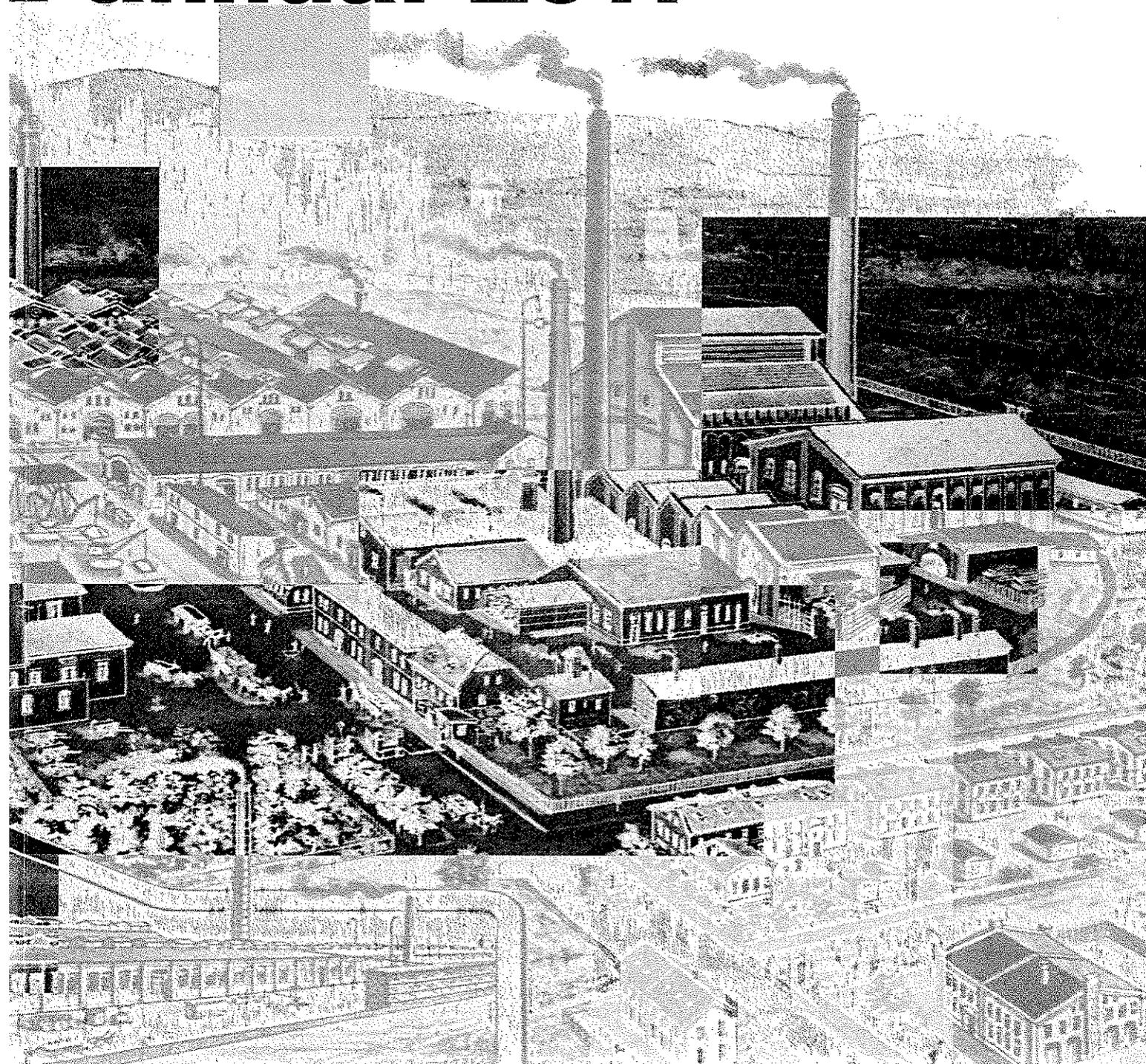


Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie

HESSEN



# Altlasten- annual 2011



# Innovative In-situ-Sanierungsverfahren - die ITVA-Arbeitshilfe zur Unterstützung bei der Altlasten- sanierung

HANS-PETER KOSCHITZKY

## 1 Veranlassung und Zielsetzung

Das Problem der Altlasten und Schadensfälle beschäftigt uns in Deutschland seit über zwanzig Jahren und wird uns noch lange beschäftigen. Auch wenn in der öffentlichen und politischen Diskussion andere Themen im Vordergrund stehen, gibt es nach wie vor zahlreiche schwierige Schadensfälle z. B. unter Gebäuden, in großen Tiefen, in stark heterogenen Untergrundstrukturen oder mit komplexen Belastungssituationen, für deren Sanierung Lösungen erforderlich sind. Andererseits gibt es bereits lang laufende Sanierungen, deren Sanierungserfolg zeitlich nicht absehbar ist oder aus ökonomischen wie auch ökologischen Gründen kritisch hinterfragt werden muss.

