größte Bedeutung.

Durch die häufig angewandte Verfahrenskombination von biologischem Sanierungsverfahren mit hydraulischer Sicherung gelingt es in der Regel, eine gleichmäßige großräumige Ausbreitung der Zusatzstoffe im Aquifer zu erreichen. Heute werden Art und Umfang des Infiltrationssystems und der Förderbrunnen häufig durch Modellrechnungen bestimmt.

Eine deutliche Verbesserung gegenüber den herkömmlichen vertikal angeordneten Brunnen stellen Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB) dar. Beim Einsatz dieser Brunnen wird in der gesättigten Bodenzone eine Zirkulationswalze erzeugt, so dass auch geringer durchlässige Schichten durchströmt und damit die Zusatzstoffe homogen verteilt werden können. Durch die Zirkulation können die Zusatzstoffe vollständig für die Abbauprozesse genutzt werden.

Bei Verfahren ohne Wasserkreislauf besteht die Gefahr, dass sich die zugesetzten Stoffe nur kleinräumig ausbreiten und daher nicht in alle Kontaminationsbereiche gelangen.

Für den Erfolg eines biologischen In-situ-Sanierungsverfahrens ist die Überwachung der biologischen Prozesse von ausschlaggebender Bedeutung. Durch eine ausreichende Zahl an Beobachtungspegeln sowie ein geeignetes Beprobungsraster und -intervall ist es möglich, genaue Kenntnisse über die Abbauprozesse und damit Steuerungsmöglichkeiten für das Sanierungsverfahren zu erlangen.

8.1.1 Biosparging

Biosparging

Prinzip

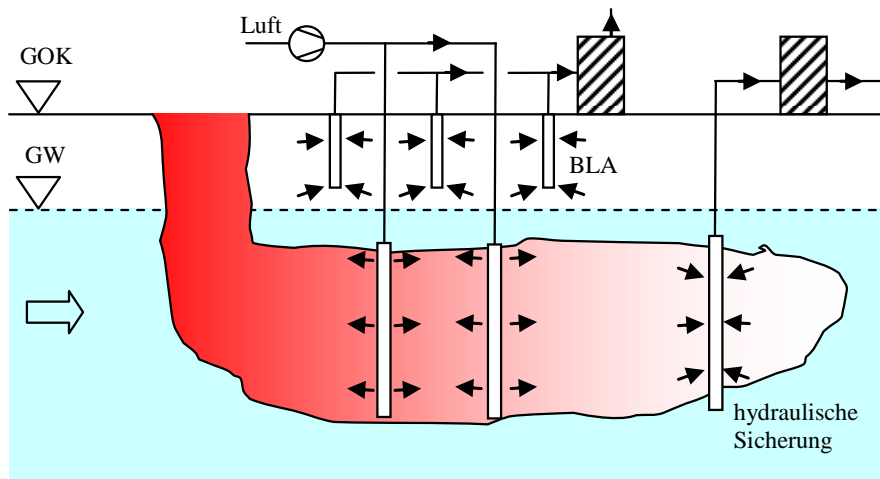
Mikroorganismen nutzen die Kohlenwasserstoffe zum Aufbau von Zellmasse und für ihre Stoffwechselprozesse. Sauerstoff dient den Organismen als Elektronenakzeptor. Die Kohlenwasserstoffe werden zu Biomasse, Kohlendioxid, Wasser und Wärme umgesetzt.

Aufbau und Beschreibung

Biosparging bezeichnet die Injektion von atmosphärischer Luft in den Aquifer. Über Injektionslanzen wird mittels eines Kompressors Luft in den kontaminierten Grundwasserbereich gepresst. Die Luft verdrängt Wasser aus dem nutzbaren Porenraum, es bildet sich ein kegelförmiger Bereich von feinen, verästelten Wegsamkeiten aus und die Luft kann in Form von Luftbläschen in Richtung Grundwasseroberfläche und von dort in die ungesättigte Bodenzone migrieren. Dabei werden flüchtige Schadstoffe in die ungesättigte Bodenzone verlagert. Das Verfahren muss daher mit einer Bodenluftabsaugung kombiniert werden. Die Notwendigkeit einer hydraulischen Abstomsicherung ist im Einzelfall zu prüfen.

Eine gepulste Luftinjektion (intermittierende Zugabe) kann sich vorteilhaft auf die Verzweigung der Strömungskanälchen auswirken. Biosparging sollte nur angewendet werden, wenn der Spargingpunkt unterhalb der Kontamination installiert werden kann. Biosparging fördert die In-situ-Strippping flüchtiger Schadstoffe (s. Airsparging), die Desorption der Schadstoffe und den mikrobiellen Abbau durch Anreicherung des Grundwassers mit Sauerstoff, der als Elektronenakzeptor wirkt. Zusätzliche Nährsalze können über die Biosparging-Pegel oder separate Infiltrationspegel eingebracht werden.

Im Rahmen eines speziellen Verfahrens („Oxywall“) wird eine Direktgasinjektion von Sauerstoff durchgeführt. Dabei werden Begasungsintensität und Begasungsintervalle mit Hilfe einer modellgestützten Steuerungstechnik optimiert. Die Sauerstoffgasphase soll dann wie eine „reaktive Gaswand“ wirken. Durch den Sauerstoffeintrag unterhalb gering durchlässiger Horizonte im Grundwasserleiter soll erreicht werden, dass der Sauerstoff in Form fein verteilter Gasblasen im Sedimentkörper zurückgehalten wird und sich vollständig im Grundwasser löst.



Verfahrensschema Biosparging

Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

- Abgrenzung der Redoxzonen
- Kenntnis der Hydrochemie, insbesondere Eisen, Mangan, Sauerstoff, DOC, Zellzahlen, Redoxspannung

<p>Biosparging</p> <p>Anwendungsbereich</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anwendung im Grundwasser im Abstrom einer Schadstoffquelle (Schadstofffahne) oder im unmittelbaren Umgebungsbereich der Schadstoffquelle • Voraussetzung ist die gleichmäßige Verteilung von Luft im Aquifer. Daher ist eine Anwendung nur bei homogenen und durchlässigen Porengrundwasserleitern Erfolg versprechend (Durchlässigkeitsbeiwert $k_f > 5 \times 10^{-4}$ m/s) • Für die begleitende Bodenluftabsaugung muss eine gute Durchlässigkeit der ungesättigten Bodenzone gegeben sein • Geeignet für alle unter aeroben Bedingungen abbaubaren Kontaminanten, u.a. BTEX, MKW, MTBE, niedermolekulare PAK
<p>Anwendungsgrenzen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wenig durchlässige Grundwasserleiter • Kluftgrundwasserleiter • Schadstoffphasen (müssen durch physikalische Verfahren entfernt werden) • Nicht oder schlecht abbaubare Schadstoffe (Metalle, hochmolekulare PAK)
<p>Besonderheiten, Hinweise, Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mit der Injektion über Lanzen ist ein blasenfreies Einbringen von Sauerstoff nicht möglich. Die Wirksamkeit von blasenförmig eingebrachtem Sauerstoff ist vergleichsweise gering • Das Einbringen von Sauerstoff unterhalb gering durchlässiger Horizonte speziell beim „Oxywall-Verfahren“ kann zur Ausbildung von Gasblasen führen • Aufgrund von Strippeffekten ist eine zusätzliche Bodenluftabsaugung in der ungesättigten Zone erforderlich • Es besteht bei Anwendung des Verfahrens das Risiko der Mobilisierung von Schadstoffen. Daher ist eine Sicherung des Abstroms empfehlenswert. Bei hohen Eisen- und Mangangehalten besteht die Gefahr der Verockerung mit der Folge einer Herabsetzung der Durchlässigkeit
<p>Entwicklungsstand</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bundesweit wurden in mehreren Fällen Luftsauerstoff und Nährstoffe zur Sanierung des Grundwassers mittels Lanzen in die gesättigte Zone eingebracht • Das Biosparging Verfahren kann als Stand der Technik bezeichnet werden • Das Oxywall-Verfahren befindet sich in der Erprobung
<p>Rechtliche Hinweise</p> <p>Wasserrechtliche Erlaubnis. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.</p>
<p>Referenzprojekte / zuständige Behörde</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gasanstalt Kaiserslautern / SGD Süd, Zentralreferat Neustadt/Weinstraße • Ehem. Tanklager, Karlsruhe / Stadt Karlsruhe, Amt für Umwelt- und Arbeitsschutz • Rütgers Chemicals AG, Hanau / Umweltamt Hanau
<p>Ausgewählte Literatur</p> <ul style="list-style-type: none"> • EPA (2004): How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. (EPA 510-B-94-003; EPA 510-B-95-007; and EPA 510-R-04-002). Chapter VIII: Biosparging (http://www.epa.gov/oust/pubs/tum_ch8.pdf). • EPA (2007): Technology Focus: Bioventing and Biosparging (http://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/Bioventing_and_Biosparging/cat/Application/). • Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2000): Mikrobiologische Sanierungsverfahren. Materialien zur Altlastenbehandlung Nr. 1/2000. • Karg F., Hintzen U., Portune T., Domalski, R. (2007): Feldtesterfahrungen zur Anwendung der DNBA zur Prozessoptimierung: Standort Rütgers Chemicals AG Hanau. In: <i>altlasten spektrum</i> 2/2007, S. 61-67 • Beckmann, A., Zittwitz, M. Gerhardt, M., Martienssen, M., Krieg, R., Geistlinger, H., Schirmer, M. (2007): Das OXYWALL-Projekt: Anwendung eines Verfahrens zur Direktgasinjektion von Sauerstoff zur in situ Sanierung von organisch kontaminierten Grundwässern. In: <i>altlasten spektrum</i> 4/2007.
<p>Bewertung durch den Arbeitskreis</p> <p><i>Das Biosparging-Verfahren wurde bundesweit in mehreren Fällen angewandt. Es kann eine Alternative zu Pump-and-treat-Verfahren in der Fahne darstellen, jedoch muss bei vorhandener Schadstoffquelle aufgrund der Schadstoffnachlieferung auch bei Anwendung dieses In-situ-Verfahrens von langen Laufzeiten ausgegangen werden. Daher ist eine Quellensanierung mit geeigneten Verfahren grundsätzlich zu empfehlen. Wichtig ist eine genaue Kenntnis der Schadenssituation und der Hydrochemie als Entscheidungs- und Planungsgrundlage.</i></p> <p><i>Mit dem Spezialverfahren „Oxywall“ liegen in Deutschland erst wenige Erfahrungen vor.</i></p>

8.1.2 Wasserstoffperoxid (H_2O_2)

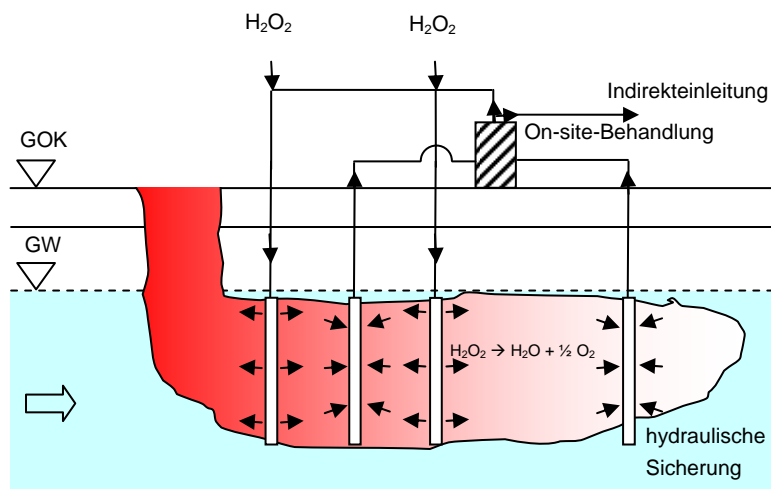
Wasserstoffperoxid (H_2O_2)

Prinzip

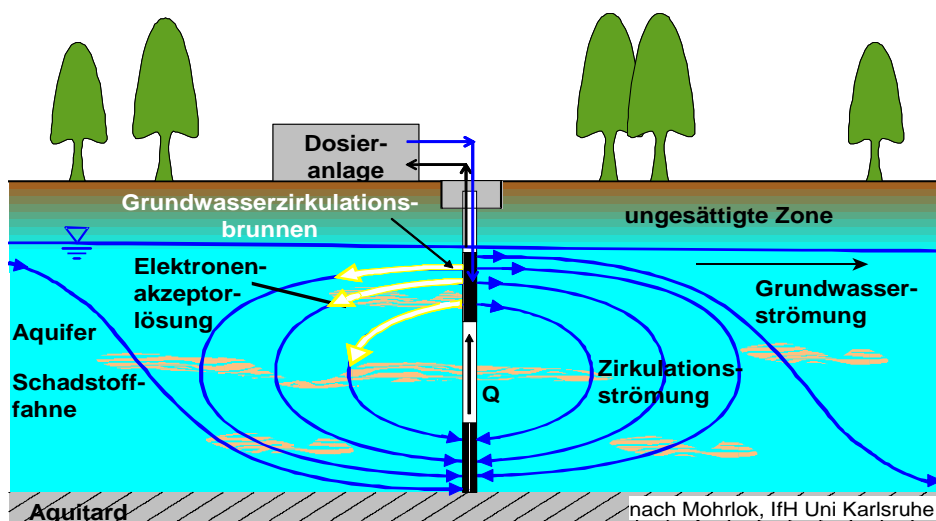
Mikroorganismen nutzen die Kohlenwasserstoffe zum Aufbau von Zellmasse und für ihre Stoffwechselprozesse. Sauerstoff dient den Organismen als Elektronenakzeptor. Die Kohlenwasserstoffe werden zu Biomasse, Kohlendioxid, Wasser und Wärme umgesetzt. Bei diesem Verfahren wird Sauerstoff in Form von Wasserstoffperoxid verwendet. Wasserstoffperoxid wird durch bakterielle Enzyme (Katalase) in Wasser und Sauerstoff gespalten. Als chemisch nicht stabile Verbindung dissoziiert Wasserstoffperoxid bei Einleitung in Wasser vergleichsweise rasch zu Wasser und setzt Sauerstoff frei. Hohe Wasserstoffperoxid-Konzentrationen wirken toxisch auf die Mikroorganismen.

Aufbau und Beschreibung

Sauerstoff kann mittels Sauerstoffträgern in den Aquifer eingebracht werden. Als Sauerstoffträger eignet sich Wasserstoffperoxid (H_2O_2), das in Verfahrenskombinationen mit einer hydraulischen Maßnahme eingesetzt werden kann. Wasserstoffperoxid wird dem Infiltrationswasser beigemischt, über Infiltrationslanzen in den Grundwasserleiter eingebracht und dort in Wasser und Sauerstoff zersetzt.



Unter geeigneten hydrogeologischen Bedingungen können auch Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB) anstelle der Injektionsbrunnen eingesetzt werden. Durch die sich ausbildende Zirkulationswalze entsteht eine vertikale Strömungskomponente, die zu einer verbesserten Verteilung des Sauerstoffs führt.



In-situ-Stimulierung des aeroben Abbaus durch Zugabe von Sauerstoff mittels H_2O_2 -Zugabe (schematische Darstellung)

Wasserstoffperoxid (H₂O₂)
Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen <ul style="list-style-type: none"> • Abgrenzung der Redoxzonen • Detaillierte Kenntnis der Hydrochemie, insbesondere Eisen, Mangan, Sauerstoff, DOC, Zellzahlen, Redoxspannung • Numerische Simulationen zur Bestimmung der MnO₂- und Fe(OH)₃-Bildung (Verblockung Aquifer) mit zum Beispiel PHREEQC
Anwendungsbereich <ul style="list-style-type: none"> • Anwendung im Grundwasser im Abstrom einer Schadstoffquelle (Schadstofffahne) oder im unmittelbaren Umgebungsbereich der Schadstoffquelle; unterstützend auch zur Quellensanierung • Voraussetzung ist die gleichmäßige Verteilung von Sauerstoff oder Sauerstoffträgern im Untergrund. Daher ist eine Anwendung nur bei homogenen und durchlässigen Porengrundwasserleitern Erfolg versprechend und sollte durch geeignete hydraulische Systeme unterstützt werden • Geeignet für alle unter aeroben Bedingungen abbaubaren Kontaminanten. Dazu gehören BTEX, MKW, niedermolekulare PAK und NSO-Heterozyklen, MTBE, niedrig chlorierte Kohlenwasserstoffe
Anwendungsgrenzen <ul style="list-style-type: none"> • Wenig durchlässige Grundwasserleiter • Kluftgrundwasserleiter • Schadstoffphasen (müssen durch physikalische Verfahren entfernt werden) • Nicht oder schlecht abbaubare Schadstoffe (Metalle, hochmolekulare PAK) • Erhöhte Eisen- und Mangangehalte
Besonderheiten, Hinweise, Risiken <p>Bei hohen Eisen- und Mangangehalten besteht die Gefahr der Verockerung mit der Folge einer Herabsetzung der Durchlässigkeit. Entsprechende verfahrenstechnische Maßnahmen sind vorzusehen (Enteisenung des Infiltrats)</p>
Entwicklungsstand <ul style="list-style-type: none"> • Wasserstoffperoxid wird als Sauerstoffträger in Deutschland häufig eingesetzt. • Der Einsatz kann als praxiserprobt bezeichnet werden.
Rechtliche Hinweise <p>Wasserrechtliche Erlaubnis. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.</p>
Referenzprojekte / zuständige Behörde <ul style="list-style-type: none"> • Ehem. Wäscherei in Schleswig CKW-Schaden / Kreis Schleswig – Flensburg, 1. Schritt: Injektion von Melasse für den CKW-Abbau bis cis-Dichlorethen, 2. Schritt: Schaffung aerober Bedingungen durch Injektion von Wasserstoffperoxid als Sauerstoffträger für den weiteren Abbau von cis-Dichlorethen), (s. auch bei Melasse) • Tankstelle in Esslingen / Landratsamt Esslingen • Ehemaliges Gaswerk (KORA Standort Testfeld Süd) in Stuttgart (VEGAS Uni Stuttgart, TZW Karlsruhe, ZAG Uni Tübingen, GZG Uni Göttingen) / AfU Landeshauptstadt Stuttgart
Ausgewählte Literatur <ul style="list-style-type: none"> • Trötschler, O.; Limburg, B.; Haslwimmer, T., Koschitzky, H.-P., Sagner, A., Tiehm, A. (2007): H₂O₂-Zugabe zur Stimulierung des aeroben biologischen Abbaus von teerölstämmigen Schadstoffen am KORA-Standort „Testfeld Süd“. In: Braun, J.; Koschitzky, H.-P.; Stuhmann, M. (Hrsg.): VEGAS-Kolloquium 2007, Mitteilungen Heft 165, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart: S. 28-40, ISBN 3-933761-69-7
Bewertung durch den Arbeitskreis <p><i>Das Verfahren der Zugabe von Wasserstoffperoxid wurde bundesweit bereits in zahlreichen Fällen eingesetzt. Es stellt eine kostengünstige Alternative zu Pump-and-Treat-Verfahren in der Fahne dar. Bei gleichzeitiger Behandlung der Schadstoffquelle resultieren Laufzeiten von mehreren Jahren. Wichtig ist eine genaue Kenntnis der Schadenssituation und der Hydrochemie als Entscheidungs- und Planungsgrundlage.</i></p>

8.1.3 Nitrat

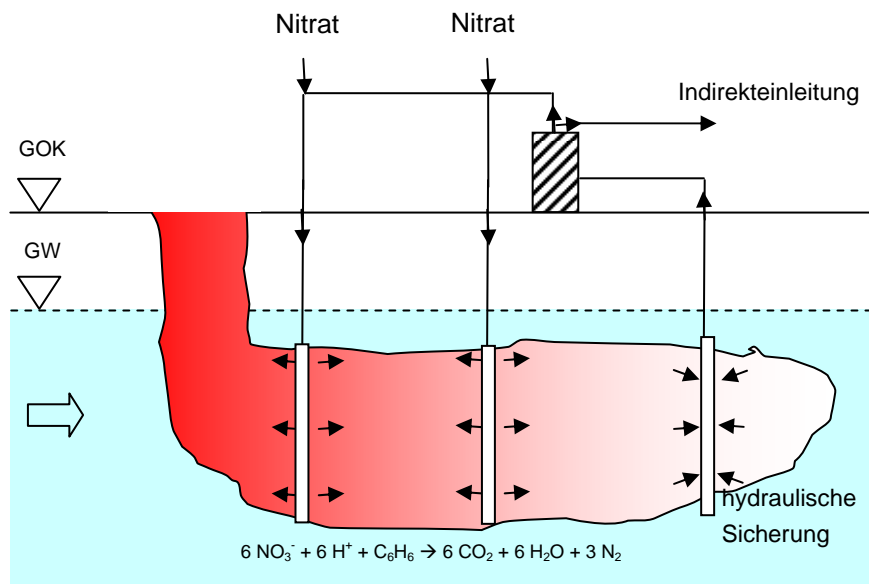
Nitrat

Prinzip

Mikroorganismen nutzen die Kohlenwasserstoffe zum Aufbau von Zellmasse und für ihre Stoffwechselprozesse. Nitrat dient den Organismen als Elektronenakzeptor. Die Kohlenwasserstoffe werden zu Biomasse, Kohlendioxid, Wasser und Wärme umgesetzt.

Aufbau und Beschreibung

Durch die Zugabe von Nitrat in den Grundwasserleiter kann der anaerobe Abbau unterstützt und beschleunigt werden. Nitratsalze werden in Wasser gelöst, dem Infiltrationswasser beigemischt und über Infiltrationsbrunnen oder über Rigolen in den Aquifer eingeleitet.



Infiltration von Nitrat zur Stimulierung des anaeroben Abbaus organischer Schadstoffe (Beispiel Benzol) in Kombination mit einer hydraulischen Sicherung (schematische Darstellung)

Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

- Abgrenzung der Redoxzonen
- Kenntnis der Hydrochemie, insbesondere Sauerstoff, Redoxspannung, Nitrat, Nitrit, Sulfat, Mangan, Eisen, DOC, Zellzahlen

Anwendungsbereich

- Anwendung im Grundwasser im Abstrom einer Schadstoffquelle (Schadstofffahne) oder im unmittelbaren Umgebungsbereich der Schadstoffquelle, unterstützend auch zu Quellensanierung
- Voraussetzung ist die gleichmäßige Verteilung von Nitrat im Untergrund. Daher ist eine Anwendung nur bei homogenen und durchlässigen Porengrundwasserleitern Erfolg versprechend
- Geeignet für den Abbau organischer Schadstoffe, insbesondere BTEX und niedermolekulare PAK

Anwendungsgrenzen

- Wenig durchlässige Grundwasserleiter
- Klüftgrundwasserleiter
- Schadstoffphasen (müssen durch physikalische Verfahren entfernt werden)
- Nicht oder schlecht abbaubare Schadstoffe (hochmolekulare PAK, Metalle)

Nitrat
<p>Besonderheiten, Hinweise, Risiken</p> <p>Es muss berücksichtigt werden, dass auch andere Stoffe als die Schadstoffe mit dem Nitrat reagieren (zum Beispiel Oxidation von Sulfiden). Daher ist eine genaue Kenntnis der hydrochemischen Verhältnisse am Standort erforderlich.</p>
<p>Entwicklungsstand</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bundesweit sind diverse großtechnische Anwendungen mit Nitrat als Elektronenakzeptor bekannt • Das Verfahren kann dem Grunde nach als Stand der Technik bezeichnet werden
<p>Rechtliche Hinweise</p> <p>Wasserrechtliche Erlaubnis. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.</p>
<p>Referenzprojekte / zuständige Behörde</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eckerkoppel, Hamburg-Farmsen / Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg • Bergstedter Chaussee, Hamburg-Bergstedt / Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg • Ehem. Raffinerie / Regierungspräsidium Darmstadt • Bundeswehrliegenschaft Gumnitz-Lager / Betrieb für Bau und Liegenschaften Mecklenburg-Vorpommern, Rostock • Metallverarbeitender Betrieb in Gelsenkirchen PAK/BTEX-Schaden eines ehem. Imprägnierwerks / Stadt Gelsenkirchen • Gaswerk Düsseldorf-Flingern / Stadt Düsseldorf, Umweltamt
<p>Ausgewählte Literatur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Richters, L., Bantz, I., Schellartz, G., Eckert, P., Wisotzky F. (2006): Stimulierung natürlicher Selbstreinigungsprozesse (ENA) nachfolgend zu aktiven Sanierungsmaßnahmen - Anwendbarkeit aus Sicht der Behörden und Sanierungspflichtigen. In: <i>altlasten spektrum</i>, 15. Jg., 04/2006
<p>Bewertung durch den Arbeitskreis</p> <p><i>Das Verfahren kann zwar als Stand der Technik bezeichnet werden, aber in vielen Anwendungsfällen wurden die Grenzen des Verfahrens deutlich. Die hydraulischen und hydrochemischen Bedingungen an den Standorten erschweren oft das Zusammenbringen des Oxidationsmittels mit den Schadstoffen. Zudem können Konkurrenzreaktionen den Schadstoffabbau erheblich behindern. Bei gleichzeitiger Behandlung der Schadstoffquelle resultieren Laufzeiten von mehreren Jahren. Wichtig ist eine genaue Kenntnis der Schadenssituation und der Hydrochemie als Entscheidungs- und Planungsgrundlage.</i></p>

8.1.4 Oxygen Release Compound (ORC®)

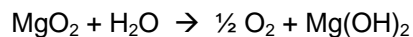
Oxygen Release Compound (ORC®)

Prinzip

Mikroorganismen nutzen die Kohlenwasserstoffe zum Aufbau von Zellmasse und für ihre Stoffwechselprozesse. Sauerstoff dient den Organismen als Elektronenakzeptor. Die Kohlenwasserstoffe werden zu Biomasse, Kohlendioxid, Wasser und Wärme umgesetzt. Bei diesem Verfahren wird Sauerstoff in Form von Kalium-/Magnesiumperoxyden eingesetzt.

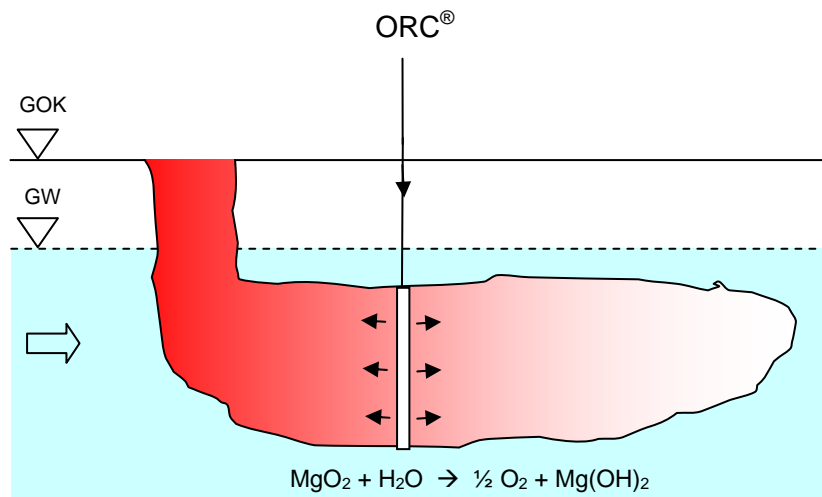
Aufbau und Beschreibung

Sauerstoff kann mittels Sauerstoffträgern in den Aquifer eingebracht werden, die langsam Sauerstoff freisetzen. Ein Beispiel ist der Sauerstoffträger ORC® (Oxygen Release Compound). Dabei handelt es sich um ein flüssiges patentiertes Magnesiumperoxid-Produkt, das bei Kontakt mit Wasser unter Bildung von Magnesiumhydroxid Sauerstoff über längere Zeit (bis zu 300 Tage) freisetzt und den Mikroorganismen zur Verfügung stellt:



Durchlässige Behälter mit ORC® werden in Grundwasserbrunnen bzw. Grundwassermessstellen eingehängt. Der Zeitraum der Sauerstofffreisetzung ist abhängig von der mit dem Grundwasser transportierten Schadstofffracht. Erschöpfte Vorratsbehälter müssen ersetzt werden.

Im Grundkonzept des Verfahrens ist eine hydraulische Abstomsicherung nicht vorgesehen. Dennoch kann es im Einzelfall sinnvoll und erforderlich sein, den Abstrom während der Durchführung des Verfahrens hydraulisch zu sichern.



Einbringen von ORC® in eine vorhandene Grundwassermessstelle
(schematische Darstellung)

Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

- Abgrenzung der Redoxzonen (bestehende aerobe oder anaerobe Bedingungen)
- Schadstoffart, -masse und -verteilung
- Tiefenlage des Grundwasserspiegels, Grundwasserfließgeschwindigkeit
- Konkurrierende Elektronenakzeptoren (Sauerstoff sinkt)
- Kenntnis der Hydrochemie, insbesondere Eisen, Mangan, Sauerstoff, DOC, Zellzahlen, Redoxspannung
- Freie Produktphase

<p>Oxygen Release Compound (ORC®)</p> <p>Anwendungsbereich</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anwendung in Grundwasser im Abstrom einer Schadstoffquelle (Schadstofffahne) oder im unmittelbaren Umgebungsbereich der Schadstoffquelle, unterstützend auch zur Quellensanierung • Voraussetzung ist die gleichmäßige Verteilung von Sauerstoff oder Sauerstoffträgern im Untergrund. Daher ist eine Anwendung nur bei homogenen und durchlässigen Porengrundwasserleitern Erfolg versprechend • alle unter aeroben Bedingungen abbaubaren Kontaminanten, z.B. BTEX, MTBE, MKW, niedermolekulare PAK
<p>Anwendungsgrenzen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wenig durchlässige Grundwasserleiter • Kluftgrundwasserleiter • Schadstoffphasen (müssen durch physikalische Verfahren entfernt werden) • Nicht oder schlecht abbaubare Schadstoffe (hochmolekulare PAK, Metalle)
<p>Besonderheiten, Hinweise, Risiken, Vor-/Nachteile</p> <ul style="list-style-type: none"> • ORC® ist patentiert • Bei hohen Eisen- und Mangangehalten besteht die Gefahr der Verockerung mit der Folge einer Herabsetzung der Durchlässigkeit
<p>Entwicklungsstand</p> <ul style="list-style-type: none"> • ORC® wurde in den USA mehrfach eingesetzt • In Deutschland liegen bisher negative Erfahrungen aus wenigen Einzelfällen vor. Aus einer Erhebung des Altlastenausschusses der LABO ist jeweils ein Fall aus Bayern und Schleswig-Holstein bekannt • Das Verfahren befindet sich in der Erprobung
<p>Rechtliche Hinweise</p> <p>Wasserrechtliche Erlaubnis. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.</p>
<p>Referenzprojekte / zuständige Behörde</p> <ul style="list-style-type: none"> • LHKW-/MKW-Schaden eines Chemiebetriebs in Günzburg, Bayern / Landratsamt Günzburg • Benzin-/Dieselschaden im Kreis Dithmarschen, Schleswig Holstein / Kreis Dithmarschen, Fachdienst Wasser, Boden und Abfall
<p>Ausgewählte Literatur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stupp, H. D. et al. (2007): Biologische Verfahren zur Sanierung von CKW-Grundwasserschäden – Systematik und Beschreibung der In-situ-Techniken. In: <i>altlasten spektrum</i> 03/2007
<p>Bewertung durch den Arbeitskreis</p> <p><i>Das Verfahren kann nicht als Stand der Technik bezeichnet werden. Es wurde in den USA mehrfach eingesetzt, in Deutschland liegen bisher erst wenige negative Erfahrungen vor. Mit diesem Verfahren erfolgreich durchgeführte Fälle sind dem Arbeitskreis nicht bekannt.</i></p>

8.1.5 iSOC® (In situ Submerged Oxygen Curtain)

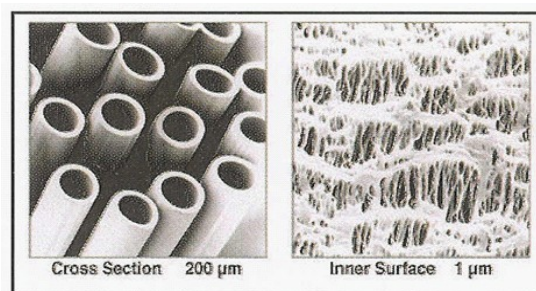
iSOC® (In situ Submerged Oxygen Curtain)

Prinzip

Mikroorganismen nutzen die Kohlenwasserstoffe zum Aufbau von Zellmasse und für ihre Stoffwechselprozesse. Sauerstoff dient den Organismen als Elektronenakzeptor. Die Kohlenwasserstoffe werden zu Biomasse, Kohlendioxid, Wasser und Wärme umgesetzt. Bei diesem Verfahren wird gasförmiger Sauerstoff blasenfrei mit Hilfe von Hohlfaserbündeln in das Grundwasser eingebracht.

Aufbau und Beschreibung

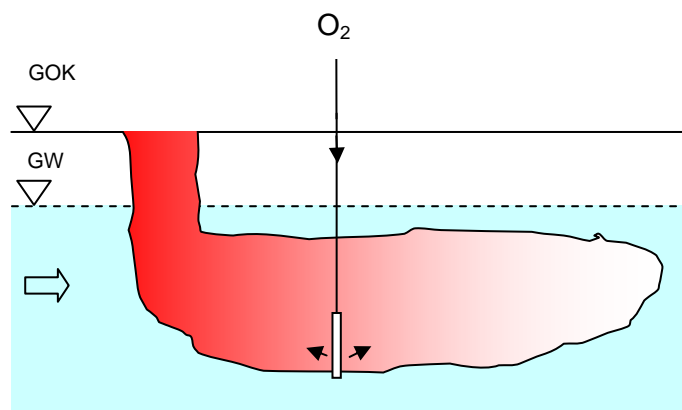
Ein patentiertes Spezialverfahren, mit dem Sauerstoff gasförmig und blasenfrei in den Aquifer eingebracht wird, ist das System iSOC® (in situ Submerged Oxygen Curtain). Dieses System besteht aus einem ca. 45 cm langen und weniger als fünf Zentimeter dicken Zylinder aus Edelstahl, in dessen Innerem sich mehr als 700 hydrophobe, mikroporöse Hohlfasern befinden, die eine große Oberfläche bieten, um den blasenfreien Transfer des reinen Sauerstoffs ins Grundwasser zu bewerkstelligen. Dadurch kann die Sauerstoffkonzentration nahe der Sättigung erreicht werden.



Microporous Hollow Fiber

Mikroporöse Hohlfaserbündel im Inneren der iSOC™-Einheit (Schnitt),
(Cornelsen & Buhl, 2005)

Durch die blasenfreie Einbringung von technischem Sauerstoff ist ein Spargingeffekt und somit eine Mobilisierung von Schadstoffen nicht zu erwarten. Im Einzelfall kann es dennoch sinnvoll sein, den Abstrom hydraulisch zu sichern.



Einbringen von gasförmigem reinen Sauerstoff in den Grundwasserleiter

Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

- Abgrenzung der Redoxzonen
- Kenntnis der Hydrochemie, insbesondere Eisen, Mangan, Sauerstoff, DOC, Zellzahlen, Redoxspannung

<p>iSOC® (In situ Submerged Oxygen Curtain)</p> <p>Anwendungsbereich</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anwendung im Grundwasser im Abstrom einer Schadstoffquelle, d.h. in der Schadstofffahne oder im unmittelbaren Umgebungsbereich der Schadstoffquelle, unterstützend auch zur Quellensanierung • Voraussetzung ist die gleichmäßige Verteilung von Sauerstoff im Untergrund. Daher ist eine Anwendung nur bei homogenen und durchlässigen Porengrundwasserleitern Erfolg versprechend • Geeignet für alle unter aeroben Bedingungen abbaubaren Kontaminanten. Dazu gehören BTEX, MTBE, MKW, niedermolekulare PAK, Erfahrungen auch mit VC
<p>Anwendungsgrenzen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wenig durchlässige, wenig ergiebige und gering mächtige Grundwasserleiter • Klufftgrundwasserleiter • Schadstoffphasen (müssen durch physikalische Verfahren entfernt werden) • Nicht oder schlecht abbaubare Schadstoffe (hochmolekulare PAK, Metalle)
<p>Besonderheiten, Hinweise, Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei hohen Eisen- und Mangangehalten ist eine Verockerung mit der Folge einer Herabsetzung der Durchlässigkeit nicht auszuschließen. Allerdings wurden Verockerungen bei den bisherigen Anwendungsfällen nicht festgestellt • Obwohl eine Mobilisierung von Schadstoffen bei Einbringen von technischem Sauerstoff generell nicht zu erwarten ist, kann es im Einzelfall sinnvoll sein, den Abstrom hydraulisch zu sichern • Feldversuche von mehreren Monaten zum Nachweis der Verfahrenseignung sind empfehlenswert • iSOC® gehört und wird hergestellt durch Inventures Technology Incorporated (ITI), Fredericton, New Brunswick und Oakville, Ontario, Kanada (www.isocinfo.com).
<p>Entwicklungsstand</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mit dem iSOC®-Verfahren gibt es in Deutschland großtechnische Erfahrung bei derzeit ca. 20 Anwendungsfällen, davon eine VC-Sanierung (Monoschaden). Somit kann das Verfahren als praxiserprobt unter den Fallrandbedingungen bezeichnet werden • In den USA und Großbritannien liegen bereits seit längerer Zeit Erfahrungen aus zahlreichen Feldanwendungen vor
<p>Rechtliche Hinweise</p> <p>Wasserrechtliche Erlaubnis. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.</p>
<p>Referenzprojekte / zuständige Behörde</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rütgers Chemicals AG, Hanau / RP Darmstadt • VC-Kontamination DB AG / Landkreis Schönebeck (Sachsen-Anhalt) • Ehemalige Teerproduktion / Duisburg
<p>Ausgewählte Literatur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Buhl, J. (2006): In-situ-Abbau von Vinylchlorid im Grundwasser. In: Symposium In-situ-Sanierung. DECHEMA, 20./21.11.2006. • Cornelsen, M., Buhl, J. (2005): Optimierung des natürlichen Schadstoffabbaus in situ durch den Einsatz von iSOC™. In: <i>altlasten spektrum</i> 2/2005, S. 70-74. • Karg, F. (2006): Felderfahrungen zur Anwendung von DNBA zur Prozessoptimierung: Standort Rütgers Chemicals AG Hanau. In: Symposium In-situ-Sanierung. DECHEMA, 20./21.11.2006 • Karg F., Hintzen U., Portune T., Domalski, R. (2007): Feldtesterfahrungen zur Anwendung der DNBA zur Prozessoptimierung: Standort Rütgers Chemicals AG Hanau. In: <i>altlasten spektrum</i> 2/2007, S. 61-67
<p>Bewertung durch den Arbeitskreis</p> <p><i>Das iSOC-Verfahren ist praxiserprobt und kann eine Alternative zu Pump-and-treat-Verfahren in der Fahne darstellen, jedoch muss bei vorhandener Schadstoffquelle aufgrund der Schadstoffnachlieferung auch bei Anwendung dieser In-situ-Verfahren von langen Laufzeiten ausgegangen werden. Daher ist eine Quellensanierung mit geeigneten Verfahren grundsätzlich zu empfehlen. Wichtig ist eine genaue Kenntnis der Schadenssituation und der Hydrochemie als Entscheidungs- und Planungsgrundlage.</i></p>

8.1.6 Oxytec

Oxytec

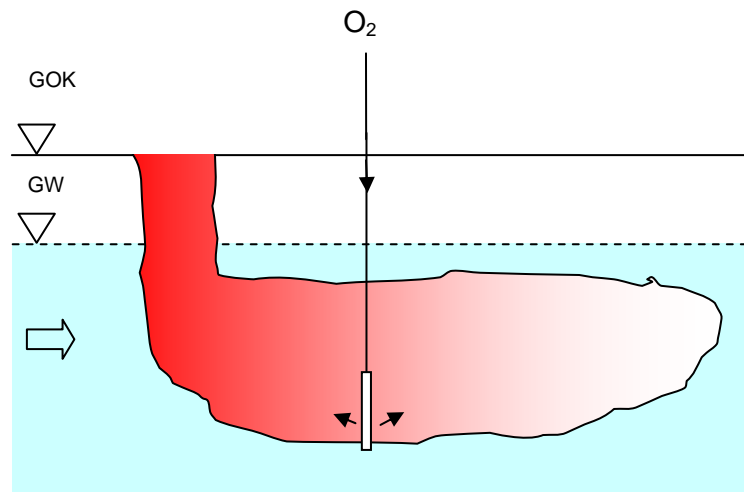
Prinzip

Mikroorganismen nutzen die Kohlenwasserstoffe zum Aufbau von Zellmasse und für ihre Stoffwechselprozesse. Sauerstoff dient den Organismen als Elektronenakzeptor. Die Kohlenwasserstoffe werden zu Biomasse, Kohlendioxid, Wasser und Wärme umgesetzt. Bei diesem Verfahren wird gasförmiger Sauerstoff mit Hilfe von gasdurchlässigen Membranen in das Grundwasser eingebracht.

Aufbau und Beschreibung

Beim Oxytec-Verfahren wird eine glasfaserverstärkte Polymermembran mit hoher Sauerstoffpermeabilität eingesetzt, um Sauerstoff nahezu blasenfrei in den Aquifer einzubringen. Die Länge der Membran ist flexibel und kann sich über die gesamte mit Grundwasser erfüllte Mächtigkeit des Aquifers erstrecken.

Im Grundkonzept der Verfahren ist eine hydraulische Abstomsicherung nicht vorgesehen, da durch eine blasenfreie Einbringung von technischem Sauerstoff ein Spargingeffekt und somit eine Mobilisierung von Schadstoffen nicht zu erwarten ist. Dennoch kann es im Einzelfall sinnvoll und erforderlich sein, den Abstrom während der Durchführung des Verfahrens hydraulisch zu sichern.