Zur Unterstützung der Altlastensanierung und zur Lösung einiger Problemfälle können spezielle – innovative – In-situ-Sanierungsverfahren einen wertvollen Beitrag leisten. Diese Sanierungsverfahren machen sich komplexe physikalische, chemische und biologische Vorgänge zu Nutze. Sie stellen einen hohen Anspruch an den Planer, an den Ausführenden aber auch an die Genehmigungsbehörden. Sie bieten – einen sorgfältigen und sachgerechten Einsatz vorausgesetzt – ein hohes und erfolgversprechendes Sanierungspotential. Sie stellen aber weder Patentlösungen dar noch gibt es ein „Universalverfahren“ zur Lösung der vielfältigen Probleme. Vielmehr müssen die Auswahl und der Einsatz in jedem Einzelfall sehr sorgfältig erfolgen. Dabei müssen insbesondere auch ihre Einsatzbereiche und Anwendungsgrenzen beachtet werden, denn ein falscher Einsatz kann durchaus Gefahren im Sinne einer Verschlechterung der Altlastensituation mit sich bringen.

In den letzten Jahren werden zunehmend, oft basierend auf „Erfahrungen“ in den USA, „innovative“ In-

situ-Sanierungsverfahren angeboten. Die Beurteilung der Einsatzfähigkeit eines Verfahrens ist häufig auf Grund der Firmenunterlagen der Anbieter und mangelnder nachvollziehbarer Referenzen nicht sachgerecht möglich. Die Anwendungsbereiche, Anwendungsvoraussetzungen und –grenzen der Verfahren sind nicht wertfrei und 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 einer genauen, bisher leider oft fehlenden Detailkenntnis der Verfahren und einer neutralen fachlichen Beurteilung. Im Vorfeld der Verfahrensauswahl bedarf es oft auch einer zusätzlichen Standort(nach) erkundung. Fallweise sind auch ergänzende Voruntersuchungen für den Einsatz eines Verfahrens und der jeweils speziellen Bedingungen eines Standorts erforderlich oder zu empfehlen, um einen optimalen und erfolgreichen Einsatz sicher zu stellen. Beides wird leider oft aus Kostengründen nicht durchgeführt, obwohl die Kosten einerseits nur einen Bruchteil der späteren Sanierung betragen und andererseits dies zu einem sowohl ökonomischen als auch effizienten Verfahrenseinsatz führen würde.

Der Arbeitskreis „Innovative In-situ-Sanierungsverfahren“ im ITVA-Fachausschuss H1 „Technologien und Verfahren“ hatte sich daher zum Ziel gesetzt, den Entwicklungsstand und die bisherigen „Praxiserfahrungen“ bei der Anwendung innovativer In-situ-Sanierungsverfahren und ihre Einsatzmöglichkeiten und –grenzen kritisch zu hinterfragen, aufzuzeigen und in systematischer Form darzustellen. Er will mit dieser Arbeitshilfe auch dazu beitragen, dass diese Verfahren bei der Altlastensanierung vermehrt eingesetzt werden.

## 2 Zielgruppe

Die Arbeitshilfe soll – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – einen unabhängigen und ausgewogenen Überblick über eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren (Verfahrensprinzipien) vermitteln. Bei der Auswahl der Verfahren wurden vorrangig Verfahren berücksichtigt, die hinsichtlich ihres Entwicklungsstandes zumindest in einer Pilotanwendung im Feld getestet wurden und hinreichend dokumentiert sind.

Die Arbeitshilfe richtet sich an Fachleute und Sachverständige in Ingenieurbüros und Behörden sowie an Sanierungspflichtige. Sie soll dazu beitragen, über die Vielzahl der Verfahren zu informieren und die Prüfung der Eignung innovativer In-situ-Sanierungsverfahren im jeweiligen Einzelfall zu erleichtern, um eine qualifizierte Auswahl und Anwendung zu ermöglichen. Die Arbeitshilfe soll auch dazu beitragen, die Akzeptanz der In-situ-Sanierungsverfahren zu erhöhen und Gedankenanstöße für ihre zukünftige Anwendung zu liefern.

## 3 Aufbau und Gliederung

Ausgehend von einer Einführung in die Problematik werden die wesentlichen mit der Thematik verbundenen Fachbegriffe definiert. Auf die rechtlichen Grundlagen und Besonderheiten beim Einsatz wird verwiesen. Die grundsätzlichen Anwendungsvoraussetzungen bzw. Planungsgrundlagen werden erläutert.

Das zentrale Element der Arbeitshilfe bildet die Beschreibung und Bewertung der ausgewählten In-situ-Sanierungsverfahren mittels standardisierter Verfahrensblätter. Sie enthalten Angaben zu den wirksamen Prozessen, dem technischen Aufbau (Verfahrenskomponenten und besondere Verfahrenscharakteristika), spezifischen Planungsgrundlagen, Anwendungsbereichen und -grenzen, Besonderheiten, Risiken, Entwicklungsstand, Referenzen, relevanten Fundstellen aktueller Literatur sowie abschließend eine Bewertung durch den Arbeitskreis.

Im Schlusskapitel der Arbeitshilfe werden aus Sicht des Arbeitskreises die bisherigen Erfahrungen bei der Anwendung der vorgestellten In-situ-Sanierungsver-

fahren zusammengefasst sowie Defizite und der weitere Entwicklungsbedarf genannt.

## 4 Definitionen und Begriffe

Da sich im allgemeinen Sprachgebrauch der „Altlastenszene“ eine Vielzahl ähnlicher Begriffe und Formulierungen finden und diese oft unterschiedlich angewendet werden, werden in der Arbeitshilfe die wichtigsten bzw. häufig vorkommende Begriffe erläutert und so weit möglich definiert. Dies umfasst Begriffe wie Sanierungsmaßnahmen, Regel oder Stand der Technik, über praxisreif, Pilotversuch bis hin zu In-situ-Sanierungsverfahren.

Z. B. ist wichtig zu definieren, was versteht man unter „innovativen“ In-situ-Sanierungsverfahren. Dies sind nach dem Verständnis des Arbeitskreises 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. Die Arbeitshilfe kann hierzu einen Beitrag leisten.

## 5 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. Zu letzterem finden sich ebenfalls im Anhang der Arbeitshilfe genauere Ausführungen.

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. Auch muss der Sicherheit von Sanierungsanlagen unter Beachtung des Geräte- und Produktsicherheitsgesetzes GPSG in Zukunft mehr Bedeutung beigemessen werden, wie jüngste Fachbeiträge im „altlastenspektrum“ oder beim Altlastensymposium 2011 in Magdeburg deutlich machen.

Um die Arbeitshilfe im Textteil nicht zu überladen, wurde auf vertiefende Ausführungen zu den rechtlichen Rahmenbedingungen bei In-situ-Sanierungsmaßnahmen verzichtet, jedoch wurde ein Verzeichnis relevanter Rechtsnormen und Regelwerke als Anhang aufgenommen.

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

## 6 Verfahrenssystematik

In-situ-Sanierungsverfahren können zur Sanierung in der ungesättigten Bodenzone, im Grundwasserschwankungsbereich und in der gesättigten Bodenzone (Grundwasserleiter bzw. Aquifer) eingesetzt werden. Sie beruhen sowohl auf physikalischen, chemischen als auch auf biologischen Prozessen.

Physikalische und chemische Prozesse führen zu einer Entfernung, Umwandlung (Oxidation, Reduktion) oder Immobilisierung (Fällung, Sorption) der Schadstoffe im Untergrund. Biologische Prozesse können nicht nur abbaubare Schadstoffe eliminieren, sondern auch physikalisch-chemische Prozesse initiieren oder unterstützen. Umgekehrt treten biologische Abbaureaktionen als „Sekundäreffekte“ beim Einsatz physikalischer oder chemischer Verfahren auf. Insofern handelt es sich bei biologischen In-situ-Verfahren z. T. eher um Verfahrenskombinationen, die zusammen mit konventionellen Techniken eingesetzt werden (können).

Unter dem Begriff „Innovative In-situ-Sanierungsverfahren“ sammeln sich Techniken und Technologien, die zum einen Methoden zur Leistungssteigerung klassischer Verfahren (z. B. Pump&Treat, P&T, Bodenluft-Absaugung, BLA) zum anderen aber auch weitgehend eigenständige Verfahren zur Herdsanierung (Quellensanierung) oder zur Abstromsicherung darstellen.

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 Aufhei-

zen des Bodens – zur Verfügung. Für hydraulische Verfahren auf der Basis des klassischen Pump-and-Treat (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 (Abwasseraufbereitung, Abluftreinigung) und dann entsorgt werden müssen (z. T. Sonderabfälle).

Einen völlig anderen Ansatz verfolgen die chemischen und mikrobiologischen In-situ-Sanierungsverfahren, die auf der In-situ-Umwandlung der Schadstoffe in unschädliche Produkte beruhen und somit keine ergänzende/zusätzliche Reinigungstechnik benötigen. Allerdings sind die Einsatzmöglichkeiten biologischer Verfahren im Schadensherd (Quellensanierung) aufgrund der sehr hohen Schadstoffgehalte begrenzt. Diese Verfahren eignen sich vorwiegend zur so genannten Fahnenanierung und werden heute oft als ENA-Maßnahme/Verfahren (ENA = Enhanced Natural Attenuation) bezeichnet. Als Verfahren zur Abstromsicherung und passiven Grundwassersanierung werden die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten von durchlässigen Reinigungswänden (PRB, Permeable Reactive Barriers) beschrieben.

Die Arbeitshilfe umfasst im Einzelnen folgende Verfahren:

## 6.1 Physikalische Verfahren

Physikalische Vorgänge führen zu einer Änderung der Lage und der äußeren Form eines Stoffes. Dabei kann es sich um die Änderung des Aggregatzustandes (flüssig – gasförmig), die Mobilisierung (Veränderung des Strömungsverhaltens, in Bewegung bringen) 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 Um-

bau- oder Abbauprozesse bereits im Untergrund die Masse der Schadstoffe verringert wird, führt die Anwendung aller physikalischer In-situ-Sanierungsverfahren zu einer Erhöhung der Mobilität der Schadstoffe im Untergrund. Ziel ist es, die Schadstoffe besser austragen zu können. Im Gegensatz zu den biologischen und chemischen In-situ-Sanierungsverfahren findet die eigentliche Massenreduzierung der Schadstoffe aus der Umwelt dann on-site z. B. in der Wasseraufbereitungsanlage statt.