Einbringen von gasförmigem reinem Sauerstoff in den Grundwasserleiter

Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

- Abgrenzung der Redoxzonen
- Kenntnis der Hydrochemie, insbesondere Eisen, Mangan, Sauerstoff, DOC, Zellzahlen, Redoxspannung

Anwendungsbereich

- Anwendung im Grundwasser im Abstrom einer Schadstoffquelle (Schadstofffahne) oder im unmittelbaren Umgebungsbereich der Schadstoffquelle, unterstützend auch zur Quellensanierung
- Voraussetzung ist die gleichmäßige Verteilung von Sauerstoff im Untergrund. Daher ist eine Anwendung nur bei homogenen und durchlässigen Porengrundwasserleitern Erfolg versprechend
- Geeignet für alle unter aeroben Bedingungen abbaubaren Kontaminanten. Dazu gehören BTEX, MTBE, MKW, niedermolekulare PAK

Oxytec
Anwendungsgrenzen <ul style="list-style-type: none"> • Wenig durchlässige, wenig ergiebige und gering mächtige Grundwasserleiter • Klufftgrundwasserleiter • Schadstoffphasen (müssen durch physikalische Verfahren entfernt werden) • Nicht oder schlecht abbaubare Schadstoffe (hochmolekulare PAK, Metalle)
Besonderheiten, Hinweise, Risiken <ul style="list-style-type: none"> • Bei hohen Eisen- und Mangangehalten ist eine Verockerung mit der Folge einer Herabsetzung der Durchlässigkeit nicht auszuschließen. • Obwohl eine Mobilisierung von Schadstoffen bei Einbringen von technischem Sauerstoff generell nicht zu erwarten ist, kann es im Einzelfall sinnvoll sein, den Abstrom hydraulisch zu sichern.
Entwicklungsstand <ul style="list-style-type: none"> • Mit dem Oxytec-Verfahren liegen erste Erfahrungen an einigen Standorten im In- und Ausland vor. • Das Verfahren ist in Erprobung.
Rechtliche Hinweise Wasserrechtliche Erlaubnis. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.
Referenzprojekte / zuständige Behörde <ul style="list-style-type: none"> • BTEX-Schaden, Tankstelle in Hertens, laufende Anwendung / Kreis Recklinghausen, Umweltamt • LHKW-Schaden in Bad-Salzuflen, laufende Anwendung / Kreis Lippe • LHKW-Schaden in Berlin, laufende Anwendung / Berlin
Ausgewählte Literatur <ul style="list-style-type: none"> • Stenert, V., Maraun, S. (2009): Einsatz des Oxytec-Verfahrens in der Altlastensanierung am Beispiel eines BTEX-Schadens. <i>altlasten spektrum</i> 1/2009, S. 32-33
Bewertung durch den Arbeitskreis <i>Das Oxytec-Verfahren kann eine Alternative der Fahnenanierung darstellen. Eine Quellensanierung mit geeigneten Verfahren ist grundsätzlich zu empfehlen. Erkenntnisse über erfolgreich abgeschlossene Sanierungen mit dem Verfahren liegen noch nicht vor.</i>

8.2 Stimulierung des Abbaus chlorierter Kohlenwasserstoffe (CKW)

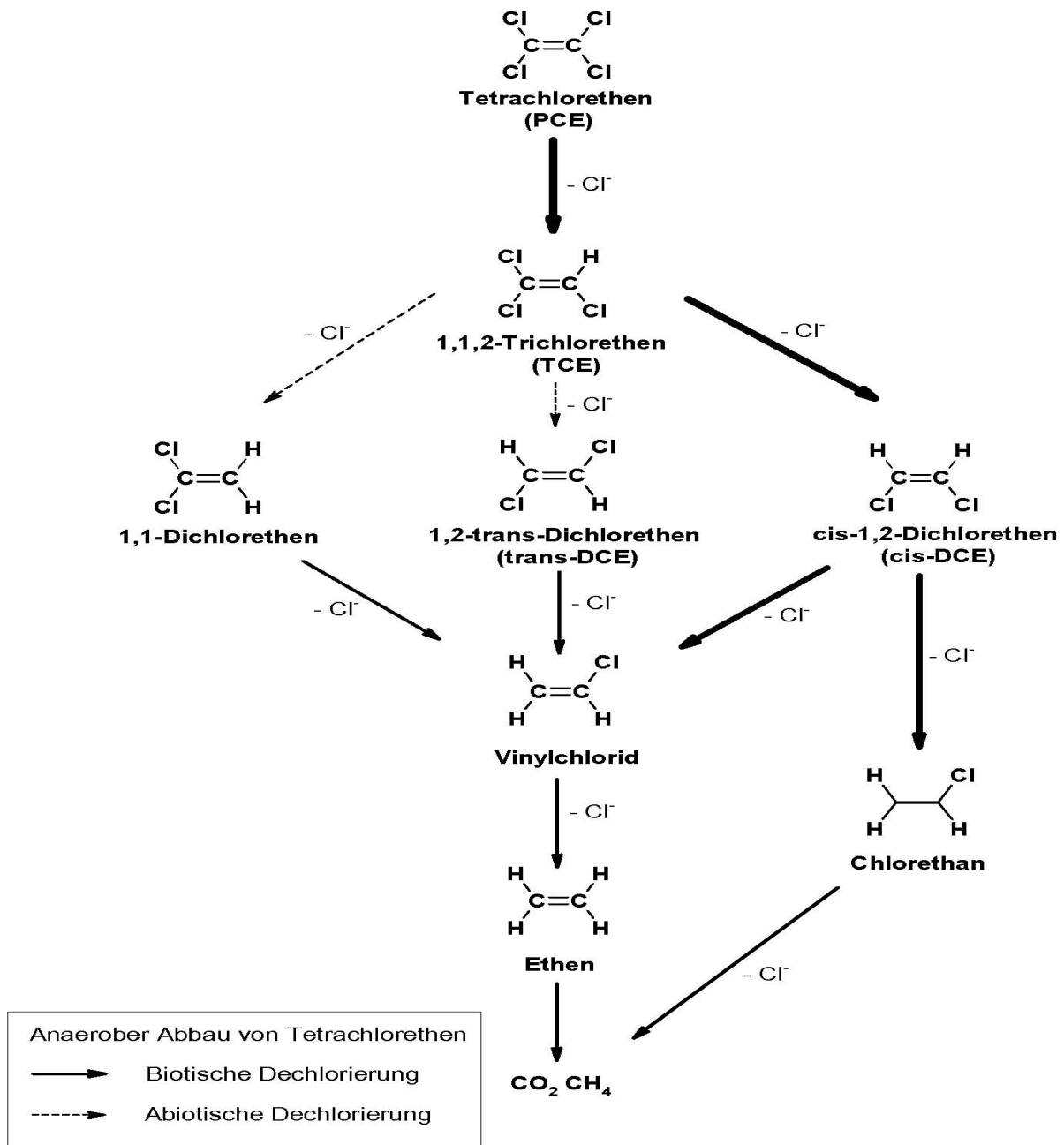
Hochchlorierte Kohlenwasserstoffe werden im Grundwasser nur unter anaeroben Bedingungen abgebaut. Geringer chlorierte Kohlenwasserstoffe wie Trichlorethen (TCE) werden auch unter aeroben Bedingungen abgebaut. Bei niedrig chlorierten Kohlenwasserstoffen (DCE, VC) wird ein Abbau im aeroben Milieu aufgrund des größeren Energiegewinns bevorzugt.

Bei Anaerobverfahren zum Abbau von halogenierten Kohlenwasserstoffen ist der Zusatz von Cosubstraten notwendig. Von praktischer Bedeutung sind organische Säuren, Alkohole, Melasse und HRC®.

Durch den Abbau des Cosubstrats werden im Grundwasser vorhandener Sauerstoff, Nitrat, oxidierte Eisenverbindungen und Sulfat reduziert und Methan und Wasserstoff gebildet. Somit wird ein strikt anaerobes Milieu geschaffen, in dem die Prozesse der reduktiven Dehalogenierung ablaufen können (Abb. 8.2). In Abhängigkeit der Standortrandbedingungen (zum Beispiel überbaute Standorte) kann es dabei erforderlich sein, die Bildung und Akkumulation von Methan zu überwachen.

Bakterienstämme der Gattung *Dehalococcoides ethenogenes* sind in der Lage, hoch chlorierte Ethene und Chlorbenzole vollständig zu mineralisieren. Einzelne Bakterienstämme bauen die hoch chlorierten Kohlenwasserstoffe dagegen nur bis zum cis-1,2-Dichlorethen bzw. Vinylchlorid ab. Unter anaeroben Bedingungen stellen diese Substanzen „dead-end“-Produkte dar. Bei einem Wechsel der Milieubedingungen sind diese Verbindungen jedoch vollständig mineralisierbar. Ob dies möglich ist, muss durch Labor- und Feldversuche sichergestellt werden.

Bei einem Einsatz von z.B. Melasse werden in Abwesenheit von *D. ethenogenes* hauptsächlich DCE und VC gebildet werden, was einer massiven Erhöhung des Schadenspotenzials gleicht. Einem Fehlen von *D. ethenogenes* könnte durch Zugabe von Zuchtkulturen dieses Organismus entgegengewirkt werden (Bioaugmentation). Im Rahmen von Voruntersuchungen sollte daher auf Ethen und Ethan sowie ggf. auf *D. ethenogenes* untersucht werden. Durch ergänzende Labor- und Feldversuche sollte überprüft werden, ob ein vollständiger Abbau stattfindet.



nach VOGEL & Mc CARTY 1985

Abbildung 8.2: Biologischer Abbau von Chlorkohlenwasserstoffen (Chlorethenen)

8.2.1 Melasse, organische Säuren, Alkohole – anaerober LCKW-Abbau (reduktive Dechlorierung)

Melasse, organische Säuren, Alkohole - anaerober LCKW-Abbau (reduktive Dechlorierung)

Prinzip

Die hochchlorierten Kohlenwasserstoffe wie Tetrachlorethen (PCE) und Tetrachlormethan (TCM) werden im Grundwasser nur unter anaeroben Bedingungen abgebaut, die geringer chlorierten Kohlenwasserstoffe wie Trichlorethen (TCE) auch unter aeroben Bedingungen. Bei niedrig chlorierten Kohlenwasserstoffen (DCE, VC) wird ein Abbau im aeroben Milieu aufgrund des größeren Energiegewinns bevorzugt.

Dehalococcoides ethenogenes-Stämme sind derzeit die einzigen in der Literatur beschriebenen Mikroorganismen, die in der Lage sind, PCE bis zum Ethen abzubauen. Verschiedene Bakterienkonsortien können ebenfalls die hoch chlorierten Kohlenwasserstoffe vollständig mineralisieren. In verschiedenen Schadensfällen bauen die standorteigenen Bakterien die LCKW dagegen nur bis zu cis-1,2-Dichlorethen bzw. Vinylchlorid ab.

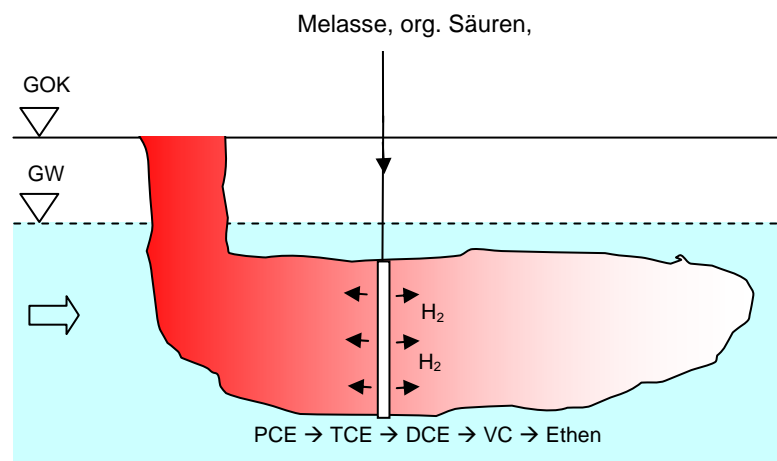
Aufbau und Beschreibung

Der LCKW-Abbau im anaeroben Milieu erfordert das Vorhandensein von gut abbaubaren organischer Substanzen (Cosubstrate). Als Cosubstrate können beispielsweise organische Säuren, Alkohole, Melasse oder andere organische Begleitsubstanzen (Mineralöle, Aromaten, zum Beispiel BTEX, PAK) wirksam sein. Alkohole können zusätzlich zur Schadstoffmobilisierung beitragen. Zur Stimulierung der Prozesse werden die Cosubstrate entweder dem Infiltrationswasser beigemischt oder direkt in die Infiltrationsbrunnen eingebracht.

Beim fermentativen Abbau der Cosubstrate wird Wasserstoff gebildet. Der Wasserstoff wirkt im anaeroben Milieu als Reduktionsmittel, also als Elektronendonator, das oxidiert wird. Die LCKW wirken als Oxidationsmittel bzw. Elektronenakzeptoren und werden reduziert. Dabei werden die Chloratome stufenweise durch Wasserstoffatome, die beim Abbau des Cosubstrates entstanden sind, ersetzt. Dieser Prozess wird als cometabolische Reduktion (reduktive Dechlorierung = Halorespiration) bezeichnet:

Tetrachlorethen (PCE) → Trichlorethen (TCE) → cis-1,2-Dichlorethen (DCE) oder trans-1,2-Dichlorethen bzw. 1,1 Dichlorethen → Vinylchlorid (VC) → Ethen → Mineralisierung.

Im Grundkonzept des Verfahrens ist eine hydraulische Abstromsicherung nicht vorgesehen. Dennoch kann es im Einzelfall sinnvoll und erforderlich sein, den Abstrom während der Durchführung des Verfahrens hydraulisch zu sichern.



Einbringen eines Cosubstrates, dadurch Bildung von Wasserstoff als Elektronendonator zur reduktiven Dechlorierung (schematische Darstellung)

Erforderliche verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

- Kenntnis der Hydrochemie, insbesondere Sauerstoff (< 0,5 g/l erforderlich), DOC (hoher DOC beschleunigt mikrobielle Dechlorierung), Redoxspannung, Wasserstoff
- Kenntnis über Verteilung der LCKW-Abbauprodukte
- ggf. Nachweis von Mikroorganismen der Gruppe *Dehalococcoides ethenogenes*

<p>Melasse, organische Säuren, Alkohole - anaerober LCKW-Abbau (reduktive Dechlorierung)</p> <p>Anwendungsbereich</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anwendung zum Abbau von LCKW im Grundwasser im Abstrom einer Schadstoffquelle (Schadstofffahne) oder im unmittelbaren Umgebungsbereich der Schadstoffquelle, unterstützend auch zur Quellensanierung • Voraussetzung ist die gleichmäßige Verteilung von Cosubstrat im Untergrund. eine Anwendung grundsätzlich bei homogenen und durchlässigen Porengrundwasserleitern Erfolg versprechend
<p>Anwendungsgrenzen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wenig durchlässige Grundwasserleiter • Klufftgrundwasserleiter • Schadstoffphasen (müssen durch physikalische Verfahren entfernt werden)
<p>Besonderheiten, Hinweise, Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei Mischkontaminationen mit Kohlenwasserstoffen oder in huminstoffreichen (Torf) Aquiferen treten häufig bereits anaerobe Bedingungen auf, bei reinen LCKW-Schadensfällen müssen die anaeroben Bedingungen durch das Cosubstrat eingestellt werden. Mit diesem Verfahren kann auch eine Quellensanierung möglich sein, da einerseits die im Zuge des Abbaus des Cosubstrates gebildeten Transformationsprodukte wie Alkohole zusätzlich als Lösungsvermittler dienen und andererseits Cosubstrate wie Methanol, Ethanol und organische Säuren lösungsvermittelnd wirken. Es kommt zusätzlich zu einer Solubilisierung der Schadstoffe. • Zum Nachweis des Abbaus sollte auf jeden Fall auf Ethen und Ethan analysiert werden. • Ggf. Nachweis von Mikroorganismen der Gruppe <i>Dehalococcoides ethenogenes</i> • Durch Laborversuche kann geprüft werden, ob ein vollständiger Abbau stattfindet. • Eine Anwendung ist primär bei homogenen und durchlässigen Grundwasserleitern Erfolg versprechend. Durch die Verwendung von Grundwasserzirkulationsbrunnen zum optimalen Einmischen der Substrate, kann das Verfahren darüber hinaus auch bei heterogenem Bodenaufbau eingesetzt werden.
<p>Entwicklungsstand</p> <ul style="list-style-type: none"> • Das Verfahren der reduktiven Dechlorierung mit Cosubstraten wird bundesweit eingesetzt. Es kann als Stand der Technik bezeichnet werden.
<p>Rechtliche Hinweise</p> <p>Wasserrechtliche Erlaubnis. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.</p>
<p>Referenzprojekte / zuständige Behörde</p> <ul style="list-style-type: none"> • Industriegebiet westliches Bergedorf, Hamburg / Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg • Ostend/Oberhafen, Frankfurt am Main / Regierungspräsidium Darmstadt, Abteilung Umwelt Frankfurt am Main • Industriegebiet West, Speyer / Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd, Neustadt a. d. Weinstraße • Ehem. Wäscherei Schleswig, CKW-Schaden / Kreis Schleswig-Flensburg: 1. Schritt: Injektion von Melasse für den CKW-Abbau bis cis-Dichlorethen, 2. Schritt: Schaffung aerober Bedingungen durch Injektion von Wasserstoffperoxid als Sauerstoffträger für den weiteren Abbau von cis-Dichlorethen (siehe auch Wasserstoffperoxid) • B-Plan-Fläche „Am Teufelspfuhl“, Bernau, Brandenburg / Landkreis Barnim
<p>Ausgewählte Literatur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Held, T., Blotvogel, J., Jacob, H., Dörr, H., Schlorke, N., Gödel, H.U. (2006): In-situ Reaktive Zone (IRZ) – Einsatz von Melasse zur mikrobiellen In-situ-Sanierung einer LCKW-Kontamination im Grundwasser. In: <i>altlasten spektrum</i>, 15. Jg., 04/2006, S. 208-215 • Zittwitz, M., Hein, P., Pistiolis, I., Moschik, A., Freygang, M., Großmann, J. (2008): Das Potenzial des biologischen Abbaus II, weiterer Feldversuch zum Abbau von LCKW bei extremer Schadstoffbelastung. In: Wasser, Luft und Boden, Suppl. TerraTech
<p>Bewertung durch den Arbeitskreis</p> <p>Für das Verfahren des Einbringens von Melasse als Cosubstrat liegen bisher in Deutschland Erfahrungen in zahlreichen Fällen vor. Andere Cosubstrate wie organische Säuren und Alkohole, werden nach Kenntnis des Arbeitskreises ebenfalls standardmäßig eingesetzt.</p>

8.2.2 HRC® (Hydrogen Release Compound) – anaerober LCKW-Abbau (reduktive Dechlorierung)

HRC® (Hydrogen Release Compound) – anaerober LCKW-Abbau (reduktive Dechlorierung)

Prinzip

Die hochchlorierten Kohlenwasserstoffe wie Tetrachlorethen (PCE) und Tetrachlormethan (TCM) werden im Grundwasser nur unter anaeroben Bedingungen abgebaut, Trichlorethen (TCE) wird sowohl unter anaeroben wie auch unter aeroben Bedingungen metabolisiert. Bei dieser Methode wird das Cosubstrat in Form eines Milchsäurepolymeres direkt in die Brunnen eingebracht.

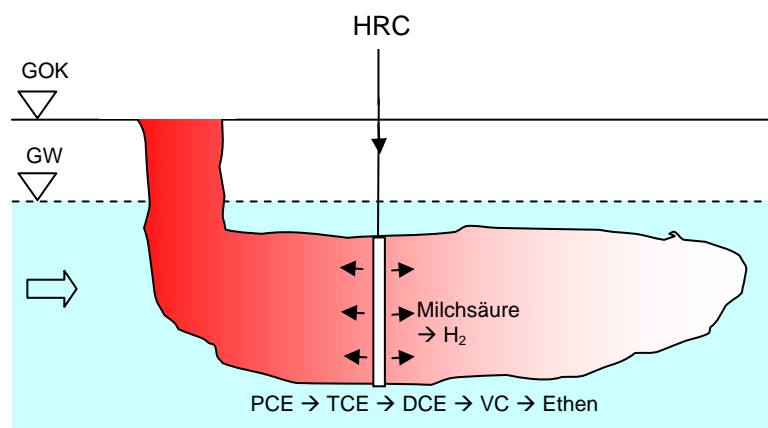
Aufbau und Beschreibung

Der LCKW-Abbau im anaeroben Milieu erfordert das Vorhandensein eines Elektronendonators. Der Wasserstoff wirkt im anaeroben Milieu als Reduktionsmittel, also Elektronendonator, der oxidiert wird. Die LCKW wirken als Oxidationsmittel bzw. Elektronenakzeptoren und werden reduziert. Dabei werden die Chloratome stufenweise durch Wasserstoffatome, die beim Abbau des Cosubstrates entstanden sind, ersetzt. Dieser Prozess wird als cometabolische Reduktion (reduktive Dechlorierung = Halorespiration) bezeichnet:

Tetrachlorethen (PCE) → Trichlorethen (TCE) → cis-1,2-Dichlorethen (DCE) oder trans-1,2-Dichlorethen bzw. 1,1-Dichlorethen → Vinylchlorid (VC) → Ethen → Mineralisierung

Ein Wasserstoff-Donator ist HRC® (Hydrogen Release Compound), das in den Grundwasserleiter eingebracht wird und Milchsäure als Cosubstrat freisetzt. Beim fermentativen Abbau von Milchsäure entsteht Wasserstoff, der als Elektronendonator (Reduktionsmittel) zur reduktiven Dechlorierung der LCKW erforderlich ist. Der Abbau der Milchsäure sorgt dafür, dass sich für den CKW-Abbau ein anaerobes Milieu einstellt.

Im Grundkonzept des Verfahrens ist eine hydraulische Abstromsicherung nicht vorgesehen. Dennoch kann es im Einzelfall sinnvoll und erforderlich sein, den Abstrom während der Durchführung des Verfahrens hydraulisch zu sichern.



Einbringen von HRC®, dadurch Freisetzung von Milchsäure und Bildung von Wasserstoff als Elektronendonator zur reduktiven Dechlorierung (schematische Darstellung)

Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

- Kenntnis der Hydrochemie, insbesondere Sauerstoff (< 0,5 g/l erforderlich), DOC (hoher DOC beschleunigt mikrobielle Dechlorierung), Redoxspannung, Wasserstoff
- Kenntnis über Verteilung der CKW-Abbauprodukte
- Zum Nachweis des Abbaus sollte auf jeden Fall auf Ethen und Ethan analysiert werden.
- Durch Laborversuche kann geprüft werden, ob ein vollständiger Abbau stattfindet.
- Ggf. Nachweis von Mikroorganismen der Gruppe *Dehalococcoides ethenogenes*

<p>HRC[®] (Hydrogen Release Compound) – anaerober LCKW-Abbau (reduktive Dechlorierung)</p> <p>Anwendungsbereich</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anwendung zum Abbau von LCKW im Grundwasser im Abstrom einer Schadstoffquelle (Schadstofffahne) oder im unmittelbaren Umgebungsbereich der Schadstoffquelle, unterstützend auch zur Quellensanierung • Voraussetzung ist die gleichmäßige Verteilung von HRC[®] im Untergrund. Die Anwendung ist nur bei homogenen und durchlässigen Porengrundwasserleitern Erfolg versprechend
<p>Anwendungsgrenzen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wenig durchlässige Grundwasserleiter • Klufftgrundwasserleiter • Schadstoffphasen (müssen durch physikalische Verfahren entfernt werden)
<p>Besonderheiten, Hinweise, Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wenn bei dem Verfahren keine hydraulische Kreislaufführung eingesetzt wird, müssen die Eintragsstellen mit einem geringem Seitenabstand platziert werden, um eine vollständige Verteilung des Cosubstrats im Aquifer zu erreichen • Es besteht bei Anwendung des Verfahrens das Risiko der Bildung von Zwischenprodukten wie VC. Daher ist eine gleichzeitige Sicherung des Abstroms erforderlich
<p>Entwicklungsstand</p> <ul style="list-style-type: none"> • Das Verfahren der reduktiven Dechlorierung wird bundesweit in einigen Fällen eingesetzt. Aus der Statistik des Altlastenausschusses der LABO sind 10 Fälle bekannt, davon 5 Fälle mit HRC[®] als Wasserstoff-Donator • HRC[®] wurde in den USA bereits vielfach eingesetzt • Das Verfahren kann als Stand der Technik bezeichnet werden
<p>Rechtliche Hinweise</p> <p>Wasserrechtliche Erlaubnis. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.</p>
<p>Referenzprojekte / zuständige Behörde</p> <ul style="list-style-type: none"> • LCKW-Schaden Neunkirchen / Kreis Neunkirchen, Saarland, Untere Wasserbehörde • LCKW-Schaden Rainbow Elementary School, Ansbach, Bayern / Wasserwirtschaftsamt Ansbach
<p>Ausgewählte Literatur</p> <ul style="list-style-type: none"> • WU, M. (2001): A Pilot Study Using HRCTM to Enhance Bioremediation of CAHs • Stupp, H. D. et al. (2007): Biologische Verfahren zur Sanierung von CKW-Grundwasserschäden – Systematik und Beschreibung der In-situ-Techniken. In: <i>altlasten spektrum</i> 03/2007
<p>Bewertung durch den Arbeitskreis</p> <p><i>Mit den Verfahren des Einbringens von HRC[®] als Elektronendonator liegen bisher in Deutschland erst wenige Erfahrungen vor. Zu beachten sind die hohen Kosten des Produktes HRC[®]. Es besteht bei Anwendung des Verfahrens das Risiko der Bildung von Zwischenprodukten wie VC. Daher ist eine gleichzeitige Sicherung des Abstroms erforderlich.</i></p>

8.2.3 Methan-Biostimulation – aerober LCKW-Abbau

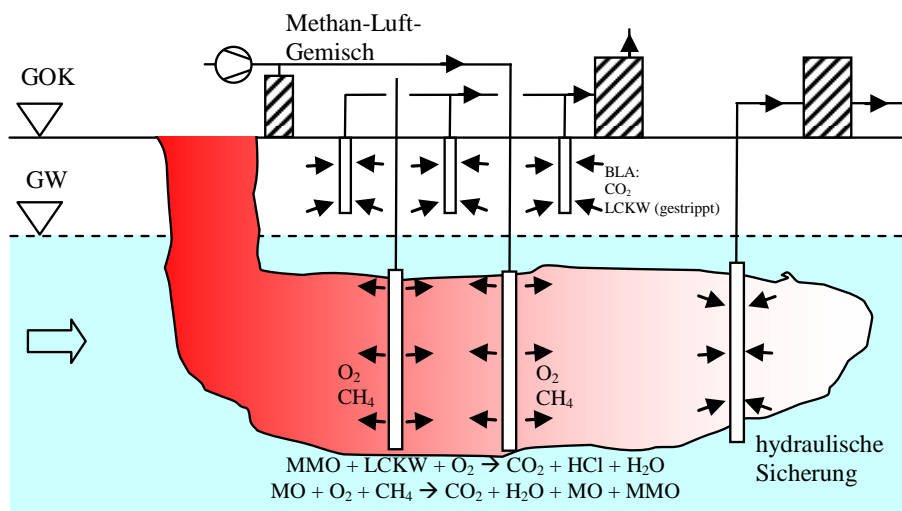
Methan-Biostimulation – aerober LCKW-Abbau

Prinzip

Bei niedrig chlorierten Kohlenwasserstoffen (DCE, VC, cometabolisch auch TCE) ist vor allem ein Abbau im aeroben Milieu von Bedeutung (oxidative Dechlorierung). Je niedriger der Chlorgehalt der Verbindung ist, desto schneller verläuft der aerobe Abbau. Der Abbau ist auf direktem Wege mit Sauerstoff möglich, wobei der Schadstoff aus Elektronenakzeptor fungiert, Elektronen an den Sauerstoff abgibt und den Bakterien als Energiequelle dient. Erfolgt der Abbau indirekt und cometabolisch, ist neben Sauerstoff ein Cosubstrat erforderlich, zum Beispiel Methan. Beim Methan-Biostimulationsverfahren werden die methylophilen Mikroorganismen durch Einbringen von Methan in den Grundwasserleiter im aeroben Milieu versorgt.

Aufbau und Beschreibung

Das Methan-Biostimulationsverfahren zielt darauf ab, methanotrophe Mikroorganismen (MO) zu vermehren. Dazu ist es erforderlich, die Mikroorganismen im gesamten Sanierungsverlauf mit Methan zu versorgen. Die methanotrophen Mikroorganismen produzieren zur Verwertung des Methans das Enzym Methanmonooxygenase (MMO), das als eine Nebenaktivität die Oxidation von LCKW katalysiert. Beim Methan-Biostimulationsverfahren wird ein methanhaltiges Luftgemisch in die gesättigte Bodenzone unterhalb der Kontamination eingeblasen. Damit handelt es sich um eine Kombination aus In-situ-Strippen und biologischem In-situ-Verfahren. Die Methan-Konzentration in der Bodenluft beträgt 0,5 – 2,2 %, um die untere Explosionsgrenze von Methan zu unterschreiten. Durch das Einblasen des Methan-Luft-Gemisches setzt ein Strippeffekt ein. Zusätzlich kann es zur Schadstoffmobilisierung kommen. Daher sind eine Sicherung des GW-Abstroms und eine Bodenluftabsaugung erforderlich.



Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

- Kenntnis der Hydrochemie, insbesondere Sauerstoff, DOC, Redoxspannung, Kohlendioxid
- Untersuchung auf methanotrophe Mikroorganismen im Grundwasser
- Kenntnis der Verteilung der CKW-Abbauprodukte

Anwendungsbereich

- Anwendung im Grundwasser im Abstrom einer Schadstoffquelle (Schadstofffahne) oder im unmittelbaren Umgebungsbereich der Schadstoffquelle, unterstützend auch zur Quellensanierung
- Voraussetzung ist die gleichmäßige Verteilung von Sauerstoff und Methan im Untergrund. Daher ist eine Anwendung nur bei homogenen und durchlässigen Porengrundwasserleitern Erfolg versprechend
- Geeignet nur für niedrig chlorierte LCKW

Methan-Biostimulation – aerober LCKW-Abbau
Anwendungsgrenzen <ul style="list-style-type: none"> • Wenig durchlässige Grundwasserleiter • Kluffgrundwasserleiter • Schadstoffphasen (müssen durch physikalische Verfahren entfernt werden) • Höher chlorierte LCKW
Besonderheiten, Hinweise, Risiken <ul style="list-style-type: none"> • Aufgrund von Strippeffekten ist eine zusätzliche Bodenluftabsaugung in der ungesättigten Zone erforderlich. Zudem besteht bei Anwendung des Verfahrens das Risiko der Mobilisierung von Schadstoffen. Daher ist eine Sicherung des Abstroms erforderlich • Um die Wirksamkeit der biologischen Verfahrenskomponente abschätzen zu können, ist der Anteil des Strippeffektes zu quantifizieren
Entwicklungsstand <ul style="list-style-type: none"> • Das Verfahren wurde in den USA entwickelt und dort bereits mehrfach eingesetzt. In Deutschland wurde das Methan-Biostimulationsverfahren in wenigen Fällen eingesetzt. Es gibt zwei Fälle in Nordrhein-Westfalen und eine Anwendung in Berlin • Das Verfahren kann als praxiserprobt bezeichnet werden
Rechtliche Hinweise Wasserrechtliche Erlaubnis. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.
Referenzprojekte / zuständige Behörde <ul style="list-style-type: none"> • Ehem. Textilbetrieb in Mönchengladbach / Untere Bodenschutzbehörde der Stadt Mönchengladbach • Altstandort im Kreis Lippe / Untere Bodenschutzbehörde des Kreises Lippe
Ausgewählte Literatur <ul style="list-style-type: none"> • Zittwitz, M., Gerhardt, M. (2006): Das Methan-Biostimulationsverfahren. In: TerraTech 10/2006. • Hazen, T. C., Fliermanns, C. B. (1994): Bioremediation of contaminated Groundwater. US Pat. No. 5,384,048.
Bewertung durch den Arbeitskreis <i>Mit diesem Verfahren liegen bisher in Deutschland erst in wenigen Fällen Erfahrungen vor. Die Wirksamkeit des Verfahrens ist nur bei niedrig chlorierten Kohlenwasserstoffen gegeben. Hoch chlorierte Kohlenwasserstoffe sind nicht aerob abbaubar. Durch das Einblasen des Methan-Luft-Gemischs setzt ein Strippeffekt ein, so dass Schadstoffe mobilisiert und über das Grundwasser oder in die Bodenluft transportiert werden können. Daher sind eine Sicherung des Abstroms und eine Bodenluftabsaugung erforderlich. Dadurch steigt der Aufwand des Verfahrens.</i>

9 Chemische Verfahren

9.1 In-situ-chemische-Oxidation – ISCO

Die In-situ-chemische-Oxidation (ISCO) ist ein Sanierungsverfahren, das in Nordamerika und in Europa in den letzten Jahren relativ große Aufmerksamkeit erfahren hat, unter anderem weil das Verfahren für eine relativ große Anzahl von Schadstoffgruppen und Standortbedingungen einen vielversprechenden Ansatz darzustellen scheint.

Bei der In-situ-chemischen-Oxidation werden Schadstoffe im Untergrund durch Einleitung eines chemischen Oxidationsmittels nach dem Prinzip einer „kalten Verbrennung“ abiotisch zerstört, wobei eine vollständige Umsetzung zu umweltneutralen Stoffen wie Kohlendioxid und Wasser sowie – bei chlorierten Verbindungen – Chlorid angestrebt wird.

Prinzipiell können alle organischen Schadstoffe durch Oxidationsmittel zerstört werden. Jedoch sind nicht alle technisch geeigneten und handhabbaren Oxidationsmittel gleichermaßen für alle altlastentypischen organischen Schadstoffe geeignet, so dass der Erfolg einer Maßnahme unter anderem von der Auswahl des am besten geeigneten Oxidationsmittels oder einer Kombination von Oxidationsmitteln abhängt. Praxiserprobte und für die In-situ-Sanierung geeignete Oxidationsmittel, die sich in ihren Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten jedoch teilweise deutlich unterscheiden, sind im Wesentlichen:

- Kalium- und Natriumpermanganat
- Fentons Reagenz (Wasserstoffperoxid mit Eisen(II) als Katalysator-Additiv)
- Ozon
- Persulfat

Die Oxidations-Reaktion selbst erfolgt im Grundwasserleiter sehr schnell, sobald ein wirksamer Kontakt zwischen dem Oxidationsmittel und der organischen Verbindung hergestellt ist. Die Geschwindigkeit und Effektivität des Oxidationsprozesses im Grundwasserleiter wird daher maßgeblich vom Transport des Oxidationsmittels zum Schadstoff und der möglichen Kontaktfläche zwischen Oxidationsmittel und Schadstoff limitiert. ISCO kann daher relativ langsam ablaufen, wenn

- (1) der Schadstoff in Phase vorliegt und der Kontakt des Oxidationsmittels nur an der Oberfläche des Phasenkörpers stattfinden kann oder
- (2) der Schadstoff in geringdurchlässigen Porenräumen vorliegt, in die das Oxidationsmittel nur langsam eindiffundieren kann.

Anhand von Labor- und Technikumsversuchen konnte gezeigt werden, dass die Oxidation des Schadstoffs durch Permanganat sogar vollständig zum Erliegen kommen kann, wenn der Kontakt an der Phasengrenze durch die charakteristischen Mangandioxid-Ausfällungen (Braunstein) unterbunden wird.

Typisch ist auch ein Wiederanstieg der Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser Tage, Wochen oder Monate nach erfolgter Sanierung mittels chemischer Oxidation. Hierbei diffundieren Schadstoffe aus geringdurchlässigen Bereichen des Grundwasserleiters, die nicht durch die Oxidationsmittelinfiltration erfasst werden konnten, zurück in Bereiche besserer Durchlässigkeit. Diesem Phänomen begegnet man in der Regel durch wiederholte Infiltrationszyklen.

Neben dem Schadstoff werden aber auch der oxidierbare Anteil der Grundwasserleitermatrix und die oxidierbaren Grundwasserinhaltsstoffe weitgehend umgesetzt. Aus diesem Grund muss das Oxidationsmittel stets in erheblichem Überschuss – bezogen auf die stöchiometrische Umsetzung der Schadstofffracht – eingesetzt werden. Folglich ist in der Praxis der so genannte Matrixbedarf (in der angelsächsischen Literatur: *soil* oder *natural oxygen demand*, SOD oder NOD) experimentell zu ermitteln und als relevante Bemessungsgröße zu verwenden und nicht die Schadstofffracht. Da die Praxis zeigt, dass der Matrixbedarf auch in Böden mit relativ geringen Gehalten an organischem Kohlenstoff sehr erheblich ist, ist der Einsatz von ISCO in der Regel nur für begrenzte Hochlastbereiche wirtschaftlich durchzuführen. Bei ISCO-Anwendungen handelt es sich somit um Verfahren zur Sanierung räumlich begrenzter Hochlastbereiche, wobei Phasenkörper kritisch sein können.

Die technische Machbarkeit und Realisierbarkeit einer ISCO-Anwendung ist somit sorgfältig und standortbezogen zu bewerten, wobei generell

- (1) die Lithologie,
- (2) der Chemismus der Matrix,
- (3) das Schadstoffprofil,
- (4) die spezifischen Eigenschaften des einzusetzenden Oxidationsmittels und
- (5) die technische Realisierbarkeit des Infiltrationssystems am Standort

in die Verfahrensbewertung eingehen müssen. Die Grundlagen für die In-situ-chemische Oxidation unterscheiden sich je nach einzusetzendem Oxidationsmittel und werden in den einzelnen Verfahrensdatenblättern daher separat diskutiert.

Die folgende Tabelle liefert erste Hinweise für die grundsätzliche Anwendbarkeit verschiedener ISCO-Verfahren. Die Anwendbarkeit ist jeweils im Einzelfall zu prüfen.

Tabelle 9.1: Schadstofftypen und Boden-/Prozessparameter für die Anwendung verschiedener ISCO-Verfahren, geändert nach Keijzer et al. (2004)

ISCO-Verfahren	Schadstoff		Boden-/Prozessparameter	
	geeignet	ungeeignet	Günstig	ungünstig
Fentons Reagenz	CKW BTEX niedermolekulare PAK Kurzketttige Aliphaten Freie Cyanide	höher molekulare PAK Langkettige Aliphaten Cyanid-Komplexe PCB	2 < pH < 6 Org. Subst. gering Permeabilität hoch Heterogenität gering	pH > 6 Org. Subst. hoch Permeabilität Gering Heterogenität hoch
Ozon	CKW (Halogen-Alkene) BTEX niedermolekulare PAK	Halogen-Alkane höher molekulare PAK MKW PCB	pH niedrig Bodenfeuchtigkeit gering Permeabilität Hoch Heterogenität Gering	pH hoch Bodenfeuchtigkeit hoch Permeabilität Gering Heterogenität hoch
Kalium-/ Natriumpermanganat	CKW (Halogen-Alkene) Toluol, Xylol Ethylbenzol	Halogen-Alkane Benzol MKW PAK PCB Cyanide	Permeabilität hoch Heterogenität Gering	Permeabilität gering Heterogenität hoch
Persulfat (nicht aktiviert)	CKW (Halogenalkene) Toluol, Xylol Ethylbenzol, kurzkettige MKW	Halogen-Alkane Benzol langkettige MKW PCB	Permeabilität Hoch Heterogenität Gering	Permeabilität Gering Heterogenität hoch
Persulfat (aktiviert)	CKW (Halogenalkane u. -alkene) BTEX kurzkettige MKW niedermolekulare PAK	langkettige MKW höher molekulare PAK PCB	Permeabilität Hoch Heterogenität Gering	Permeabilität gering Heterogenität hoch

Das prinzipielle Verfahrenschema für ISCO mit Permanganat bzw. Persulfat ist in Abbildung 9.1 dargestellt. Bei Anwendung anderer Reagenzien (z.B. Fentons Reagenz) wird die Verfahrenstechnik in der On-site-Anlage etwas aufwändiger (s. Verfahrensblatt in Kap. 9.2.1).