### 6.1.1 Physikalische Verfahren für die ungesättigte Bodenzone

Dies umfasst das zwischenzeitlich durch zahlreiche Pilotierungen und Anwendungen zur Praxistauglichkeit entwickelte Verfahren der „Thermisch Unterstützten Boden-Luft-Absaugung (mittels Dampf-Luft-Injektion DLI) – TUBA“, die „Thermische In-situ-Sanierung mit Festen Wärmequellen – THERIS“, die aus den USA bekannte „Multi-Phase-Extraction“ und „Dual Phase Extraction (Zwei- und Mehr-Phasen-Extraktion)“ und das Verfahren der „Elektrokinetik“.

### 6.1.2 Physikalische Verfahren für die gesättigte Bodenzone

Hier befasst sich die Arbeitshilfe mit dem zwar seit langem bekannten, aber wenig oder oft unter ungünstigen (falschen) Randbedingungen und daher mit unbefriedigendem Erfolg angewendeten Airsparging und der analog zum TUBA-Verfahren praxisreifen Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Bodenzone (DLI), die insbesondere für die Sanierung von CKW-Schadstoffquellen ein hohes Potential hat. Jüngste positive Erfahrungen beim erstmaligen Einsatz der Dampf-Luft-Injektion in einem Kluftgesteinsaquifer im Rahmen eines Pilotprojektes bei einem CKW-Schadensfall zeigen neue Anwendungsgebiete dieses Verfahrens auf.

Auch das in Deutschland bisher noch nicht bei einer Sanierung angewendete neue Verfahren der Alkoholspülung (Alkoholcocktail) wurde mit in die Arbeitshilfe aufgenommen, da die Technologieentwicklung als abgeschlossen betrachtet werden kann.

Darüber hinaus werden die auch in Deutschland schon eingesetzte Tensidspülung, der Einsatz von

## Physikalische Verfahren

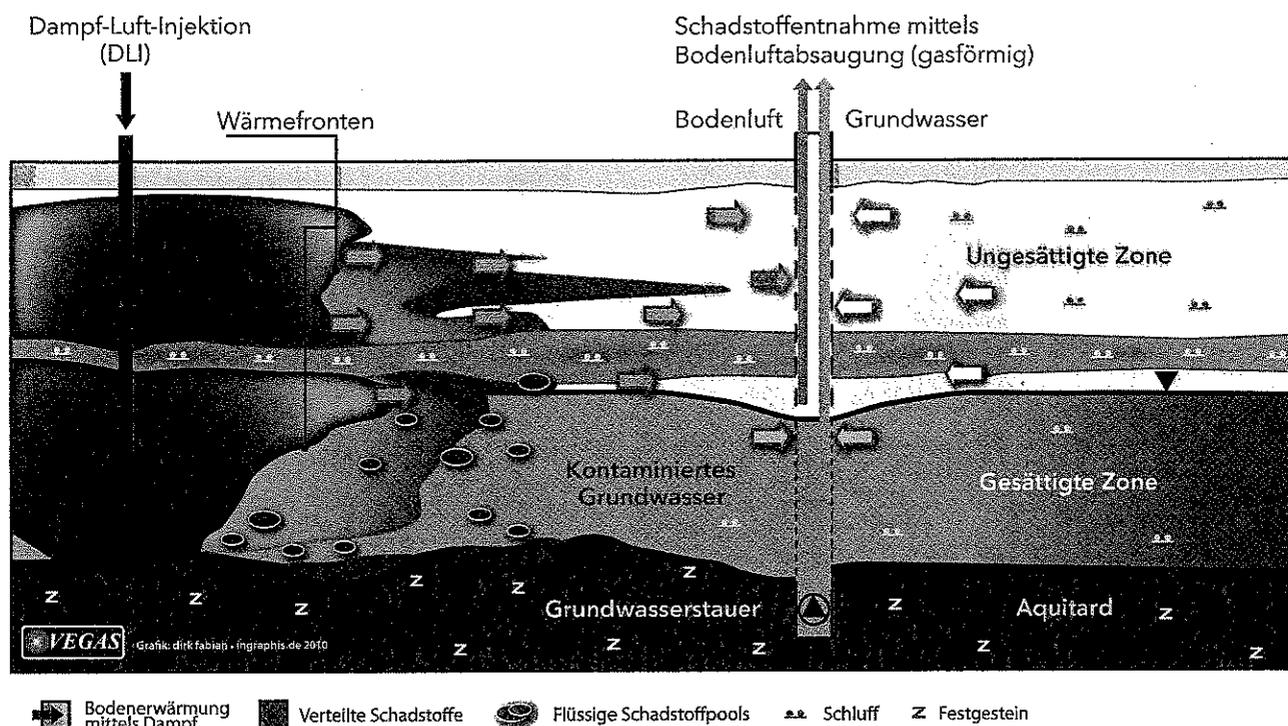


Abb. 1: Thermische Verfahren für die ungesättigte und gesättigte Bodenzone.

Huminstoffen als Bio-Sorptionssperre sowie das Geoschock- und Hydroschock-Verfahren dargestellt.

Mit Ausnahme von Airsparging, das klassischer Weise in der Schadstofffahne zur Anwendung kommt, sind fast alle genannten physikalischen Verfahren zur Anwendung im Quellbereich der gesättigten Zone vorgesehen.

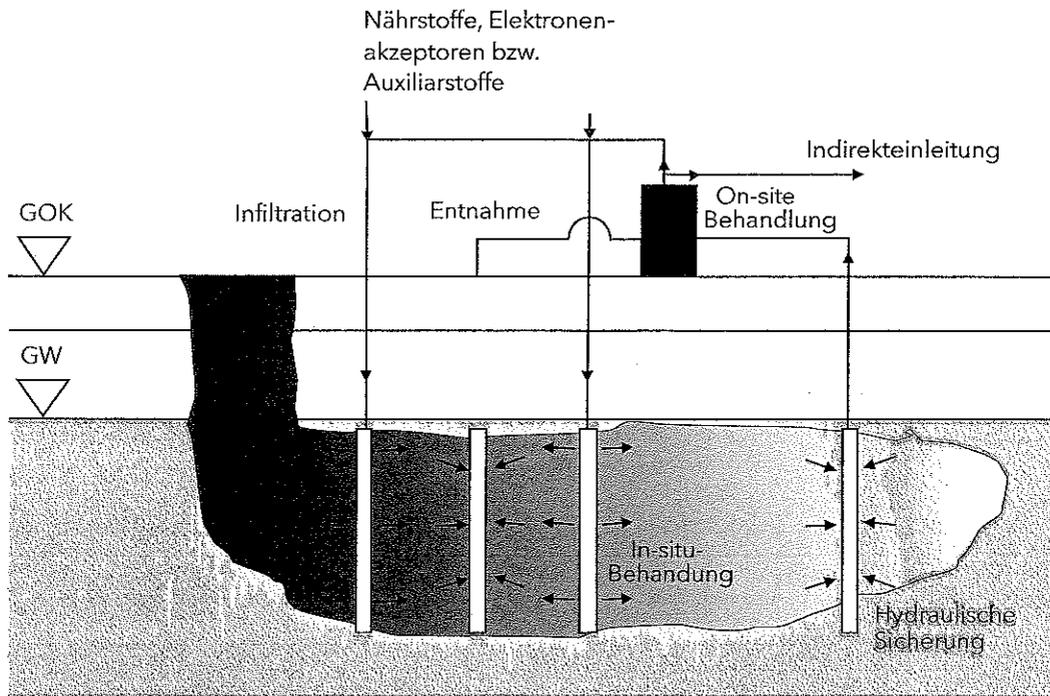
## 6.2 Biologische Verfahren

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 biolo-

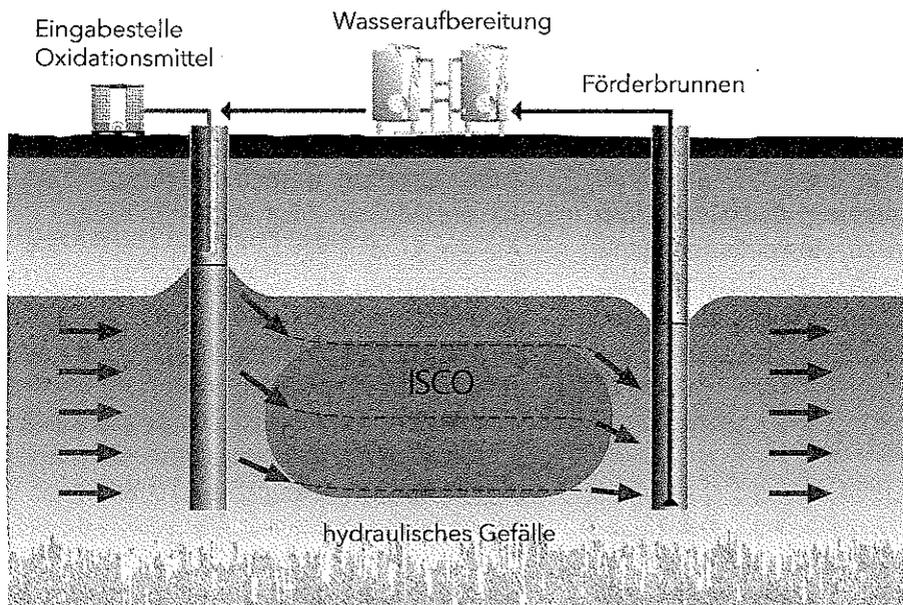
gischen In-situ-Sanierungsverfahren ist, dass die Schadstoffe durch die Mikroorganismen im Grundwasser abgebaut werden und daher nicht gefördert und on-site abgereinigt werden müssen.