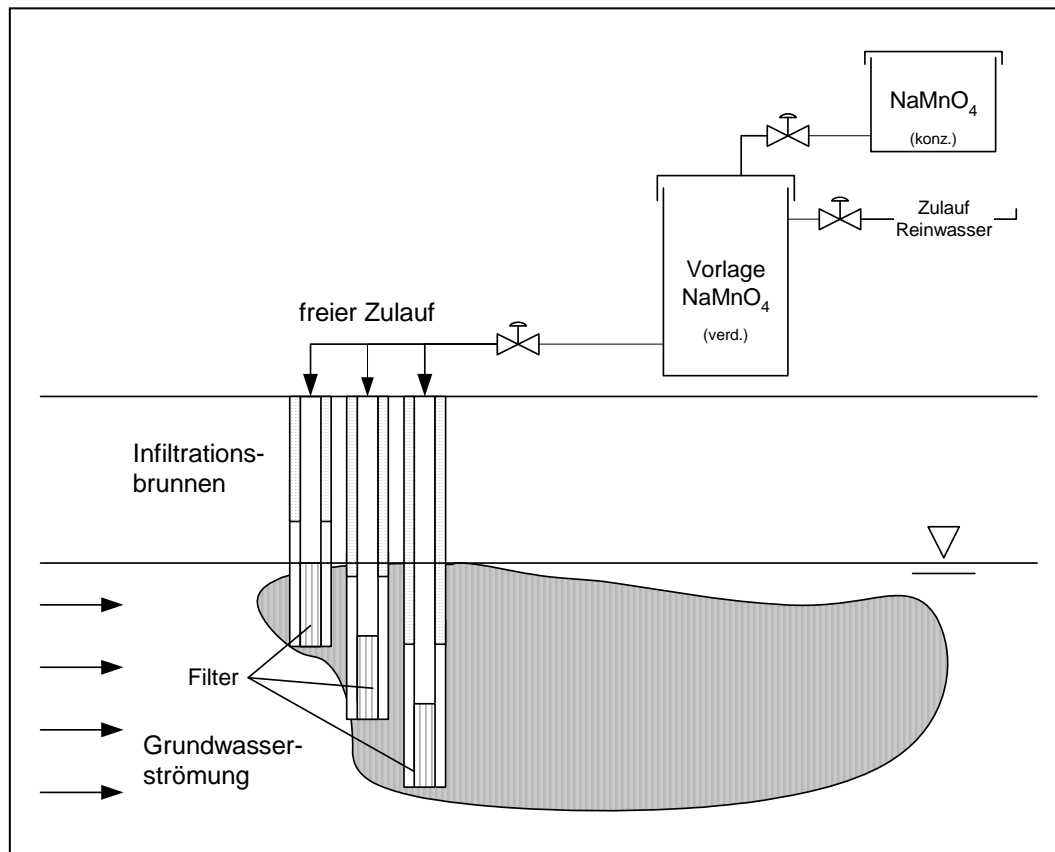


Abb. 9.1: ISCO mit Natriumpermanganat (NaMnO₄) oder Natrium-Persulfat (NaS₂O₈)

9.1.1 Kalium-/Natriumpermanganat

<p>Kalium- / Natriumpermanganatinjektion</p> <p>Prinzip</p> <p>Abiotische und oxidative Umsetzung organischer Stoffe mittels Permanganat-Ionen, die als Lösung von Alkalipermanganaten (NaMnO_4, KMnO_4) direkt, d.h. ohne weitere Additive, in den zu sanierenden Aquiferbereich infiltriert werden. Das Oxidationspotenzial des Permanganat-Ions liegt bei ca. +1,2 V. Permanganat oxidiert selektiv ungesättigte organische Verbindungen oder Verbindungen mit funktionellen Gruppen (Hydroxyl-, Aldehyd-Gruppen). Die gesättigten Kohlenstoffverbindungen, z.B. Alkane und Benzol, bieten keinen Ansatzpunkt für den oxidativen Angriff. Dennoch ist auch die Oxidationswirkung des Permanganats im Grundwasserleiter nicht als schadstoffspezifisch zu betrachten. Neben den Zielkontaminanten wird der Großteil der im Feststoff oder im Wasser vorhandenen organischen und anorganischen reduzierten Substanzen ebenfalls oxidiert. Das Permanganat ist im Grundwasserleiter grundsätzlich stabil, bis es durch Redoxreaktionen mit dem Schadstoff oder mit Matrixkomponenten umgesetzt wird, wobei das Mangan von Mn(VII) zu Mn(IV) reduziert und bei für natürliche Grundwässer typischen pH-Werten als MnO_2 ausgefällt wird. Dadurch ist eine Auffüllung des Aquifers bei geeigneten hydraulischen Voraussetzungen möglich, so dass durch relativ langsame Diffusionsprozesse auch Bereiche geringerer hydraulischer Durchlässigkeit erfasst werden können. Die Reichweite eines Infiltrationspegels ist vom Infiltratvolumen und der Grundwasserhydraulik abhängig. Zu beachten ist ein tendenzielles Absinken der Lösung aufgrund der im Vergleich zum Grundwasser höheren Dichte des Oxidationsmittels.</p>
<p>Aufbau und Beschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einrichtung mehrerer Infiltrationsbrunnen (optional: Direct-Push) und Beobachtungspegel. Das Pegelnetz ist anhand der Sanierungsziele und im Hinblick auf eine optimale dreidimensionale Verteilung des Oxidationsmittels zu dimensionieren. • Die Infiltrationsbrunnen werden mit handelsüblichem Rohr- und Filtermaterial (zum Beispiel PVC, HDPE) ausgebaut. Die Filterlänge sollte unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten nicht zu lang gewählt werden, um eine gute vertikale Verteilung des Infiltrats zu erzielen. • Die Anlagentechnik beschränkt sich auf die Verdünnung der angelieferten konzentrierten Permanganatlösung auf die geeignete Infiltrationskonzentration, sofern diese nicht manuell durchgeführt werden kann. Bei ausreichend großer hydraulischer Durchlässigkeit der Grundwasserleitermatrix kann die Infiltration mittels freien Zulaufs erfolgen. • Ein Abströmen von nicht verbrauchtem Permanganat ist aufgrund der in der Regel quantitativen Umsetzung nicht zu erwarten, sollte jedoch einzelfallbezogen überprüft werden.
<p>Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kenntnis des Schadensbildes (insbesondere Art und Ausdehnung der Quelle) • Geologische und hydrogeologische Beschreibung des Untergrunds • Laborversuch zur Ermittlung des Oxidationsmittelbedarfs, des Stoffumsatzes und der Metabolite • Feldversuche zur Bestimmung von Reichweiten und Infiltrationsparameter, Stoffumsatz im Feld, Rekontaminationseffekte und möglicher Freisetzung von Metaboliten oder anderen Stoffen
<p>Anwendungsbereich</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anwendung ist für Quellbereiche geeignet, jedoch nur eingeschränkt für Vorkommen freier Phase (NAPL), wegen der geringeren Oxidationsstärke und weil MnO_2-Ausfällungen an der Phasengrenzfläche den Prozess behindern können • Die Anwendung in der Fahne ist möglich, jedoch in der Regel keine wirtschaftliche Option, da die Behandlung großer Aquifervolumen aufgrund des erheblichen Matrixbedarfs kostenintensiv ist • Gute bis sehr gute hydraulische Durchlässigkeit. Auch geringfügige lithologische Heterogenitäten können die Wirksamkeit einschränken, da das Permanganat nicht den vollständigen Kontaminationsbereich erfasst. Dichteeffekte sind zu berücksichtigen • Hohe Anteile organischer Substanz bzw. reduzierter anorganischer Verbindungen im Untergrund erhöhen den Bedarf an Oxidationsmittel • Geeignet für CKW (Halogen-)Alkene, BTEX ohne Benzol, niedermolekulare PAK

Kalium- / Natriumpermanganatinjektion
Anwendungsgrenzen
<ul style="list-style-type: none"> • Nicht geeignet für (Halogen-)Alkane, Benzol, PAK, PCB, MKW, Cyanide • Untergrundbedingungen mit geringer und ungleichförmiger hydraulischer Durchlässigkeit
Besonderheiten, Hinweise, Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Ein Abstrom von Permanganat im Grundwasser über den Sanierungsbereich ist bei geeigneter Dosierung in der Regel nicht zu besorgen, da das Permanganat quantitativ umgesetzt wird • Die mögliche Freisetzung von Metallen durch die Oxidation der Grundwasserleitermatrix, insbesondere die Mobilisierung von Chrom durch die Oxidation von Cr(III) zu Cr(VI) sowie die mögliche Entstehung organischer Metabolite sind im Vorfeld zu bewerten. Schwermetalle liegen je nach Reinheitsgrad des Permanganats bereits in der Infiltrationslösung, in relevanten Konzentrationen vor • Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens hängt insbesondere von der einzusetzenden Chemikalienmenge ab, die je nach Beschaffenheit des Aquifers stark variiert. Da die Abbaureaktion unspezifisch ist, ist der Bedarf an Oxidationsmitteln nicht direkt aus der Schadstoffmenge abzuleiten, sondern mittels geeigneter Laborversuche an repräsentativen Aquifermaterialproben zu ermitteln • Beim Einsatz von Permanganat kann es durch die Braunsteinbildung zur temporären Einkapselung von Phasenkörpern kommen, wodurch ein „Sanierungserfolg“ vorgetäuscht wird. Nach einer gewissen Zeit (Auflösen des Braunsteins) können wieder erhöhte Schadstoffkonzentration im Wasser auftreten („Rebound Effekt“), wodurch erneute Permanganat Zugaben erforderlich werden • Der Umgang mit Permanganat erfordert die Einhaltung der materialspezifischen Sicherheitsanforderungen (R- und S-Sätze), was insbesondere relevant ist, wenn festes Kaliumpermanganat vor Ort gelagert und gehandhabt werden soll (Nutzungserklärung, opt. Einsatz als Sprengstoff) • Die Ausfällung von MnO₂ kann zur Verblockung des Porenraums führen
Entwicklungsstand
<ul style="list-style-type: none"> • Das Verfahren ist praxiserprobt
Rechtliche Hinweise
<ul style="list-style-type: none"> • Wasserrechtliche Erlaubnis, erlaubnispflichtig beim Bundesamt für Arzneimittelforschung (BfArM), Bonn. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.
Referenzprojekte / zuständige Behörde
<ul style="list-style-type: none"> • LCKW-Sanierung / Kreis Wesel (AAV-Projekt, Sanierung mit Natriumpermanganat) • LCKW-Sanierung / Kreis Soest (AAV-Projekt, Sanierung mit Kaliumpermanganat) • LCKW-Sanierung / Sindelfingen, LRA Böblingen (Sanierung mit Kaliumpermanganat)
Ausgewählte Literatur
<ul style="list-style-type: none"> • ITRC (2005): Technical and Regulatory Guidance for In Situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Groundwater. Technical/Regulatory Guideline. Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC). (http://www.itrcweb.org/Documents/ISCO-2.pdf). • Edel, H.-G., Schwarz, M., Seidel, U., Friedrich, M., Gerweck, H., Stäblein, H., Maier-Oßwald, W. (2004 und 2005): In-situ-chemische Oxidation (ISCO) – Einsatz eines neuartigen Verfahrens zur Sanierung eines LCKW-Grundwasserschadens, Teil 1. In: <i>altlasten spektrum</i>, 13. Jg., 05/2004, S. 251 – 258. Teil 2. In: <i>altlasten spektrum</i>, 14. Jg. 5/2005, S. 281 – 285. • Keijzer, T., Sumann, M., van Zutphen, M. (2004): Implementation of in-situ-remediation techniques: Encountered conditions and problems during ISCO projects. In: Barczewski, Koschitzky, Weber, Wege, R. (Hrsg.): VEGAS-Statuskolloquium 2004, Mitteilungen Heft 131, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, ISBN 3-933761-34-4, S. 71-78 • Hetzer, S., Klaas, N., Trötschler, O. (2006): Machbarkeitsstudie zum Einsatz von chemischer Oxidation (ISCO) zur Sanierung von CKW-Kontaminationen – Ergebnisse aus Batch- und Säulenversuchen, in: Eds. Braun, Koschitzky, Stuhmann, Mitteilungen Heft 150, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart 2006, ISBN 3-933761-53-0, S. 95-107 • Thelen, H.-P. (2007): Die in situ-Oxidation (ISCO) von chlorierten Kohlenwasserstoffen im Grundwasser – Praxiserfahrungen aus NRW. In: Tagungsband AAV-Fachtagung „Boden und Grundwasser“, AAV Altlastensanierungs- und Altlastenaufbereitungsverband NRW, Hattingen
Bewertung durch den Arbeitskreis
<p><i>Aussichten auf eine erfolgreiche Sanierung mithilfe von ISCO durch Kalium- / Natriumpermanganat-injektion werden als positiv beurteilt, da bereits langjährige Praxiserfahrungen vorhanden sind. Da in vielen Anwendungsfällen jedoch mit einem sogenannten Rebound-Effekt zu rechnen ist, ist für eine erfolgreiche Sanierung meist ein wiederholter Einsatz von ISCO notwendig.</i></p>

9.1.2 Fentons Reagenz

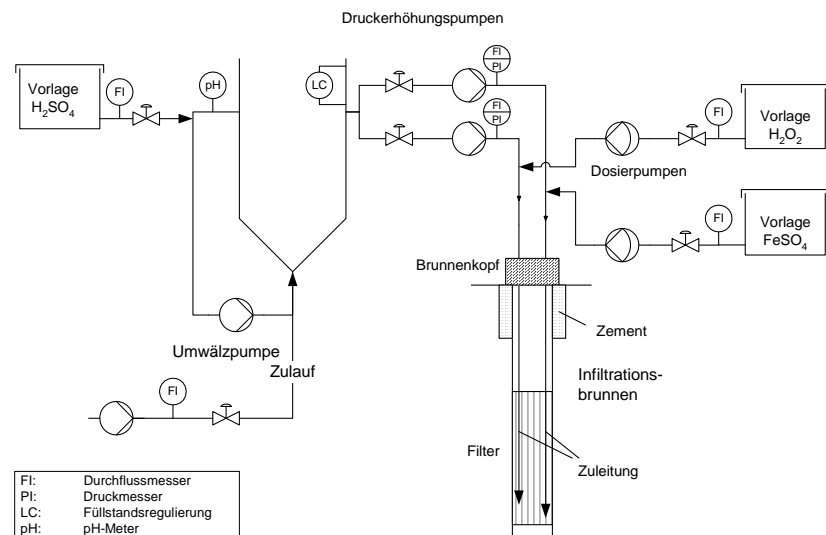
Fentons Reagenz

Prinzip

Abiotische, oxidative Umsetzung organischer Stoffe mittels Hydroxyl-Radikalen ($\text{OH}\bullet$), die im Grundwasserleiter (in-situ) erzeugt werden, indem nach Ansäuerung des betreffenden Grundwasserleiterabschnitts Wasserstoffperoxidlösung und Eisen(II)-Salzlösungen infiltriert werden. Durch ihr hohes Oxidationspotential (ca. +2 Volt) reagieren Hydroxyl-Radikale im Grundwasserleiter unspezifisch mit fast jeder Art von organischen Molekülen bzw. Molekülstrukturen. Die Bildung von Hydroxyl-Radikalen ($\text{OH}\bullet$) erfolgt durch die Fe(II)-katalysierte, monovalente H_2O_2 -Reduktion (Fenton-Reaktion). Die Ansäuerung ist erforderlich, um die Fe^{2+} -Ionen zu stabilisieren. Theoretisch ist die Eisenstabilisierung auch mittels chelatbildender Infiltratzusätze (patentierte Verfahren) möglich. Das Hydroxyl-Radikal ist sehr unbeständig und muss laufend nachgebildet werden, so dass keine Auffüllung des Grundwasserleiters mit nachfolgender Langzeitwirkung möglich ist. Verstärkt wird dieser Effekt durch die Instabilität des Wasserstoffperoxids. Generell ist davon auszugehen, dass die Wirksamkeit der Fentons-Infiltration auf Stunden bis wenige Tage beschränkt ist. Folglich ist generell davon auszugehen, dass eine Reaktion nur in solchen Aquiferbereichen erfolgt, die für den advektiven Transport des Infiltrats zugänglich sind, während auch kleinräumige feinkörnige Strukturen innerhalb eines heterogen aufgebauten Aquifers, in denen der Transport nur diffusiv erfolgen kann, nicht erfasst werden. Durch Wärmeentwicklung und Gasentwicklung kann es zu Strip-Effekten kommen, aufgrund derer Kontaminanten u.U. in die ungesättigte Bodenzone und die Atmosphäre entweichen können.

Aufbau und Beschreibung

Einrichtung des Pegelnetzes mit Infiltrationsbrunnen, Beobachtungspegel und ggf. Bodenluftabsaug-(BLA-) Pegel. Die Infiltrationsbrunnen werden i.d.R. mit Edelstahlfiltern ausgebaut. Das Pegelrohr wird durch eine Zementabdichtung gegen im Ringraum auftretende Druckzunahme gesichert. Der Brunnenkopf nimmt zwei getrennte Leitungen für die separate Zuleitung von Wasserstoffperoxid- und Eisen(II)-Lösung auf und wird gegen Infiltratrückstau gesichert (Dichtung). Die Anlagentechnik sieht die Ansäuerung der Vorlage auf den Ziel-pH-Wert mittels Schwefelsäuredosierung vor. Aus der Vorlage wird das angesäuerte Wasser über 2 Leitungen dem Infiltrationsbrunnen zugeleitet, wobei Peroxid und Eisensulfat in den Mengen zugeführt werden, die erforderlich sind, um die im Vorversuch ermittelten Zielkonzentration einzustellen.



Schema Anlagentechnik Fentons-Reagenz-Infiltration.

Schema Anlagentechnik Fentons-Reagenz-Infiltration. Aus der Vorlage wird das angesäuerte Wasser über 2 Leitungen dem Infiltrationsbrunnen zugeleitet, wobei Peroxid und Eisensulfat in den Mengen zugeführt werden, die erforderlich sind, um die im Vorversuch ermittelten Zielkonzentration einzustellen.

Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

- Kenntnis des Schadensbildes (insbesondere Art und Ausdehnung der Quelle) ;
- Geologische und hydrogeologische Beschreibung des Untergrunds;
- Laborversuch zur Ermittlung des Oxidationsmittelbedarfs, des Stoffumsatzes und der Metabolite;
- Feldversuche zur Bestimmung der Reichweiten und Infiltrationsparameter, des Stoffumsatzes im Feld, der Rekontaminationseffekte und der möglichen Freisetzung von Metaboliten oder anderen Stoffen.

<p>Fentons Reagenz</p> <p>Anwendungsbereich</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anwendung ist für Quellbereiche einschließlich Vorkommen freier Phase (NAPL) geeignet. Die Anwendung in der Fahne ist möglich, jedoch i.d.R. keine wirtschaftliche Option, da die Behandlung großer Aquifervolumen aufgrund des erforderlichen engmaschigen Pegelnetzes kostenintensiv ist • Hydraulische Eigenschaften des Bodens/Untergrundes: Die gute Durchlässigkeit des für die Infiltration vorgesehenen Aquiferbereichs ist Voraussetzung. Darüber hinaus ist eine homogene Durchlässigkeitsverteilung erforderlich. Deutliche Dichteeffekte sind zu erwarten • Schadstoffe: geeignet für kurzkettige Aliphaten, CKW, BTEX, niedermolekulare PAK; freie Cyanide sowie Chlorbenzole und -phenole • Saures Milieu, sofern nicht chelatbildende Infiltratzusätze verwendet werden
<p>Anwendungsgrenzen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schadstoffe: nicht geeignet für höhermolekulare PAK, PCB, gealterte MKW (langkettige Aliphaten) und komplexierte Cyanide • Untergrundbedingungen mit geringer und ungleichförmiger hydraulischer Durchlässigkeit • Geochemische Eigenschaften des Bodens/Untergrundes: Hohe Anteile organischer Substanz bzw. reduzierter anorganischer Verbindungen erhöhen den Bedarf an Oxidationsmittel
<p>Besonderheiten, Hinweise, Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Oxidation organischer Verbindungen durch Hydroxyl-Radikale ist stark exotherm, so dass im Laborversuch Temperaturen von >60°C auftreten • Die Entstehung von Gasblasen (O₂, CO₂) im Ringraum kann die Infiltrationskapazität des Injektionspegels gegenüber den aus hydraulischen Kenndaten errechneten Werten deutlich reduzieren • Die Ansäuerung und die Oxidation im Untergrund können in gewissem Umfang zur temporären oder dauerhaften Freisetzung von Substanzen (Schwermetalle, schlecht oxidierbare organische Verbindungen) führen, die zuvor an die Aquifermatrix gebunden sind • Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens hängt insbesondere von der einzusetzenden Chemikalienmenge ab, die je nach Beschaffenheit des Aquifers stark variiert. Da die Abbaureaktion unspezifisch ist, ist der Bedarf an Oxidationsmitteln nicht direkt aus der Schadstoffmenge abzuleiten, sondern mittels geeigneter Laborversuche an repräsentativen Aquifermaterialproben zu ermitteln
<p>Entwicklungsstand</p> <ul style="list-style-type: none"> • Das Verfahren ist anwendungsreif • In den Niederlanden (NL) und den USA im Vollmaßstab eingesetzt. Maßnahmen in NL unter anderem in Kombination mit Perozon und mit Permanganat als Verfahrenskombinationen • In Belgien und Deutschland erste Anwendungen im Pilotmaßstab
<p>Rechtliche Hinweise</p> <p>Wasserrechtliche Erlaubnis. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.</p>
<p>Referenzprojekte / zuständige Behörde</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pilotversuch Fentons Reagenz / Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz der Stadt Berlin
<p>Ausgewählte Literatur</p> <ul style="list-style-type: none"> • ITRC (2005): Technical and Regulatory Guidance for In Situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Groundwater. Technical/Regulatory Guideline. Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC). January 2005 (http://www.itrcweb.org/Documents/ISCO-2.pdf). • Georgi, A., Schierz, A., Kopinke, F.-D. (2006): Activation of hydrogen peroxide by complexes of iron(III) with humic acid for chemical degradation of organic compounds in water. EAAOP conference (Environmental applications of Advanced Oxidation Processes), Chania, Greece.
<p>Bewertung durch den Arbeitskreis</p> <p><i>Aufgrund des hohen Oxidationspotentials der Fenton-Reaktion besteht grundsätzlich ein hohes Umsetzungspotential für organische Schadstoffe, jedoch genau diese starke exotherme Reaktion birgt Gefahren für die Anwendung des Verfahrens (zum Beispiel Mobilisierung von Schwermetallen, Metalliten- und Gasbildung).</i></p>

9.1.3 Persulfat

Persulfat

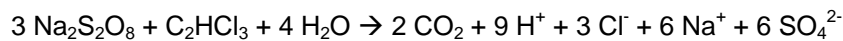
Prinzip

Durch die Infiltration von Persulfatlösung ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$, $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) kommt es zur abiotischen oxidativen Umsetzung organischer Stoffe mittels Persulfationen. Gebräuchlich ist die Verwendung von Natriumpersulfat. Dabei besteht die Möglichkeit des direkten Elektronenübergangs durch das Einbringen von Persulfat ohne weitere Additive (Oxidationspotenzial +2,12 V) und die Möglichkeit der Erzeugung von Sulfat-Radikalen nach Aktivierung (Oxidationspotenzial +2,6 V). Vier Methoden stehen zur Aktivierung zur Verfügung: Einbringen von Fe^{2+} -Ionen als Katalysator (Europa: Eisencitrat), Zugabe von Wasserstoffperoxid, Einstellen eines hohen pH-Wertes (>10,5) oder Wärmezufuhr.

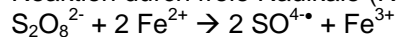
Durch ihr hohes Oxidationspotential reagieren Sulfat-Radikale im Grundwasserleiter unspezifisch mit fast jeder Art von organischen Molekülen bzw. Molekülstrukturen. Bei Einbringen von Fe^{2+} -Ionen ist eine Ansäuerung erforderlich, um die Fe^{2+} -Ionen zu stabilisieren. Theoretisch ist die Eisenstabilisierung auch mittels chelatbildender Infiltratzusätze (patentierte Verfahren) möglich, diese Methode wird in Europa aber nicht eingesetzt. Der Vorteil gegenüber Fenton-Reagenz besteht darin, dass Sulfat-Radikale stabiler als Hydroxyl-Radikale sind, so dass größere Wirkungsradien als bei einer Injektion von Fentons Reagenz erzielbar sind.

Persulfat (Wassergefährdungsklasse 1) ist stabil, relativ einfach zu handhaben und führt im Gegensatz zu Permanganat nicht zur Bildung von Braunstein. Allerdings muss beachtet werden, dass die Bildung von Sulfatfahnen möglich ist, die chemisch aggressiv gegenüber Beton wirken.

Reaktion durch Elektronenübergang, zum Beispiel TCE:



Reaktion durch freie Radikale (Radikal reagiert mit org. Stoff):



Aufbau und Beschreibung

Einrichtung des Pegelnetzes mit Infiltrationsbrunnen (optional: Direct-Push, Manschettenrohre) und Beobachtungspegeln. Eine begleitende Bodenluftabsaugung ist erforderlich, wenn Persulfat durch Wärmezufuhr aktiviert werden soll (zur Bildung von Sulfat-Radikalen). Bei der Aktivierung durch Einstellen eines hohen pH-Wertes oder mit Eisencitrat ist diese Absaugung nicht notwendig. Das Pegelnetz ist anhand der Sanierungsziele und im Hinblick auf eine optimale dreidimensionale Verteilung des Oxidationsmittels zu dimensionieren.

Die Infiltrationsbrunnen werden mit handelsüblichem Rohr- u. Filtermaterial (zum Beispiel PVC, HDPE) ausgebaut. Wenn vorgesehen ist, zusätzlich Fe^{2+} -Ionen als Katalysator mit dem Ziel der Entstehung von Sulfat-Radikalen einzubringen, sind aufgrund der Ansäuerung Vorkehrungen zu treffen (Edelstahlfilter). Die Filterlänge sollte unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten nicht zu lang gewählt werden, um eine gute vertikale Verteilung des Infiltrats zu erzielen. Eine Möglichkeit des Einbringens, bei der eine vertikale Verteilung erreicht werden kann, ist das Manschettenrohrverfahren. Dabei werden Öffnungen im Abstand von 33 cm mittels Packer einzeln zur Injektion angesteuert. Bei ausreichend großer hydraulischer Durchlässigkeit der Grundwasserleitermatrix kann die Infiltration gravitativ erfolgen.

Die Anlagentechnik besteht aus Aggregaten zum Anmischen des angelieferten, granulierten Persulfats auf die geeignete Infiltrationskonzentration (meist 10%) und der Zugabe der aktivierenden Komponente sowie aus der Injektionstechnik (je nach Verfahren Pump- und Dosierstation). Beim Einbringen von Fe^{2+} -Ionen als Katalysator ist ggf. zusätzlich die Ansäuerung der Vorlage auf den Ziel-pH-Wert mittels Schwefelsäuredosierung vorzusehen. Häufig wird Natronlauge zur Aktivierung verwendet.

Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

- Geologische und hydrogeologische Beschreibung des Untergrunds
- Hydrochemie, insbesondere pH und Metalle
- Laborversuch zur Ermittlung des Oxidationsmittelbedarfs, des Stoffumsatzes und der Metabolite
- Feldversuche zur Bestimmung der Reichweiten und Infiltrationsparameter, des Stoffumsatzes im Feld, der Rekontaminationseffekte und der möglichen Freisetzung von Metaboliten oder anderen Stoffen

<p>Persulfat</p> <p>Anwendungsbereich</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anwendung ist für Quellbereiche der gesättigten Bodenzone geeignet. Die Anwendung in der Fahne ist möglich, jedoch in der Regel keine wirtschaftliche Option, da die Behandlung großer Aquifervolumen aufgrund des erheblichen Matrixbedarfs kostenintensiv ist. • Die Anwendung erfordert eine gute bis sehr gute hydraulische Durchlässigkeit. • Aktiviertes Persulfat geeignet für (Halogen-)Alkene und Halogen-Alkane, BTEX, niedermolekulare PAK, kurzkettige MKW u. a.
<p>Anwendungsgrenzen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Untergrundbedingungen mit geringer und ungleichförmiger hydraulischer Durchlässigkeit • Klufftgrundwasserleiter • Geochemische Eigenschaften des Bodens/Untergrundes: Hohe Anteile organischer Substanz bzw. reduzierter anorganischer Verbindungen erhöhen den Bedarf an Oxidationsmittel • Betonfundamente (aggressive Wirkung von Sulfat)
<p>Besonderheiten, Hinweise, Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Beim Einsatz von Radikalbildnern können die Ansäuerung und die Oxidation im Untergrund in gewissem Umfang zur temporären oder dauerhaften Freisetzung von Substanzen (Schwermetalle, schlecht oxidierbare organische Verbindungen) führen, die zuvor an die Aquifermatrix gebunden waren • Sulfatfahne möglich • Sulfatmonitoring in der Fahne langfristig erforderlich • Bei der Anwendung sind patentrechtliche Ansprüche zu beachten (http://www.faqs.org/patents/app/20080272063; http://www.freepatentsonline.com/41444144.html; http://www.freshpatents.com/Ex-situ-and-in-situ-remediation-with-activated-persulfate-dt20081106ptan20080272063.php)
<p>Entwicklungsstand</p> <ul style="list-style-type: none"> • Das Verfahren wird seit vielen Jahren in den USA und seit wenigen Jahren in UK eingesetzt. Es befindet sich in Kontinentaleuropa in der Erprobung • In Deutschland: Einsatz (mit NaOH-Aktivierung) in einem Projekt in Süddeutschland, Feldversuch Industriegelände Seckbach
<p>Rechtliche Hinweise</p> <p>Wasserrechtliche Erlaubnis. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.</p>
<p>Referenzprojekte / zuständige Behörde</p> <ul style="list-style-type: none"> • Clorbenzole / Standort in Süddeutschland • Industriegelände Seckbach / RP Darmstadt
<p>Ausgewählte Literatur</p> <ul style="list-style-type: none"> • ITRC (2005): Technical and Regulatory Guidance for In Situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Groundwater. Technical/Regulatory Guideline. Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC). January 2005 (http://www.itrcweb.org/Documents/ISCO-2.pdf). • Springer-Greve, Th. (2010): Seckbachs Boden und Grundwasser werden sauberer oder Schwerer Boden – Gifte belasten Seckbacher Grundstücke Ergebnisse eines Feldversuchs zur Sanierung durch In-Situ-Chemische-Oxidation, Vortrag beim HLUg-Seminar Altlasten und Schadensfälle 2010, http://www.hlug.de/medien/altlasten/archiv.htm
<p>Bewertung durch den Arbeitskreis</p> <p><i>Persulfat und aktiviertes Persulfat besitzen ein hohes Oxidationspotenzial sind jedoch im Untergrund nach aktuellem Wissensstand beständig genug, um in vielen Fällen einen wirksamen Kontakt zwischen Schadstoff und Oxidationsmittel herstellen zu können. Die Aktivierung des Persulfat-Ions ist jedoch in Analogie zu Fentons Reagenz mit nicht unerheblichem Aufwand in der Handhabung verbunden. Für eine abschließende Beurteilung sind weitere Praxiserfahrungen erforderlich.</i></p>

9.1.4 Ozon

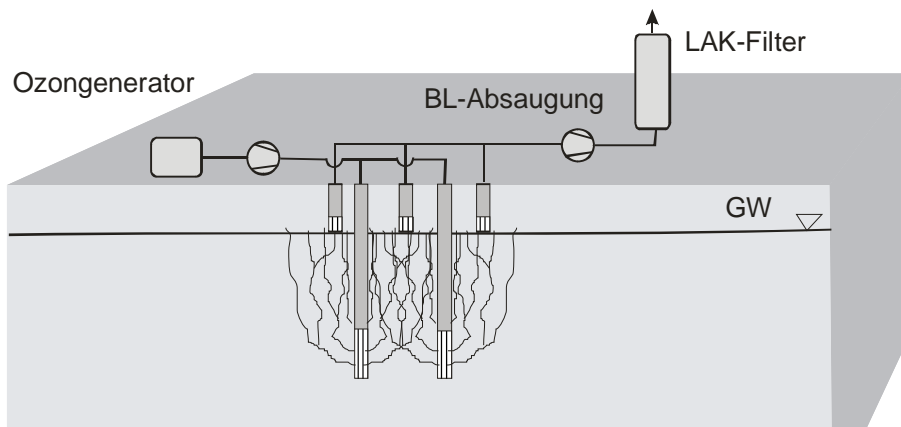
Ozon

Prinzip

Ozon wird in der Regel mittels Ozongeneratoren aus der Umgebungsluft oder aus technischem Sauerstoffgas vor Ort hergestellt und gasförmig in den Untergrund eingebracht. Aufgrund seiner Instabilität ist ein Transport von Ozon zum Standort technisch nicht möglich. Ozon ist ein starkes Oxidationsmittel, das eine abiotische, oxidative Umsetzung organischer Stoffe im Grundwasserleiter durch eine direkte Reaktion oder über die Bildung von Hydroxylradikalen erzeugen kann. Aufgrund des gasförmigen Aggregatzustands ist Ozon prinzipiell auch in der ungesättigten Zone einsetzbar. Aufgrund seiner geringen Stabilität und Transportreichweite ist die Einbringung von Ozon mit Hilfe eines engen Injektionsrasters durchzuführen.

Aufbau und Beschreibung

Einrichtung des Pegelnetzes mit Spargingbrunnen, Beobachtungspegel und ggf. Bodenluftabsaug-(BLA-)Pegel. Die Erforderlichkeit einer begleitenden BLA ist in der Regel gegeben und im Einzelfall mittels einer Gefährdungsabschätzung bzgl. möglicher Stripeffekte (Wohnbebauung, Versiegelung) zu bewerten und mit der genehmigenden Behörde abzustimmen. Das Pegelnetz ist anhand der Sanierungsziele und der im Vorversuch zu ermittelnden Reichweiten der Brunnen zu dimensionieren. Die Anlagentechnik sieht einen Ozongenerator, entweder auf der Basis von Umgebungsluft oder von technischem Sauerstoff sowie Druckleitungen zu dem Netz von Spargingbrunnen vor. Die Technik muss eine entsprechende Chemikalienbeständigkeit aufweisen



Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

- Kenntnis des Schadensbildes (insbesondere Art und Ausdehnung der Quelle)
- Geologische und hydrogeologische Beschreibung des Untergrunds
- Laborversuch zur Ermittlung des Oxidationsmittelbedarfs, des Stoffumsatzes und der Metabolite
- Feldversuche zur Bestimmung der Reichweiten und Infiltrationsparameter, des Stoffumsatzes im Feld, der Rekontaminationseffekte und der möglichen Freisetzung von Metaboliten oder anderen Stoffen

<p>Ozon</p> <p>Anwendungsbereich</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Anwendung ist auf der geringen Transportreichweite des Ozons im Untergrund und des erforderlichen engen Infiltrationsnetz für begrenzte Quellenbereiche geeignet. Die Behandlung von Fahnen mittels Ozon ist nicht umsetzbar • Die gute Durchlässigkeit des für die Infiltration vorgesehenen Aquiferbereichs ist Voraussetzung. Überdies ist eine homogene Durchlässigkeitsverteilung erforderlich. In heterogenen Matrices breitet sich das Infiltrat nur entlang besser durchlässiger Pfade aus und ein weiterer diffusiver Transport in geringer durchlässige Bereiche erfolgt aufgrund der geringen Lebensdauer des Ozonmoleküls nur in sehr beschränktem Umfang • Hohe Anteile organischer Substanz bzw. reduzierter anorganischer Verbindungen erhöhen den Bedarf an Oxidationsmittel • Geeignet für (Halogen-)Alkene, BTEX, niedermolekulare PAK
<p>Anwendungsgrenzen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geringe hydraulische Durchlässigkeit und stark heterogener Untergrund • Nicht geeignet für gesättigte (Halogen-)Alkane, MKW, PCB, höhermolekulare PAK
<p>Besonderheiten, Hinweise, Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei der Handhabung von Ozon sind besondere Sicherheitsanforderungen zu beachten. • Laborversuche an Bodenproben vom Gelände der Gasversorgung München wurden durchgeführt. Die Untersuchungen ergaben: <ul style="list-style-type: none"> ○ bei hohem Ozonüberschuss ist ein mäßiger Abbau der PAK erreichbar ○ Indizien für eine erhöhte Mobilisierbarkeit der verbleibenden PAK ○ Indizien für die Bildung toxischer Metaboliten
<p>Entwicklungsstand</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pilot-Anwendungen sind aus den USA und den Niederlanden bekannt • In Deutschland sind nur Laborversuche bekannt. Verschiedene Verfahren auf der Basis von Ozoninfiltration wurden zu Anwendungsreife gebracht und sind z.T. kommerziell verfügbar
<p>Rechtliche Hinweise</p> <p>Wasserrechtliche Erlaubnis. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.</p>
<p>Referenzprojekte / Zuständige Behörde</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cruquiuskade, Perozone, LCKW (Laakhaven, NL) / Stadt Den Haag • Paul Gabrilstraat, Perozone, LCKW / Stadt Den Haag • Biddinghuizen, Perozone, Pestizide / Provinz Flevoland, (NL) (Pilotmaßstab) • Landstraat, Bussum (NL) / Stadt Bussum (C-sparge, CKW) • van Ostadelaan, Utrecht (NL) / Stadt Utrecht (C-sparge und Perozone, CKW, Pilot- und Vollmaßstab) • Baanstraat, Utrecht(NL) / Stadt Utrecht (C-sparge, CKW) • Rembrandtlaan, Bilthoven (NL) / Provinz Utrecht (C-sparge, CKW)
<p>Ausgewählte Literatur</p> <ul style="list-style-type: none"> • ITRC (2005): Technical and Regulatory Guidance for In Situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Groundwater. Technical/Regulatory Guideline. Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC). January 2005 (http://www.itrcweb.org/Documents/ISCO-2.pdf). • Nimmer, M., Wayner, B., Morr, A. (2000): In Situ Ozonation of Contaminated Groundwater. Environmental Progress, 19(3): 183-196. • Black, H. (2001): Ozone as a cleanup tool. Environmental Science & Technology. 35(13):283A-284A. • Huling, S.G., Pivetz, B.E. (2006): In-situ chemical oxidation. US EPA, Engineering issue, 600/R-06/072.
<p>Bewertung durch den Arbeitskreis</p> <p><i>Ozon – insbesondere auch in Verbindung mit Wasserstoffperoxid – besitzt ein sehr hohes Oxidationspotenzial. Erfolgsaussichten auf eine erfolgreiche Sanierung mithilfe von Ozon müssen jedoch einzelfallspezifisch und kritisch betrachtet werden, da die Transportreichweite von Ozon im Untergrund sehr begrenzt und somit die flächenhafte Behandlung im Untergrund schwierig ist. Indizien für toxische Metaboliten wurden bei einem Einsatz zur PAK-Sanierung beobachtet. Der Auswahl der Technik zur Einbringung des Ozons kommt hierbei eine wichtige Rolle zu.</i></p>

9.2 In-situ-chemische-Reduktion - ISCR

Die In-situ-chemische Reduktion erfolgt in der Regel mit Eisen. In durchströmten Reinigungswänden (PRB Permeable Reactive Barriers) wird bereits elementares Eisen (granulARES 0-wertiges Eisen) zur chemischen In-situ-Reduktion von beispielsweise chlorierten Kohlenwasserstoffen eingesetzt¹¹. Als alternative innovative In-Situ-Sanierungstechnologie steht seit Ende der 1990-er Jahre die Injektion von nullwertigen Eisenteilchen im Nano- und Mikrometerbereich zur Verfügung¹². Der primäre Unterschied liegt in der Größe der Eisenpartikel. Heutzutage ist es möglich, auf verschiedenen Produktionswegen nullwertige Eisenpartikel im Größenbereich von 30 - 100 Nanometern herzustellen. Man unterscheidet zwischen Nano-Eisen, bimetallischem Nano-Eisen und emulgiertem Nano-Eisen, die sich in der Reaktivität und der Lebensdauer unterscheiden¹³.

Die gegenüber Eisenteilchen im Mikrometerbereich viel kleinere Teilchengröße (Nano) verleiht dem Eisen aufgrund der deutlich größeren spezifischen Oberfläche eine hohe Reaktivität ($\geq 10 \text{ m}^2/\text{g}$)¹⁴. So sollen Nano-Eisen-Partikel um den Faktor 10 - 1000 reaktiver sein als konventionelle Eisenpartikel¹⁵. Die geringe Partikelgröße ermöglicht potentiell den Transport der Nano-Eisen-Partikel als kolloidale Partikelsuspension in den Bodenporen. Das Fe₀-Material kann vom Grundsatz her direkt als wässrige Suspension zur Sanierung in einen kontaminierten Aquifer injiziert werden. Für die Injektion der Nano-Eisen-Suspension in den Aquifer sind im Gegensatz zu den Permeablen Reaktiven Wänden keine Baumaßnahmen, sondern lediglich Injektionsbrunnen (spezielle Bauart) notwendig, die aber auch unter Gebäuden, sofern im Gebäude gebohrt werden kann, oder in großen Tiefen errichtet werden können. Diese Möglichkeiten und die Eigenschaften der Eisen-Partikel lassen den Einsatz für eine In-Situ-Sanierung besonders qualifiziert erscheinen.

Nano-Eisen ist ein moderates, wirksames Reduktionsmittel, das zu Fe(II) reagiert¹⁶ und sowohl für organische als auch für anorganische Kontaminanten, wie beispielsweise Chrom und Arsen, geeignet ist. Das nullwertige Eisen reagiert im Grundwasser zuerst mit Sauerstoff. Sobald der vorhandene Sauerstoff aufgebraucht ist, wird Wasserstoff erzeugt. Dadurch werden anaerobe Verhältnisse geschaffen, unter denen das Nano-Eisen mit dem Schadstoff reagieren kann.

¹¹ vgl. RUBIN-Handbuch (BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (2007): ANWENDUNG VON DURCHSTRÖMTEN REINIGUNGSWÄNDEN ZUR SANIERUNG VON ALTLASTEN, ENDBERICHT FORSCHUNGSVORHABEN RUBIN, JANUAR 2007 und Kap. 10)

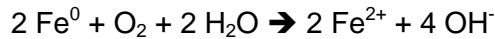
¹² Cantrell & Kaplan (1997), Wang & Zhang (1997)

¹³ Müller et al. (2006)

¹⁴ Köber & Kopinke (2007)

¹⁵ Müller et al. (2006)

¹⁶ Müller et al. (2006)



Das nullwertige Eisen kann nicht nur mit Sauerstoff reagieren, sondern andere Stoffe wie Sulfat und Nitrat werden ebenfalls reduziert. Die Reaktionsgleichung für chlorierte organische Kohlenwasserstoffe lautet:



Reaktivität und Langzeitstabilität der Nano-Eisen-Partikel in porösem Medium sind maßgeblich für eine effiziente und auch ökonomisch durchführbare In-Situ-Sanierung. Reaktivität und Langzeitstabilität sind jedoch nicht nur von den Nano-Teilchen selbst, sondern in großem Maße auch vom System Boden-Wasser-Schadstoff abhängig. Zu Fragen der Reaktivität, der Langzeitstabilität und auch zur Optimierung der Nano- bzw. Mikro-Eisenteilchen werden derzeit noch F&E-Vorhaben durchgeführt.

Obwohl erwartet werden kann, dass die Nano-Eisen Partikel durch ihre geringe Größe im Untergrund sehr mobil sind werden in der Literatur sehr unterschiedliche Einflussradien bzw. Reichweiten um eine Injektionsstelle beschrieben, die von wenigen Zentimetern bis zu 30 Metern reichen. Diese Reichweiten hängen unter anderem von den Partikeln, der Zusammensetzung der Suspension, der Injektionstechnik, aber auch insbesondere der jeweils bei einem bestimmten Schadensfall vorliegenden Geologie ab¹⁷.

In Kap. 9.2.1 werden nachfolgend die Eisen-Partikel (primär Nano- und Mikro-Eisen) detailliert vorgestellt und bewertet.

Weltweit wurden Eisen-Partikel bereits auf zahlreichen Standorten eingesetzt¹⁸. Während aus den USA bereits über 20 Sanierungsvorhaben bekannt sind, wurde das Verfahren in Deutschland bisher in wenigen Feldanwendungen eingesetzt. Der Erfahrungsstand ist somit noch sehr gering.

Die Gefahren bei der Anwendung von Nano-Eisen bzw. Mikro-Eisen in der Umwelt werden derzeit im Kontext mit der Debatte zum generellen Einsatz von Nanopartikeln und deren Umweltverträglichkeit kontrovers diskutiert.

Durch die Injektion von Reduktionsmitteln wie zum Beispiel Eisen(II)sulfat, Natriumdithionit oder Kaliumdisulfit erfolgt eine In-situ-chemische-Reduktion (ISCR) von Cr(VI) zu Cr(III), wobei Fe(II) zu Fe(III) und die Schwefelverbindungen zu Sulfat oxidiert werden (Kap. 9.2.2).

¹⁷ http://www.iws.unistuttgart.de/Vegas/deutsch_html/forschungsschwerpunkte/

¹⁸ Macé et al., (2006)

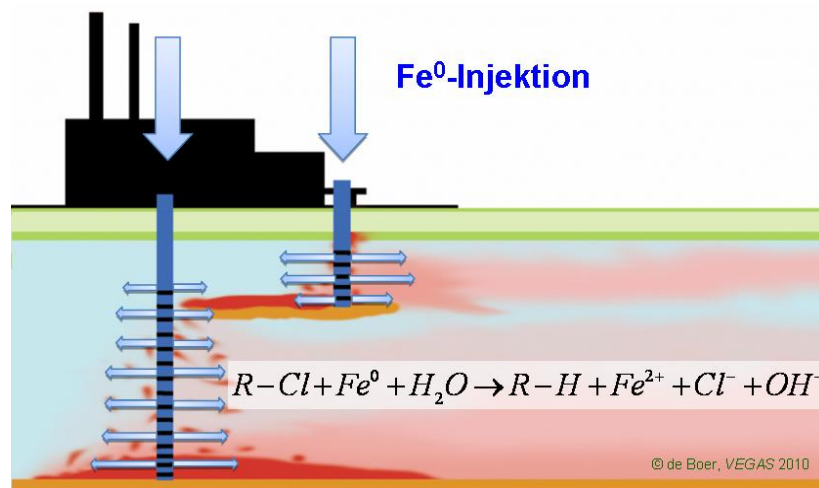
9.2.1 Eisen-Partikel

Eisen-Partikel

Prinzip

Reduktion von LCKW: Elementares Eisen (Fe^0) wird als kolloidale Suspension in den Kontaminationsbereich (Schadstoffquelle) eingebracht, wo es aufgrund seines niedrigen Redox-Potenzials sowie der großen spezifischen Oberfläche zu einer spontanen reduktiven Umsetzung bestimmter organischer Verbindungen führt. Hierbei werden durch die Oxidation des Fe^0 zu Fe^{2+} Elektronen direkt an das organische Molekül übertragen. Daneben reagiert das nullwertige Eisen direkt mit Wasser unter Entstehung von Wasserstoff. Mit dem so entstandenen Wasserstoff kommt es parallel zur oben genannten chemischen Direktreaktion zu einer reduktiven Dechlorierung, das heißt Chloratome werden schrittweise durch Wasserstoff ersetzt. Die chemische Direktreaktion bis hin zum Ethen ist dominierend.

Reduktion von Schwermetallen: Grundsätzlich können Schwermetallen mit Hilfe von Eisen reduziert werden. Beispielsweise wird Chromat (CrO_4^{2-} , enthält sechswertiges Chrom) über die Reaktion mit Nano-eisen zu Chrom(III) reduziert, das anschließend ausfällt. Ausfällungsprodukt ist Chromit (vgl. Kap. 9.2.2).



Aufbau und Beschreibung

Nullwertige Eisen-Partikel, die in der Regel Durchmesser im Nano- bis Mikrometerbereich aufweisen, werden in einer wässrigen Suspension angeliefert und mithilfe von Injektionspegeln (z.B. Manschettenrohren) über Packersysteme in den kontaminierten Grundwasserleiter eingebracht. Ziel ist eine gleichmäßige Verteilung der Partikel im Grundwasser und eine „Vermischung“ mit dem Schadstoff.

Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen

- Detaillierte Erkundung des Schadensherds mit kleinskaligem Raster im Meterbereich
- Laborversuche zur Ermittlung des Reduktionsmittelbedarfs, des Stoffumsatzes und der Metabolite sowie zur Transportbestimmung (Reichweitenabschätzung), Pilotinjektionen im Feld zur Bestimmung der Reichweiten und Infiltrationsparameter, des Stoffumsatzes, der Rekontaminationseffekte und der möglichen Freisetzung von Metaboliten oder anderen Stoffen. Weitere Feldversuche, z.B. auch Tracerversuche, sowie versuchsbegleitende Probenahmen und Analytik dringend angeraten

Anwendungsbereich

- Nach Literaturangaben umfasst das behandelbare Schadstoffspektrum leicht- und schwerflüchtige halogenierte organische Schadstoffe (LHKW, chlorierte Aromaten, organisch chlorierte Pestizide), Nitroaromaten, Perchlorate sowie Schwermetalle (Cr(VI) , Cd, Pb, Ni, Hg, As etc.), anorganische Ionen (Arsenat, Arsenit, Selenat, Molybdat, Technetium), TNT, Lindan, DDT, Pentachlorphenol sowie Radionuclide. In Deutschland liegen aus einem Pilotversuch Erfahrungen in der Behandlung von LHKW vor. Die jeweilige Eignung ist anwendungsspezifisch zu prüfen.

Eisen-Partikel
<p>Anwendungsgrenzen</p> <p>Derzeit liegen nur bedingt Erfahrungswerte über das Transportverhalten der Eisen-Partikel im Grundwasser vor. Anwendungsgrenzen ergeben sich durch die Reaktion von Nano-Eisen mit Nitrat, Sulfat und Sauerstoff sowie durch die geringe Lebensdauer im Grundwasser im Zeitraum von Monaten.</p>
<p>Besonderheiten, Hinweise, Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Reichweite der (Nano-)Eisen-Partikel ist nicht eindeutig bekannt (Aggregatbildung). Mit unbehandeltem Nano-Eisen lassen sich Injektionsradien von nur wenigen Dezimeter erreichen. Praktische Erfahrungen zeigen, dass die zusätzliche Anwesenheit von - toxisch unbedenklichen - organischen Polycarbonsäuren zu einer deutlichen Steigerung der Reichweite führen kann. Bei dem so behandelten Nano-Eisen sollen sich im Porenwasserleiter u.U. Injektionsradien von einigen Metern erreichen lassen, ein direkter Nachweis jedoch fehlt bis zum heutigen Zeitpunkt. Veränderungen der hydraulischen Durchlässigkeit im behandelten Grundwasserleiter durch die Wasserstoffbildung (feine Bläschen) sind möglich. • Die hohe Reaktivität des Nano-Eisens ist zeitlich begrenzt. Verschiedene Anbieter von Nano-Eisen agieren auf dem Markt, eine Qualitätskontrolle des gelieferten Materials wird unbedingt empfohlen. • Durch die Reaktion mit Wasser entsteht Wasserstoff (H₂), der bei Anreicherung in geschlossenen Bereichen explosionsfähige Atmosphären (Knallgas) bilden kann. Die Suspension hat basische Eigenschaften (pH 11) und kann Augen und Haut reizen. Nano-Eisen-Lösungen müssen unterhalb von 35°C und außerhalb der Reichweite von Zündquellen gelagert werden. Eine Zusammenlagerung mit Oxidationsmitteln ist zu vermeiden. Nano-Eisen ist der Wassergefährdungsklasse WGK I zuzuordnen, die Zubereitung ist kein gefährliches Produkt gemäß RL 1999/45/EG • Nach derzeitigem Kenntnisstand sind bei einer Anwendung von Nanoeisenpartikeln zur Schadstoffreduktion im Grundwasser keine konkreten negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt zu besorgen, sofern keine unmittelbare Grundwasserentnahme vorliegt. Abschließende Untersuchungen liegen jedoch nicht vor. • Die US-EPA betreibt eine Website, die Informationen über innovative Sanierungs- und Standortcharakterisierungs-Technologien liefert und ein Forum alle Stakeholder bietet (http://www.cluin.org).
<p>Entwicklungsstand</p> <ul style="list-style-type: none"> • International mehrere großskalige Feldversuche, z.B. in Italien, Kanada und Tschechien, in Deutschland ein Pilotversuch am Standort Bornheim-Roisdorf zur Grundwassersanierung eines CKW-Schadensfalls • Noch in der Entwicklung
<p>Rechtliche Hinweise</p> <p>Wasserrechtliche Erlaubnis. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit den zuständigen Behörden abzustimmen.</p>
<p>Referenzprojekte / zuständige Behörde</p> <p>Ehemalige chemische Reinigung, AAV-Pilotvorhaben Bornheim / Rhein-Sieg-Kreis</p>
<p>Ausgewählte Literatur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Phenrat, T., Saleh, N., Sirk, K., Tilton, R.D., Lowry, G.V. (2007): Aggregation and Sedimentation of Aqueous Nanoscale Zerovalent Iron Dispersions. Environmental Science & Technology, 41(1): 284-290. • Köber, R., Kopinke, F.D. (2007): Sanieren mit Nanoeisen. Nullwertiges Eisen in Form kolloidaler Partikel zur Quellen- und Fahnenanierung im Grundwasser. In: wlb Wasser, Luft und Boden, 51(6): TT17-TT20. • Braun, J., de Boer, C. (2007): Injektion von Nano-Eisen zur LHKW-Sanierung – Ergebnisse aus VEGAS Laboruntersuchungen. In: Braun, Koschitzky, Stuhmann (Hrsg.): Mitteilungen Heft 165, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart 2007, ISBN 3-933761-69-7, S. 64-74 • Rissing, P. (2007): Grundwassersanierung mittels Nano-Technologie – ein innovatives Sanierungsprojekt des AAV in NRW. Fachtagung Boden und Grundwasser, Altlastensanierungs- und Altlastenaufbereitungsverband NRW, Hattingen.
<p>Bewertung durch den Arbeitskreis</p> <p><i>Aussichten auf eine erfolgreiche Sanierung mithilfe von (Nano-)Eisen-Partikeln werden momentan sehr kritisch betrachtet, da die homogene Verteilung der Eisen-Partikel bei der Injektion noch nicht gewährleistet werden kann.</i></p>

9.2.2 In-situ-Reduktion von Chrom(VI)

<p>In-situ-Reduktion von Chrom(VI)</p> <p>Prinzip</p> <p>Durch die Injektion von Reduktionsmitteln wie zum Beispiel Eisen(II)sulfat, Natriumdithionit oder Kaliumdisulfid erfolgt eine In-situ-chemische-Reduktion (ISCR) von Cr(VI) zu Cr(III), wobei Fe(II) zu Fe(III) und die Schwefelverbindungen zu Sulfat oxidiert werden. Nachdem die vorstehend genannten Reduktionsmittel in sauerstoffhaltigen Grundwässern und bei höheren Redoxpotentialen nicht stabil sind und daher bei einer Injektion nur sehr geringe Reichweiten erzielt werden, ist in diesem Fall eine unterstützende Injektion von organischen Kohlenstoffquellen (zum Beispiel Melasse, Dextrose, Ethanol) sinnvoll. Diese fungieren als Elektronendonator und werden mikrobiologisch abgebaut. Durch die hiermit einhergehende Sauerstoffzehrung und Absenkung des Redoxpotentials wird die Injektion der anorganischen Reduktionsmittel erleichtert und es lassen sich größere Reichweiten der Injektion erzielen.</p> <p>Das reduzierte Chrom wird idealerweise als „praktisch“ unlösliches Chrom(III)hydroxid ($\text{Cr}(\text{OH})_3$) oder Chromit ausgefällt und damit in der Bodenmatrix abgelagert. Unabhängig von dieser Fixierung des Chroms ist anzumerken, dass die Toxizität von Cr(III) um etwa den Faktor 1.000 niedriger als die von Cr(VI) eingestuft wird.</p> <p><i>Anmerkung: Die Anwendung von nullwertigem Eisen zur Reduktion wird im Verfahrensblatt „Eisen-Partikel“ beschrieben.</i></p>
<p>Aufbau und Beschreibung</p> <p>Das mit Wasser verdünnte Reduktionsmittel wird durch Brunnen(-galerien) in den Aquifer eingebracht. Insbesondere bei sauerstoffhaltigen Grundwässern kann dies zu einer sehr raschen Verblockung der Infiltrationsstelle durch Ausfällungen führen. Hier empfiehlt es sich, mit geeignetem zeitlichem Vorlauf durch das Einbringen von Kohlenstoffquellen zunächst eine Sauerstoffzehrung und Absenkung des Redoxpotentials zu bewirken. Der Aufbau der Chromat-reduzierenden Zone erfolgt dann zweistufig. In Abhängigkeit von den Standortbedingungen muss entschieden werden, ob die Reduktionsmittel kontinuierlich oder diskontinuierlich eingebracht werden. Bei einem kontinuierlichen Einbringen wird zwar im Idealfall eine nahezu stationäre Reduktionzone aufgebaut, es besteht jedoch die deutlich erhöhte Gefahr einer Verblockung der Infiltrationsstellen. Diese kann bei geeignet gewählten, diskontinuierlichen Infiltrationszyklen verringert werden, wobei dann sowohl die Gefahr einer Über- als auch einer Unterdosierung von Reduktionsmittel gegeben ist</p>
<p>Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grundwasserfließrichtung, Grundwasserschwankungsbereich, geol. Aufbau Aquifer, Daten zur Dispersion • Lage des Schadstoffherdes, Abgrenzung der Fahne (horizontal und vertikal) • Ausbreitung des Reduktionsmittels im Aquifer Chemismus des Grundwassers
<p>Anwendungsbereich</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schadstoffe: Cr(VI) • Bodenzone: gesättigte Zone • Schadstoffsituation: bevorzugt Fahnensanierung, aber auch Quellensanierung

<p>In-situ-Reduktion von Chrom(VI)</p> <p>Anwendungsgrenzen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gering durchlässige Grundwasserleiter • Wechsellagerungen, Inhomogenitäten: Ausbreitung der reduktiven Zone durch Inhomogenitäten des Aquifers häufig unbefriedigend • Probleme mit Ausfällungen (zum Beispiel Eisen): Verblockung und geringe Reichweiten • Reaktion mit anderen Stoffen, daraus resultierend hoher Reduktionsmittelbedarf • Mobilisierungen anderer Stoffe (zum Beispiel Metalle, Arsen)
<p>Besonderheiten, Hinweise, Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keine Grundwasserentnahmen erforderlich • Durch die In-situ-Fällung entstehen keine weiteren zu behandelnden oder zu entsorgenden Abfälle • wenig Anlagentechnik notwendig; geringe Kosten für Technik und Steuerung • Chrom verbleibt im Untergrund; Grundwasserbelastung durch Cr(III), adsorbiert an Huminstoffen möglich • lang andauernde Überwachung erforderlich • Nachteilige Veränderung der Grundwasserqualität durch organische Befruchtung und Begleitstoffe (zum Beispiel Sulfat) • möglicherweise Methanbildung • ggf. Verblockung des Aquifers durch ausgefälltes Eisen und Bioclogging • Vorgang ist nach Beendigung der Zugabe unter ungünstigen Bedingungen (niedriger pH-Wert, oxidierende Bedingungen) reversibel
<p>Entwicklungsstand</p> <ul style="list-style-type: none"> • In der Erprobung: in Deutschland wurden bisher Labor- und Pilotversuche durchgeführt. • Großtechnische Sanierungen sind nicht bekannt.
<p>Rechtliche Hinweise</p> <p>Wasserrechtliche Erlaubnis. Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit den zuständigen Behörden abzustimmen.</p>
<p>Referenzprojekte / zuständige Behörde</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ehemalige Galvanik Althegnenberg: Feldversuche zur In-situ-Reduktion von Cr(VI) / Landratsamt Fürstfeldbruck
<p>Ausgewählte Literatur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hong, J., Sewell, G. W. (1999): Organic Electron Donors for the Microbial Cr(VI) Reduction. Presented at In-Situ and On-Site Bioremediation: 5th Intl. Symp, San Diego, CA, 04/19-22/1999. Batelle, Columbus/Ohio. http://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryID=87203 • EPA (2000): In Situ Treatment of Soil and Groundwater Contaminated with Chromium. Technical Resource Guide • Lowe, J.: Molasses-Based Microbial Precipitation Used Successfully for Chromium Reduction. EPA/Region3. http://www.clu-in.org/products/newsletters/tandnt/view.cfm?issue=0703.cfm#3 • Tokunaga, T. K., Jiamin, W., Firestone, M. K., Hazen, T. C., Olsen, K. R., Herman, D. J., Sutton, S. R., Lanzirrotti, A. (2003); Bioremediation and biodegradation: In situ reduction of chromium(VI) in heavily contaminated soils through organic carbon amendment. In: Journal of environmental quality, vol. 32 (2003), no5, pp. 1641-1649. ISSN 0047-2425 • Ludwig, R. D., Su, Ch., Lee, T. R., Wilkin, R. T., Acree, S. D., Ross, R. R., Keeley, A. (2007): In Situ Chemical Reduction of Cr(VI) in Groundwater Using a Combination of Ferrous Sulfate and Sodium Dithionite: A Field Investigation. In: Environ. Sci. Technol., 2007, 41 (15), pp 5299–5305
<p>Bewertung durch den Arbeitskreis</p> <p><i>Grundsätzlich lässt sich Cr(VI) unproblematisch zu Cr(III) reduzieren und damit aus dem Wasser entfernen. Problematisch ist dabei, dass Cr(VI)-Belastungen im Regelfall in sauerstoffreichen Aquifer bei hohen Redoxpotentialen vorkommen. Dadurch treten beim Einbringen von Reduktionsmitteln meist starke Matrixeffekte auf. Diese bewirken einerseits einen stark überstöchiometrischen Reduktionsmittelbedarf, zum anderen können starke Verblockungserscheinungen die Infiltrationsstellen und die Ausbreitung im Aquifer behindern. Erfolgsversprechend dürften daher am ehesten diskontinuierliche Injektionen mit relativ hohen Infiltrationsraten sein.</i></p>

10 Durchströmte Reinigungswände (Permeable Reactive Barriers – PRB)

10.1 Definition

Im RUBIN-Handbuch (2006): "Anwendung von durchströmten Reinigungswänden zur Sanierung von Altlasten" (BMBF-Förderschwerpunkt RUBIN: Reinigungswände und -barrieren im Netzwerkverbund), sind Durchströmte Reinigungswände (Permeable Reactive Barriers – PRB) wie folgt definiert:

„Eine durchströmte Reinigungswand ist eine ingenieurtechnisch geplante und bautechnisch im Untergrund errichtete Behandlungszelle aus reaktivem Material (reaktiven Materialien) zur In-situ-Reinigung von kontaminiertem Grundwasser. Sie ist derart plaziert und konstruiert, daß der kontaminierte Grundwasserstrom allein aufgrund des natürlichen Potentialgefälles durch die reaktiven Medien strömt und die Schadstoffe während der Passage durch physikalische, chemische und/oder biologische Prozesse in für das Grundwasser akzeptable Substanzen transferiert oder in ausreichendem Maße reduziert werden. Eine durchströmte Reinigungswand hat einen vernachlässigbaren Einfluß auf den Grundwasserabstrom vom Standort.“

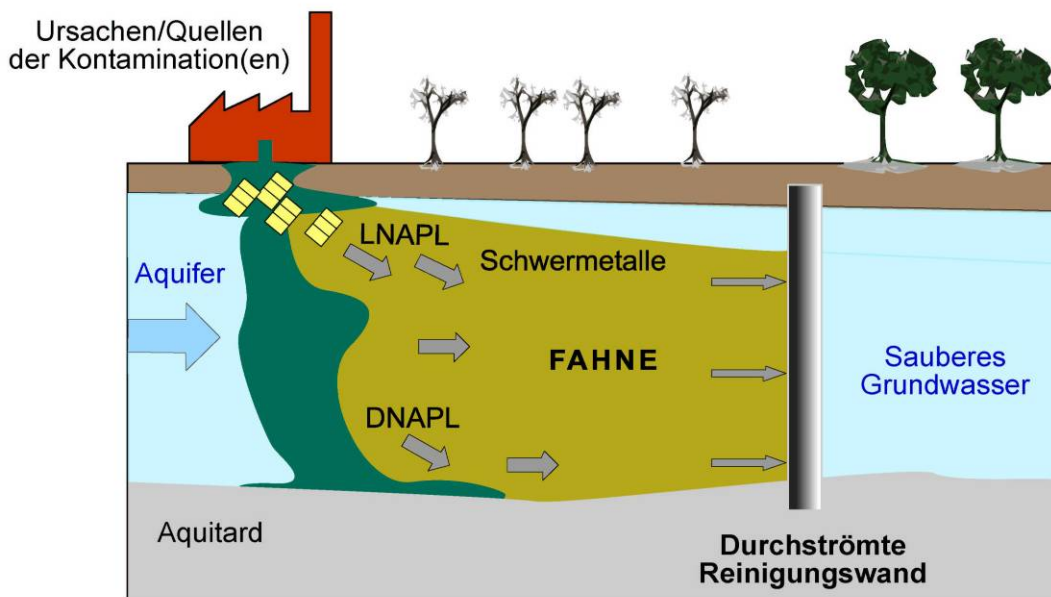


Abbildung 10.1: Prinzip Permeable Reaktive Wand (PRB)
(aus RUBIN-Handbuch)

10.2 Verfahrensprinzip und Anwendungsmöglichkeiten

Das Verfahrensprinzip der durchströmten Reinigungswände beruht in der Schaffung reaktiver Zonen im Untergrund zur In-situ-Dekontamination des durchströmenden Grundwassers. Die reaktive Zone wird dabei passiv unter Ausnutzung des Grundwasser-Potentialgefälles durchströmt, wobei dieses Potential ggf. durch Aufstau des Grundwassers vor der Wand und/oder Absenkung des Grundwassers hinter der Wand erhöht werden kann. Die Reinigungswirkung kann im Wesentlichen durch Umwandlung der Schadstoffe und/oder deren Rückhalt (Sorption, Fällung etc.) erfolgen. Eine Beeinflussung des abströmenden Grundwassers kann in der Praxis sowohl hinsichtlich des Chemismus als auch der Hydraulik nicht immer vermieden werden. Im Rahmen der Planung sind diese möglichen Veränderungen abzuschätzen. Gegebenenfalls ist durch geeignete Maßnahmen sicherzustellen, dass sich keine negativen Auswirkungen auf den Zustand des Grundwassers sowie sonstige Schutzgüter (zum Beispiel Vorfluter, Gebäude etc.) ergibt.

Durchströmte Reinigungswände werden zur **Sicherung des Grundwasserabstroms** eingesetzt. Sie stellen eine Alternative zu aktiven hydraulischen Sicherungsmaßnahmen (Pump & Treat) dar.

Als Sicherungsmaßnahme sind durchströmte Reinigungswände insbesondere für Schadstoffquellen geeignet, bei denen eine Dekontamination innerhalb eines überschaubaren Zeitrahmens aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht möglich ist und bei denen aufgrund der Schadstoffeigenschaften und/oder der hydrogeologischen/hydraulischen Verhältnisse eine lang andauernde Grundwasserbeeinträchtigung zu erwarten ist.

Prinzipiell sind durchströmte Reinigungswände auch zur Sanierung von „abgerissenen“ Fahnen oder als prophylaktische Maßnahme zum Schutz von sensiblen Grundwassernutzungen geeignet.

10.3 Einsatzgebiete und -grenzen

Durchströmte Reinigungswände eignen sich besonders zur Sicherung von oberflächennahen Porengrundwasserleitern. Ihre Einsatzmöglichkeiten werden begrenzt:

- durch die Möglichkeit, den belasteten Grundwasserabstrom mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand jederzeit und in seiner gesamten Breite und Tiefe vollständig zu erfassen,
- durch den Grundwasserchemismus (Redox, Eisen-, Mangangehalte etc.),
- durch den maximal zulässigen Grundwasseraufstau,
- durch die Verfügbarkeit geeigneter Reaktionsmaterialien.

Insbesondere im Hinblick auf die Tiefenausdehnung der Grundwasserbelastung sind wirtschaftliche und bautechnische Grenzen gesetzt. Bautechnisch sind derzeit durch Standardverfahren Bautiefen bis 15 m im Allgemeinen ohne größere Schwierigkeiten zu erreichen. Insbesondere für Dichtwände (Funnel) sind jedoch auch größere Tiefen problemlos zu realisieren.

10.4 Planungsvoraussetzungen

Die Konzeption, die Planung und der Bau von durchlässigen Reinigungswänden erfordern umfassende Kenntnisse in verschiedenen Fachgebieten:

- Geologie, Hydrogeologie, Hydraulik, hinsichtlich Positionierung und Dimensionierung
- Chemie, Geochemie und Biologie im Hinblick auf reaktive Materialien, Abbauprozesse, Fällung und Retardation
- Ingenieurtechnik, Spezialtiefbauverfahren bezüglich Konstruktion und Bau
- Wasserrecht, Bodenschutzrecht, Baurecht

Für die Dimensionierung einer Reinigungswand ist im Allgemeinen ein numerisches Grundwasserströmungsmodell zur Simulation unterschiedlicher Szenarien unentbehrlich. Im Einzelfall empfiehlt es sich, mit Grundwasser vom Standort in Labor- und Technikumsversuchen das Verhalten gegenüber den vorgesehenen Reaktor- und Dichtwandmaterialien zu untersuchen.

Eine Reihe von Verfahren, die bei durchströmten Reinigungswänden zum Einsatz kommen (zum Beispiel der Einsatz von Fe-0 zur Dehalogenierung von LHKW) und Bauformen (zum Beispiel Funnel-and-Gate) sind patentrechtlich geschützt. Eine umfangreiche Auflistung bestehender Patente ist im RUBIN-Handbuch „Anwendung von durchströmten Reinigungswänden zur Sanierung von Altlasten“ [www.rubin-online.de] enthalten.

10.5 Bauliche Ausführung

Im angelsächsischen Sprachraum werden durchströmte Reinigungswände als „Permeable Reactive Barriers (PRB)“ oder als „Treatment walls“, „Treatment curtains“ oder „Treatment fences“ bezeichnet. Im deutschen Sprachraum ist neben der Bezeichnung „durchströmte Reinigungswand“ der Oberbegriff „reaktive Wand“ gebräuchlich.

Die Bezeichnungen „Adsorberwände“, „In-situ-Sorptionssperren“, „Eisenwände“ bzw. „Funnel & Gate (F&G)“ und „vollflächig durchströmte Reinigungswand (Continuous reactive barrier – CRB)“ stellen dagegen verfahrenstechnische Varianten dar und sind unter den vorgenannten

Oberbegriffen einzuordnen. Zu unterscheiden ist zwischen den wesentlichen Konstruktionsarten:

- vollflächig durchströmte Reinigungswände (Continuous Beactive Barriers – CRB)
- durchströmte Reinigungswände mit gelenktem Grundwasserstrom, z.B. Funnel & Gate-Systeme (F&G) oder Drain & Gate-Systeme (D&G)

10.5.1 Vollflächig durchströmte Reinigungswände – Continuous Reactive Barriers (CRB)

Vollflächig durchströmte Reinigungswände – **Continuous Reactive Barriers (CRB)** – sind dadurch gekennzeichnet, dass sie über ihre gesamte Fläche durchlässig und reaktiv ausgebildet sind. Um eine Umströmung der Wand zu vermeiden, sollte die hydraulische Gesamtdurchlässigkeit (k_f) der Wand überall mindestens so groß sein wie diejenige des Aquifers. CRB sollten grundsätzlich dichtend in die Basis des belasteten Grundwasserleiters eingebunden werden. Unter günstigen Bedingungen, wenn nur der obere Teil des Grundwasserleiters kontaminiert ist und zum Beispiel aufgrund einer entsprechenden Anisotropie eine vertikale Verlagerung der Belastung nicht zu besorgen ist, können CRB auch als hängende Wand ausgebildet werden.

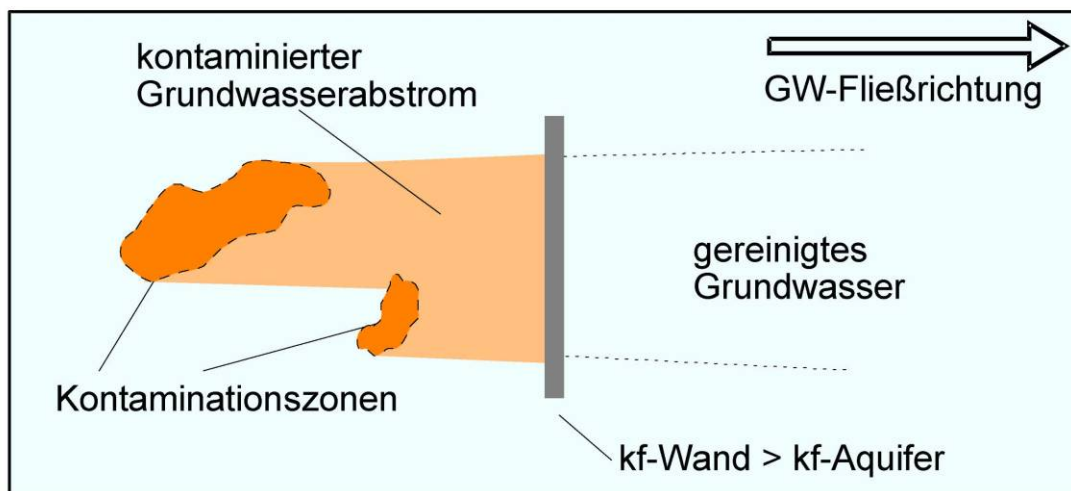


Abbildung 10.2: Prinzip vollflächig durchströmte Reaktive Wand (PRB)
(aus RUBIN-Handbuch)

Die Mächtigkeit der reaktiven Zone ist so zu bemessen, dass die Schadstoffe bei der Passage der Wand in ausreichendem Umfang aus dem Grundwasser entfernt werden. Eine Anpassung an die jeweilige Schadstoffbelastung/Schadstofffracht kann über die Variierung der Wanddicke oder auch über eine „Abmagerung“ des reaktiven Materials durch den Zusatz von inerten Sand-Kies-Gemischen erfolgen.

10.5.2 Durchströmte Reinigungswände mit gelenktem Grundwasserstrom (Funnel-and-Gate-Systeme, Drain-and-Gate-Systeme)

Bei **Funnel-and-Gate-Systemen (F&G)** wird der Grundwasserstrom mit Hilfe von gering durchlässigen Leitwänden (Funnel = Trichter) zu einem als reaktive Zone ausgebildeten Durchlass (Gate = Durchlass) geführt. Anzahl, Abstand, Anordnung und Breite der Gates sind nach hydraulischen Kriterien zu ermitteln (Begrenzung des Einflusses auf die Grundwasserströmung), das Volumen der Gates richtet sich nach der zu behandelnden Schadstoffkonzentration und Schadstofffracht.

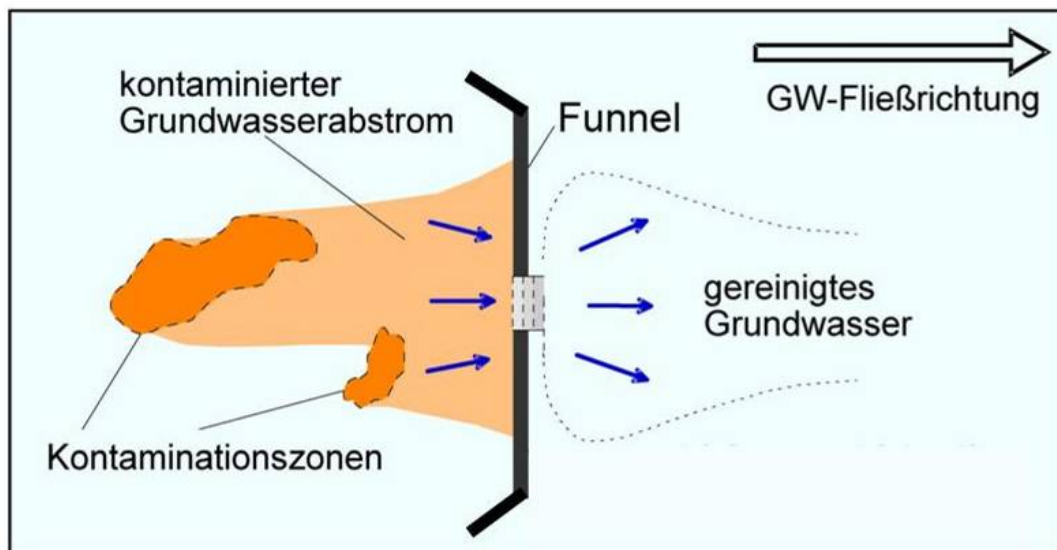


Abbildung 10.3: Prinzip Funnel-and-Gate-System
(gelenkter Grundwasserstrom, aus RUBIN Handbuch, modifiziert)

Bei **Drain-and-Gate-Systemen (D&G)** wird das kontaminierte Wasser nicht über Leitwände, sondern über Kollektor-Dränagen zu dem Gate bzw. den Gates (reaktive Zone) geleitet. Zusätzlich ist unmittelbar abstromig des/der Gates ein dem Kollektor analoges System zur Rückführung des gereinigten Wassers in den Aquifer (Distributor) erforderlich.

Diese Systeme bieten unter gewissen Umständen auch die Möglichkeit einer passiven hydraulischen Steuerung, wenn aufgrund der örtlichen Situation das unterstromige Potential tiefer ist als das sich natürlicherweise am Gate einstellenden (s. Abb. 10.4.: das Gate ist über eine Rohrleitung an ein hydraulisch tieferes Potential angeschlossen). In diesem Fall kann der Durchfluss beziehungsweise das Einzugsgebiet des Gates innerhalb eines begrenzten Bereichs gesteuert werden. Derartige Systeme werden mit dem Zusatz EC-PRB („efficiently controllable PRB“) bezeichnet.

Während F&G-Systeme eher bei besser durchlässigen Grundwasserleitern eingesetzt werden, sind D&G-Systeme für mäßig bis gering durchlässige Aquifere geeignet.

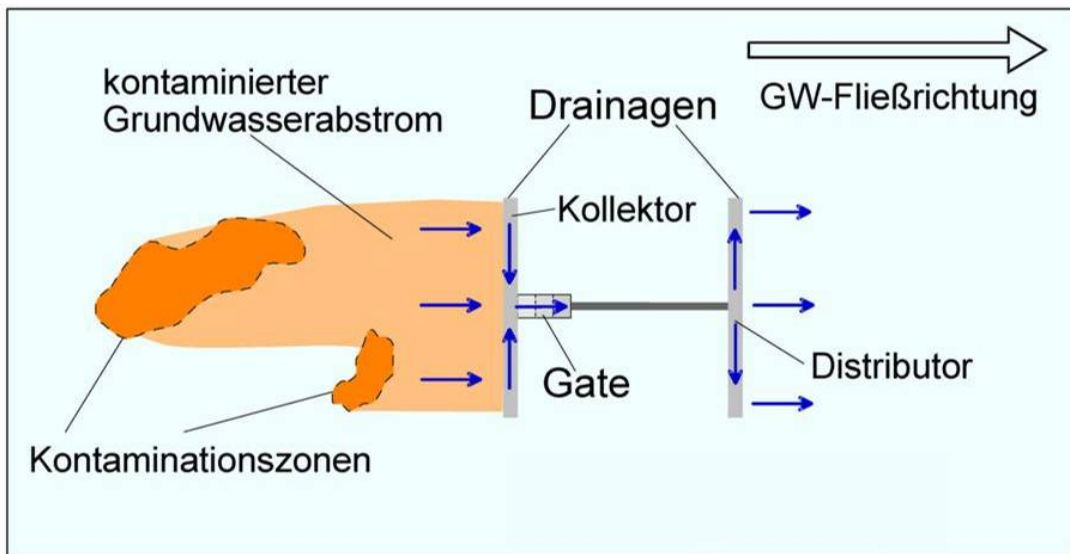


Abbildung 10.4 : Prinzip Drain-and-Gate-System
(aus RUBIN Handbuch, modifiziert)

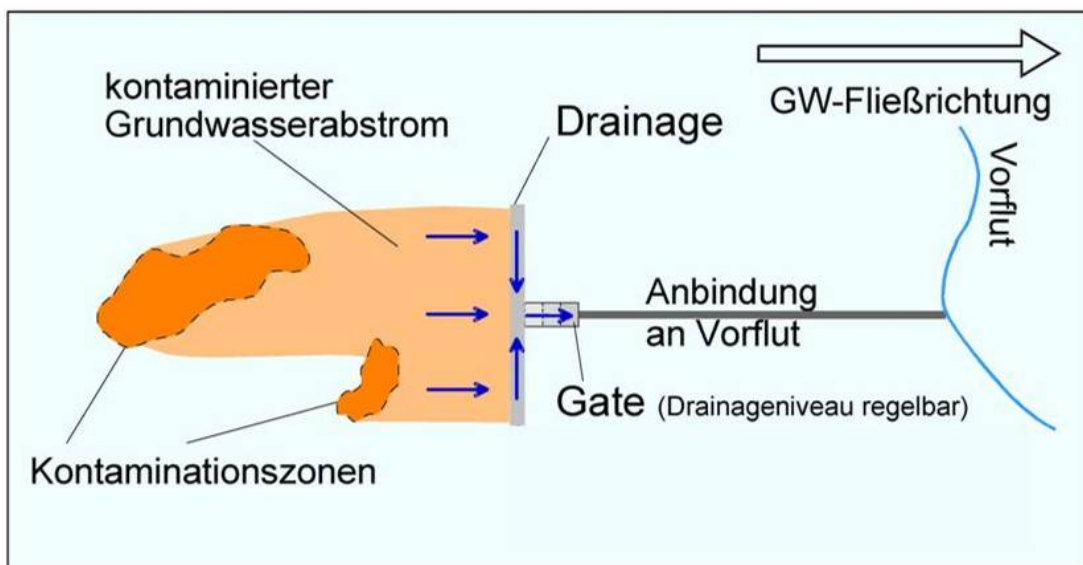


Abbildung 10.5: Prinzip Drain-and-Gate-System mit Eingriffs- (Steuer)möglichkeit (EC-PRB)
(aus RUBIN Handbuch, modifiziert)

Vorteile

- Durch F&G-/D&D-Systeme wird die Kontamination – oder auch mehrere Schadstoff-fahren – auf eine vergleichsweise kleine reaktive Zone fokussiert. Durch die Entkoppe-lung der Systemhydraulik von der Filtertechnik sind ein optimierter Materialeinsatz und eine vereinfachte Abstromüberwachung möglich
- Durch Mischungseffekte im Filterzustrom ist eine wesentlich bessere Ausschöpfung der Filtermaterialien gegeben
- Es können Gates eingesetzt werden, deren bauliche Ausbildung einen einfachen Zu-gang zum reaktiven Material und/oder einen regelmäßiger Austausch der Reaktorfü-lung ermöglichen

Nachteile

- Durch die Konzentration des Grundwasserstroms ist das reaktive Material in F&G-Systemen einer spezifisch höheren Beaufschlagung durch Begleitstoffe ausgesetzt, was zu einer Beeinträchtigung der Langzeiteffektivität (siehe unten) führen kann.

10.6 Reaktive Materialien und deren Einsatzmöglichkeiten

Als geeignete reaktive Materialien stehen derzeit vorrangig **elementares Eisen (Fe-0)** und **Aktivkohle** zur Verfügung. Diese Materialien wurden bislang überwiegend zur Abreinigung chlorierter Ethene / Ethane, zur Chromatfällung und zur Arsenfixierung (Fe-0), Aktivkohle bei PAK-Schäden und LCKW eingesetzt.

Grundsätzlich ist eine Vielzahl weiterer reaktiver Materialien und Materialkombinationen für den Einsatz in Reinigungswänden geeignet, sofern sie folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Die zu behandelnden Schadstoffe werden bei gegebenen Konzentrationen und Frach-ten in ausreichendem Umfang aus dem Wasser entfernt.
- Die Materialien besitzen als stabile Schüttung eine ausreichende Durchlässigkeit für Wasser.
- Die Materialien besitzen eine ausreichende Langzeiteffektivität.

10.6.1 Elementares Eisen

Eisen-Wände stellen mit rund 100 Feldanwendungen bislang die häufigste Anwendung dar.

Elementares Eisen ist als umwelttoxisch unbedenkliches Massengut relativ kostengünstig auch in großen Mengen verfügbar.

Das Haupteinsatzgebiet liegt beim reduktiven Abbau halogenierter aliphatischer Kohlenwasserstoffe, vorrangig PCE, TCE und cis-1,2 DCE. Der Abbau verläuft teilweise unter Bildung niederchlorierter Tochterprodukte wie cis-DCE oder VC die eine höhere Toxizität als die Ursprungssubstanzen aufweisen. Diese Zwischenprodukte werden zwar im Folgenden weiter zu vollständig dechlorierten Endabbauprodukten (im Wesentlichen Ethen und Ethan) reduziert, der Abbauprozess verläuft jedoch wesentlich langsamer als bei PCE und TCE. Für einige chlorierte Aliphaten (zum Beispiel 1,2-Dichlorethan) wurde der Abbau durch Fe-0 bisher nicht nachgewiesen.

Der Einsatz von Fe-0 ist jedoch nicht auf LHKW beschränkt. Es gibt technische Anwendungen zur **Chromatfällung**, zusätzlich ist ein hohes Abreinigungspotential für mit **Arsen** kontaminierte Grundwässer nachgewiesen.

10.6.2 Aktivkohle

In der klassischen Wasseraufbereitung wird Aktivkohle zur Sorption unpolarer Kohlenwasserstoffverbindungen seit langem wirkungsvoll eingesetzt. Auch in durchströmten Reinigungswänden wurde Aktivkohle als reaktives Material an mehreren Standorten weltweit, hauptsächlich in Europa, eingesetzt. Bisher sind rund 20 Anwendungen, vorwiegend PAK-Schäden, bekannt. Es wurden sehr gute Abreinigungsleistungen und Langzeitstabilitäten belegt oder berichtet.

Da Aktivkohle ein weit gefächertes Anwendungsspektrum besitzt, besteht grundsätzlich die Möglichkeit, A-Kohle auch für andere Kohlenwasserstoffe, insbesondere auch für LCKW (als Alternative zu Fe-0) einzusetzen.

10.6.3 Weitere Materialien

Liegen zur Anwendung von Eisen und Aktivkohle in Reinigungswänden vergleichsweise viele Erfahrungen vor, so variiert der Entwicklungs- bzw. Erfahrungsstand hinsichtlich weiterer reaktiver Materialien zum Teil erheblich, so dass keine verallgemeinerungsfähigen Aussagen getroffen werden können. Folgende Materialien sind in der Erprobung bzw. wurden in Einzelfällen eingesetzt:

- Zeolithe zur Schwermetallsorption
- Kalksteine zur Behandlung von sogenannten sauren Grubenwässern
- Apatit wurde eingesetzt, um eine Grundwasserbelastung mit Blei zu behandeln
- In sogenannten „Kompost“-Reinigungswänden lassen sich Schwermetalle, wie zum Beispiel Blei, Zink und Kupfer, durch Sulfidfällung in einer Kompostwand fixieren

10.6.4 Langzeiteffektivität des reaktiven Materials

Im Hinblick auf die Langzeiteffektivität reaktiver Materialien sind folgende Punkte zu beachten:

- Das reaktive Material darf durch Nebenreaktionen im Grundwasser nicht an Reaktivität in Bezug auf den Abbau bzw. Rückhalt der Schadstoffe einbüßen, oder die Abnahme der Reaktivität muss erfassbar und bestenfalls vorhersagbar sein.
- Die hydraulische Durchlässigkeit des reaktiven Materials darf durch Nebenreaktionen im Grundwasser nicht oder nicht signifikant vermindert werden.

Prozesse, die die Langzeiteffektivität beeinträchtigen können, sind:

- Belegung der Partikeloberflächen des reaktiven Materials mit „Coatings“ durch Korrosionsprodukte oder sekundär gebildete Mineralphasen
- Verstopfung („Clogging“) des Porenraumes zwischen Partikeln des reaktiven Materials durch:
 - Ausfällung sekundärer Minerale
 - Gasbläschenbildung („Gasclogging“)
 - Reaktionsprodukte aus biotischen Prozessen oder Biomasse („Biofouling“)
- Vorzeitiger Verbrauch des vorhandenen Reaktivitätspotentials durch unerwünschte Nebenreaktionen oder (unerwartete) Auflösung oder Austrag des reaktiven Materials, zum Beispiel infolge von pH-Wert-Schwankungen bzw. Abnahme der Stabilität der Schüttung
- Bevorzugte Fließwege („präferenzielle Strömungen“) bewirken, dass nur ein geringer Teil des Reaktormaterials für die Reaktion zur Verfügung steht und sich bereits lange vor der Erschöpfung des überwiegenden Teils des Reaktors ein Schadstoffdurchbruch einstellt
- Insbesondere bei CRB erfolgt keine Mischung und Homogenisierung des auf die Wand auftreffenden Grundwassers. Hierdurch kann sich eine sehr ungleichmäßige Erschöpfung des Reaktors ergeben, ohne dass die höher belasteten Bereiche identifiziert und isoliert ausgetauscht werden können

Da die Langzeiteffektivität des reaktiven Materials einen wesentlichen Punkt bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung darstellen kann, kommt einer realistischen Einschätzung der Standzeiten oftmals eine entscheidende Rolle bei der Auswahl des Verfahrens zu.