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 z. B. 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. Durch die zugesetzten Nährstoffe können sich die autochthonen (= am Standort vorhandenen) Mikroorganismen vermehren und somit den Schadstoffabbau beschleunigen. Im

## Biologische Verfahren



**Abb. 2:** Kombination aus hydraulischer Förderung mit physikalischer On-site-Wasserreinigung und biologischem In-situ-Sanierungsverfahren.



**Abb. 3:** Prinzipskizze ISCO-Verfahren (Züblin Umwelttechnik GmbH, 2010, textlich ergänzt).

Regelfall ist kein Zusatz von gezüchteten Mikroorganismen notwendig.

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

### 6.2.1 Aerobe und anaerobe Verfahren

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. Zur Einstellung anaerober Bedingungen ist der Zusatz von Elektronendonatoren erforderlich.

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. Aufgrund der unterschiedlichen Wirkweise lassen sich die Verfahren wie folgt einordnen:

### 6.2.2 Stimulierung des Abbaus von Kohlenwasserstoffen durch Zugabe von Elektronenakzeptoren

Hierzu werden die Verfahren beschrieben: Biosparging und Wasserstoffperoxid ( $H_2O_2$ )-Zugabe zum aeroben Abbau organischer Schadstoffe, Nitratzugabe zum anaeroben Abbau organischer Schadstoffe, ORC®, iSOC™, Oxytec als Verfahren für den aeroben Abbau von Kohlenwasserstoffen und das Oxywall-Verfahren für den aeroben Abbau nicht chlorierter organischer Schadstoffe.

### 6.2.3 Stimulierung des Abbaus chlorierter Kohlenwasserstoffe durch Zugabe von Elektronenakzeptoren

Die Arbeitshilfe enthält Verfahrensblätter zur Zugabe von Melasse, organischen Säuren, Alkoholen und HRC® für den anaeroben LCKW-Abbau (reduktive Dechlorierung) und ein Verfahren zur Stimulierung des Abbaus niedrig chlorierter Kohlenwasserstoffe (oxidative Dechlorierung) mit Sauerstoff als Elektronenakzeptor und Methan (Methan-Biostimulation).

## 6.3 Chemische Verfahren

### 6.3.1 In-situ-chemische-Oxidation - ISCO

Unter In-situ-chemischer-Oxidation (ISCO) versteht man Sanierungsverfahren, die in Nordamerika und in Europa in den letzten Jahren relativ große Aufmerksamkeit erfahren haben, u. a. weil die Verfahren für eine relativ große Anzahl von Schadstoffgruppen und Standortbedingungen einen viel versprechenden Ansatz darzustellen scheinen.

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 (s. Abb. 3).

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 u. a. von der Auswahl des am besten geeigneten Oxidationsmittels oder einer Kombination von Oxidationsmitteln abhängt.

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.

Die technische Machbarkeit und Realisierbarkeit einer ISCO-Anwendung ist sehr sorgfältig und standortbezogen zu bewerten, wobei generell die Lithologie, der Chemismus der Matrix, das Schadstoffprofil, die spezifischen Eigenschaften des einzusetzenden Oxidationsmittels und 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 verschiedenen Verfahrensdatenblättern daher separat diskutiert. Sie umfassen den Einsatz von Kalium-/Natriumpermanganat, Fentons Reagenz, Persulfat und Ozon.

### 6.3.2 In-situ-chemische-Reduktion

In durchströmten Reinigungswänden (PRB Permeable Reactive Barriers) wird insbesondere in den USA seit vielen Jahren elementares Eisen (Fe<sup>0</sup>-Wände) zur chemischen In-situ-Reduktion z. B. von chlorierten Kohlenwasserstoffen eingesetzt. Metallisches Eisen ist ein wirksames Reduktionsmittel, das sowohl für organische als auch für anorganische Kontaminanten, wie beispielsweise Chrom und Arsen, geeignet ist.

Aus Übersee kommend wird seit wenigen Jahren der In-situ-Einsatz (Injektion einer Suspension) von Eisen-Partikeln zur In-situ-Grundwassersanierung von einigen Anbietern propagiert die dies weltweit bereits auf zahlreichen Standorten eingesetzt haben. In Deutschland und teilweise im europäischen Ausland wird unter dem Begriff Eisen-Partikel vor allem Nano-Eisen bzw. Mikro-Eisen verstanden. Der Einsatz als In-situ-Sanierungsverfahren wird z. T. noch kontrovers diskutiert. In Deutschland werden dazu zurzeit auch einige große nationale und europäische F&E Vorhaben durchgeführt, die sich u. a. mit der Entwicklung neuer und der Optimierung der injizierbaren Eisen-Partikel befassen (s. z. B.: <http://www.nanopartikel.info>, <http://www.napasan.de>, <http://www.aquarehab.vito.be>).