10.7 Verknüpfung mit anderen Verfahren

Bio-Wände

Es werden Substrate oder Reaktionspartner eingesetzt, die in der Reinigungswand oder auch im direkten Abstrom der Reinigungswand zur (mikrobiologischen) Umwandlung und / oder Festlegung der Schadstoffe führen. Der Übergang zu mikrobiologischen In-situ-Sanierungsverfahren zur Grundwassersanierung (enhanced natural attenuation) ist fließend.

Anwendungsbeispiel: F&G-Systeme, bei denen das Gate als ein (hochpermeabler) Reaktionsraum zur Einmischung von Substraten und Homogenisierung des zu behandelnden Grundwasserzustroms genutzt wird.

10.8 Vor- und Nachteile durchströmter Reinigungswände (PRB)

Die prinzipiellen Vor- und Nachteile des Einsatzes einer durchströmten Reinigungswand lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Vorteile

- integrale Sicherungswirkung
- auch bei geringdurchlässigem Aquifer einsetzbar
- kein Energiebedarf
- keine Ver- und Entsorgungsleitungen erforderlich
- geringe Auswirkungen auf den Grundwasserhaushalt
- keine oder nur geringe Veränderungen der Grundwasserstände (geringe Setzungsgefahr für Bauwerke) im Vergleich zu entsprechenden Pump&Treat-Maßnahmen
- durch unterirdische Installation gute Integration in die Umgebung und Folgenutzung möglich

Nachteile

- Wirtschaftlichkeit gegenüber Pump&Treat-Maßnahmen mit zugehörigem Monitoring nur bei langen Sanierungszeiträumen gegeben
- hohe Anforderungen an die Langzeitstabilität des reaktiven Materials
- geringe Flexibilität gegenüber Änderungen der Sanierungsstrategie
- Bemessung erfolgt auf Maximalbelastung
- hoher Aufwand zur Standortcharakterisierung
- hohe Investitionskosten im Vergleich mit P&T
- hoher Aufwand bei Nachbesserung oder der Behebung von Funktionsstörungen
- bei einem eventuell erforderlichen Rückbau (nach Sanierungsende oder bei nicht behebbaren Funktionsstörungen) entstehen möglicherweise erneut hohe Kosten

Als allgemeiner Nachteil jeglicher Sicherungsverfahren ist die Tatsache festzuhalten, dass der Schadstoffherd im Untergrund verbleibt und dort zu Einschränkungen der Geländenutzung führen kann.

10.9 Referenzstandorte und Literaturhinweise

Angaben zu Referenzstandorten finden sich im RUBIN-Handbuch „Anwendung von durchströmten Reinigungswänden zur Sanierung von Altlasten“ [www.rubin-online.de]. Ebenso finden sich dort ausführliche Literaturangaben.

10.10 Bewertung durch den Arbeitskreis

Generell konnten mit Reinigungswänden bisher sehr gute Sanierungserfolge erreicht werden. Insbesondere Adsorberwände auf Aktivkohlebasis können bei geeigneter Auslegung als zuverlässige Technologie bezeichnet werden. Mit Eisenwänden zur Reduktion halogener Schadstoffe konnten zwar gute Abreinigungsgrade erzielt werden, allerdings kann hier die Gasbildung in den Reaktoren zu erheblichen Problemen führen. In vielen Fällen weisen gelenkte Systeme mit gezielt ausgebildeten Reaktoren (Funnel-and-Gate-Systeme) Vorteile gegenüber vollflächig durchströmten Wandsystemen auf. Von entscheidender Bedeutung für den Fassungsbereich eines Systems sowie das Systemverhalten bei unterschiedlichen Grundwasserständen ist die Abstimmung der Gate-Bereiche, Reaktoren oder permeablen Wandteile nach Lage und hydraulischem Verhalten auf den anstehenden Aquifer. Für das Funktionieren der Systeme hat sich dabei insbesondere die Planung auf Basis einer numerischen Grundwassermodellierung als elementar erwiesen.

11 Fazit und Ausblick

Innovative In-situ-Sanierungsverfahren bieten **Möglichkeiten**, die den Anwendungsbereich konventioneller Techniken erweitern. Sie können mit Blick auf künftige Anforderungen an die Nachhaltigkeit¹⁹ von Sanierungsmaßnahmen eine Alternative sowohl bei der Sanierung der Schadstoffquellen als auch bei der Sanierung der Schadstofffahnen im Grundwasser sein oder zur Unterstützung bzw. zur Optimierung konventioneller Verfahren beitragen.

Festzustellen ist, dass in Deutschland viele innovative In-situ-Verfahren bisher nur im Rahmen von Pilotversuchen in Teilbereichen von Boden- und/oder Grundwasserkontaminationen eingesetzt wurden. Die in der Arbeitshilfe vorgestellten Verfahren entsprechen zwar überwiegend noch nicht dem Stand der Technik, können jedoch vielfach als praxisreif bezeichnet

¹⁹ Brundlandt-Report 1987 (<http://www.worldinbalance.net/intagreements/1987-brundtland.php>), Report of the NICOLE /SAGTA Workshop "Sustainable Remediation", März 2008 (<http://www.sagta.org.uk/>)

werden. Sie können – bei sachgerechtem und sorgsamem Einsatz – zur Sanierung von Schadensfällen eingesetzt werden, bei denen die bekannten und konventionellen Verfahren ineffektiv oder sogar unwirksam sind, obwohl diese dem Grunde nach für die betrachteten Schadensszenarien in hinreichendem Umfang zur Verfügung stehen und „Stand der Technik“ sind.

Der **Einsatz innovativer In-situ-Verfahren** erfordert jedoch zum Teil vertiefte interdisziplinäre chemische, physikalische, thermodynamische oder mikrobiologische Kenntnisse und Spezialwissen, um einen sachgerechten und sorgsamem Einsatz ohne eine weitere Gefährdung von Schutzgütern sicherzustellen. Er muss vor allem auf dem Wissen der Planer aufbauen. In-situ-Technologien können dabei auch dahingehend eine Zukunftschance bieten, dass die Kosten für den technischen Aufwand verringert werden und ein Teil dieser eingesparten Kosten für gute, wissensbasierte planerische Dienstleistungen aufgewandt wird, wodurch sich insgesamt eine deutliche Kostenersparnis ergeben kann. Der Einsatz innovativer Verfahren kann daher sowohl aus Kosteneffizienzgründen als auch aus ökologischen Gesichtspunkten sinnvoll sein und eine Möglichkeit zur Lösung eines Sanierungsproblems darstellen.

Die bisherigen **internationalen und nationalen Erfahrungen** zeigen, dass sich der Sanierungserfolg beim Einsatz von innovativen In-situ-Sanierungsverfahren nicht immer im gewünschten Maße einstellt, wobei die Gründe nicht selten in einem unsachgemäßen oder einem auf Grund der Datenlage verfrühten Einsatz zu suchen sind. Entscheidend für den Sanierungserfolg von In-Situ-Maßnahmen ist eine sorgfältige Konzeption und Vorbereitung. Grundlage für den Einsatz muss daher immer ein ausreichender Kenntnisstand der geologisch-hydrogeologischen Situation des Standorts und der Schadenssituation, insbesondere der dreidimensionalen Schadstoffverteilung, sein. Dabei kommt bei einzelnen Verfahren einer verfahrensspezifischen und zusätzlich detaillierten Standorterkundung eine große Bedeutung zu. Die hierfür anfallenden zusätzlichen Zeiten und Kosten können durch einen späteren nachhaltigen Sanierungserfolg und einer damit unter Umständen verbundenen deutlichen Zeit- und Kosteneinsparung gerechtfertigt und ausgeglichen werden.

Innovative In-situ-Sanierungsverfahren stellen aber **keine Alleinlösungen** oder „Allheilmittel“ dar und haben ihre ganz speziellen Einsatzbereiche und Anwendungsgrenzen. Daher kann auf die bisher eingesetzten klassischen Verfahren zur Boden- und Grundwassersanierung trotz der zunehmenden Verfügbarkeit innovativer In-situ-Verfahren keinesfalls verzichtet werden. Jedes Verfahren ist hinsichtlich seiner Anwendungsmöglichkeiten und –grenzen einzelfallbezogen zu bewerten. Diese Prüfung im Rahmen einer Sanierungsuntersuchung kann ergeben, dass im Einzelfall auch Kombinationen von etablierten und erprobten Techni-

ken mit innovativen Ansätzen differenziert nach Einsatz in der Quelle und in der Fahne erfolgversprechend sein können.

In einigen Fällen stellen innovative In-situ-Sanierungsverfahren jedoch auch **Speziallösungen** zur Lösung eines Problems dar. Gelingt es bei der Anwendung eines innovativen Verfahrens, die injizierten Wirkstoffe in Kontakt mit den Schadstoffen zu bringen, so dass die angestrebten Reaktionen zur Beseitigung der Schadstoffe ablaufen können, bestehen gute Voraussetzungen für erfolgreiche Sanierungen. Bei einer alleinigen Anwendung kommen sie oft nicht ohne besondere Schutz- und Überwachungsmaßnahmen zum Beispiel durch hydraulische Sicherungsmaßnahmen aus.

Nicht jeder **Standort** eignet sich für eine In-situ-Sanierung und auch die Art des möglichen Verfahrens ist stark von den Standortrandbedingungen abhängig. Auch die im Auftrag der LABO durchgeführte Auswertung von fünf In-situ-Sanierungsfällen²⁰ hat bestätigt, dass die Erfolgsaussichten insbesondere der innovativen In-situ-Verfahren im Einzelfall abhängig von den standortspezifischen geologischen, hydrochemischen und hydrogeologischen Gegebenheiten – insbesondere der hydraulischen Kenngrößen – sowie der räumlichen und konzentrationsabhängigen Schadstoffverteilung sind.

Mit Blick auf die **Auswahl** eines zur Erzielung des optimalen Sanierungserfolges geeigneten Verfahrens bzw. einer Verfahrenskombination sowie die Beurteilung der erzielbaren Sanierungseffizienz ist daher im Rahmen der Sanierungsuntersuchung eine detaillierte dreidimensionale Standortorterkundung sowie die Erstellung eines konzeptionellen Standortmodells erforderlich. Kommen nach einer ersten Vorprüfung mehrere Verfahren in Betracht, ist eine einzelfallbezogene Bewertung jedes Verfahrens hinsichtlich seiner Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen unerlässlich.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung von innovativen In-situ-Verfahren, bei denen Hilfsstoffe eingesetzt werden (Oxidations-, Reduktionsmittel, Elektronenakzeptoren, Elektronendonatoren etc.) ist, diese in möglichst vollständigen Kontakt mit den Schadstoffen zu bringen. Dies ist nur möglich, wenn die Verfahrensdurchführung auf die Schadenssituation und die Hydrogeologie/Hydrochemie abgestimmt sind. Im Vorfeld ist eine genaue Massenabschätzung bzw. -ermittlung der Schadstoffe und der erforderlichen Reaktionsstoffe durchzuführen, um Sanierungserfolg und Kostensicherheit zu gewährleisten. Dies gilt vor allem für den mitunter recht hohen Aufwand für Betriebsmittel. Ansonsten können erhebliche wirtschaftliche Risiken für den Sanierungspflichtigen entstehen, weil die Maßnahmen aufwändiger und unkalkulierbarer als konventionelle Techniken werden.

²⁰ http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb_prod/WaBoAb/Vorhaben/LABO/B_5.07/index.jsp

Bisherige Erfahrungen zeigen auch, dass es im Einzelfall erforderlich sein kann, mehrfache Infiltrationskampagnen (zum Beispiel bei ISCO) oder sogar dauerhaft wiederkehrende Infiltrationen von vorne herein einzuplanen, wenn ein vollständiger Kontakt mit den Schadstoffen nicht hergestellt werden kann und zwangsläufig wiederkehrend Rebound-Effekte auftreten.

Labor- und Feldversuche liefern wertvolle Informationen und tragen außerdem zur Verbesserung des Prozessverständnisses bei. Die Ergebnisse und Erfahrungen aus Labor- und Feldversuchen sowie die Berücksichtigung der Auswertung internationaler Erfahrungen²¹ (LABO 2009) können zu größerer Sicherheit bei der Sanierungsentscheidung für oder gegen innovative In-situ-Sanierungsverfahren und der Beurteilung von Erfolgsaussichten führen. Bei der Mehrzahl der Verfahren empfiehlt es sich, gezielte Vorversuche mit einem entsprechenden Untersuchungsprogramm vor der eigentlichen Sanierungsmaßnahme durchzuführen. Diese dienen einerseits der Eignungsprüfung des Verfahrens für den Standort und andererseits als Grundlage zur sicheren, zuverlässigen und damit auch zu einer optimierten Kosten- und Zeitplanung der Sanierungsmaßnahme. Eine Begleitung der Versuche durch wissenschaftliche Institutionen ist zu empfehlen.

Bereits in der **Vorbereitungsphase zur Sanierung** sind alle Voraussetzungen für eine Beurteilung des Sanierungserfolges zu schaffen. Eine Kontrolle der Wirksamkeit der Sanierung und bei einigen Verfahren die Steuerung bzw. die Betriebsweise des Verfahrens ist nur möglich, wenn eine hinreichende Anzahl von Messstellen an geeigneten Positionen vorgesehen wird, um die verfahrensrelevanten Parameter bestimmen zu können. Daher ist bereits vor Durchführung der Sanierung die Erarbeitung eines Monitoringkonzeptes erforderlich. Messstellen sind so zu platzieren, dass Bilanzierungen durchgeführt werden können und der Sanierungsfortschritt nachgewiesen werden kann. Um Haftungsrisiken für den Planer/Gutachter zu minimieren, sollten jeweils nach den Erfordernissen des Einzelfalls zusätzlich geeignete Sicherungsmaßnahmen vorgesehen werden.

Zur **Erweiterung der Anwendungsgrenzen** kann eine zeitliche und / oder räumliche Kombination (treatment trains) von innovativen Verfahren mit herkömmlichen Verfahren oder MNA-Konzepten sein (zum Beispiel Aushub der Schadensquelle und In-situ-Verfahren in der Fahne oder In-situ-Verfahren in der Quelle und Pump-and-treat oder ein MNA-Konzept in der Fahne). Dieses muss im Einzelfall geprüft werden.

Auf der Basis des **derzeitigen Kenntnisstandes** bleiben noch zahlreiche technische, ökologische, ökonomische und juristische Fragen zur Anwendung innovativer In-situ-Verfahren offen. Dies betrifft belastbare Nachweise zur Kosten(effizienz), zu Auswirkungen auf die Um-

²¹ http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb_prod/WaBoAb/Vorhaben/LABO/B_1.07/index.jsp

welt sowie zur Nachhaltigkeit des Sanierungserfolges. Aber auch Fragen der Prognosesicherheit und eines Nachweises des Sanierungserfolges, der Schadstoffbilanzierung, der Kontrolle und Steuerung des Sanierungsverlaufs, der Kostenplanung und der Dauer der Sanierung sowie der Haftungsrisiken im Hinblick auf die Gewährleistung der Sanierungsziele sind zu klären.

Die noch bestehenden **Wissensdefizite** bezüglich der

- Erkundungsmethoden zur Detektion organischer Phasen und deren Verteilungsformen
- Kenntnis über Reichweiten und Wirksamkeiten der eingesetzten Stoffe in Abhängigkeit der Durchlässigkeiten der Aquifersysteme
- Auswirkungen einer Kombination von oxidativen und biologischen Verfahren
- Anwendung von treatment trains

bedingen weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Ebenso sind

- die Optimierung von Injektionssystemen /-technologien und
- die (Weiter)entwicklung von In-Situ-Messsystemen zum Online-Monitoring

geboten.

Mit Blick auf die **Ableitung von Handlungsempfehlungen** zur Entscheidungsfindung ist zudem die systematische Auswertung weiterer In-situ-Sanierungsfälle erforderlich. Ein intensiver Erfahrungsaustausch über neue Erkenntnisse aus der Anwendung von innovativen Verfahren würde zur Schließung von Datenlücken beitragen und die Aussichten auf erfolgreiche Sanierungsanwendungen steigern.

Deshalb wird seitens des ITVA-Arbeitskreises dringend **empfohlen**, die Anwendung innovativer In-situ-Sanierungsverfahren schon bei der Konzeptionierung ausschließlich unter Einbeziehung der jeweils zuständigen Behörde und externer Experten zu prüfen und im Fall eines zu erwartenden Anwendungserfolges das ausgewählte Verfahren rechtssicher zum Beispiel durch einen verbindlichen Sanierungsplan, eine Anordnung oder einen öffentlich-rechtlichen Vertrag zu realisieren.

12 Literatur

- AFCEE & NFESC (2004): Principles and Practices of Enhanced Anaerobic Bioremediation of Chlorinated Solvents. Air Force Center for Environmental Excellence, Brooks City- Base, Texas; Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, California, Environmental Security Technology Certification Program, Arlington, Virginia
- Anderson, W. C. (1994): Innovative site remediation technology: Chemical treatment. American Academy of Environmental Engineers, Annapolis, Maryland, USA
- Arnold, W. A., Roberts, A. L. (2000): Pathways and kinetics of chlorinated ethylene and chlorinated acetylene reaction with Fe(0) particles. *Environmental Science and Technology*, 34, 1794-1805
- Balcke, G. (2000): Anthropogene Huminstoffe als Sorbenzien und Reagenzien zur Immobilisierung von organischen Schadstoffen in Grundwässern. Dissertation, Universität Leipzig, Leipzig
- Baldwin, B. R., Nakatsu, C. H., Nebe, J., Wickham, G.S., Parks, Chr., Nies, L. (2008): Enumeration of aromatic oxygenase genes to evaluate biodegradation during multi-phase extraction at a gasoline-contaminated site. In: *Journal of Hazardous Materials* 163 (2009) 524-530
- Batelle, Duke & Engineering Services (2001): Cost and Performance Report for Surfactant-Enhanced DNAPL Removal at Site 88, Marine Corps Base Camp Lejeune, North Carolina
- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.) (2005): In-situ-Sanierung schadstoffbelasteter Böden mit elektrokinetischen Verfahren. Abschlussbericht zum gleichnamigen FuE-Vorhaben im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Augsburg, 77 S.
- Beckmann, A., Zittwitz, M. Gerhardt, M. (2006): OXYWALL: Sauerstoffgaswände mittels Direktgasinjektion. In: Symposium „In-situ-Sanierung“ 20. - 21.11.2006, DECHEMA e.V., Frankfurt, Frankfurt am Main
- Beckmann, A., Zittwitz, M. Gerhardt, M., Martienssen, M., Krieg, R., Geistlinger, H., Schirmer, M. (2007): Das OXYWALL-Projekt: Anwendung eines Verfahrens zur Direktgasinjektion von Sauerstoff zur in situ Sanierung von organisch kontaminierten Grundwässern. In: *altlasten spektrum*, 16. Jg., 04/2007, S. 153 – 160
- Betz, Ch. (1998): Wasserdampfdestillation von Schadstoffen im porösen Medium: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie. *Mitteilungen Heft 97*, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, ISBN: 3-921694-97-3
- Blue, X. (2006): In Situ Ozone Remediation of Adsorbed PAHs in Soil
- Bock, P. et al (1990): Untergrundsanierung mittels Bodenluftabsaugung und In-Situ-Strippen. *Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, Karlsruhe*
- Braeckevelt, M., Mirschel, G., Wießner, A., Rückert, M., Reiche, N., Vogt, C., Schultz, A., Paschke, H., Kusch, P., Kästner, M. (2008): Treatment of chlorobenzene-contaminated groundwater in a pilot-scale constructed wetland. In: *Ecol.Eng.* 33 (1), 45-53; <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.02.002>
- Braeckevelt, M., Rokadia, H., Imfeld, G., Stelzer, N., Paschke, H., Kusch, P., Kästner, M., Richnow, H.-H., Weber, S. (2007): Assessment of in situ biodegradation of monochlorobenzene in contaminated groundwater treated in a constructed wetland, *Environ.Pollut.* 148 (2), 428-437; <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2006.12.008>
- Braun, J., de Boer, C. (2007): Injektion von Nano-Eisen zur LHKW-Sanierung – Ergebnisse aus VEGAS Laboruntersuchungen. In: Braun, Koschitzky, Stuhmann (Hrsg.): *Mitteilungen Heft 165*, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart 2007, ISBN 3-933761-69-7, S. 64-74
- Braun, J., Greiner, P. Koschitzky, H.-P., Schnieders, J., Weber, K. (2003): Übersicht über Technologieentwicklungen zur NAPL-Sanierung mittels Alkoholcocktails. In: Schrenk, Batereau, Barczewski, Weber, Koschitzky (Hrsg.): *Symposium Ressource Fläche und VEGAS-Statuskolloquium 2003*, *Mitteilungen Heft 124*, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, ISBN 3-933761-27-1

- Brooks et al. (2004): Controls release, blind test of DNAPL remediation by ethanol flushing. *Journal of Contaminant Hydrology*, 69, 281-297
- Brown, R., Henry, E., Herman, C., Leonard, W. (1991): The use of aeration in environmental clean-ups. In *Proceedings of the Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water*, 265-279, by National Water Well Association
- Buhl, J. (2006): In-situ-Abbau von Vinylchlorid im Grundwasser. In: Symposium „In-situ-Sanierung“ 20. - 21.11.2006, DECHEMA e.V., Frankfurt, Frankfurt am Main
- Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) (2009): Ableitung validierter Probenahme- und Analysenmethoden für Zwischen- und Endprodukte der anaeroben Stoffverwertungsprozesse von Leichtflüchtigen Chlorierten Kohlenwasserstoffen (LCKW) im Grundwasser im Rahmen von Altlastenuntersuchungen. Abschlussbericht Projekt B 2.08 Länderfinanzierungsprogramm Wasser und Boden, 79 S.;
http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb_prod/WaBoAb/Vorhaben/LABO/B_2.08/index.jsp
- BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (2007): Anwendung von durchströmten Reinigungswänden zur Sanierung von Altlasten. Endbericht Forschungsvorhaben RUBIN
- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz – LABO (2009): Berücksichtigung natürlicher Schadstoffminderungsprozesse bei der Altlastensanierung. Positionspapier vom 10.12.2009; http://labo-deutschland.de/documents/MNA-Positionspapier_Stand_10-12-2009_e51.pdf
- Burghardt, D., Simon E., Knöller, K., Kassahun, A. (2007): Immobilization of uranium and arsenic by injectible iron and hydrogen stimulated autotrophic sulphate reduction. *Journal of Contaminant Hydrology* 94, 305-314.
- CALIFORNIA DEPARTMENT OF TOXIC SUBSTANCES CONTROL (2006): In-situ Bioremediation of Chlorinated Hydrocarbons - An Assessment of Projects in California. OPPTD Document No. 1217
- Cantrell, K. J., Kaplan, D.I. (1997): Zero-valent iron colloid emplacement in sand columns, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 123, S. 499-505
- Carver, M., Brown, R.A. (2007): Chemical Oxidation of MTBE and TBA. Battelle, Columbus/Ohio
- Chapelle, F.H. (1992): *Groundwater microbiology and biochemistry*. Wiley and Sons, New York, USA
- Childs, J., Acosta, E., Annable, M. D., Brooks, M.C., Enfield, C.G., Harwell, J.H., Hasegawa, M., Knox, R.C., Rao, P.S.C., Sabatini, D.A., Shiao, B., Szekeres, E., Wood, A.L. (2005): Field demonstration of surfactant-enhanced solubilization of DNAPL at Dover Air Force Base, Delaware. *Journal of Contaminant Hydrology*, 82, pp.: 1-22
- Christ, J.A., Ramsburg, C.A., Abriola, L.M., Pennell, K.D., Löffler, F.E. (2005): Coupling Aggressive Mass Removal with Microbial Reductive Dechlorination for Remediation of DNAPL Source Zones: A Review and Assessment. *Environmental Health Perspectives*, vol. 13, no. 4, pp.: 465 – 477
- Conrad, S.H., Glass, R.J., Peplinski, W.J. (2002): Bench-scale visualisation experiments of DNAPL remediation processes in analog heterogeneous aquifers: surfactant floods and insitu chemical oxidation using permanganate. *Journal of Contaminant Hydrology*, 58, 13-49
- Cookson, J. (1995): *Bioremediation Engineering: Design and Application*. R.R. Donnelly & Sons Company, San Francisco, California, USA
- Cornelsen, M. (2004): In-situ-Schadstoffabbau (MTBE, BTEX, Benzin) mittels iSOC™.- Firmeninformation der Cornelsen Umwelttechnologie GmbH, Essen.
- Cornelsen, M., Buhl, J. (2005): Optimierung des natürlichen Schadstoffabbaus in situ durch den Einsatz von iSOC™. In: *altlasten spektrum*, 14. Jg., 02/2005, S. 70 - 74.
- Crimi, M.L., Sigrist, R.L. (2003): Geochemical effects on metals following permanganate oxidation of DNAPLs. *Ground Water* 41:458-469
- Cunningham, J. A., Rahme, H., Hopkins, G. D., Lebron, C., Reinhard, M. (2001): Enhanced In Situ Bioremediation of BTEX-Contaminated Groundwater by Combined Injection of Nitrate and Sulfate, *Environ. Sci. Technol.*, 35 (8), 1663 -1670, 2001. 10.1021/es001722t, 2001

- Dalla Vecchia, E., Coisson, M., Appino, C., Vinai, F., Sethi R. (2009): Magnetic Characterization and Interaction Modeling of Zerovalent Iron Nanoparticles for the Remediation of Contaminated Aquifers. *JOURNAL OF NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY* **9**, 3210-3218.
- Danzer, J., Herbert, M. (2000): Tenside zur In-situ-Grundwassersanierung – Stand der Technik, Planung, Implementierung. Schriftenreihe Altlastenforum Baden-Württemberg e.V. e.V. Heft 3, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- Davis, E.L. (1997): How Heat Can Enhance In-situ Soil and Aquifer Remediation: Important Chemical Properties and Guidance on Choosing the Appropriate Technique. Ground Water Issue EPA/540/S-97/502
- de Boer, C. (2007): Characteristics and mobility of zero-valent nano-iron in porous media, Masterarbeit an der Universität Utrecht, Institut für Geowissenschaften
- de Boer, C., Klaas, N., Braun, J. (2009): Anwendung nanoskaliger Eisenkolloide zur In-Situ-Sanierung anthropogener CKW-Kontaminationen im Untergrund. Wissenschaftlicher Bericht Nr. VEG 36, 2009/05. University of Stuttgart
- Deeb, R.A., Flores, A.E., Stocking, A.J., Thompson, S.E., Kavanaugh, M.C., Creek, D.N., Davidson, J. M. (2004): Evaluation of MTBE Remediation Options. Center for Groundwater Restoration and Protection, National Water Research Institute, Fountain Valley, California, USA
- Derek L. et al. (1996): Humic substances as electron acceptors for microbial respiration. *Nature*, Vol. 382
- Dermietzel, J., Krauss, G., Seifert, K. (1999): Untersuchungen zum aeroben Abbau von Chloraromaten im Grundwasser und im Aquifer - Modellstandort, mobile Testeinheit, Pilotanlage (SAFIRA, 2. Statusbericht), In: Weiß, H., Daus, B., Teutsch, G. (Hrsg.): UFZ-Bericht 17/1999, UFZ Leipzig-Halle GmbH, Leipzig, S. 146-155
- DGFZ (Hrsg.) (2008): KORA-Synopse "Systemanalyse, Modellierung und Prognose der Wirkungen natürlicher Schadstoffminderungsprozesse - eine rezente Synopse" (KORA-TV7 "Modellierung, Prognose"), Gemeinsame Mitteilungen des Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V. und seiner Partner, Heft 05/2008, ISSN 1611-5627 (www.dgfz.de/publikationen, www.natural-attenuation.de)
- Dorgerloh, U.; Theißen, H., Becker, R., Wehrhan, A., Win, T. (2010): Ableitung validierter Probenahme- und Analysenmethoden für Zwischen- und Endprodukte der anaeroben Stoffverwertungsprozesse von Leichtflüchtigen Chlorierten Kohlenwasserstoffen (LCKW) im Grundwasser im Rahmen von Altlastenuntersuchungen, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) (Hrsg.), Heft 290, Berlin 2010, BAM-Eigenverlag, 121 S., ISBN 978-3-9813346-5-4; http://www.bam.de/de/service/publikationen/publikationen_medien/fb290_vt.pdf
- Drangmeister, J., Großmann, J., Willand, A. (2007): Eine Auswertung von durchgeführten Grundwassersanierungen der Länder und Ansätze zur Optimierung zukünftiger Maßnahmen. Forschungsbericht 200 23 249, UBA-FB 000786
- Ebert, M. (2004): Elementares Eisen in permeablen reaktiven Barrieren zur in-situ- Grundwassersanierung – Kenntnisstand nach zehn Jahren Technologieentwicklung, Dissertation an der Christian-Albrechts-Universität Kiel, Institut für Geowissenschaften
- Ebert, M., Köber, R., Schlenz, B., Dahmke, A., Großmann, J., Weiß, H. (2007): Modelling the effect of air sparging on groundwater geochemistry; 3rd European Conference on Natural Attenuation and In-situ Remediation; 19.-21.11.2007, Frankfurt, Tagungsunterlagen
- Edel, H.-G., Schwarz, M., Seidel, U., Friedrich, M., Gerweck, H., Stäblein, H., Maier-Oßwald, W. (2004): In-situ-chemische Oxidation (ISCO) – Einsatz eines neuartigen Verfahrens zur Sanierung eines LCKW-Grundwasserschadens, Teil 1. In: altlasten spektrum, 13.Jg., 05/2004, S. 251 – 258.
- Edel, H.-G. et al. (2004): In.situ-chemische Oxidation (ISCO)- Einsatz eines neuartigen Verfahrens zur Sanierung eines LCKW Grundwasserschadens, Teil 2. In: altlasten spektrum, 14. Jg. 5/2005, S. 281 – 285.
- Elliott, D.W., Zhang, W.X. (2001): Field Assessment of Nanoscale Bimetallic Particles for Groundwater Treatment. *Environmental Science & Technology*, 35(24), 4922 - 4926.

- Ellis, E. T. et al. (2000): Bioaugmentation for Accelerated In Situ Anaerobic Bioremediation. *Environmental Science & Technology*, 34, 2254 – 2260
- Elsner, M., Schwarzenbach, R. P., Haderlein, S. B. (2004): Reactivity of Fe(II)-bearing minerals toward reductive transformation of organic contaminants. *Environmental Science and Technology*, 38, 799-807
- Engelmann, F. I., Ehbrecht, H., Giese, R., Roscher, C. (2004): Formierung durchlässiger Reinigungswände in Grundwasserleitern durch Injektion reaktiver Gase am Beispiel der BIOX-WAND Berlin. Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V. - Fachtagung Innovative Verfahren und Techniken zur In-situ-Grundwassersanierung. 9. Dresdner Grundwasserforschungstage
- ESTCP (2005): Bioaugmentation for remediation of chlorinated solvents: technology development, status and research needs. Environmental Security Technology Certification Program. [http://DOCS.SERDP-ESTCP.ORG/VIEWFILE.CFM?DOC=BIOAUGMENTATION WHITEPAPER.PDF](http://DOCS.SERDP-ESTCP.ORG/VIEWFILE.CFM?DOC=BIOAUGMENTATION%20WHITEPAPER.PDF)
- European Commission (2005): ATEX GUIDELINES (Second Edition) – Guidelines on the Application of Council Directive 94/9/EC of 23 March 1994 on the Approximation of the Laws of the Member States concerning Equipment and Protective Systems intended for Use in potentially explosive Atmospheres, July 2005, UPDATED May 2007, Brussels; <http://ec.europa.eu/enterprise/atex/guide/index.htm>
- Eweis, J.N., Chang, D.P., Schroeder, E.D., Scow, K.M., Morton, R.L., Caballero, R.C. (1997): Meeting the challenge of MTBE biodegradation. Presented at the 90th Annual Meeting and Exhibition of the Air and Water Management Association, on June 8-13, 1997, in Toronto, Canada, Air and Waste Management Association, Pittsburgh, Pennsylvania, USA
- Falta, R. W., Lee, C. M., Brame, S. E., Roeder, E., Coates, J. T., Wright, C., Wood, A. L., Enfield, D. C.G. (1999): Field test of high molecular weight alcohol flushing for subsurface nonaqueous phase liquid remediation: *Water Resources Research*, 35, 2095-2108
- Färber, A., Class, H., Jie, D., Koschitzky, H.-P., Müller, C., Ochs, S.O., Trötschler, O., Steidinger (2004): Dampf-Luft-Injektion zur In-situ Sanierung der gesättigten Bodenzone: Anwendungsmöglichkeiten und Erfahrungen aus einer PCE-Sanierung in Albstadt. S.78-87. In: (Hrsg): Barczewski B., Koschitzky H.-P., Weber K. & Wege R.: VEGAS Statuskolloquium 2004, Mitteilungen Nr. 131, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart ISBN 3-933761-34-4
- Farrel, J., Kason, M., Melitas, N., Li, T. (2000): Investigation of Long- Term Performance of Zero-Valent Iron for Reductive Dechlorination of Trichloroethylene. *Environmental Science & Technology*, 34, pp.: 514-521
- Fields, K., Gibbs, J., Condit, W., Leeson, A., Wickramanayake, G. (2002): Air Sparging: A Project Manager's Guide . Battelle Press, Columbus, OH, 2002, 170 pp., ISBN: 1-57477-130-2
- Fischer, A., Bauer, J., Dietze, M., Gödeke, S., Schirmer, M., Weiß, H., Kästner, M., Meckenstock, R. U., Richnow, H.-H. (2005): Konzept zur Quantifizierung des anaeroben in situ-Schadstoffabbaus in BTEX-kontaminierten Grundwasserleitern mittels Deuterium-markierter Substanzen. In: *altlasten spektrum* 14 (1), 5-12
- Frankel, A.J., Owsianiak, L.M., Wuerl, B.J., Horst, J.F. (2004): In-situ anaerobic remediation of perchlorate-impacted soils
- Friedl, C. (2006): AAV und Rhein-Sieg-Kreis sanieren CKW-Altlast in-situ mit Nanotechnik. http://www.aav-nrw.de/aav/dokumente/projektinformation/bornheim_ferster.pdf
- Friis, A.K. (2005): The potential for reductive dechlorination after thermal treatment of TCEcontaminated aquifers. Academic dissertation, Institute of Environment & Resources, Technical University of Denmark
- Frimmel, F.H., Abbt-Braun, G., Heumann, K.-G., Hock, B., Lüdemann, H.-D., Spitteller, M. (2001): *Refractory Organic Substance in the Environment*. Wiley-VCH, Weinheim
- Gavaskar, A., Tatar, L., Condit, W. (2005): Cost and performance report nanoscale zerovalent iron technologies for source remediation. Naval Facilities Engineering Command, Port Hueme, USA

- Geistlinger, H., Eisermann, D., Lazik, D., Weiß, H. (2002): Process Modelling of Oxygen Supply for Aerobic Biodegradation in the Presence of an Oxygen Bubble Wall. In: Thornton, S. F., Oswald, S. E. (Hrsg.): Groundwater Quality: Natural and Enhanced Restoration of Groundwater Pollution, IAHS Red Book Series 275, IAHS Press, Oxfordshire, UK, S. 507-512
- Geistlinger, H., Lazik, D., Beckmann, A., Eisermann, D., Krauss, G., Mayer, U. (2002): Experimental and Theoretical Investigations of Oxygen Release by a Trapped Gas Phase : ModelCare'2002, Prag, 17.-20.6.2002, In: Acta Universitas Carolinae - Geologica, 458-461
- Geistlinger, H., Lazik, D., Beckmann, A., Eisermann, D., Krauss, G., Mayer, K. U. (2003): Experimental and theoretical investigations of oxygen release by a trapped gas phase. In: GeoProc 2002: Geochemical processes in soil and groundwater, Bremen, 4.-7.3.2002, Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA, Weinheim, S. 19-36
- Geistlinger, H., Lazik, D., Beckmann, A., Eisermann, D., Krauss, G., Mayer, U. (2002): Experimental and theoretical investigations of oxygen phase transfer: Reactive transport modelling of an in situ oxygen bubble wall. In: Geo Proc 2002 - Geochemical Processes, Bremen, 4.-7.3.2002, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Universität Bremen,
- Georgi, A., Schierz, A., Kopinke, F.-D. (2006): Activation of hydrogen peroxide by complexes of iron(III) with humic acid for chemical degradation of organic compounds in water. In: EAAOP conference (Environmental applications of Advanced Oxidation Processes), Chania, Greece
- Gerzabek, M. H., Reichenauer, Th. G. (2006): Innovative In-situ Methoden zur Sicherung und Sanierung von Altablagerungen und Altstandorten. Facultas Universitätsverlag, Wien
- Gilbert, B., Lu G., Kim, C. S. (2007): Stable cluster formation in aqueous suspensions of iron oxyhydroxide nanoparticles. *JOURNAL OF COLLOID AND INTERFACE SCIENCE* **313**(1), 152-159.
- Grandel, S., Dahmke, A. (2005): Partial source treatment by in-situ technologies - a review of limits, advantages and challenges. In: Nützmann, G., Viotti, P. & Aagaard, P. (Editors): Reactive Transport in Soil and Groundwater. Springer Verlag, Berlin, 279-295.
- Gödeke, S., Richnow, H.-H., Weiß, H., Fischer, A., Vogt, C., Borsdorf, H., Schirmer, M. (2006): Multi tracer test for the implementation of enhanced in-situ bioremediation at a BTEX-contaminated megarite. In: J.Contam.Hydrol. 87 (3-4), 211-236; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconhyd.2006.05.008>
- Gödeke, S., Schirmer, M., Weiß, H. (2001): Benzenabbau im Grundwasser durch Sulfatreduktion. 3. DECHEMA Symposium "Natural Attenuation - Umsetzung, Finanzierung, Perspektiven", Frankfurt/M., 4.-5.12.2001, S. 167-170
- Großmann, J., Dahmke, A., Weiß, H. (2009): Wieviel Quellsanierung ist sinnvoll? Theorie und praktische Beispiele. XX. Sächsisches Altlastenkolloquium, Tagungsunterlagen
- Großmann, J., Tischer, L., Dahmke, A., Köber, R., Hornbruch, G., Schubert, M., Weiß, H. (2007): Development and pilot-scale implementation of an NA- and ENA-based remediation strategy at a refinery site with large-scale petroleum hydrocarbon and BTEX-contamination
- Großmann, J., Weiß, H. (2009): Vergleichende Untersuchungen mehrerer innovativer Sanierungsverfahren am Standort einer alten Raffinerie; BEW-Forum Altlasten und Bodenschutz, Tagungsunterlagen
- Greenberg, R., Andrews, T., Kakarla, P., Watts, R. (1998): In Situ Fenton-Like Oxidation of Volatile Organics: Laboratory, Pilot and Full-Scale Demonstrations. Remediation, 8, 29-42
- Greiner, P., Braun, J., Schnieders, J. und H.-P. Koschitzky (2002): Injektion von Alkoholcocktails zur In-situ-Sanierung von CKW-Schadensherden in Grundwasserleitern. In: VEGAS-Statuskolloquium 2002. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Stuttgart, S. 95-102
- Gropper, H., Kohler, W., Kohlmeier, E., Schöndorf, Th., Schrenk, V., Wabbels, D. (2004): Ökobilanzierung von Altlastensanierungsverfahren. Schriftenreihe altlastenforum Baden Württemberg e.V., Heft 9, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- Handwerkskammer für München und Oberbayern: Technische Regeln; <http://www.hwk-muenchen.de/74,0,126.html>

- Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften - HVBG (2006): Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit. BG-Regel „Kontaminierte Bereiche“ (BGR 128). Carl Heymanns Verlag München. –
<http://www.arbeitssicherheit.de/servlet/PB/show/1224439/bgr128.pdf>
- Haus, R., Zorn, R., Czurda, K., Terfehr, S. (2002): Elektrokinetische In-Situ-Sanierung. Schriftenreihe altlastenforum Baden Württemberg e.V., Heft 7, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- Hazen, T. C., Fliermanns, C. B. (1994): Bioremediation of contaminated Groundwater. US Pat. No. 5,384,048
- Hein, P., Zittwitz, M., Pistiolis, I., Moschick, A., Freygang, M., Großmann, J. (2008): In-situ-Abreinigung von Trichlorethen im Grundwasser mit regenerierbarem Fe(0)-Reaktor. In: altlasten spektrum Heft 2/2008
- Held, Th. (1996): Natürlicher und forcierter mikrobieller in-situ-Abbau von CKW am Beispiel der Fallstudie Pintsch, Hanau. In: altlasten spektrum 5/1996, S. 257 - 264
- Held, Th., Blotevogel, J., Jacob, H., Dörr, H., Schlorke, N., Gödel, H.U. (2006): In-situ Reaktive Zone (IRZ) – Einsatz von Melasse zur mikrobiellen In-situ-Sanierung einer LCKW-Kontamination im Grundwasser. In: altlasten spektrum, 15. Jg., 04/2006, S. 208-215
- Held, Th. (2007): Neue Verfahren und Konzepte zur Quellensanierung: Eine Einführung. In: Franzius, V., Wolf, K., Brandt, E. (Hrsg.): Handbuch Altlastensanierung, C. F. Müller Verlag, Heidelberg, 51. Aktualisierung, 3. Aufl. März 2007, S. 5851 f.
- Held, Th. (2009): Auswertung von Fällen mit In-situ-Anwendungen in der gesättigten Zone bei der Altlastenbearbeitung. Hrsg.: Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern im Rahmen des Länderfinanzierungsprogramms 2007, LFP-Projekt-Nr. B 5.07.
http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb_prod/WaBoAb/Vorhaben/LABO/B_5.07/index.jsp
- Held, Th. (2009): Optimierte Entscheidungsfindung bei Verfahrenskombinationen. Tagung "Planung und Durchführung abfallarmer Bodensanierung, kosten- und abfalloptimierte Methoden der in-situ-Sanierung, Potsdam
- Helms, K. (2009): Ausschreibung und Vergabe bei der In-situ-Sanierung. Tagung "Planung und Durchführung abfallarmer Bodensanierung, kosten- und abfalloptimierte Methoden der in-situ-Sanierung, Potsdam
- Heron, G., Carrolls, S., Nielsen, S.G. (2005): Full-scale removal of DNAPL constituents using steam-enhanced extraction and electrical resistance heating: Ground Water Monitoring and Remediation, 25, 92-107.
- Hetzer, S., Klaas, N., Trötschler, O. (2006): Machbarkeitsstudie zum Einsatz von chemischer Oxidation (ISCO) zur Sanierung von CKW-Kontaminationen – Ergebnisse aus Batch- und Säulenversuchen, in: (Hrsg.) Braun, Koschitzky, Stuhmann, Mitteilungen Heft 150, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart 2006, ISBN 3-933761-53-0, S. 95-107
- Hiester, U. & Schrenk, V. (2005): In-Situ Thermal Remediation: Ecological and Economic Advantages of the TUBA and THERIS Methods. In: Uhlmann, O., Annokkée, G.-J., & Arendt, F. (2005): ConSoil 2005. Proceedings of the 9th International FZK/TNO Conference on Soil-Water Systems, 3 - 7 October 2005, Bordeaux/France. S. 1581 - 1587
- Hiester, U., Koschitzky, H.-P., Trötschler, O., Färber, A., Baker, R., Lachance, J., Kuhlmann, M. (2005): Feste Wärmequellen zur In-situ-Grundwasserreinigung bei DNAPL Schäden - erste Ergebnisse einer U.S. geförderten Forschungs Kooperation. In (Hrsg.): Braun, Koschitzky, Müller: Resource Untergrund: 10 Jahre VEGAS: Forschung und Technologieentwicklung zum Schutz von Grundwasser und Boden, Tagungsband zur Veranstaltung am 28. und 29. September 2005 an der Universität Stuttgart, Mitteilungen Heft 145, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, ISBN 3-933761-48-4

- Hiester, U., Schrenk, V., Pietscher, F. (2006): Thermische In-situ-Sanierung mit dem THERIS-Verfahren - Erfahrungen beim Einsatz unter genutzten Gebäuden. Proceedings, DECHEMA-Tagung: In-Situ Sanierung - Trends in Forschung und Praxis (23. - 24. November 2006 Frankfurt am Main), Editor: DECHEMA Frankfurt, Eigenverlag, DECHEMA, 11/2006.
- Hiester, U. (2009): Technologieentwicklung zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone mit festen Wärmequellen. Mitteilungen Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart Heft 178, ISBN: 978-3-933761-82-8
- Hinchee, R.E. (1994): Air sparging for site remediation. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida
- Holbert, C., Arens, S., Himle, C., Gorder, K. Field (2004): Observations four years after aggressive source removal using SEAR; Paper 2C-02. In: Gavaskar, A.R., Chen, A.S.C. (Eds.) (2004): Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds 2004. Proceedings of the Fourth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, CA; May 2004. Press, Columbus, OH, ISBN 1-57477-145-0
- Hong, J., Sewell, G. W. (1999): Organic Electron Donors for the Microbial Cr(VI) Reduction. Presented at In-Situ and On-Site Bioremediation: 5th Intl. Symp, San Diego, CA, 04/19-22/1999. Batelle, Columbus/Ohio. http://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_Report.cfm?dirEntryID=87203
- Houben, G.; Kringel, R. (2007): Remediation of Contaminated Groundwater with Nanoparticles. *DECHEMA - In situ Sanierung*, Frankfurt am Main, Germany.
- Hunling, S.G., Pivetz, B.E. (2006): In Situ Chemical Oxidation. EPA, Engineering Issue EPA 600/R-06/072.
- Imfeld, G., Estop Aragonés, C., Zeiger, S., Vitzthum von Eckstädt, C., Paschke, H., Trabitzsch, R., Weiß, H., Richnow, H.-H. (2008): Characterization of in situ biodegradation in a model subsurface flow constructed wetland treating 1,2-dichloroethenes. In: *Environ.Sci.Technol.* 42 (21), 7924-7930; <http://dx.doi.org/10.1021/es8014277>
- Imfeld, G., Nijenhuis, I., Nikolausz, M., Zeiger, S., Paschke, H., Drangmeister, J., Grossmann, J., Richnow, H.-H., Weber, S. (2008): Assessment of in situ degradation of chlorinated ethenes and bacterial community structure in a complex contaminated groundwater system. In: *Water Res.* 42 (4-5), 871-882; <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2007.08.035>
- Imfeld, G., Nijenhuis, L., Nikolausz, M., Zeiger, S., Paschke, H., Drangmeister, J., Großmann, J., Richnow, H.-H., Weber, St. (2008): Assessment of in-situ degradation of chlorinated ethenes and bacterial community structure in a complex contaminated groundwater system. *Water Research* 42 (2008), S. 871-882.
- INOCRE (2002) : In-Situ Remediation Techniques.- M6/3, 07.03.2002
- Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung: GESTIS Stoffdatenbank; <http://biade.itrust.de/biade/lpext.dll?f=templates&fn=main-h.htm>, <http://www.dguv.de/bgia/stoffdatenbank>
- ITRC (2000): Dense Nonaqueous Phase Liquids (DNAPL): Review of Emerging Characterisation and Remediation Technologies.
- ITRC (2003): Technical and Regulatory Guidance for Surfactant/Cosolvent Flushing of DNAPL Source Zones. Technical/Regulatory Guideline. Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC) , Dense Nonaqueous Phase Liquids Team. <http://www.itrcweb.org/Documents/DNAPLs-3.pdf>
- ITRC (2004): Strategies for Monitoring the Performance of DNAPL Source Zone Remedies. Interstate Technology and Regulatory Council, Dense Nonaqueous-Phase Liquids Team, pp.: 8 ff
- ITRC (2005): Technical and regulatory guidance for in situ chemical oxidation of contaminated soil and groundwater – Second Edition. Technical/Regulatory Guideline. The Interstate Technology & Regulatory Council, In situ chemical oxidation team. <http://www.itrcweb.org/Documents/ISCO-2.pdf>
- Jankowitz, K., Jacobs, P. (2006): Möglichkeiten und Perspektiven bei der Anwendung von In-Situ-Verfahren in Deutschland, Belgien und den Niederlanden - Fallbeispiele In-Situ chemische Oxidation und Mikrobiologischer Abbau. Altlastensymposium 2006, 27. und 28. September Berlin

- Jawitz, J. W., Sillan, R. K., Annable, M. D., Rao, P. S. C., Warner, K. (2000): In-Situ Alcohol Flushing of a DNAPL Source Zone at a Dry Cleaner Site. *Environmental Science & Technology*, 34(17), pp.: 3722 – 3729.
- Kakarla, P.K., Andrews, T., Greenberg, R.S., Zervas, D.S. (2002): Modified Fenton's Processes for In-situ Chemical Oxidation-Laboratory and Field Evaluation. *Remediation Autumn 2002*, 23-36.
- Kanel, S. R., Manning, B., Charlet L., Choi, H. (2005): Removal of Arsenic(III) from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron. *Environmental Science and Technology*, 39, 1291-1298
- Kanel, S.R., Greneche, J.M., Choi, H. (2006): Arsenic(V) removal from groundwater using nano scale zero-valent iron as a colloidal reactive barrier material, *Environmental Science Technology*, 40 (6), 2045-2050
- Karg, F. (2006): Felderfahrungen zur Anwendung von DNBA zur Prozessoptimierung: Standort Rütgers Chemicals AG Hanau. In: Symposium „In-situ-Sanierung“ 20./21.11.2006, DECHEMA e.V., Fankfurt, Frankfurt am Main
- Karg F., Hintzen U., Portune T., Domalski, R. (2007): Feldtesterfahrungen zur Anwendung der DNBA zur Prozessoptimierung: Standort Rütgers Chemicals AG Hanau. In: *altlasten spektrum 2/2007*, S. 61-67
- Kaschl, A., Heidrich, S., Weiß, H. (2002): EU-Projekt WELCOME: Prävention und Sanierung der Grundwasserkontamination an großflächigen Standorten. In: *altlasten spektrum 3/2002*, 111-119
- Kaschl, A., Heidrich, S., Weiß, H. (2004): Biodegradation reactions in a multiple contaminated aquifer - Bitterfeld case study. 7th International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium, Orlando/USA, 2.-5.6.2003, In *Situ and On-Site Bioremediation - 2003*, Batelle Press, Columbus, S. Paper H-15
- Kaschl, A., Kopinke, F.-D., Schirmer, M., Weiß, H. (2005): In situ treatment of large-scale sites contaminated by chlorinated compounds. In: Lens, P., Grotenhuis, T., Malina, G., Tabak, H. (Hrsg.): *Soil and sediment remediation. Mechanisms, technologies and applications. Integrated environmental technology series IWA Publishing, London*, S. 176-199
- Kaschl, A., Schirmer, M., Weiß, H. (2002): Prävention und Sanierung der Grundwasserverschmutzung an großflächig kontaminierten Standorten (WELCOME-Projekt). In: Laßl, M., Scholz, S. (Hrsg.): *Flächenrecycling Grundwassermanagement Umweltrecht, Berichte vom 18. Bochumer Altlasten-Seminar und 13. Leipziger Altlasten-Seminar 2002*, Schürmann + Klagges, Bochum, S. 351-370
- Kaschl, A., Schultz, A., Vogt, C., Dorusch, F., Popp, P., Borsdorf, H., Küster, E., Kusch, P., Kästner, M., Weiß, H. (2005): A meso-scale constructed wetland for the remediation of chlorobenzene contaminated groundwater. In: Thomson, N. R. (Hrsg.): *Bringing groundwater quality research to the watershed scale (International conference of groundwater quality: bringing groundwater quality research to the watershed scale Waterloo, Canada, 19.-22. July 2004)*, IAHS publication 297, International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, S. 404-411
- Kaschl, A., Vogt, C., Uhlig, S., Nijenhuis, I., Weiß, H., Kästner, M., Richnow, H.-H. (2005): Isotopic fractionation indicates anaerobic monochlorobenzene biodegradation. In: *Environ.Toxicol.Chem.* 24 (6), 1315-1324, <http://dx.doi.org/10.1897/04-321R.1>
- Kastner, J. R., Santo Domingo, J., Denham, M., Molina, M., Brigmon, R. (2000): Effect of chemical oxidation of subsurface microbiology and trichloroethene (TCE) biodegradation. *Bioremediation Journal*, 4, pp.: 219-236.
- Keijzer, T., Sumann, M., van Zutphen, M. (2004): Implementation of in-situ-remediation techniques: Encountered conditions and problems during ISCO projects. In: Barczewski, Koschitzky, Weber, Wege, R. (Hrsg.): *VEGAS-Statuskolloquium 2004, Mitteilungen Heft 131*, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, ISBN 3-933761-34-4, S. 71-78
- Kissalt, J., Baranowski, M. (2005): Ehemalige Südkaserne in Nürnberg. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Ref. Altlasten, schädliche Bodenveränderungen

- Knöller, K., Vogt, C., Feisthauer, S., Weise, S. M., Weiß, H., Richnow, H.-H. (2008): Sulfur cycling and biodegradation in contaminated aquifers: insights from stable isotope investigations. In: *Environ.Sci.Technol.* 42 (21), 7807-7812; <http://dx.doi.org/10.1021/es800331p>
- Knöller, K., Weise, S. M., Vieth, A., Gödeke, S., Weiß, H., Schirmer, M. (2003): Isotopic evidence for biodegradation in a sulfate-rich BTEX-contaminated aquifer. In: Fourth South American Symposium on Isotope Geology, Salvador/Brazil, 24.-27.8.2003, Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, Salvador, S. 438-440
- Köber, R., Kopinke, F.D. (2007): Sanieren mit Nanoeisen. Nullwertiges Eisen in Form kolloidaler Partikel zur Quellen- und Fahnenanierung im Grundwasser. *wlb Wasser, Luft und Boden*, 51(6): TT17-TT20.
- Köhler, R., Kopinke, F.-D., Mackenzie, K., Weiß, H., Schüth, C., Grathwohl, P. (2003): Dekontamination von mit halogenierten Kohlenwasserstoffen (HKW) kontaminierten Grund- und Abwässern durch Vakuumstrippung und Hydrohalogenierung der HKW in der Gasphase. 9. Dresdner Grundwasserforschungstage, Dresden, 6.10.2003, Proceedings des DGFZ e.V. 24, DGFZ, Dresden, S. 159-174
- Kohler, W. (1999): Modellhafte Bearbeitung von Altlasten - Innovative Sanierungsverfahren im praktischen Einsatz. In: Jahresbericht 1998/99, LfU Baden-Württemberg, Stuttgart 1999
- Kopinke, F.-D., Köhler, R., Mackenzie, K., Weiß, H., Schüth, C. (2000): In situ-Dechlorierung von CKW im Grundwasser. In: *Wasserwirtschaft Wassertechnik Abwassertechnik (AWT)* 7, 58-63
- Kopinke, F.-D., Mackenzie, K., Köhler, R. (1997): Arbeiten zur elektrochemischen Dechlorierung von Chlorbenzen im Grundwasser. In: Weiß, H., Teutsch, G., Daus, B. (Hrsg.): Sanierungsforschung in regional kontaminierten Aquiferen (SAFIRA): Bericht zur Machbarkeitsstudie für den Modellstandort Bitterfeld, UFZ-Bericht 27/1997, UFZ Leipzig-Halle GmbH, Leipzig, S. 141-150
- Kopinke, F.-D., Mackenzie, K., Roland, U., Köhler, R., Weiß, H., Fritsch, D. (1999): Verfahren zur Behandlung von mit organischen Halogenverbindungen kontaminiertem Wasser. Deutsches Patent 199 52 732.6-41, Deutsches Patentamt, München
- Kopinke, F.-D., Mackenzie, K., Köhler, R., Georgi, A., Weiß, H., Roland, U. (2003): Konzepte zur Grundwasserreinigung, *Chemie Ingenieur Technik*, Ausgabe 4/2003, Nr. 75, S. 329-339
- Kopinke, F.-D., Mackenzie, K., Köhler, R., Weiß, H., Grathwohl, P., Schüth, C. (2007): Method and device for decontaminating waters which are loaded with organic halogen compounds (halogenated hydrocarbons). US-Patent US 7,252,771, United States Patent and Trade Office, Washington, D.C.
- KORA (2006): Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden, Workshop Themenverbund 2, BEW Duisburg 12.06.2006, http://www.natural-attenuation.de/media/document/15_4725tagungsbandtv2.pdf
- Koschitzky, H.-P., Trötschler, O.: (2008): Thermische In-situ-Sanierungsverfahren: Einsatzbereich, Dimensionierung und erfolgreiche Anwendung. In: Franzius, V., Altenbockum, M. & Gerhold, T. (eds.): *Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement*. 55. Aktual., 3. Aufl., C.F. Müller Verlag, 5/2008, 5716 ff. ISBN: 978-3-8114-9700-9
- Koschitzky, H.-P., Hiester, U. (2005): Thermische In-situ-Sanierungen: Ökologische und ökonomische Vorteile der Verfahren TUBA und THERIS. In: *Tagungsband Altlastensymposium 2005*, 06. - 07. Juni 2005, Weiden i.d.OPf., GAB, Gesellschaft zur Altlastensanierung in Bayern mbH, München, 6/2005. - Seiten: 108-113
- Koschitzky, H.-P., Trötschler, O.; Limburg, B., Hirsch, M., Weiß, H. (2007): Pilotanwendung DLI Zeit: Erste Ergebnisse der thermischen Sanierung des Kernbereichs eines Benzolschadens mittels Dampf-Luft-Injektion. In: Braun, J.; Koschitzky, H.-P., Stuhmann, M. (Hrsg.): *VEGAS-Kolloquium 2007*, Mitteilungen Heft 165, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 9/2007, S. 52 – 62. ISBN: 3-933761-69-7

- Küster, E., Dorusch, F., Weiß, H., Altenburger, R. (2001): TRE-Toxicity-Reduction-Evaluation - Approaches for continuous effect monitoring of in situ groundwater remediation techniques. 11th Annual Meeting of the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) Europe, Madrid, Spain, 6.-10.5.2001, SETAC, Europe, Brussels, Belgium
- Küster, E., Dorusch, F., Weiß, H., Altenburger, R. (2003): Controlling (groundwater-) remediation success via on line biomonitoring or how toxic is remediated groundwater?. In: ConSoil - Eighth International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil, Gent/Belgium, 12.-16.5.2003, F&U confirm, Leipzig, S. 3305-3314
- Küster, E., Dorusch, F., Weiß, H., Schüürmann, G., Altenburger, R. (2003): Beurteilung der Entgiftung von Grundwasser durch Sanierungsverfahren mittels kontinuierlicher biologischer Überwachung. Risk assessment and management of large contamination sites, Halle, 22.-24.2.2002, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle, S. 41-45
- Lagrega, M. D., Buckingham, P. L., Evans, J. C. (1994): Hazardous Waste Management. McGraw-Hill Inc., New York, USA
- Leeson, A., Johnson, P.C., Johnson, R.L., Vogel, C.M., Hinchee, R.E., Marley, M., Peagrin, T., Bruce, C.L., Amerson, I.L., Coonfare, C.T., Gillespie, R.D., McWhorter, D.B.(2002): Air Sparging Design Paradigm. Battelle, Columbus, Ohio
- LFU BW – Landesanstalt für umweltschutz Baden-Württemberg (1993): Der Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB). Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Karlsruhe
- LFU BW – Landesanstalt für umweltschutz Baden-Württemberg (2001): PAK-Sanierung mittels tensidunterstützter Extraktion – Feldversuch im Rahmen des Modellvorhabens "GASWERK / TEERÖLPRODUKTEFABRIK KEHL". In: Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Bd. 35; Mannheim (2001)
- Li, X. D., Schwartz, F. W. (2000): Efficiency problems related to permanganate oxidation schemes. In: Proceedings of the Second International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, vol. C2-6, S. 41-48. Battelle Press
- Li, X. D., Schwartz, F. W. (2004a): DNAPL remediation with in situ chemical oxidation using potassium permanganate part I. Mineralogy of Mn oxide and its dissolution in organic acids, Journal of Contaminant Hydrology, 68, 39 – 53.
- Li, X. D., Schwartz, F. W. (2004b): DNAPL remediation with in situ chemical oxidation using potassium permanganate part II. Increasing removal efficiency by dissolving Mn oxide precipitates. Journal of Contaminant Hydrology, 68, 458 – 469.
- Li, X. D., Elliott, D. W., Zhang, W.-X. (2006): Zero-Valent Iron Nanoparticles for Abatement of Environmental Pollutants: Materials and Engineering Aspects. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences* **31**, 111–122.
- Lien, H.-L., Zhang, W.-X. (1999): Transformation of chlorinated methanes by nano-scale iron particles, Journal of Environmental Engineering, November 1999, S. 1042-1047
- Lien, H.L., Wilkin, R.T. (2005): High-level arsenite removal from groundwater by zerovalent iron. *Chemosphere*, 59, 377 - 386
- Lin, S. S., Gurol, M. (1996): Heterogeneous catalytic oxidation of organic compounds by hydrogen peroxide. *Water Science and Technology*, 34, 57-64.
- Liu, Y., Majetich, S.A., Tilton, R.D., Sholl, D.S., Lowry, G.V. (2005): TCE dechlorination rates, pathways, and efficiency of nanoscale iron particles with different properties. *Environmental Science and Technology*, 39, 1338-1345
- Lorenz, D., Gass, M., Stupp, D. (2008): Auswertung internationaler Fachliteratur zu In-situ-Anwendungen in der gesättigten Bodenzone bei der Altlastenbearbeitung, Projekt im Rahmen des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser, Boden und Abfall“ 2007, LFP-Projekt-Nr.: 1.07; (www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb_prod/WaBoAb/Vorhaben/LABO/B_1.07/LFP_1_07_Literaturstudie.pdf)

- Lowe, J.: Molasses-Based Microbial Precipitation Used Successfully for Chromium Reduction. EPA/Region3. <http://www.clu-in.org/products/newsletters/tandt/view.cfm?issue=0703.cfm#3>
- LUA NRW – Landesumweltamt Nordrhein Westfalen (2005): Leistungsbuch Altlastensanierung und Flächenentwicklung 2004/2005. Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, Band 20. LUA NRW, Essen
- LUA NRW – Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2000): Anforderungen an eine Sanierungsuntersuchung unter Berücksichtigung von Nutzen-Kosten-Aspekten. Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz, Band 11. LUA NRW, Essen
- LUA NRW – Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2001): Arbeitshilfe Bodenluftsanierung – Ergebnisse einer Recherche zum Stand der Bodenluftsanierungspraxis mit Handlungsempfehlungen für die Planung und Durchführung von Bodenluftsanierungsmaßnahmen. Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz (MALBO), Bd. 13. LUA NRW, Essen.
- Ludwig, R. D., Su, Ch., Lee, T. R., Wilkin, R. T., Acree, S. D., Ross, R. R., Keeley, A. (2007): In Situ Chemical Reduction of Cr(VI) in Groundwater Using a Combination of Ferrous Sulfate and Sodium Dithionite: A Field Investigation. In: Environ. Sci. Technol., 2007, 41 (15), pp 5299–5305
- Lutes, C., Amato, V. D., Liles, D., Hansen, M., Burdick, J., Suthersan, S., Hansen, J. (2002): Advances in understanding and predicting enhanced anaerobic CAH bioremediation. Proceedings of the Third International Conference of Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey May 2002, Battelle Press
- Macé, C. et al. (2006): Nanotechnology and Groundwater Remediation: A Step Forward in Technology Understanding. Remediation, 16(2): 23-33.
- Mace, C., Desrocher, S., Gheorgiu, F., Kane, A., Pupeza, M., Cernik, M., Kvapil, P., Venkatakrishnar, R., Zhang, W. (2006): Nanotechnology and Groundwater Remediation: A Step Forward in Technology Understanding. Remediation 16(2), 23 - 33, Wiley Periodicals.
- Mackenzie, K., Köhler, R., Weiß, H., Kopinke, F.-D. (2000): Dechlorination of chlorohydrocarbons in groundwater using novel membrane-supported catalysts. In: Wickramanayke, G. B., Gavaskar, A. R. (Hrsg.): Chemical Oxidation and Reactive Barriers: Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compound, Battelle Press, Columbus (Richland), S. 331-338
- Mathes, T. (2005): Erfahrungen von Anwendern mit innovativen Verfahren. Fachtagung Grundwasser-sanierung in der Praxis 9.11.2005 Altlastensanierungs- und Altlastenaufbereitungsverband NRW.
- McGuire, T.M., McDade, J.M., Newell, C.J. (2006): Performance of DNAPL Source Depletion Technologies at 59 Chlorinated Solvent Impacted Sites. Ground Water Monitoring & Remediation 26: 73-84.
- Memminger, B. (2006): Aufbereitung von Spülwässern bei der hydraulischen In-situ-Sanierung, Diss. Fakultät 2, Universität Stuttgart, 12 / 2006
- Michels, J., Track, Th., Gehrke, U., Sell, D. (2001): Leitfaden "Biologische Verfahren zur Bodensanierung". Umweltbundesamt (Hrsg.) im Auftrag des BMBF, Berlin, 2001, BMBF-Förderkennzeichen 1491064
- Michels, J., Stuhmann, M., Frey, C., Koschitzky, H.-P. (2008): Handlungsempfehlungen mit Methodensammlungen. Natürliche Schadstoffminderung bei der Sanierung von Altlasten. DECHEMA e.V. (Hrsg.), Frankfurt, ISBN 978-3-89746-092-0 (<http://www.natural-attenuation.de>)
- Mohrlok, U., Greiner, Ph., Heinrich, K., Trötschler, O., Schnieders, J., Jirka, G.H., Koschitzky, H.-P., Braun, J. (2005): Entwicklung einer weitergehenden Grundwassersanierungstechnologie zur Abreinigung von anthropogenen chlorierten Kohlenwasserstoffen hoher Dichte (CKW) durch Alkoholinjektion. Abschlussbericht des gleichlautenden BMBF-Projekts, Institut für Hydromechanik, Karlsruhe, Institut für Wasserbau Stuttgart.
- Moreti, L. (2005): In Situ Bioremediation of DNAPL Source Zones. U.S. Environmental Protection Agency www.epa.gov

- Mravik, S. C., Sillan, R. K., Wood, A.L., Sewell, G. W. (2003): Field evaluation of the solvent extraction residual biotreatment technology. *Environmental Science & Technology*, 37, pp.: 5040.
- Mueller, N. C.; Nowack, B. (2010): Nano zero valent iron – THE solution for water and soil remediation? Report of the ObservatoryNANO. www.observatorynano.eu.
- Müller, C., Löbel, E., Rissing, P. (2006a): Sanierung mit Nano-Eisen – Stand der Technik. In: *altlasten spektrum*, 02/2006, Erich Schmidt Verlag & Co., Berlin, S. 75 – 83.
- Müller, C., Rissing, P., Widmayer, F., Wischott, M. (2006b): Nano-Eisen Feldversuch: Strategie, Durchführung, Ergebnisse und Auswertung. *altlasten spektrum*, 3, 137-147
- Müller, K., Laudel, G., Harpke, G., Weiß, H., Dorausch, C., Dahmke, A., Nitsche, C., Menschner, K., Großmann, J. (2008): Schadenskomplex "ehemalige Benzolfabrik" im ÖGP Hydrierwerk Zeitz (HYZET). 10. DECHEMA-Symposium Natural Attenuation, 24./25.11.2008, Frankfurt, Tagungsunterlagen
- Müller, K., Weiß, H., Dietrich, P., Brummer, N., Harpke, B., Dahmke, A., Ebert, M., Dorausch, C., Großmann, J., Laudel, G., Menschner, K., Nitsche, C. (2008): Evaluation of air sparging using in-situ measurements and direct-push monitoring techniques. ConSoil 2008, Milano, 3.-6.6.2008, Leipzig, CD-ROM, S. C-246-C-252
- Müller, K., Weiß, H., Laudel, G., Großmann, J. (2008): Schadenskomplex Benzolfabrik - Air Sparging Pilotversuch. DECHEMA Symposium "Strategien zur Boden- und Grundwassersanierung", Frankfurt/Main, 24.-25.11.2008, DECHEMA, S. 19-20
- Müller, T. (2000): Abbau von Schadstoffen in Böden mit Ozon. Dissertation Universität hannover, Hannover
- Mysona, E. S., Hughes, W. D. (1999): Remediation of BTEX in groundwater with LNAPL using Oxygen release Materials (ORM). In: B. C. Alleman & A. Leeson (Eds.): Proceedings from the Fifth International In Situ and On Site Bioremediation Symposium. Vol. 3: In Situ Bioremediation of Petroleum Hydrocarbon and Other Organic Compounds, pp. 283-288. Battelle Press, Columbus, Ohio, USA
- National Research Council – NRC (2004): Contaminants in the Subsurface: Source Zone Assessment and remediation. National Academic Press, Washington, D.C.
- National Research Council (NRC), Committee on Ground Water Cleanup Alternatives: Alternative s for Ground Water Cleanup. National Academic Press, Washington, D.C.
- Naumann, J., Rauch, F. (2006): Einsatz innovativer Verfahren zur Sanierung von Grundwasserschäden in Deutschland – Ergebnisse einer Umfrage des Arbeitskreises der Altlastensanierungsgesellschaften der Länder (AKASG)
- NAVAL FACILITIES ENGINEERING SERVICE CENTER (NFESC) & PARSONS ENGINEERING SCIENCE, INC (2002): Evaluation of Performance and Costs Associated with Anaerobic Dechlorination Techniques. Prepared for the Environmental Security Technology Certification Program, Arlington, Texas
- NAVFAC (2003): Surfactant-Enhanced Aquifer Remediation (SEAR) Implementation Manual. Technical Report TR-2219-ENV
- Nelson, M. D., Parker, B. L., Cherry, J. A. (2000): Passive destruction of PCE DNAPL by potassium permanganate in a sandy aquifer. S. 135-143 in Proceedings of the Second International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds. vol. C2-6, Battelle Press
- Nimmer, M., Wayner, B., Morr, A. (2000): In Situ Ozonation of Contaminated Groundwater. *Environmental Progress*, 19(3): 183-196.
- Nitsche, C., Müller, K., Laudel, G., Poetke, D., Großmann, J. (2008): Laborative Untersuchungen zur Plausibilitätsprüfung von In-Situ-Sanierungsergebnissen am Beispiel des Air-Sparging-Pilotversuches im Bereich der ehemaligen Benzolfabrik im ÖGP Hydrierwerk Zeitz. 10. DECHEMA-Symposium Natural Attenuation, 24./25.11.2008, Frankfurt, Tagungsunterlagen

- Niu, S., Liu, Y., Xu, X., Lou, Z. (2005): Removal of hexavalent chromium from aqueous solution by iron nanoparticles
- Nowack, B. (2008): Pollution Prevention and Treatment Using Nanotechnology. In: *Nanotechnology*, Vol. 2 (ed. H. Krug). WILEY-VCS Verlag GmbH&Co.
- Nurmi, J.T., Tratnyek, P.G., Srathy, V., Baer, D.R., Amonette, J.E., Pecher, K., Wang, C., Linehan, J.C., Matson, D.W., Penn, R.L., Driessen, M.D. (2005): Characterization and properties of metallic iron nanoparticles: spectroscopy, electrochemistry, and kinetics. *Environmental Science and Technology*, 39, 1221-1230
- Ondruschka, B., Meinhardt, W., Meinhardt, C., Flachowsky, J., Weiß, H. (1999): Verfahren und Vorrichtung zur chemischen in situ-Reinigung von Grundwasserleitern. Deutsches Patent 197 49 764.2-41, Deutsches Patentamt, München
- Oppermann, A. (2003): Remediation of CHC by Reductive Dechlorination in Germany: A Full-Scale Approach. Platform Presentation '559 at the Seventh International Conference of In Situ and On-Site Bioremediation, Orlando Florida, June 2-5, 2003
- Parbs, A., Birke, V. (2005a): State-of-the-art report and inventory on already demonstrated innovative remediation technologies. European Co-ordination Action for Demonstration of Efficient Soil and Groundwater Remediation, EuroDemo, Sixth Framework Program (2002 - 2006)
- Parbs, A., Birke, V. (2005b): Status Report on technological reliability for demonstrated soil and groundwater management technologies with special focus on the situation in Europe. part 2, European Co-ordination Action for Demonstration of Efficient Soil and Groundwater Remediation, Sixth Framework Program (2002 - 2006)
- Park, K., Cowen, R.M. (1997): Effects of oxygen and temperature on the biodegradation of MTBE. *American Chemical Society*, 37(1), 421-423
- PARS Environmental (2009): An innovative remediation technology for soils and groundwater. <http://www.parsenviro.com/nanofeaw-1.html>.
- Patent DE 19707096C1: Verfahren zur thermisch-unterstützten in-situ Reinigung von Böden in der ungesättigten Zone ohne Verfrachtung flüssigen Schadstoffs in tiefer gelegene Bodenbereiche
- Payne, F. C., Quinnan, J. A., Potter, S. T. (2008): Remediation hydraulics. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA
- Peabody (2004): Oxygen release compound (ORC®) BTEX, TPH and MTBE Remediation at a Former Service Station. Regenesys, San Clemente, CA
- Phenrat, T., Saleh, N., Sirk, K., Tilton, R.D., Lowry, G.V. (2007): Aggregation and Sedimentation of Aqueous Nanoscale Zerovalent Iron Dispersions. *Environmental Science & Technology*, 41(1): 284-290.
- Ponder, S. M., Darab, J. G., Mallouk, T. E. (2000): Remediation of Cr(VI) and Pb(II) aqueous solutions using supported, nanoscale zero-valent iron. *Environmental Science and Technology*, 34, 2564-2569
- Ponder S., Darab J. G., Bucher J., Caulder D., Craig I., Davis L., Edelstein N., W. Lukens, Nitsche H., Rao L., et al. (2001): Surface chemistry and electrochemistry of supported zerovalent iron nanoparticles in the remediation of aqueous metal contaminants. In: *Chem. Mater.* **13**, 479-486.
- Prokop, G., Schamann, M., Edelgaard, I. (2000): Management of contaminated sites in Western Europe. Topic report No 13/1999. European Environment Agency
- Quinn, J., Geiger, C., Clausen, C., Major, D. (2005): Field demonstration of DNAPL dehalogenation using emulsified zero-valent iron. *Environ. Sci. Technol.* **39**, 1309-1318.
- Ramsburg, C.A., Abriola, L.M., Pennell, K.D., Löffler, F.E., Gamache, M., Amos, B.K., Petrovskis, E.A. (2004): Stimulated Microbial Reductive Dechlorination following Surfactant Treatment at the Bachmann Road Site. *Environmental Science & Technology*, vol. 38, no. 22

- Rao, P.S.C., Annable, M.D., Sillan, R.K., Dai, D., Hatfield, K., Graham, W.D., Wood, A.L., Enfield, C.G. (1997): Field- scale evaluation of in situ cosolvent flushing for enhanced aquifer remediation, *Water Resources Research*, 33(12), pp.: 2673 – 2686.
- Rein, A., Bittens, M. (2008): Multimedia environmental modelling for a risk-based implementation of biological in situ methods. In: *ConSoil 2008*, Milano, 3.-6.6.2008, Leipzig, CD-ROM, S. 66-74
- Richardson, R.E., James, C.A., Bhupathira, V.K., Alvarez-Cohen, L. (2002): Microbial activity in soils following steam treatment. *Bioremediation Journal*, 13, pp.: 285 – 295.
- Richters, L., Bantz, I., Schellartz, G., Eckert, P., Wisotzky F. (2006): Stimulierung natürlicher Selbstreinigungsprozesse (ENA) nachfolgend zu aktiven Sanierungsmaßnahmen - Anwendbarkeit aus Sicht der Behörden und Sanierungspflichtigen. In: *altlasten spektrum*, 15. Jg., 04/2006
- Rickerby, D., Morrison, M. (2007): Report from the Workshop on Nanotechnologies for Environmental Remediation. <http://www.nanowerk.com/nanotechnology/reports/reportpdf/report101.pdf>
- Rissing, P. (2007): Grundwassersanierung mittels Nano-Technologie – ein innovatives Sanierungsprojekt des AAV in NRW. Fachtagung Boden und Grundwasser, Altlastensanierungs- und Altlastenaufbereitungsverband NRW, Hattingen
- Roth, U., von Mücke, T., Konertz, K., Adolphi, P. (2007): STL-Pilotversuch zur Dekontamination von CKW-Phasenverunreinigungen in der gesättigten Bodenzone. In: *altlasten spektrum*, 16. Jg., 06/2007, S. 257 – 263
- Rowland, M. A., Brubaker, G. R., Kohler, K., Westray, M., Morris, D. (2001): "Effects of Potassium Permanganate Oxidation on Subsurface Microbial Activity," presented at *In Situ and On-Site Bioremediation: The 6th International Symposium*
- Rückert, M., Weiß, H. (2004): Abbauprodukte der in situ-Sanierungsverfahren. In: Weiß, H., Teutsch, G., Daus, B. (Hrsg.): *SAFIRA (Sanierungsforschung in regional kontaminierten Aquiferen)*, UFZ-Bericht 13/2004, UFZ Leipzig-Halle GmbH, Leipzig, S. 170-198
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (1989): *Sondergutachten Altlasten*. Dezember 1989, Stuttgart: Metzler-Poeschel, 1990, 304 S., ISBN 3-8246-0059-5., (Bundestags-Drucksache 11/6191)
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (1995): *Sondergutachten Altlasten II*. Februar 1995, Stuttgart: Metzler-Poeschel, 1995, 285 S. ISBN 3-8246-0367-5. (Bundestags-Drucksache 13/380)
- Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.) (2000): *Mikrobiologische Sanierungsverfahren. Materialien zur Altlastenbehandlung Nr. 1/2000*, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden
- Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Referat Grundwasser und Altlasten (Hrsg.) (2007): *In-situ-Sanierungsverfahren. Materialien zur Altlastenbehandlung*, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Referat Grundwasser und Altlasten (Hrsg.) (2007): *Entscheidungshilfe zur Grundwassersanierung: Effizienz von Pump and Treat-Sanierungen*. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- Samanta, S. K., Singh, O. V., Jain, R. K. (2002): Polycyclic aromatic hydrocarbons: environmental pollution and bioremediation: *Trends in Biotechnology*, 20, 243-248.
- Schima, S., Labrecque, D. J., Lundegard, P.D. (1996): Monitoring air sparging using resistivity tomography: *Ground Water Monitoring and Remediation*, 16, 131-138.
- Schmidt, R. (2001): Wasserdampf- und Heißluftinjektion zur thermischen Sanierung kontaminierter Standorte. *Mitteilungen Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart Heft 106*, ISBN 3-921694-09-3
- Schmidt, R., Betz, C., Färber, A. (1998): LNAPL and DNAPL behaviour during steam injection into the unsaturated zone. In *Groundwater Quality: Remediation and Protection (Proc. Of the GQ'98 Conference, Tübingen)*, IAHS Publ. no. 250, 1998, 111-117.
- Schmidt, R.; Färber, A.; Betz, Chr.; Koschitzky, H.-P. (2000): Dampfinjektion zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Zone, *Handbuch der Altlastensanierung*, 2. Aufl., Dez. 2000, Nr. 5715

- Schmidt, T., Schirmer, M., Weiß, H., Haderlein, S. B. (2004): Microbial degradation of methyl tert-butyl ether and tert-butyl alcohol in the subsurface. In: *J. Contam. Hydrol.* 70 (3-4), 173-203, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconhyd.2003.09.001>
- Schrick, B., Blough J., Jones A., Mallouk, T. E. (2002): Hydrodechlorination of trichloroethylene to hydrocarbons using bimetallic nickel-iron nanoparticles. *Chem. Mater.* 14, 5140–5147.
- Schrick, B., Hydutsky, B.W., Blough, J.L., Mallouk, T.E. (2004): Delivery Vehicles for Zerovalent Metal Nanoparticles in Soil and Groundwater. *Chemistry of Materials*, 16, 2187-2193
- Schroers, S., Odensaß, M. (2007): In-situ Verfahren für die gesättigte Zone: Einsatzmöglichkeiten und erste Beispiele aus Nordrhein-Westfalen, In: *altlasten spektrum* 1/2007
- Schulz, P. (2005): Verfahren zur Sanierung CKW – belasteter Böden und Grundwasser – Einsatz oberflächenaktiver, mikrobiologisch wirksamer Substanzen. Fachtagung Grundwassersanierung in der Praxis, Altlastensanierungs- und Altlastenaufbereitungs-verband NRW, Hattingen
- Schwartz, O. R., Berndt, J. A., Mundell, J. A. (2005): The Use of Ozone Sparging to Remove MTBE from Groundwater in a Uniform Sand Aquifer - A Case Study. Proceedings of the 2005 National Groundwater Association Conference on MTBE and Perchlorate Assessment, Remediation and Public Policy, San Francisco, CA, 169
- Seol, L. Y., Zhang, H., Schwartz, F. W. (2003): A Review on In Situ Chemical Oxidation and Heterogeneity.
- Smith, J. A., Burnes, S. E. (2001): High-Vacuum Soil Vapour Extraction in a Silty-Clay Vadose Zone. In: *Physicochemical groundwater remediation*, Kluwer Academic/Plenum Publishers USA, ISBN 0-306-46569-8
- Song, H., Carraway, E.R. (2005): Reduction of chlorinated ethanes by nanosized zerovalent iron; kinetics, pathways, and effects of reaction conditions. *Environmental Science and Technology*, 39, 6237-6245
- Springer-Greve, Th. (2010): Seckbachs Boden und Grundwasser werden sauberer oder Schwerer Boden – Gifte belasten Seckbacher Grundstücke Ergebnisse eines Feldversuchs zur Sanierung durch In-Situ-Chemische-Oxidation, Vortrag beim HLUg-Seminar Altlasten und Schadensfälle 2010, <http://www.hlug.de/medien/altlasten/archiv.htm>
- Stefan, R. J., McClay, K., Vainberg, S., Condee, C. W., Zhang, D. (1997): Biodegradation of the gasoline oxygenates methyl tert-butyl ether, ethyl tert-butyl ether, and tert-amyl methyl ether by propane oxidizing bacteria. *Applied Environmental Microbiology*, 63(11), 4216- 4222.
- STEGER, H., ZORN, R., HAUS, R. & CZURDA, K. (2001): Removal of tetrachloroethylene from fine-grained soils by electrokinetic processes. - In: CZURDA, K., HAUS, R., KAPPELER, C. & ZORN, R. (Hrsg.): Proc. EREM 2001 3. Symposium on Electrokinetic Remediation, April 18 - 20, 2001, Karlsruhe. *Schr. Angew. Geol. Karlsruhe*, 63: 25/1-25/14; Karlsruhe.
- Steger, H. (2006): Elektrokinetische In-situ-Sanierung LCKW-kontaminierter gering durchlässiger Lockergesteine.- Dissertation Universität Karlsruhe, 196 S., Karlsruhe.
- Stenert, V., Maraun, S. (2009): Einsatz des Oxytec-Verfahrens in der Altlastensanierung am Beispiel eines BTEX-Schadens. In: *altlasten spektrum* 1/2009, S. 32-33
- Stupp, H. D. (2001): DNAPL in Boden und Grundwasser – Verhalten von LCKW und PAK-Ölen, *Handbuch der Altlastensanierung*, Franzius – Wolf – Brandt, 27. Erg.-Lfg., 12/2001; <http://www.dscweb.de/Publikationen/DNAPL%20in%20Boden/paper8.html>
- Stupp, H. D., Bakenhus, A., Gass, M., Hüttmann, S., Engelmann, F. I. (2007): Biologische Verfahren zur Sanierung von CKW-Grundwasserschäden – Systematik und Beschreibung der In-Situ Techniken. In: *altlasten spektrum*, Heft 3, Erich Schmidt Verlag & Co., Berlin, S. 101-110.
- Stupp, H. D.; Bakenhus, A.; Stauffer, Lorenz, D. (2005): Sanierungsoptimierung von CKW-Grundwasserschäden – Möglichkeiten zur Reduzierung der Sanierungskosten. In: *altlasten spektrum*, 14. Jg., 06/2005, S. 313-322.
- Suthersan, S. S. (1997): *Remediation engineering: Design concepts*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, ISBN 1-56670-653-X