Als Vorteil der Nano-Eisenpartikel wird genannt, dass sie im Grundwasser als kolloidale Partikelsuspension transportiert würden und aufgrund der relativ großen spezifischen Oberfläche von  $\geq 10 \text{ m}^2/\text{g}$  eine hohe Reaktivität besitzen. In Deutschland wurde das Verfahren bisher in wenigen pilothaften Feldanwendungen eingesetzt. Eine erste großer Pilotsanierung (Nano- und Mikro-eisen-Injektion) in Deutschland wurde in NRW durchgeführt.

## 6.4 Durchströmte Reinigungswände

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, d. h. unter Ausnutzung des natürlichen Grundwasserflusses durchströmt.

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.

Allen PRB ist gemein, dass sie zur Sicherung des Grundwasserabstroms eingesetzt werden. Sie stellen somit eine Alternative zu aktiven hydraulischen Sicherungsmaßnahmen (Pump&Treat), die über Jahre bzw. Jahrzehnte betrieben werden müssten, dar.

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

## Durchströmte Reinigungswände

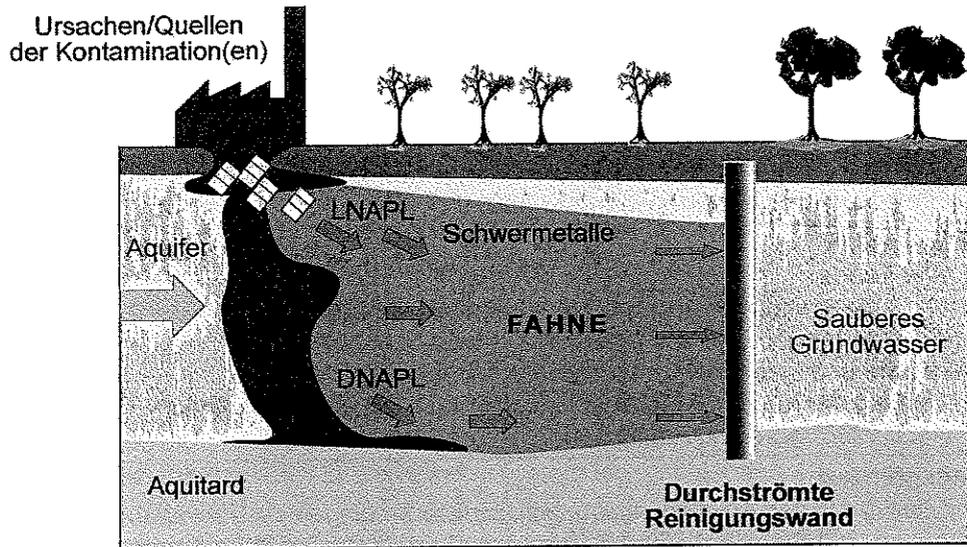


Abb. 4: Prinzip Permeable Reaktive Wand (PRB) (aus RUBIN-Handbuch).

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.

Auf Grund der Vielfalt der Durchströmten Reinigungswände (PRB), wurde diese nicht in Tabellenform dargestellt, sondern als separates Kapitel, mit Bezug zum RUBIN-Handbuch, 2006 (Anwendung von durchströmten Reinigungswänden zur Sanierung

von Altlasten“, <http://www.rubin-online.de>). Dabei lassen sich mehrere „Wandtypen“ unterscheiden, deren Einsatzmöglichkeiten, Vor- und Nachteile und Charakteristika werden kurz dargestellt.

## 7 Zusammenfassende Informationen - die Verfahrensblätter

Alle Verfahren werden in standardisierten Verfahrensblättern (Tab. 1) auf maximal zwei DIN A4 Seiten dargestellt mit folgenden Unterpunkten und Inhalten:

Tab. 1: Typisiertes Verfahrensblatt.