- Su, C., Puls, R.W. (2001): Arsenate and arsenic removal by zerovalent iron: kinetics, redox transformation, and implications for in situ groundwater remediation. *Environmental Science and Technology*, 35, 1487-1492
- Suttka, R., Hintzen, U., Buhl, J. (2005): Projektbeispiel: Feldversuch zum Abbau von Kohlenwasserstoffen auf einem Tanklagergelände in Hamm. In: Tagungshandbuch 7. Symposium Natural Attenuation, 21. – 22.11.2005, DECHEMA e.V., Frankfurt, Frankfurt.
- Teutsch, G., Weiß, H., Großmann, J., Dahmke, A. (2007): Möglichkeiten und Grenzen der Quellensanierung, aktuelle Defizite der Bewertung. Trans-IT Workshop, 26.09.2007, Berlin, Tagungsunterlagen.
- Teutsch, G., Weiß, H., Schirmer, M. (2001): Verfahren und Vorrichtung zur Sanierung von kontaminiertem Grundwasser. Patent-Anmeldung WO 01/24952 A1, Weltorganisation für geistiges Eigentum
- Thelen, H.-P. (2007): Die in situ-Oxidation (ISCO) von chlorierten Kohlenwasserstoffen im Grundwasser – Praxiserfahrungen aus NRW. In: Tagungsband AAV-Fachtagung „Boden und Grundwasser“, AAV Altlastensanierungs- und Altlastenaufbereitungsverband NRW, Hattingen
- Thelen, H. P., Pfülb, M. (2006): In-Situ chemische Oxidation eines LCKW Grundwasserschadens, AAV Projekt "Große Holtforth". Tagungshandbuch Symposium In-Situ-Sanierung, DECHEMA e.V., Frankfurt
- Theron, J., Walker, J. A., Cloete, T. E. (2008): Nanotechnology and Water Treatment: Applications and Emerging Opportunities. *Critical Reviews in Microbiology* 34(1), 43-69.
- Theurer, T., Koschitzky, H.-P. (2001): Modellvorhaben Mühlacker, Modellhafte In-situ-Sanierung durch Dampfinjektion nach dem TUBA-Verfahren. Technischer Bericht Nr. 001/03, HG 280, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Abschlussbericht
- Thomas, J. M., Wilson, J. T., Ward, C. H. (1997): Microbial processes in the subsurface. *Subsurface Restoration*, C.H. Ward, J.A. Cherry, and M.R. Scalf, eds., Ann Arbor Press, Inc., Chelsea, Michigan, USA
- Tokunaga, T. K., Jiamin, W., Firestone, M. K., Hazen, T. C., Olsen, K. R., Herman, D. J., Sutton, S. R., Lanzirotti, A. (2003): Bioremediation and biodegradation: In situ reduction of chromium(VI) in heavily contaminated soils through organic carbon amendment. In: *Journal of environmental quality*, vol. 32 (2003), n°5, pp. 1641-1649. ISSN 0047-2425
- Tratnyek, P. G., Johnson, R. L. (2006): Nanotechnologies for environmental cleanup. *Nanotoday*, 1(2), 44–48.
- Trommler, U. (2007): Einfluss von Huminstoffen auf chemische Reaktionen bei der Reinigung von kontaminierten Wässern. Dissertation, Universität Leipzig, Leipzig
- Trötschler, O., Färber, A., Koschitzky, H.-P. (2003): Wasserdampf-Luftinjektion im Grundwasser zur Extraktion von organischen Schadstoffen. VEGAS Statuskolloquium 2003, Mitteilungen, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart Heft 124, ISBN 3-933761-27-1.
- Trötschler, O., Koschitzky, H.-P., Ochs, S.O., Denzel, S., Stöckl, K. (2006): Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone: Pilotanwendung zur Sanierungsplanung an einem innerstädtischen Standort im Rheintal. In: Braun, J.; Koschitzky, H.-P., Stuhmann, M. (Hrsg.), VEGAS-Statuskolloquium 2006. Mitteilungen Heft 150, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, S. 60-70. ISBN: 3-933761-53-0
- Trötschler, O.; Limburg, B.; Haslwimmer, T., Koschitzky, H.-P., Sagner, A., Tiehm, A. (2007): H₂O₂-Zugabe zur Stimulierung des aeroben biologischen Abbaus von teerölstämmigen Schadstoffen am KORA-Standort „Testfeld Süd“. In: Braun, J.; Koschitzky, H.-P.; Stuhmann, M. (Hrsg.): VEGAS-Kolloquium 2007, Mitteilungen Heft 165, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart: S. 28-40, ISBN 3-933761-69-7
- UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC, 2006): Design: In Situ Thermal Remediation, http://clu.in.org/download/contaminantfocus/dnapl/Treatment_Technologies/USACEIn_Situ_Thermal_Design.pdf

- Universität Lüneburg, Fakultät III (Umwelt und Technik), Campus Suderburg (Hrsg.) (2006): RUBIN-Handbuch „Anwendung von durchströmten Reinigungswänden zur Sanierung von Altlasten“, BMBF-Vorhaben-Nummer 0271241. Lüneburg. [http:// www.rubin-online.de](http://www.rubin-online.de)
- U.S. Army Corps of Engineers (1999): Engineering and Design Multi-Phase Extraction. Manual 1110-1-4010, Washington, D.C.; <http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-1-4010/entire.pdf>
- U.S. EPA (1994): How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites - A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. EPA510-R-04-002, Chapter VII Air Sparging, <http://www.epa.gov/OUST/pubs/tums.htm>
- U.S. EPA (2000): Engineered Approaches to In Situ Bioremediation of Chlorinated Solvents: Fundamentals and Field Applications. United States Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington DC, <http://www.epa.gov/tio/download/remed/engappinsitbio.pdf>
- U.S. EPA (2000): In Situ Treatment of Soil and Groundwater Contaminated with Chromium. Technical Resource Guide
- U.S. EPA. (2001): Cost analysis for selected groundwater cleanup projects: Pump and treat systems and permeable reactive barriers. Report 542-R-00-013. Washington DC
- U.S. EPA (2003): In Situ Conductive Heating at the Confidential Chemical Manufacturing Facility, Portland, In Cost and Performance Report, <http://costperformance.org/profile.cfm?ID=330&CaseID=330>
- U.S. EPA (2003): The DNAPL Remediation Challenge: Is There a Case for Source Depletion? Expert Panel on DNAPL Remediation. EPA 600-R-03-143
- U.S. EPA (2004): How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers, EPA 510/R-04/002. Office of Underground Storage Tanks. http://epa.gov/oust/pubs/tum_ch13.pdf
- U.S. EPA (2004): How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. (EPA 510-B-94-003; EPA 510-B-95-007; and EPA 510-R-04-002). Chapter VIII: Biosparging (http://www.epa.gov/oust/pubs/tum_ch8.pdf).
- U.S. EPA (2005): U.S. EPA Workshop on Nanotechnology for Site Remediation. U.S. Department of Commerce, October 20-21, http://es.epa.gov/ncer/publications/workshop/pdf/10_20_05_nanosummary.pdf; <http://www.frtr.gov/nano/>
- U.S. EPA (2007): Technology Focus: Bioventing and Biosparging (http://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/Bioventing_and_Biosparging/cat/Application/).
- U.S. EPA (2007): Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report (Twelfth Edition), <http://www.clu-in.org/asr/>
- Urynowicz, M. A. (2000): Reaction Kinetics and Mass Transfer during In Situ Oxidation of Dissolved and DNAPL Trichloroethene and Permanganate. Ph.D. Dissertation, Colorado School of Mines
- Varadhi, S. N., Gill, H., Apoldo, J. L., Lioa, K., Blackman, R. A., Wittmann, W. K. (2005): Full-scale nanoiron injection for treatment of groundwater contaminated with chlorinated hydrocarbons. Natural Gas Technologies Conference 2005, conference paper
- Vieth, A., Kästner, M., Schirmer, M., Weiß, H., Gödeke, S., Meckenstock, R. U., Richnow, H.-H. (2005): Monitoring in situ biodegradation of benzene and toluene by stable carbon isotope fractionation. In: Environ.Toxicol.Chem. 24 (1), 51-60
- Virkutyte, J; Sillanpää, M.; Latostenmaa, P. (2002): Electrokinetic soil remediation — critical overview. Sci. Total Environ., 298, S. 97–121
- Vogt, C., Alfreider, A., Lorbeer, H., Ahlheim, J., Feist, B., Böhme, O., Weiß, H., Babel, W., Wünsche, L. (2002): Two pilot plant reactors designed for the in situ bioremediation of chlorobenzene-contaminated ground water: hydro-geological and chemical characteristics and bacterial consortia. In: Water Air Soil Poll.: Focus 2 (3), 161-170

- Vogt, C., Alfreider, A., Schirmer, M., Weiß, H., Babel, W. (2002): Estimation of the microbial degradation potential of an aquifer highly contaminated with benzene (former hydrogenation plant Zeitz). European Conference on Natural Attenuation, Heidelberg, 14.-17.10.2002, Abstractband,
- Vogt, C., Gödeke, S., Treutler, H.-C., Weiß, H., Schirmer, M., Richnow, H.-H. (2007): Benzene oxidation under sulfate-reducing conditions in columns simulating in situ conditions. In: Biodegradation 18 (5), 625-636, <http://dx.doi.org/10.1007/s10532-006-9095-1>
- Voigt, G. (2007): Gezielte Mobilisierung von CKW durch Infiltration von Tensiden auf einem Altstandort in NRW. In: Tagungsband AAV-Fachtagung „Neue Entwicklungen im Umgang mit der Resource Boden – Ergebnisse aus aktuellen In-situ-Sanierungsvorhaben des AAV“ 06.12.2007, AAV Altlastensanierungs- und Altlastenaufbereitungsverband NRW, Hattingen
- Voskamp, Michael (2004): Untersuchungen zur Sorption an Huminstoffen; Molekulargewicht und Kohlenstoff-Isotopenfraktionierung, Dissertation an der Universität Leipzig
- Wang, C.-B., Zhang, W. (1997): "Synthesizing Nanoscale Iron Particles for Rapid and Complete Dechlorination of TCE and PCBs." Environmental Science and Technology, 31(7): 2154-2156
- Warner, K. M. (1998): Cosolvent Flushing Pilot Test Report - Former Sages Dry Cleaner. LFR Levine Fricke prepared for Florida Department of Environmental Protection
- WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY BOARD (WSTB, 2004): Contaminants in the Subsurface: Source Zone Assessment and Remediation, National Research Council of the National Academies, USA, <http://www.nap.edu/catalog/11146.HTML>
- Weiss, H. (2007): imw-Innovative Messtechnik Dr. Weiss, Tübingen Innovative Probennahmetechniken für das Grundwasser, BEW-Seminar Gefährdungsabschätzung und Sanierung von Altlasten 2007
- Weiß, H. (1999): SAFIRA - Pilotanlage zur Entwicklung von Verfahren für die in situ Sanierung komplex belasteter Grundwässer. In: Jessberger, P. (Hrsg.): Flächenrecycling und Grundwassersanierung, Schürmann & Klagges, Bochum, S. 97-102
- Weiß, H., Dahmke, A. (2000): Verfahren zur Konditionierung von mit Halogenkohlenwasserstoffen und anorganischen Schadstoffen belasteten Wässern. Europäisches Patent EP 00/02861, Europäisches Patentamt, München
- Weiß, H., Großmann, J. (2009): "State of the art" bei der in-situ-Sanierung; Beste verfügbare Techniken und aktuelle Entwicklungen. Tagung "Planung und Durchführung abfallarmer Bodensanierung, kosten- und abfalloptimierte Methoden der in-situ-Sanierung, Potsdam
- Weiß, H., Schirmer, M., Teutsch, G., Merkel, P. (2002): Sanierungsforschung in regional kontaminierten Aquiferen (SAFIRA) - 2. Projektüberblick und Pilotanlage. In: Grundwasser 7 (3), 135-139
- Weiß, H., Teutsch, G. (1999): Forschungsprojekt zur Entwicklung von Verfahren zur in situ-Sanierung komplex belasteter Grundwässer. In: TerraTech 1, 58-59
- Weiß, H., Teutsch, G. (2000): Verfahren und Reaktor zur Dekontamination von Grundwasser. Europäisches Patent EP 99/10011, Europäisches Patentamt, München
- Weiß, H., Teutsch, G., Schirmer, M. (2000): Vorrichtung zur Sanierung von kontaminiertem Grundwasser. Deutsches Gebrauchsmuster 299 20 299.2
- Weiß, H., Teutsch, G., Schirmer, M. (2004): Verfahren und Reaktor zur Dekontamination von Grundwasser. Europäisches Patent 1144312, Europäisches Patentamt, München
- Wennrich, R. (2008): Optimization of water treatment technology for As and Sb scavenging by microbologically activated Fe minerals (MicroActiv), Mineral surfaces - from atomic processes to industrial application, München, 13.-14.10.2008, Geotechnologies Science Report 12, Potsdam, S. 25-33
- Werner, U.; Pastor, W.; Müller, K. (2000): Baurecht von A-Z. Lexikon des öffentlichen und privaten Baurechts, 7., neubearbeitete und stark erweiterte Auflage. C.H. Beck Verlag, München, Köln
- Widmann, S., Karg, F., Hintzen, U., Portune, Th. (2008): Fallbeispiel „PAK-Schadensfall“. In: altlasten annual 2007, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden 2008.

- Wiedemeier, T. H., Rifah, H. S., Newell, C. J., WILSON, J. T. (1999): Natural Attenuation of fuels and chlorinated solvents in the subsurface.—617 S. John Wiley & Sons, Inc.
- Willershausen, H., Kohlmeier, E., Kohler, W., Backhaus, L., Maxin, C. (1994): In-situ-Sanierung eines LCKW-Schadens auf dem Gelände der ehemaligen chemischen Fabrik. TerraTech, 2/1997
- Winkler, A. (2002): Prozesse des Wärme- und Stofftransports bei der In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen. Mitteilungen Heft 115, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, ISBN: 3-933761-18-2
- Winkler, A.; Koschitzky, H.-P.; Gropper, H.; Weiske, G. (2001): Statusbericht: Thermische In-situ-Sanierungstechnologien, Arbeitskreis Innovative Erkundungs-, Sanierungs- und Überwachungs-methoden, Schriftenreihe Altlastenforum Baden Württemberg e.V., Heft 4, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Jan. 2001.
- WU, M. (2001): A Pilot Study Using HRC™ to Enhance Bioremediation of CAHs.
- Xu, Y., Zhang, W. (2000): Subcolloidal Fe/Ag particles for reductive dehalogenation of chlorinated benzenes. *Indus. Eng. Chem. Res.* **39**, 2238-2244.
- Yang, Y. R., McCarty, P. L. (2002): Comparison between Donor Substrates for biologically enhanced tetrachloroethene DNAPL Dissolution. *Environmental Science & Technology*, 36, 3400 – 3404
- Younger P. (2002), CL:AIRE view
- Zhai, X., Huai, I., Rao, P. S. C., Lee, L. S. (2005): Cosolvent-enhanced chemical oxidation of perchloroethylene by potassium permanganate. *Journal of Contaminant Hydrology*, 82, 61-74.
- Zhang, W.-X. (2003): Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview; *Journal of Nanoparticle Research* 5: 323 –332
- Zittwitz, M., Gerhardt, M. (2006): Das Methan-Biostimulationsverfahren, Vollständige Sanierung von LCKW-Schadensfällen durch biologische in-situ-Maßnahme. In: Wasser, Luft und Boden, Suppl. TerraTech 10 Seite TT 18 - TT 21
- Zittwitz, M., Hein, P., Kilpert, S., Freygang, M. (2007): Das Potenzial des biologischen LCKW-Abbaus – Abbau von LCKW bei extremer Schadstoffbelastung unter Einsatz von Melasse. Wasser, Luft und Boden, Suppl. TerraTech 1-2/2007, 20-24.
- Zittwitz, M., Hein, P., Kilpert, S., Moschik, D.A., Gerhardt, M., Freygang, M., Großmann, J. (2007): Möglichkeiten zur biologischen Sanierung von LCKW-Schadensfällen, BGD-Seminar "Innovative Verfahren zur LHKW-Sanierung im Grundwasser", 01.11.2007, Leipzig, Tagungsunterlagen
- Zittwitz, M., Hein, P., Pistiolis, I., Moschik, A., Freygang, M., Großmann, J. (2008): Das potenzial des biologischen Abbaus II, weiterer Feldversuch zum Abbau von LCKW bei extremer Schadstoffbelastung unter Einsatz von Melasse. Wasser, Luft und Boden, Suppl. TerraTech
- Zogorski, J., Morduchowitz, A., Baehr, A., Baumann, B., Conrad, D., Dres, R., Korrtten, N., Lapham, W., Pankow, J., Washington, E. (1997): Interagency Assessment of Oxygenated Fuels. Report coordinated by Office of Science and Technology Policy (OSTP), National Science & Technology Council, Washington DC, USA
- Zorn, R., Steger, H., Haus, R. & Czurda, K. (2000): Elektrokinetische Bodensanierung: Einsatzmöglichkeiten, Anwendungsbereiche und Erkundungsanfordernisse. - LFU Bayern, Fachtagung "Elektrokinetische Verfahren - Methoden zur Altlastensanierung", Augsburg, 22.11.2000: S. 41-52.
- Zorn, R., Steger, H., Haus, R. & Czurda, K. (2001): Elektrokinetik - Einführung, Ergebnisse aus Labor- und Feldversuchen - In: BURKHARDT, G., EGLOFFSTEIN, T. & CZURDA, K. (Hrsg.): Altlasten 2001 - Neue Verfahren zur Sicherung und Sanierung, Beiträge zum Seminar 20.-21.06.01 in Karlsruhe, Band 4: 71-82; Karlsruhe (ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt)
- Zorn, R., Steger, H., Haus, R. & Czurda, K. & Penz, M. (2001): Elektrokinetische Bodensanierung - Einfluß auf die Standfestigkeit tonhaltiger Böden - In: CZURDA, K., FERNANDEZ-STEGER, T. & ROEHL, K.E. (Hrsg.): 13. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie, 2.-6. April 2001, Karlsruhe: 243-244; Essen (Verlag Glückauf)

Internetquellen

- http://www.aavnrw.de/aav/dokumente/pressemitteilungen/2007/ferster_presentation.pdf.
ALSTOM – AAV, 2007
- <http://www.ask-eu.de/default.asp?Menu=149&AnbieterID=41>
- <http://www.biopract.de/>
- <http://www.circa.europa.eu/Members/irc/enterprise/atex/home>,
ATEX Directive interest group in CIRCA
- <http://www.circa.europa.eu/Members/irc/enterprise/atexms/home>
ATEX Administrative Co-operation (ADCO) interest group in CIRCA
- <http://www.cacruscorporation.com>
- <http://www.cl-solutions.com>.
- <http://www.clu-in.org/asr/>.
EPA (2007): Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report (Twelfth Edition),
- http://www.cluin.org/download/contaminantfocus/dnapl/Treatment_Technologies/USACEIn_Situ_Thermal_Design.pdf
- <http://www.clu-in.org/techfocus/>
- http://www.clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/multi-phase_extraction/cat/overview
- <http://www.costperformance.org/profile.cfm?ID=330&CaseID=330>.
EPA (2003): In Situ Conductive Heating at the Confidential Chemical Manufacturing Facility, Portland, In Cost and Performance Report
- <http://www.dbiproducts.com/>. CARUS REMEDIATION TECHNOLOGIES
- http://www.delta-umwelt.com/air_sparging.php
- <http://www.dialog-nanopartikel.de> (Nanotechnologie im Dialog)
- <http://www.docs.serdp-estcp.org/viewfile.cfm?doc=bioaugmentationwhitepaper.pdf>
- <http://www.ec.europa.eu/enterprise/atex/centrcont.htm> (countries and EEA countries)
- <http://www.ec.europa.eu/enterprise/atex/direct/trans94-9.htm>, References of national measures transposing directive 94/9/EC:
- http://www.ec.europa.eu/enterprise/atex/intern_org.htm (International organisations)
- <http://www.ec.europa.eu/enterprise/atex/listcomp.htm>
List of competent authorities known to the Commission regarding Market Surveillance of directive 94/9/EC in Member States, candidate countries EEA countries:
- <http://www.ec.europa.eu/enterprise/atex/nb/nblast.htm> (Notified Bodies)
- <http://www.ec.europa.eu/enterprise/atex/stand.htm> (ATEX standardization)
- <http://www.ec.europa.eu/enterprise/atex>
"How to apply the Directive", further Considerations by the ATEX Standing Committee's Working Group
- <http://www.enviro.de>
- <http://www.epa.gov/OUST/cat/airsparg.htm>
- <http://www.epa.gov/oust/cat/biosparg.htm>.
- http://www.epa.gov/oust/pubs/tum_ch13.pdf.
EPA (2004): How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers, EPA 510/R-04/002. Office of Underground Storage Tanks

<http://www.epa.gov/OUST/pubs/tums.htm>.

EPA (1994): How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites - A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. EPA510-R-04-002, Chapter VII Air Sparging

<http://www.epa.gov/swerust1/cat/dualphas.htm>

<http://www.epa.gov/tio/download/remed/engappinsitbio.pdf>.

EPA (2000): Engineered Approaches to In Situ Bioremediation of Chlorinated Solvents: Fundamentals and Field Applications. United States Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington DC

<http://www.epa.gov/tio/index.htm>

http://www.es.epa.gov/ncer/publications/workshop/pdf/10_20_05_nanosummary.pdf.

EPA (2005): U.S. EPA Workshop on Nanotechnology for Site Remediation. U.S. Department of Commerce, October 20-21

http://www.es.epa.gov/ncer/publications/workshop/pdf/10_20_05_nanosummary.pdf

<http://www.eurodemo.info>

<http://www.eurodemo.info/feature-projects/feature-technology-tsve/>

<http://www.fe4u.de>

http://www.fe4u.de/pdf/sicherheitsdatenblatt_nFe.pdf

<http://www.groundwaterremediation.com/Groundwater-Remediation-technology/Groundwater-Remediation-technology.asp>

<http://www.isocinfo.com/>.

<http://www.istev.com>

<http://www.iws.uni-stuttgart.de/Vegas>

<http://www.kva-equipment.com/>.

<http://www.labo-deutschland.de>

http://www.labo-deutschland.de/documents/MNA-Positionspapier_Stand_10-12-2009_e51.pdf

http://labo-deutschland.de/documents/ausgelegethilfe_4d4.pdf

http://labo-deutschland.de/documents/grundsaeetze_nachsorge_5db.pdf

http://labo-deutschland.de/documents/abgrenz_c3b.pdf

http://labo-deutschland.de/documents/BBodG_Wasserrecht_5a0.pdf

http://labo-deutschland.de/documents/bimsch_19a.pdf

http://labo-deutschland.de/documents/bergabg_a9e.pdf

http://labo-deutschland.de/documents/altlasten_2009_bbd.pdf

http://labo-deutschland.de/documents/LABO-HGW-Text_4e3.pdf

http://labo-deutschland.de/documents/LABO-HGW-Anhang_340.pdf

http://labo-deutschland.de/documents/umweltpruefung_494.pdf

http://labo-deutschland.de/documents/TOP111_Endbericht_20b.pdf

http://labo-deutschland.de/documents/grundsaeetze_nachsorge_3b5_139.pdf

http://labo-deutschland.de/documents/Ah_Du_1208_732_8fa.pdf

http://labo-deutschland.de/documents/grundsaeetze_nachsorge_3b5_139.pdf

http://labo-deutschland.de/documents/labo-arbeitshilfe-qualitaetssicherung-12-12-2002_d4c.pdf

http://labo-deutschland.de/documents/Fachmodul-Boden-Altlasten-20102000_56d.pdf

<http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de>

http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb_prod/WaBoAb/Vorhaben/LABO/B_1.07/index.jsp

http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/cms/WaBoAb_prod/WaBoAb/Vorhaben/LABO/B_5.07/index.jsp

<http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/35855>

<http://www.nanosafe.org> (Safe production and use of nanomaterials)

<http://www.nap.edu/catalog/11146.HTML>

<http://www.natural-attenuation.de>

<http://www.nap.edu/catalog/11146.html>

WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY BOARD (WSTB, 2004): Contaminants in the Subsurface: Source Zone Assessment and Remediation, National Research Council of the National Academies, USA

https://portal.navfac.navy.mil/portal/page/portal/navfac/navfac_ww_pp/navfac_nfesc_pp/environmental/erb/nzvi. (U.S. Navy Website on nZVI)

<http://www.eurodemo.info>

<http://www.regenesis.com/>

<http://www.sanierungsverfahren.de>

<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00137952>

<http://www.sensatec.de>

<http://www.teresa3.de>

TERESA 3.0 online – Technologieregister zur Sanierung von Altlasten.

<http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/infosysteme/irsa/jsp/anonym/atrium/index.jsp>

<http://www.umwelt.sachsen.de/lfug/documents/32/EntscheidungshilfeGW-SanierungEndversion.pdf>

<http://www.umwelt.sachsen.de/lfug/documents/32/Materialienband-insituverfahrenEndversion.pdf>

<http://www.umweltbundesamt.de/gesundheit/stoffe/nanopartikel.htm>

<http://www.umweltfactory.de/deutsch/sanierung/insisa.html>.

<http://www.web.unife.it/convegni/elettrochimica/EREM%202005/>

13 Glossar

BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BLA	Boden-Luft-Absaugung (soil vapour extraction, SVE)
BTEX	Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole (leichtflüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe)
cis-DCE	cis-1.2-Dichlorethen
CKW	chlorierte Kohlenwasserstoffe (Chlorkohlenwasserstoffe)
CRB	Continuous reactive barriers – Vollflächig durchströmte Reinigungswände
1.2-DCA	1.1-Dichlorethan
DDT	Dichlordiphenyltrichlorethan
DNAPL	Dense Non-Aqueous Phase Liquids (zum Beispiel CKW), nicht mit Wasser mischbarer flüssiger Schadstoff mit einer Dichte > der des Wassers (1,0 g/cm ³)
DOC	gelöster organischer Kohlenstoff
DRO	Diesel ranging organics - der Dieselfraktion angehörende Kohlenwasserstoffe
ECD	Electrolytic Capture Detector
ENA	Enhanced Natural Attenuation (stimmulierter natürlicher Rückhalt und Abbau) In-situ-Sanierung, die durch Initiierung, Stimulierung oder Unterstützung von natürlichen Schadstoffminderungsprozessen mit dem Einbringen von Substanzen unter Nutzung naturgegebener Reaktionsräume aktiv in das Prozessgeschehen eingreift. Voraussetzung ist, dass die Prozesse in vermindertem Umfang natürlich ablaufen. Daher handelt es sich bei biologischen In-situ-Sanierungsverfahren in der Regel auch um ENA.
ERH	Electrical Resistance Heating
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe (sehr stabile und nicht brennbare Gase zum Beispiel früher Kältemittel in Klimaanlage und Kühlschränken)
Gemischsiedetemperatur	Siedetemperatur (< 100°C bei Atmosphärendruck) eines Stoffgemisches (in Analogie zu Metallschmelzen auch „Eutektische Temperatur“ genannt). Flüssige organische Schadstoffe sieden bei gleichzeitiger Verdampfung von Wasser bei Erreichen der stoffspezifischen Gemischsiedetemperatur. Der Vorgang wird in der Thermodynamik als Wasserdampfdestillation bezeichnet.
GFS	Geringfügigkeitsschwelle
HKW	Halogenierte Kohlenwasserstoffe

HPO	Hydrous Pyrolysis Oxidation
HRC	Hydrogen Releasing Compound
In situ	an Ort und Stelle
IRZ	In-Situ Reaktive Zone
ISCO	In Situ Chemical Oxidation – In-Situ-Chemische-Oxidation
ISCR	In Situ Chemical Reduction – In-Situ-Chemische-Reduktion
iSOC	In situ submerged oxygen curtain
K_f	Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)
kritische Mizellenkonzentration (CMC)	abhängig von: <ul style="list-style-type: none"> - Art des Dispersionsmittels (Wasser, Benzol, Glycerin etc.) - chemischer Aufbau der hydrophilen Kopfgruppe und der hydrophoben Gruppe (Kettenlänge) - sterische Eigenschaft der hydrophoben Kohlenwasserstoffkette (verzweigt-kettig, unverzweigt-kettig) - Wertigkeit und Art der Gegenionen in der Kopfgruppe von ionischen Tensiden - Wertigkeit und Art des zugesetzten Grundelektrolyten und dessen Ionenstärke
LCKW	Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe
LHKW	Leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe
LNAPL	Light Non-Aqueous Phase Liquids (MKW, BTEX, etc.) nicht mit Wasser mischbarer flüssiger Schadstoff mit einer Dichte < der des Wassers (1,0 g/cm ³)
Mizellenbildung	Bei einer geringen Konzentration an Tensidanionen reichern sich diese an der Wasseroberfläche an. Bei zunehmender Konzentration wird diese Grenzfläche vollständig mit einer Schicht von Seifenanionen bedeckt. Beim Lösen weiterer Tenside liegen dann auch Tensidanionen im Innern der Lösung vor. Der hydrophobe Teil des Tensidanions versucht dabei, sich der Wechselwirkung mit dem Wasser möglichst zu entziehen und es kommt zur Ausbildung von Mizellen. Die Mizellen sind Teilchenverbände unterschiedlicher Form, die sich aus 50 bis 1000 Tensidanionen bilden. Innerhalb der Mizellen ordnen sich die Tensidanionen so an, dass die hydrophoben Gruppen in das Innere der Mizelle weisen und durch Van-der-Waals-Kräfte stabilisiert werden. Die hydrophilen Gruppen sind den Wassermolekülen in der Lösung zugewandt.
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
MNA	Monitored Natural Attenuation (überwachter natürlicher Rückhalt und Abbau)

NA	Natural Attenuation (natürlicher Rückhalt und Abbau)
NAPL	Non-aqueous phase liquids, nicht mit Wasser mischbare Flüssigkeit (flüssiger Schadstoff)
NOD	Natural Oxidant Demand (natürlicher Oxidationsmittelbedarf)
NSO	Kohlenwasserstoffverbindungen mit Heteroatomen (Stickstoff, Schwefel, Sauerstoff)
OEG (UEL)	Obere Explosionsgrenze (Upper explosion level)
Off-site	nach Abtransport
On-site	vor Ort
ORC[®]	Oxygen Releasing Compound
PAK (PAH)	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH = polycyclic aromatic hydrocarbons)
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCE	Tetrachlorethen = Tetrachlorethylen = Perchlorethen = Perchlorethylen (Per)
PCP	Phenylcyclohexylpiperidin
PID	Photoionisationsdetektor
RFZ	Redoxgesteuerte Fluidzonen
RNIP	Reactive Nano-scale Iron Particles
ROI	Radius of influence (Einflussradius)
R-Sätze	Risiko-Sätze. Das sind standardisierte Hinweise auf besondere Gefahren, die bei gebräuchlicher Handhabung und Verwendung gefährlicher Stoffe und Zubereitungen auftreten können. R-Sätze werden bei der Kennzeichnung von Gefahrstoffen angegeben, zum Beispiel auf der Verpackung. Hierbei sind auch Kombinationen mehrerer R-Sätze möglich.
Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen	nach § 2 Abs. 8 BBodSchG sonstige Maßnahmen, die Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit verhindern oder vermindern, insbesondere Nutzungsbeschränkungen.
SEE	Steam Enhanced Extraction
SOD	soil oxygen demand – Matrixbedarf
S-Sätze	standardisierte Sicherheitsvorschläge, werden Hinweise auf notwendige Vorsichtsmaßnahmen für die Handhabung und Verwendung von gefährlichen Stoffen gegeben. S-Sätze sind bei der Kennzeichnung von Gefahrstoffen anzuwenden.
SVE	Soil vapour extraction (Boden-Luft-Absaugung, BLA)
TBA	tert-Butanol (tert-Butylalkohol)

TBF	tert-butyl-Formiat
TCA	1.1.1-Trichlorethan
TCE	Trichlorethen = Trichlorethylen (Tri)
TCH	Thermal Conductive Heating
t-DCE	trans-1.2-Dichlorethen
Tenside	<p>(<i>lat. tendere= spannen</i>) sind grenzflächenaktive Substanzen. In der Regel sind Tenside amphiphile Verbindungen, d.h. sie tragen sowohl polare (hydrophile bzw. lipophobe) als auch unpolare (hydrophobe bzw. lipophile) Gruppen. Ihre beiden wichtigsten Eigenschaften sind</p> <ul style="list-style-type: none">- die Adsorption an Grenzflächen- die Aggregation (Mizellenbildung) in der Volumenphase. <p>Andere Ausdrücke für grenzflächenaktive Substanzen: Detergentien (<i>lat. detergere= abwischen</i>), Amphiphile, Surfactants (<i>engl. surfaceactiveagents</i>)</p>
THERIS	Thermische In-Situ-Sanierung (Name des Thermischen In-Situ-Verfahrens, bei dem mittels elektrisch betriebener Heizlanzen der Untergrund in der ungesättigten Bodenzone aufgeheizt wird)
TNT	2.4.6-Trinitrotoluol (Sprengstoff, Kampfmittelbestandteil)
TPH	Total petroleum hydrocarbons - Bezeichnung der Gesamtheit aller Mineralölkohlenwasserstoffe
TUBA	Thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung (Name des Thermischen In-Situ-Verfahrens, bei dem mittels Dampf/Dampf-Luft-Injektion der Untergrund in der ungesättigten Bodenzone aufgeheizt wird)
UEG (LEL)	Untere Explosionsgrenze (Lower explosion level)
VC	Vinylchlorid (Chlorethan)
VOC	volatile organic compound (flüchtige organische Verbindungen)
VOX	volatile organics chlorinated (flüchtige chlorierte organische Verbindungen)

ANHANG

- Anhang 1: Zusammenfassung der Verfahrensbewertungen durch den Arbeitskreis**
- Anhang 2: Verzeichnis relevanter Rechtsnormen und Regelwerke**
- Anhang 3: Arbeitsschutz bei Arbeiten in kontaminierten Bereichen**

ANHANG 1: Zusammenfassung der Verfahrensbewertungen durch den Arbeitskreis

Verfahren	Schadstoff- phase	Schadstoff- quelle	Schadstoff- fahne	Ungesättigte Bodenzone	GW-Schwan- kungsbereich	Gesättigte Bo- denzone	Entwicklungsstand	Bewertung durch den Arbeitskreis
Bewertung	++ = sehr hoch / sehr gut + = hoch / gut 0 = mittel / mäßig - = gering / niedrig -- = sehr gering / ungeeignet							
TUBA	+	++	-	+	+	-	Mehrere wissenschaftlich begleitete Pilotanwendungen in Deutschland. Praxisreif	<i>Das Verfahren hat sich in der Erprobung als praxisreif erwiesen und kann unter entsprechenden Bedingungen als zuverlässiges, gut kontrollierbares, schnelles und kostengünstiges Verfahren eingesetzt werden. Zur zuverlässigen Dimensionierung ist allerdings Expertenwissen erforderlich. Allgemein verfügbare Dimensionierungstools liegen noch nicht vor, werden jedoch in naher Zukunft erarbeitet.</i>
THERIS	+	++	--	+	0	-	praxiserprobtes Sanierungsverfahren für die ungesättigte Zone. Praxisreif	<i>Das Verfahren hat sich in der Erprobung als praxisreif erwiesen und kann unter entsprechenden Bedingungen als zuverlässiges, effizientes und kostengünstiges und praxisreifes Verfahren eingesetzt werden. Expertenwissen erforderlich, allgemein verfügbare Dimensionierungstools liegen nicht vor.</i>
MPE/DPE	+	+	0	+	+	+	Das Verfahren wurde in Großbritannien, Italien und in den USA bereits häufig eingesetzt und kann dort sowie auch in anderen europäischen Ländern als Stand der Technik bezeichnet werden. In Deutschland wurde dieses Verfahren bislang jedoch nur wenig angewendet.	<i>Bei geeigneten Randbedingungen, wie zum Beispiel mäßig durchlässigen Aquiferen und geringen Aquifermächtigkeiten, ist dieses Verfahren sehr gut anwendbar und zeigt im Vergleich zu konventionellen P&T-Maßnahmen und In-situ-Verfahren, die auf dem Prinzip der Injektion eines Wirkstoffes basieren, häufig bessere Resultate und deutlich verkürzte Sanierungszeiten. Dementsprechend können die Sanierungsdauer sowie -kosten bei Schadensfällen unter geeigneten Randbedingungen häufig erheblich reduziert werden. Die Technologie ist in zahlreichen Ländern außerhalb Deutschlands als Stand der Technik zu bezeichnen. Von daher sind umfangreiche Erfahrungswerte hinsichtlich der einzusetzenden Maschinenteknik sowie der erzielbaren Sanierungsergebnisse vorhanden</i>
Elektrokinetik	-	0	-	+	+	+	In Erprobung. In Deutschland wurden bislang nur Pilotversuche / Forschungsvorhaben	<i>Die Prüfung einer Anwendung sollte allenfalls in kleinräumigen Bereichen und bei geeigneten geologischen und hydrogeologischen Randbedingungen in Erwägung gezogen werden</i>

ANHANG 1: Zusammenfassung der Verfahrensbewertungen durch den Arbeitskreis

Verfahren	Schadstoff- phase	Schadstoff- quelle	Schadstofffahne	Ungesättigte Bodenzone	GW-Schwan- kungsbereich	Gesättigte Bo- denzone	Entwicklungsstand	Bewertung durch den Arbeitskreis
	++ = sehr hoch / sehr gut + = hoch / gut 0 = mittel / mäßig - = gering / niedrig -- = sehr gering / ungeeignet							
Airsparging	-	-	+	-	-	+	Stand der Technik in Deutschland / Europa / USA. In Deutschland weit mehr als 500 Anwendungsfälle.	<i>Im Regelfall ist diese Methode bei vorhandener BLA und Sicherung des GW-Abstroms einfach und schnell umsetzbar. Da wenig zusätzliche Anlagentechnik notwendig ist und zumeist nur geringe Kosten für Technik und Steuerung anfallen, handelt es sich um eine preiswerte und ergänzende Sanierungsmethode. Häufig sind schnelle Abnahmen der Schadstoffkonzentrationen zu beobachten</i>
DLI	+	+	-	-	+	+	Mehrere wissenschaftlich begleitete Pilot-Anwendungen in Deutschland vorhanden. Praxisreif im Porengrundwasserleiter, in Erprobung im Kluffgestein.	<i>Das Verfahren hat sich in der Erprobung als praxisreif erwiesen und kann unter entsprechenden Bedingungen als zuverlässiges, gut kontrollierbares, schnelles und kostengünstiges Verfahren eingesetzt werden. Zur zuverlässigen Dimensionierung ist allerdings Expertenwissen erforderlich. Allgemein verfügbare Dimensionierungstools liegen noch nicht vor, werden jedoch in naher Zukunft erarbeitet. Der Sanierungsverlauf kann online durch ein Temperaturmonitoring verfolgt und überwacht werden</i>
Alkohol-spülung	+	+	-	-	-	+	Die Verfahrensentwicklung im Technikum ist abgeschlossen durch drei Forschungsvorhaben mit Großbehälterversuchen bei VEGAS an der Universität Stuttgart und am Institut für Hydromechanik an der Universität Karlsruhe. In Erprobung, Pilot-Anwendung in Deutschland mit wissenschaftlicher Begleitung steht noch aus.	<i>Dieses neu entwickelte Verfahren wurde bisher noch nicht unter Feldbedingungen eingesetzt. Es ist in Deutschland dem Grunde nach genehmigungsfähig, sofern „beherrschbare hydraulische Verhältnisse am Standort vorliegen (Sicherheit), um den großräumigen Schutz des Grundwassers durch geeignete Maßnahmen zu gewährleisten“.</i>

ANHANG 1: Zusammenfassung der Verfahrensbewertungen durch den Arbeitskreis

Verfahren	Schadstoff-phase	Schadstoff-quelle	Schadstofffahne	Ungesättigte Bodenzone	GW-Schwan-kungsbereich	Gesättigte Bo-denzone	Entwicklungsstand	Bewertung durch den Arbeitskreis
Bewertung	++ = sehr hoch / sehr gut + = hoch / gut 0 = mittel / mäßig - = gering / niedrig -- = sehr gering / ungeeignet							
Tensid-spülung	+	+	-	-	-	+	Vielzahl von Pilotprojekten in den USA in den 90-er Jahren, weitgehend praxistaugliches Verfahren zur Grundwassersanierung bei MKW-Schäden (LNAPL). Unter gut kontrollierbaren Bedingungen einsetzbar, teilweise noch in der Entwicklung. Wenige Sanierungsanwendungen in Deutschland, vornehmlich kleine Projekte.	<i>Verfahren zur beschleunigten Schadstoffquellensanierung unter engen Randbedingungen und unter intensiver fachgutachterlicher Begleitung. Wirkungsweise und Sanierungserfolg ist stark abhängig von der Auswahl und der Art des für den Einzelfall geeigneten Tensides</i>
Biosparging	-	0	+	-	0	+	Bundesweit wurden in mehreren Fällen Luft-sauerstoff und Nährstoffe zur Sanierung des Grundwassers mittels Lanzen in die gesättigte Zone eingebracht. Das Biosparging Verfahren kann als Stand der Technik bezeichnet werden.	<i>Das Biosparging-Verfahren wurde bundesweit in mehreren Fäl-len angewandt. Es kann eine Alternative zu Pump-and-treat-Verfahren in der Fahne dar-stellen, jedoch muss bei vorhande-ner Schadstoffquelle aufgrund der Schadstoffnachlieferung auch bei Anwendung dieses In-situ-Verfahrens von langen Laufzeiten ausgegangen werden. Daher ist eine Quellensanierung mit an-deren geeigneten Verfahren grundsätzlich zu empfehlen. Wichtig ist eine genaue Kenntnis der Schadenssituation und der Hydro-chemie als Entscheidungs- und Planungsgrundlage.</i>
Oxywall							Das Oxywall-Verfahren befindet sich in der Erprobung.	<i>Mit dem Spezialverfahren „Oxywall“ liegen in Deutschland erst wenige Erfahrungen vor.</i>
H₂O₂	-	0	+	-	0	+	Wasserstoffperoxid wird als Sauerstoffträger in Deutschland häufig eingesetzt. Der Einsatz kann als praxiserprobt bezeich-net werden.	<i>Das Verfahren der Zugabe von Wasserstoffperoxid wurde bun-desweit bereits in zahlreichen Fällen eingesetzt. Es stellt eine kostengünstige Alternative zu Pump-and-Treat-Verfahren in der Fahne dar. Bei gleichzeitiger Behandlung der Schadstoffquelle resultieren Laufzeiten von mehreren Jahren. Wichtig ist eine ge-naue Kenntnis der Schadenssituation und der Hydrochemie als Entscheidungs- und Planungsgrundlage.</i>

ANHANG 1: Zusammenfassung der Verfahrensbewertungen durch den Arbeitskreis

Verfahren	Schadstoff- phase	Schadstoff- quelle	Schadstoff- fahne	Ungesättigte Bodenzone	GW-Schwan- kungsbereich	Gesättigte Bo- denzone	Entwicklungsstand	Bewertung durch den Arbeitskreis
Bewertung	++ = sehr hoch / sehr gut + = hoch / gut 0 = mittel / mäßig - = gering / niedrig -- = sehr gering / ungeeignet							
Nitrat	-	0	+	-	-	+	Bundesweit sind zahlreiche großtechnische Anwendungen mit Nitrat als Elektronenakzeptor bekannt. Das Verfahren kann aus Stand der Technik bezeichnet werden.	<i>Das Verfahren kann zwar als Stand der Technik bezeichnet werden, aber in vielen Anwendungsfällen wurden die Grenzen des Verfahrens deutlich. Die hydraulischen und hydrochemischen Bedingungen an den Standorten erschweren oft das Zusammenbringen des Oxidationsmittels mit den Schadstoffen. Zudem können Konkurrenzreaktionen den Schadstoffabbau erheblich behindern. Bei gleichzeitiger Behandlung der Schadstoffquelle resultieren Laufzeiten von mehreren Jahren. Wichtig ist eine genaue Kenntnis der Schadenssituation und der Hydrochemie als Entscheidungs- und Planungsgrundlage.</i>
ORC[®]	-	0	0	-	0	+	ORC [®] wurde in den USA mehrfach eingesetzt. In Deutschland liegen bisher negative Erfahrungen aus wenigen Einzelfällen vor. Aus einer Erhebung des Altlastenausschusses der LABO ist jeweils ein Fall aus Bayern und Schleswig-Holstein bekannt. Das Verfahren befindet sich in der Erprobung.	<i>Das Verfahren wurde in den USA mehrfach eingesetzt, in Deutschland liegen bisher erst wenige Erfahrungen vor. Mit diesem Verfahren erfolgreich durchgeführte Fälle sind nicht bekannt.</i>
iSOC[®]	-	0	+	-	0	+	Mit dem iSOC [®] -Verfahren gibt es in Deutschland großtechnische Erfahrung bei derzeit ca. 20 Anwendungsfällen, davon eine VC-Sanierung (Monoschaden). Somit kann das Verfahren als praxiserprobt unter den Fallrandbedingungen bezeichnet werden. In den USA und Großbritannien liegen bereits länger Erfahrungen aus zahlreichen Feldanwendungen vor.	<i>Das Isic-Verfahren ist praxiserprobt und kann eine Alternative zu Pump-and-trat-Verfahren in der Fahne darstellen, jedoch muss bei vorhandener Schadstoffquelle aufgrund der Schadstoffnachlieferung auch bei Anwendung dieser In-situ-Verfahren von langen Laufzeiten ausgegangen werden. Daher ist eine Quellensanierung mit geeigneten Verfahren grundsätzlich zu empfehlen. Wichtig ist eine genaue Kenntnis der Schadenssituation und der Hydrochemie als Entscheidungs- und Planungsgrundlage.</i>

ANHANG 1: Zusammenfassung der Verfahrensbewertungen durch den Arbeitskreis

Verfahren	Schadstoff- phase	Schadstoff- quelle	Schadstoff- fahne	Ungesättigte Bodenzone	GW-Schwan- kungsbereich	Gesättigte Bo- denzone	Entwicklungsstand	Bewertung durch den Arbeitskreis
	Bewertung ++ = sehr hoch / sehr gut + = hoch / gut 0 = mittel / mäßig - = gering / niedrig -- = sehr gering / ungeeignet							
Oxytec	-	0	+	-	0	+	Mit dem Oxytec-Verfahren liegen erste Erfahrungen an einigen Standorten im In- und Ausland vor. Das Verfahren ist in Erprobung.	<i>Das Oxytec-Verfahren kann eine Alternative der Fahnen-sanierung darstellen. Eine Quellensanierung mit geeigneten Verfahren ist grundsätzlich zu empfehlen. Erkenntnisse über erfolgreich abgeschlossene Sanierungen mit dem Verfahren liegen dem Arbeitskreis noch nicht vor.</i>
Melasse, org. Säuren, Alkohole – anaerober LCKW-Abbau (reduktive Dechlorierung)	-	0	+	-	-	+	Das Verfahren der reduktiven Dechlorierung mit Cosubstraten wird bundesweit eingesetzt. Es kann als Stand der Technik bezeichnet werden.	<i>Für das Verfahren des Einbringens von Melasse als Cosubstrat liegen bisher in Deutschland Erfahrungen in zahlreichen Fällen vor. Andere Cosubstrate wie organische Säuren und Alkohole, werden nach Kenntnis des Arbeitskreises ebenfalls standardmäßig eingesetzt.</i>
HRC® - anaerober LCKW-Abbau (reduktive Dechlorierung)	-	0	+	-	-	+	Das Verfahren der reduktiven Dechlorierung wird bundesweit in einigen Fällen eingesetzt. HRC® wurde in den USA bereits vielfach eingesetzt. Das Verfahren kann als Stand der Technik bezeichnet werden.	<i>Mit dem Verfahren des Einbringens von HRC® als Elektronendonator liegen bisher in Deutschland erst wenige Erfahrungen vor. Zu beachten sind die hohen Kosten des Produktes HRC®. Es besteht bei Anwendung des Verfahrens das Risiko der Bildung von Zwischenprodukten wie VC. Daher ist eine gleichzeitige Sicherung des Abstroms erforderlich.</i>
Methan-Biostimulation – aerober LCKW-Abbau	-	0	+	-	0	+	Das Verfahren wurde in den USA entwickelt und dort bereits mehrfach eingesetzt. In Deutschland wurde das Methan-Biostimulationsverfahren in wenigen Fällen eingesetzt. Es gibt zwei Fälle in Nordrhein-Westfalen und eine Anwendung in Berlin. Das Verfahren kann als praxiserprobt bezeichnet werden	<i>Mit diesem Verfahren liegen bisher in Deutschland erst in wenigen Fällen Erfahrungen vor. Die Wirksamkeit des Verfahrens ist nur bei niedrig chlorierten Kohlenwasserstoffen gegeben. Hoch chlorierte Kohlenwasserstoffe sind nicht aerob abbaubar. Durch das Einblasen des Methan-Luft-Gemischs setzt ein Strippeffekt ein, so dass Schadstoffe mobilisiert und über das Grundwasser oder in die Bodenluft transportiert werden können. Daher sind eine Sicherung des Abstroms und eine Bodenluftabsaugung erforderlich. Dadurch steigt der Aufwand des Verfahrens.</i>

ANHANG 1: Zusammenfassung der Verfahrensbewertungen durch den Arbeitskreis

Verfahren	Schadstoff-phase	Schadstoff-quelle	Schadstofffahne	Ungesättigte Bodenzone	GW-Schwan-kungsbereich	Gesättigte Bo-denzone	Entwicklungsstand	Bewertung durch den Arbeitskreis
Bewertung	++ = sehr hoch / sehr gut + = hoch / gut 0 = mittel / mäßig - = gering / niedrig -- = sehr gering / ungeeignet							
Kalium-/ Natriumpermanganat-Injektion	0	+	0	-	-	+	Das Verfahren ist praxiserprobt.	<i>Aussichten auf eine erfolgreiche Sanierung mithilfe von ISCO durch Kalium-/Natriumpermanganat-Injektion werden positiv beurteilt, da bereits langjährige Praxiserfahrungen vorhanden sind. Da in vielen Anwendungsfällen jedoch mit einem sogenannten Rebound-Effekt zu rechnen ist, ist für eine erfolgreiche Sanierung meist ein wiederholter Einsatz von ISCO notwendig.</i>
Fentons Reagenz	+	+	-	-	-	+	Verfahren kann als anwendungsreif bezeichnet werden. In den Niederlanden (NL) und den USA im Vollmaßstab eingesetzt. Maßnahmen in NL unter anderem in Kombination mit Perozon und mit Permanganat als Verfahrenskombinationen. In Belgien und Deutschland erste Anwendungen im Pilotmaßstab.	<i>Aufgrund des hohen Oxidationspotentials der Fenton-Reaktion besteht grundsätzlich ein hohes Umsetzungspotential für organische Schadstoffe, jedoch genau diese starke exotherme Reaktion birgt Gefahren für die Anwendung des Verfahrens (zum Beispiel Mobilisierung von Schwermetallen, Metaboliten- und Gasbildung).</i>
Persulfat	+	+	0	-	-	+	Das Verfahren wird seit vielen Jahren in den USA und seit wenigen Jahren in UK eingesetzt. Es befindet sich in Kontinentaleuropa in der Erprobung. In Deutschland wurde das Verfahren (mit NaOH-Aktivierung) in einem Projekt in Süddeutschland eingesetzt.	<i>Persulfat und aktiviertes Persulfat besitzen ein hohes Oxidationspotenzial sind jedoch im Untergrund nach aktuellem Wissensstand beständig genug, um in vielen Fällen einen wirksamen Kontakt zwischen Schadstoff und Oxidationsmittel herstellen zu können. Die Aktivierung des Persulfat-Ions ist jedoch in Analogie zu Fentons Reagenz mit nicht unerheblichem Aufwand in der Handhabung verbunden. Für eine abschließende Beurteilung sind weitere Praxiserfahrungen erforderlich.</i>

ANHANG 1: Zusammenfassung der Verfahrensbewertungen durch den Arbeitskreis

Verfahren	Schadstoff- phase	Schadstoff- quelle	Schadstofffahne	Ungesättigte Bodenzone	GW-Schwan- kungsbereich	Gesättigte Bo- denzone	Entwicklungsstand	Bewertung durch den Arbeitskreis
Bewertung	++ = sehr hoch / sehr gut + = hoch / gut 0 = mittel / mäßig - = gering / niedrig -- = sehr gering / ungeeignet							
Ozon	-	0	-	-	-	+	Pilot-Anwendungen sind aus den USA und den Niederlanden bekannt. In Deutschland sind keine Pilotversuche, sondern nur Laborversuche bekannt. Verschiedene Verfahren auf der Basis von Ozoninfiltration wurden zu Anwendungsreife gebracht und sind z.T. kommerziell verfügbar.	<i>Ozon – insbesondere auch in Verbindung mit Wasserstoffperoxid – besitzt ein sehr hohes Oxidationspotenzial. Erfolgsaussichten auf eine erfolgreiche Sanierung mithilfe von Ozon müssen jedoch einzelfallspezifisch und kritisch betrachtet werden, da die Transportreichweite von Ozon im Untergrund sehr begrenzt und somit die flächenhafte Behandlung im Untergrund schwierig ist. Indizien für toxische Metaboliten wurden bei einem Einsatz zur PAK-Sanierung beobachtet. Der Auswahl der Technik zur Einbringung des Ozons kommt hierbei eine wichtige Rolle zu.</i>
Eisen-Partikel	+	+	-	-	-	+	International wurden bereits mehrere großskalige Feldversuche, zum Beispiel in Italien, Kanada und Tschechien durchgeführt (vgl. Macé et al. 2006). In Deutschland wurde ein Pilotversuch am Standort Bornheim-Roisdorf zur Grundwassersanierung eines CKW-Schadensfalls durchgeführt. Noch in der Erprobung.	<i>Aussichten auf eine erfolgreiche Sanierung mit von (Nano-)Eisen-Partikeln werden momentan sehr kritisch betrachtet, da die homogene Verteilung der Eisen-Partikel bei der Injektion noch nicht gewährleistet werden kann.</i>
In-situ-Reduktion von Chrom (VI)	*	+	+	0	0	+	In der Erprobung: in Deutschland wurden bisher Labor- und Pilotversuche durchgeführt. Großtechnische Sanierungen sind nicht bekannt.	<i>Grundsätzlich lässt sich Cr(VI) unproblematisch zu Cr(III) reduzieren und damit aus dem Wasser entfernen. Problematisch ist dabei, dass Cr(VI)-Belastungen im Regelfall in sauerstoffreichen Aquifer bei hohen Redoxpotentialen vorkommen. Dadurch treten beim Einbringen von Reduktionsmitteln meist starke Matrixeffekte auf. Diese bewirken einerseits einen stark überstöchiometrischen Reduktionsmittelbedarf, zum anderen können starke Verblockungserscheinungen die Infiltrationsstellen und die Ausbreitung im Aquifer behindern. Erfolgsversprechend dürften daher am ehesten diskontinuierliche Injektionen mit relativ hohen Infiltrationsraten sein.</i>

ANHANG 1: Zusammenfassung der Verfahrensbewertungen durch den Arbeitskreis

Verfahren	Schadstoffphase	Schadstoffquelle	Schadstofffahne	Ungesättigte Bodenzone	GW-Schwankungsbereich	Gesättigte Bodenzone	Entwicklungsstand	Bewertung durch den Arbeitskreis
Bewertung	++ = sehr hoch / sehr gut + = hoch / gut 0 = mittel / mäßig - = gering / niedrig -- = sehr gering / ungeeignet							
PRB Durchströmte Reinigungswände	-	-	+	-	-	+	Stand der Technik	<p><i>Generell konnten mit Reinigungswänden bisher sehr gute Sanierungserfolge erreicht werden. Insbesondere Adsorberwände auf Aktivkohlebasis können bei geeigneter Auslegung als zuverlässige Technologie bezeichnet werden. Mit Eisenwänden zur Reduktion halogener Schadstoffe konnten zwar gute Abreinigungsgrade erzielt werden, allerdings kann hier die Gasbildung in den Reaktoren zu erheblichen Problemen führen. In vielen Fällen weisen gelenkte Systeme mit gezielt ausgebildeten Reaktoren (Funnel-and-Gate-Systeme) Vorteile gegenüber vollflächig durchströmten Wandsystemen auf. Von entscheidender Bedeutung für den Fassungsereich eines Systems sowie das Systemverhalten bei unterschiedlichen Grundwasserständen ist die Abstimmung der Gate-Bereiche, Reaktoren oder permeablen Wandteile nach Lage und hydraulischem Verhalten auf den anstehenden Aquifer. Für das Funktionieren der Systeme hat sich dabei insbesondere die Planung auf Basis einer numerischen Grundwassermodellierung als elementar erwiesen.</i></p>

Verzeichnis relevanter Rechtsnormen und Regelwerke

Das Verzeichnis umfasst die wesentlichen Rechtsnormen und Regelwerke der Rechtsbereiche Bundes-Boden-, Wasser-, Immissionsschutz-, Arbeitsschutz-, Abfall-, Bau- und Naturschutzrecht (s. Kap. 4) sowie ergänzend weitere für die Anwendung innovativer In-situ-Sanierungsverfahren relevante Einzelnormen und Regelwerke. Weiterführende länderspezifische und kommunale Ermächtigungsgrundlagen sind nicht aufgeführt. Generell hat das Verzeichnis keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Es sind die jeweiligen aktuellen Fassungen der Gesetze, Verordnungen und Regelwerke anzuwenden.

Über folgende beispielhafte Links bzw. Internet-Portale sind aktuelle Fassungen bzw. Übersichten verfügbar:

- <http://www.gesetze-im-internet.de/index.html>
Portal des Bundesministeriums der Justiz (Juris) mit Titel- und Volltextsuche zu Bundesgesetzen und Verordnungen
- <https://www.umwelt-online.de/regelwerk/index.htm>
Vorschriften und Regelsammlung Umweltschutz- und Technikrecht (umfangreiche freizugängliche Demoversion)
- <http://www.baua.de> Internetportal der BAUA (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin)
 - z.B. → Themen von A-Z → Gefahrstoffe
 - z.B. → Informationen für die Praxis → Rechtsgrundlagen und Vorschriften
- <http://www.dguv.de>
Internetportal der "Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung – DGUV. Regelwerk der Träger der gesetzlichen Unfallversicherung unter "Medien/Datenbanken":
 - BGVR-Online-Datenbank (gesamtes berufsgenossenschaftliche Vorschriften- und Regelwerk)
 - Regelwerk Sicherheit und Gesundheitsschutz (Vorschriften, Regeln und weitere Publikationen der öffentlichen Unfallversicherungsträger)
- http://www.bgbau-medien.de/site/asp/dms.asp?url=/site/inh_gese.htm
Zugriff auf Gesetze und Regeln zum Arbeitsschutz der BG Bau (BGV, BGI, BGR) und Grundsätze (BGG), sowie Gesetze hierzu
- <http://www.wingis-online.de>
Gefahrstoff-Informationssystem der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft
- http://www.bmu.de/gesetze_verordnungen/aktuell/aktuell/1252.php
Internet-Portal des BMU mit Umweltgesetzen und -verordnungen EU und Bund
- http://www.rechtliches.de/Gesetze_3.html
Gesetze und Vorschriften zum Haushaltsrecht und Bundesvermögen
- <http://frei.bundesgesetzblatt.de/index.php>
Lese-Version des Bundesanzeigers (Bundesgesetzblatt seit 1998)
- <http://www.baurecht.de/gesetze.htm>
Verzeichnis der Bauordnungen des Bundes und des Landes
- http://www.baurecht-dienst.de/html/registrierung/frm1_1.htm
Verlinkung zu Landesbauordnungen (kostenfreier Teil des Rudolf Müller Verlags)

Gesetze und Verordnungen

- Achte Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (Verordnung über das Inverkehrbringen von persönlichen Schutzausrüstungen) (8. GPSGV). Achte Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (Verordnung über das Inverkehrbringen von persönlichen Schutzausrüstungen) in der Fassung der Bekanntmachung vom 20. Februar 1997 (BGBl. I S. 316), geändert durch Artikel 15 des Gesetzes vom 6. Januar 2004 (BGBl. I S. 2)
- Baugesetzbuch (BauGB). Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. September 2004 (BGBl. I S. 2414), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 21. Dezember 2006 (BGBl. I S. 3316)
- Bundesberggesetz (BBergG). Bundesberggesetz vom 13. August 1980, BGBl. I S. 1310, zuletzt geändert durch Artikel 11 des Gesetzes vom 09. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2833)
- Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 23. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3758)
- Elfte Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (Explosionsschutzverordnung) (11. GPSGV). Elfte Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (Explosionsschutzverordnung) vom 12. Dezember 1996 (BGBl. I S. 1914), zuletzt geändert durch Artikel 18 des Gesetzes vom 6. Januar 2004 (BGBl. I S. 2)
- Erste Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (Verordnung über das Inverkehrbringen elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen) (1. GPSGV). Erste Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (Verordnung über das Inverkehrbringen elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen) vom 11. Juni 1979 (BGBl. I S. 629), zuletzt geändert durch Artikel 10 des Gesetzes vom 6. Januar 2004 (BGBl. I S. 2, 219)
- Geräte- und Produktsicherheitsgesetz vom 6. Januar 2004 (BGBl. I S. 2 (219)), zuletzt geändert durch Artikel 3 Abs. 33 des Gesetzes vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970)
- Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG). Arbeitsschutzgesetz vom 07. August 1996 (BGBl. I S. 1246), zuletzt geändert durch Artikel 227 der Verordnung vom 31. Oktober 2006 (BGBl. I S. 2407)
- Gesetz über die Vermeidung und Sanierung von Umweltschäden (Umweltschadensgesetz - USchadG). Umweltschadensgesetz vom 10. Mai 2007 (BGBl. I S. 666), geändert durch Artikel 7 des Gesetzes vom 19. Juli 2007 (BGBl. I S. 1462)
- Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz – BNatSchG). Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542)
- Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Chemikaliengesetz – ChemG). Chemikaliengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 20. Juli 2002 (BGBl. I S. 2090), zuletzt geändert durch Artikel 3 § 2 des Gesetzes vom 13. Dezember 2007 (BGBl. I S. 2930)
- Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG). Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 BGBl. I 1998 S. 502, zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 9. Dezember 2004, BGBl. I S. 3214
- Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutz-Gesetz – BImSchG). Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung vom 26. September 2002 (BGBl. I S. 3830); zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 23. Oktober 2007 (BGBl. I S. 2470)
- Gesetz zur Anpassung des Baugesetzbuches an EU-Richtlinien (Europarechtsanpassungsgesetz Bau – EAG Bau) vom 24. Juni 2004 (BGBl. I S. 1359)
- Gesetz zur Beseitigung von Hemmnissen bei der Privatisierung von Unternehmen und der Förderung von Investitionen (Hemmnisbeseitigungsgesetz) vom 22. März 1991 (BGBl. I S. 766)

- Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG). Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz vom 27. September 1994 (BGBl. I S. 2705, zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 19. Juli 2007 (BGBl. I S. 1462))
- Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushaltes (Wasserhaushaltsgesetz – WHG). Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585)
- Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Umwelthaftung zur Vermeidung und Sanierung von Umweltschäden (Umweltschadensgesetz – USchadG). Umweltschadensgesetz vom 10. Mai 2007 (BGBl. I S. 666)
- Gesetz zur Bereinigung des Bundesrechts im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Rechtsbereinigungsgesetz Umwelt – RGU) vom 11. August 2009 (BGBl. I S. 2723)
- Gesetz über den Zugang zu digitalen Geodaten (Geodatenzugangsgesetz - GeoZG) vom 10. Februar 2009 (BGBl. I S. 278)
- Neunte Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (Maschinenverordnung) (9. GPSGV). Neunte Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (Maschinenverordnung) vom 12. Mai 1993 (BGBl. I S. 704), zuletzt geändert durch Artikel 14 der Verordnung vom 23. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3758)
- Richtlinie 1999/92/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 1999 über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können (Fünfzehnte Einzelrichtlinie im Sinne von Artikel 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG). Abl. L 23/57 vom 28.01.2000
- Richtlinie 2004/35/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. April 2004 über die Umwelthaftung zur Vermeidung und Sanierung von Umweltschäden (Umwelthaftungsrichtlinie, ABI. EG 2004 Nr. L 143, S. 56)
- Richtlinie 2004/35/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. April 2004 über die Umwelthaftung zur Vermeidung und Sanierung von Umweltschäden (Umwelthaftungsrichtlinie, ABI. EG 2004 Nr. L 143, S. 56)
- Richtlinie 94/9/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. März 1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen. Abl. L 100 vom 19.4.1994, S.1, berichtigt durch Berichtigung Abl. L 257 vom 10.10.1996, S. 44 (94/9/EG), berichtigt durch Berichtigung Abl. L 21 vom 26.1.2000, S. 42 (94/9/EG), geändert durch Verordnung (EG) Nr. 1882/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. September 2003, Abl. L 284 vom 31.10.2003, S.1; <http://ec.europa.eu/enterprise/atex/direct/newapproach.htm>
- Sechste Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (Verordnung über das Inverkehrbringen von einfachen Druckbehältern) (6. GPSGV). Sechste Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (Verordnung über das Inverkehrbringen von einfachen Druckbehältern) vom 25. Juni 1992 (BGBl. I S. 1171), zuletzt geändert durch Artikel 6 Abs. 3 der Verordnung vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261)
- Umwelthaftungsgesetz (UmweltHG). Umwelthaftungsgesetz vom 10. Dezember 1990 (BGBl. I S. 2634), zuletzt geändert durch Artikel 9 Abs. 5 des Gesetzes vom 23. November 2007 (BGBl. I S. 2631)
- Umweltinformationsgesetz (UIG). Umweltinformationsgesetz vom 22. Dezember 2004 (BGBl. S. 3704)
- Umweltrahmengesetz (URaG). Umweltrahmengesetz vom 29.06.1990 (GBl. DDR 1990 I S. 649)
- Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung – ArbStättV). Arbeitsstättenverordnung vom 12. August 2004 (BGBl. I S. 2179), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 20. Juli 2007 (BGBl. I S. 1595)
- Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (Baunutzungsverordnung - BauNVO). Baunutzungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. Januar 1990 (BGBl. I S. 132), geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 22. April 1993 (BGBl. I S. 466)

- Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV 2001). Trinkwasserverordnung vom 21. Mai 2001 (BGBl. I S. 959), geändert durch Artikel 363 der Verordnung vom 31. Oktober 2006 (BGBl. I S. 2407)"
- Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz auf Baustellen (Baustellenverordnung – BaustellV). Baustellenverordnung vom 10. Juni 1998 (BGBl. I S. 1283), zuletzt geändert durch Artikel 15 der Verordnung vom 23. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3758)
- Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Benutzung persönlicher Schutzausrüstungen bei der Arbeit (PSA-Benutzungsverordnung - PSA-BV). PSA-Benutzungsverordnung vom 4. Dezember 1996 (BGBl. I S. 1841)
- Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Bereitstellung von Arbeitsmitteln und deren Benutzung bei der Arbeit, über Sicherheit beim Betrieb von genehmigungsbedürftigen Anlagen und über die Organisation des betrieblichen Arbeitsschutzes (Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV). Betriebssicherheitsverordnung vom 27. September 2002 (BGBl. I S. 3777), zuletzt geändert durch Artikel 5 der Verordnung vom 06. März 2007 (BGBl. I S. 261)
- Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen (Biostoffverordnung - BioStoffV). Biostoffverordnung vom 27. Januar 1999 (BGBl. I S. 50), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 06. März 2007 (BGBl. I S. 261)
- Verordnung über Verbote und Beschränkungen des Inverkehrbringens gefährlicher Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse nach dem Chemikaliengesetz (Chemikalien-Verbotsverordnung – Chem-VerbotsV. Chemikalien-Verbotsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 13. Juni 2003 (BGBl. I S. 867), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 12. Oktober 2007 (BGBl. I S. 2382)
- Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV). Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen vom 23. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3758, 3759), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 12. Oktober 2007 (BGBl. I S. 2382)
- Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Artikel 1 der Verordnung zur Neufassung der 4. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes) (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV). Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. März 1997 (BGBl. I S. 504), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 23.10.2007 (BGBl. I S. 2470)
- Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Artikel 1 der Verordnung zur Neufassung der 4. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes) (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV). Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. März 1997 (BGBl. I S. 504), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 23.10.2007 (BGBl. I S. 2470)
- Vierzehnte Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (Druckgeräteverordnung) (14. GPSGV). Vierzehnte Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (Druckgeräteverordnung) vom 27. September 2002 (BGBl. I S. 3777, 3806), geändert durch Artikel 21 des Gesetzes vom 6. Januar 2004 (BGBl. I S. 2)

Technische Regeln Gefahrstoffe

- TRGS 402 "Ermittlung und Beurteilung der Konzentrationen gefährlicher Stoffe in der Luft in Arbeitsbereichen"
- TRGS 403 "Bewertung von Stoffgemischen in der Luft am Arbeitsplatz"
- **TRGS 524 "Schutzmaßnahmen für Tätigkeiten in kontaminierten Bereichen"**
- TRGS 555 "Betriebsanweisung und Unterweisung nach § 20 Gefahrstoff-Verordnung"
- TRGS 900 "Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz"
- TRGS 903 "Biologische Arbeitsplatztoleranzwerte"
- TRGS 905 "Verzeichnis krebserzeugender, erbgutverändernder oder fortpflanzungsgefährdender Stoffe"

Unfallverhütungsvorschriften (UVV) / BGV

- BG-Vorschriften "Grundsätze der Prävention" (BGV A1 - vom 01.01.2004)
- BG-Vorschriften "Arbeitsmedizinische Vorsorge" (BGV A4, ehem. VGB 100)
- BG-Vorschriften "Sicherheitsingenieure und andere Fachkräfte für Arbeitssicherheit" (BGV A6, ehem. VBG 122)
- BG-Vorschriften "Betriebsärzte" (BGV A7, ehem. VBG 123)
- BG-Vorschriften "Sicherheitskennzeichnung am Arbeitsplatz" (BGV A8, ehem. VBG 125)
- BG-Vorschriften "Explosivstoffe und Gegenstände mit Explosivstoff – Allgemeine Vorschrift" (BGV B5, ehem. VBG 55a)
- BG-Vorschriften "Biotechnologie" (BGV C4, ehem. VBG 102)
- BG-Vorschriften "Bauarbeiten" (BGV C22, ehem. VBG 37)

Berufsgenossenschaftliche Regeln und Informationen, Richtlinien, Sicherheitsregeln und Merkblätter

- BG-Regel "Arbeiten in Behältern und engen Räumen" (BGR 117, ehem. ZH 1/77)
- BG-Regel "Laboratorien" (BGR 120, ehem. ZH 1/119)
- BG-Regel "Arbeitsplatzlüftung - Lufttechnische Maßnahmen" (BGR 121, ehem. ZH 1/140)
- **BG-Regel "Kontaminierte Bereiche" (BGR 128, ehem. ZH 1/183)**
- BG-Regel "Ausrüstung von Arbeitsstätten mit Feuerlöschern" (BGR 133, ehem. ZH 1/1/201)
- BG-Regel "Hochziehbare Personenaufnahmemittel" (BGR 159, ehem. ZH 1/461)
- BG-Regel "Bauarbeiten unter Tage" (BGR 160, ehem. ZH 1/486)
- BG-Regel "Arbeiten im Spezialtiefbau" (BGR 161, ehem. ZH 1/492)
- BG-Regel "Einsatz von Schutzkleidung" (BGR 189, ehem. ZH 1/700)
- BG-Regel "Benutzung von Atemschutzgeräten" (BGR 190, ehem. ZH 1/701)
- BG-Regel "Benutzung von Fuß- und Beinschutz" (BGR 191, ehem. ZH 1/702)
- BG-Regel "Benutzung von Augen- und Gesichtsschutz" (BGR 192, ehem. ZH 1/703)
- BG-Regel "Benutzung von Kopfschutz" (BGR 193, ehem. ZH 1/704)
- BG-Regel "Einsatz von Schutzhandschuhen" (BGR 195, ehem. ZH 1/706)
- BG-Regel "Benutzung von Hautschutz" (BGR 197, ehem. ZH 1/708)
- BG-Regel "Benutzung persönlicher Schutzausrüstungen gegen Absturz" (BGR 198, ehem. ZH 1/709)
- BG-Informationen "Fahrerkabinen mit Anlage zur Atemluftversorgung auf Erdbaumaschinen und Maschinen des Spezialtiefbaus" (BGI 581, ehem. ZH 1/184)
- BG-Informationen "Verzeichnis zertifizierter Atemschutzgeräte" (BGI 693, ehem. ZH 1/606)

DIN-Normen

Bezugsquelle: Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10772 Berlin

- EN 141 bzw. DIN 31 81 Atemgeräte, Atemfilter für Atemschutzgeräte, Teile 1-3
- DIN 48 43 Schutzschuhe, Sicherheitstechnische Anforderungen, Prüfung
- DIN 32762 Chemikalien-Schutzanzüge TYP 1, Sicherheitstechnische Anforderungen, Prüfung
- DIN 58 645 Atemgeräte, vollständige Atemschutzgeräte, Teile 1 und 5
- DIN EN 60335-2-69 Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke - Teil 2-69: Besondere Anforderungen für Staub- und Wassersauger einschließlich kraftbetriebener Bürsten für industrielle und gewerbliche Zwecke

Arbeitsschutz bei Arbeiten in kontaminierten Bereichen

Spätestens mit dem Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) ist die "Beurteilung der Arbeitsbedingungen" das bestimmende Element des Schutzes der Beschäftigten vor Unfällen, Berufskrankheiten und sonstigen arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren. Häufig wird verkürzt auch der Begriff der "Gefährdungsbeurteilung" verwendet, der aber nur einen Teil dessen umschreibt, was das ArbSchG erreichen möchte: zur Durchführung einer Arbeit sind stets verschiedene Tätigkeiten auszuführen, und für jede einzelne Tätigkeit ist eine Gefährdungsbeurteilung anzufertigen. Daher umfasst der Begriff der "Beurteilung der Arbeitsbedingungen" die Summe aller einzelnen Gefährdungsbeurteilungen. Dafür sind z.B. neben den stoffbezogenen oder arbeitsmittelbezogenen Gefährdungen auch die Faktoren einzubeziehen, die die Art und Höhe der jeweiligen Gefährdung, z.B. die Höhe einer Gefahrstoffexposition oder die Wahrscheinlichkeit, sich an einer Kreissäge den Finger abzuschneiden, bestimmen oder zumindest beeinflussen - in diesem Fall z.B. die Temperatur im Arbeitsbereich bzw. der fehlende Schiebestock.

Für die wesentlichsten "Gefährdungsarten" gibt es entsprechende Gesetze, Verordnungen und dazugehörige technische Regeln:

Die **Betriebsicherheitsverordnung (BetrSichV)** und ihre **Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS)** regeln den Bereich des Einsatzes von Arbeitsmitteln (Werkzeuge, Geräte, Maschinen) sowie auch den sicheren Betrieb von Anlagen, damit auch Anlagen zur Sanierung von Böden, Grundwasser oder Bodenluft, incl. des betreffenden anlagenbezogenen Explosionsschutzes, wenn in diesen Anlagen brennbare Stoffe vorhanden sind.

Im Hinblick auf die Beschaffenheit einer "sicheren" Sanierungsanlage sind die Regelungen nach dem **Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (GPSG)**, den verschiedenen "**GPSGV**"-**Verordnungen** heranzuziehen, insbesondere die Nummern **9. "Maschinenverordnung"**, **11. "Explosionsschutzverordnung"** und **14. "Druckgeräteverordnung"**.

Die **Biostoffverordnung (BioStoffV)** und ihre **Technische Regeln für biologische Arbeitsstoffe (TRBA)** regeln die Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen, also insbesondere Bakterien, Viren; Pilze sowie die sogenannten "humanpathogenen Endoparasiten", wie Würmer, Amöben und dergleichen. Die BioStoffV unterscheidet zwischen "gezielten" und "nicht gezielten" Tätigkeiten, d.h. zwischen solche Tätigkeiten, die auf bekannte Mikroorganismen ausgerichtet sind ("Labor") und, einfach gesagt, den "anderen" Tätigkeiten. Dazu gehört schon die Ausführung von Erdarbeiten, da hier ja bekanntlich der Tetanuserreger vorhanden sein kann. Somit gehört die Ermittlung, ob bei den Tätigkeiten zur Einrichtung und Betrieb einer Sanierungsanlage stets auch die Gefährdungsbeurteilung in Bezug auf biologische Arbeitsstoffe. Dies gilt insbesondere dann, wenn biologische Verfahren eingesetzt wer-

den (auch "Dünger" kann verkeimen) oder sich bei anderen Verfahren biologische Arbeitsstoffe bilden könnten, von denen eine Gefährdung ausgehen könnte.

Die **Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)** und ihre **Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS)** regeln die Tätigkeiten mit Gefahrstoffen, sowohl dann, wenn die Tätigkeiten direkt mit Gefahrstoffen ausgeführt werden, als auch Tätigkeiten im Gefahrenbereich. Dabei sind in der die Einrichtung und Betrieb von Sanierungsanlagen entsprechenden Gefährdungsbeurteilung nicht nur die Gefahrstoffe zu berücksichtigen, die als Input, als "Kontaminant" in die Anlage gehen, sondern auch diejenigen, die – soweit ermittelbar – im Verfahrensprozess als Zwischen- oder Endprodukte entstehen, als auch diejenigen, die im Verfahren als Lösemittel, Reaktanden oder dergleichen eingesetzt werden. Eine der wesentlichen Bestimmungen der GefStoffV ist die Pflicht zur Erstellung und Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung "ab einem Beschäftigten."

Da der Ort der Einrichtung oder des Betriebes einer Sanierungsanlage stets auch eine Arbeitsstätte ist und die mangelhafte Einrichtung einer Arbeitsstätte ebenfalls Gefährdungen verursachen kann (z.B. mangelhafte Verkehrswege – "Stolpern, Stürzen", fehlende Hygieneeinrichtungen), sind auch die **Arbeitsstättenverordnung** mit ihren **Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR)** zu beachten. Die neuen ASR lösen nach und nach die ehemaligen "Arbeitsstättenrichtlinien" ab.

Bei den stets mit einer Exposition zu Gefahrstoffen verbundenen Tätigkeiten zur Einrichtung und Betrieb von Sanierungsanlagen die **Persönliche Schutzausrüstung-Benutzungsverordnung (PSA-BV)** anzuwenden. Sie formuliert die grundsätzlichen Anforderungen an Arbeitgeber und Arbeitnehmer bzgl. Bereitstellung und Umgang (Lagerung, Wartung), Auswahl und Anwendung von Persönlicher Schutzausrüstung. Darüber hinaus führt die PSA-BV die Verpflichtung ein, die Gefährdungsbeurteilung nicht nur für die Einzelkomponenten (siehe die verschiedenen Regeln für den Einsatz von PSA - BGR 189 ff) durchzuführen, sondern stets das Gesamtpaket an benutzter Persönlicher Schutzausrüstung und die evtl. daraus entstehende Gefährdung zu betrachten, z.B. in der Kombination "Schutzbrille und Halbmaske" behindert oft zumindest die Halbmaske die Funktion der Schutzbrille.

Weiter ist auch die **Arbeitsmedizinvorsorgeverordnung (ArbMedVV)** wesentlich, in der zwischenzeitlich alle die die arbeitsmedizinische Vorsorge betreffenden Bestimmungen aus anderen Verordnungen zusammengeführt wurden, sowie Und nicht zuletzt wäre noch das **Arbeitszeitgesetz** zu nennen, denn Gefährdung entsteht auch durch nicht an die Arbeitsbedingungen angepasste Arbeitszeit.

Die bisher genannten staatlichen Vorschriften des Arbeitsschutzes hatten als Normadressaten den "Arbeitgeber" mit Ausnahme der GefStoffV, die sich im § 17 auch an Auftraggeber

wendet. Eine Arbeitsschutzverordnung, die sich in ihren grundsätzlichen Forderungen hauptsächlich an den Auftraggeber ist die **Baustellenverordnung (BaustellV)**. Sie betrifft im Wesentlichen die Phase der Einrichtung der Sanierungsanlagen, insbesondere die notwendigen Erd- und Bohrarbeiten, sowie den Aufbau der Anlagen. Auch wenn die BaustellV den Begriff der Gefährdungsbeurteilung nicht nennt, bedeutet der dort verankerte Hinweis auf den § 4 ArbSchG auf die systemimmanente Notwendigkeit zur Durchführung der Gefährdungsbeurteilung durch den Auftraggeber, denn wie soll sonst der "Kordinator der Planungsphase" als Planer und damit Auftraggeber-Vertreter Gefährdungen erkennen, geschweige denn "vermeiden" bzw. "minimieren" (siehe §4 ArbSchG).

Die staatlichen Vorschriften und ihre technischen Regeln sind stets aktuell über die Internetadresse des Bundesamtes für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAUA): www.baua.de erhältlich.

Als weitere Hilfe für den Arbeitgeber, aber auch für den Auftraggeber und Planer, die Anforderungen des staatlichen Vorschriftenwerkes bzgl. Gefährdungsermittlung und -beurteilung, Auswahl von Schutzmaßnahmen, Auswahl und Umgang mit Persönliche Schutzausrüstung u.v.a.m. ist das **Vorschriften und Regelwerk der Träger der gesetzlichen Unfallversicherung** (insbesondere Gewerbliche Berufsgenossenschaften, Unfallkassen der öffentlichen Hand) zu betrachten.

Als für Einrichtung und Betrieb von Sanierungsanlagen wesentliche **Berufsgenossenschaftliche Vorschriften - BGV** sind zu nennen

- BGV A1 - "Grundsätze der Prävention"
 - BGV A8 - "Sicherheitskennzeichnung am Arbeitsplatz"
 - BGV C22 - "Bauarbeiten", zzgl. insbesondere der anlagenbezogenen Vorschriften
- BG-Vorschriften, aber auch das staatliche Vorschriftenwerk wird konkretisiert auf spezielle Anwendungsbereiche durch die sogenannten **Berufsgenossenschaftlichen Regeln und Informationen (BGR bzw. BGI)**. So werden z.B. Einsatzbedingungen und Umgang mit allen Arten der Persönlichen Schutzausrüstungen in einzelnen BG-Regeln beschrieben (BGR 189 ff) oder in BGI Handlungshilfen für die Gefährdungsbeurteilung für verschiedene Tätigkeiten gegeben, z.B. BGI 833 " Handlungsanleitung zur Gefährdungsbeurteilung und Festlegung von Schutzmaßnahmen bei der Kampfmittelräumung" oder die Handlungsanleitungen der BG Chemie unter www.bgchemie.de.

Für Arbeiten in kontaminierten Bereichen ganz speziell gilt die **BGR 128 – "Kontaminierte Bereiche"**. Sie formuliert im Wesentlichen Aufgaben und Pflichten von Auftraggeber und Auftragnehmer bei Planung und Ausführung von Arbeiten in kontaminierten Bereichen, sowie Standards bei Baustelleneinrichtung und Schutzmaßnahmen (z.B. Schwarz-Weiß-Einrichtungen, Anlagen zur Atemluftversorgung für Erdbaumaschinen und Fahrzeuge nach BGI 581). Ein wesentlicher Bestandteil der BGR 128 ist die Forderung nach dem Nachweis der Sachkunde für Arbeiten in kontaminierten Bereichen und die Formulierung von Anforderungen für entsprechende Sachkunde-Lehrgänge. Bei der Anwendung der BGR 128 auf die in dieser Arbeitshilfe angesprochenen Tätigkeiten ist maßgeblich zu beachten, dass die BGR 128 ausschließlich auf die zur Einrichtung der Sanierungsanlagen auszuführenden Erkundungs- und Bauarbeiten anzuwenden ist (z.B. Erd- und Bohrarbeiten, Errichtung der Anlagen vor-Ort) anzuwenden ist, nicht aber auf den Betrieb der Anlagen, der allein über die BetrSichV und im Kontext dieser Arbeitshilfe im Zusammenhang mit der GefStoffV oder der BioStoffV geregelt wird.

Nach derzeitigem Stand der Rechtslage bestehen 2 Regeln für Arbeiten in kontaminierten Bereichen - die BGR 128 und die TRGS 524. Die seit Februar 2010 vorliegende **TRGS 524 – Schutzmaßnahmen für Tätigkeiten in kontaminierten Bereichen** – (GMBI Nr. 21 vom 1. April 2010, S. 419) ist eine Fortschreibung der TRGS 524 – "Sanierung und Arbeiten in kontaminierten Bereichen" – und beruht auf der berufsgenossenschaftlichen Regel "Kontaminierte Bereiche" (BGR 128). Diese TRGS gilt für Arbeiten in kontaminierten Bereichen einschließlich Vor- und Nacharbeiten. Sie konkretisiert die in § 7 Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) geforderte Informationsermittlung, beschreibt die Methodik zur Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten in kontaminierten Bereichen und stellt Grundanforderungen an die Auswahl der Schutzmaßnahmen. Branchen- oder tätigkeitsspezifische Lösungen, wie sie z.B. Regeln und Handlungsanleitungen der Unfallversicherungsträger, Richtlinien der Schadenversicherer, LASI-Leitfäden und anderen Schriftenreihen von Landesbehörden und Fachverbänden enthalten, sind als konkrete Hilfestellung zu betrachten, soweit sie sich auf die TRGS als Grundlage beziehen.

Zu beachten ist, dass bei Arbeiten in kontaminierten Bereichen neben den in der TRGS behandelten Gefährdungen durch Gefahrstoffe auch Gefährdungen durch biologische Arbeitsstoffe eintreten können. Für diesen Fall wird auf die BioStoffV und die entsprechenden Technischen Regeln für biologische Arbeitsstoffe (TRBA) sowie auf Informationen und Handlungsanleitungen der Träger der gesetzlichen Unfallversicherung verwiesen.

Das Regelwerk der Träger der gesetzlichen Unfallversicherung findet sich aktuell unter der Internetadresse der "Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung – DGUV“

<http://www.dguv.de> unter dem Link "Medien/Datenbanken".

Bei den Arbeiten zur Einrichtung der Sanierungsanlagen ist auch das eventuelle Vorhandensein von Kampfmitteln zu berücksichtigen. Wie bei jeder Baumaßnahmen empfiehlt es sich, bei den zuständigen Ordnungsbehörden (Polizei, Kampfmittelräumdienste der Länder) im Hinblick auf "Kampfmittelfreiheit" nachzufragen.