<b>Verfahrensname</b>
<b>Prinzip</b> <i>Beschreibung der wirksamen Prozesse, verbale Beschreibung, Bild, Skizze</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Aufbau und Beschreibung</i></li> <li>• <i>Verbale technische Beschreibung des Verfahrens und</i></li> <li>• <i>ggf. Verfahrensschema mit vollständiger Quellenangabe</i></li> <li>• <i>Verfahrenskomponenten, besondere Verfahrenscharakteristik</i></li> <li>• <i>begleitende Komponenten wie Grundwassersicherung, BLA etc. als Module</i></li> </ul>
<b>Verfahrensspezifische Planungsgrundlagen</b> <i>Untersuchungsergebnisse (z.B. Erkundung, Voruntersuchungen), die über die im Kap. 5 genannten zwingend erforderliche Vorkenntnisse (OU, DU, Etc.) benötigt werden</i>
<b>Anwendungsbereich</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Quelle oder Fahne</i></li> <li>• <i>Bodenzone (ungesättigte Bodenzone, GW-Schwankungsbereich, gesättigte Zone)</i></li> <li>• <i>Geologie und Hydrogeologie des Standortes</i></li> <li>• <i>Geochemische und hydrochemische Standortbedingungen</i></li> <li>• <i>Art und Umfang der Kontamination - Schadstoffe (gut, bedingt, ungeeignet)</i></li> <li>• <i>Art des Aquifers Poren-GWL, Kluftaquifer, ....</i></li> </ul>
<b>Anwendungsgrenzen</b> <i>Grenzen mit Bezug auf den Anwendungsbereich, Einschränkungen des Anwendungsbereichs z.B. Leichtphasen, Schwerphasen, Einzelsubstanzen aus Stoffgruppe des Anwendungsbereichs, Kf-Werte, Grundwasserchemismus, Schluffschichten, starke Inhomogenitäten, etc.</i>
<b>Besonderheiten, Hinweise, Risiken</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Unkontrollierte Schadstoffmobilisierung</i></li> <li>• <i>Explosionsfähige Gemische</i></li> <li>• <i>Methabolitenbildung</i></li> <li>• <i>Besonderer Arbeitsschutz</i></li> <li>• <i>etc.</i></li> </ul>
<b>Entwicklungsstand</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Pilotphase, Entwicklungsphase,</i></li> <li>• <i>Stand der Technik etc. in Deutschland / Europa (?) / USA (??)</i></li> </ul>
<b>Rechtliche Hinweise</b> <i>Besonderheiten die über Kap. 4 hinaus gehen.</i>  <i>Hinweis: Die Genehmigungsvoraussetzungen und die Art der erforderlichen Genehmigungen sind im Einzelfall mit den zuständigen Behörden abzustimmen.</i>
<b>Referenzprojekte / zuständige Behörde</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Konkrete Referenzbeispiele</i></li> <li>• <i>ggf. Kontaktpersonen (Sanierungspflichtiger oder zuständige Behörde)</i></li> </ul>
<b>Ausgewählte Literatur</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>bis max. 5 aktuelle Stellen der letzten 3 Jahre</i></li> <li>• <i>konkrete, vollständige Literaturzitate, nicht nur Hinweis auf Internet</i></li> <li>• <i>keine Firmenwerbung</i></li> </ul>
<b>Bewertung durch den Arbeitskreis</b> <i>Aspekte u.a. Wirtschaftlichkeit, Genehmigungsfähigkeit, Sanierungsdauer, Risiken, Entwicklungsstand</i>

## 8. Fazit und Ausblick

Am Ende der Arbeitshilfe wird zu den innovativen In-situ-Verfahren ein kritisches Fazit gezogen und eine zusammenfassende Bewertung gegeben. Nach Auffassung des AK bieten die innovativen In-situ-Sanierungsverfahren Möglichkeiten, die über die Grenzen konventioneller Techniken hinausgehen. Sie können mit Blick auf künftige Anforderungen an die Kosteneffizienz und Nachhaltigkeit von Sanierungsmaßnahmen eine Alternative sowohl bei der Sanierung der Schadstofffahne als auch der Sanierung der Schadstoffquelle sein oder zur Unterstützung bzw. zur Optimierung konventioneller Verfahren beitragen. Mehr noch, in vielen Fällen können sie dazu beitragen, als „nicht sanierbar“ geltende Altlasten „sanierbar“ zu machen.

Die in der Arbeitshilfe vorgestellten Verfahren entsprechen überwiegend noch nicht dem Stand der Technik. Eine Zusammenfassung aller Einzelbewertungen der vorgestellten Verfahren durch den Arbeitskreis wird nochmals separat in Tabellenform als Anhang in der Arbeitshilfe gegeben. Eine umfangreiche Literaturzusammenstellung, ein Glossar, ein Verzeichnis relevanter Rechtsnormen und Regelwerke sowie Ausführungen zum Arbeitsschutz bei Arbeiten in kontaminierten Bereichen runden die Arbeitshilfe ab.

## Danksagung und Informationen zum Bezug

Dank gebührt allen Mitgliedern des Arbeitskreises für die Ausarbeitung der verschiedenen Verfahrensblätter und einzelner Textpassagen der Arbeitshilfe sowie die konstruktiven und kritischen Diskussionen. Besonderer Dank gilt Frau Sabine Gier, die neben ihrer Tätigkeit als Geschäftsführerin des ITVA viele Details recherchiert, zusammengetragen und textlich ausgearbeitet hat. Dank auch an alle Fachleute, die uns im Rahmen des Gelbdruckverfahrens noch wertvolle Hinweise und Anregungen gegeben haben, die in die Endversion der Arbeitshilfe aufgenommen wurden.

Die Arbeitshilfe kann bezogen werden über die Geschäftsstelle des ITVA: Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e. V. Invalidenstraße 34, 10115 Berlin,  
E-Mail: [info@itv-altlasten.de](mailto:info@itv-altlasten.de), [www.itv-altlasten.de](http://www.itv-altlasten.de).

## Literaturhinweis

ITVA-Arbeitshilfe-H1-13 (2010): „Innovative In-situ-Sanierungsverfahren“. Erarbeitet vom Arbeitskreis „Innovative In-situ-Sanierungsverfahren“ im Fachausschuss H1 „Technologien und Verfahren“. Herausgeber: Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e. V. (ITVA), Berlin, Juni 2010.