



Technologiequicksan

In-situ- Sanierungstechnologien

Autoren

Timo Dörrie (Umweltbundesamt)

Helmut Längert-Mühlegger (Umweltbundesamt)

Unter Beratung und mit Beiträgen von

Thilo Hofmann, Hans-Peter Koschitzky, Thomas Reichenauer

Johann Punesch, Werner Repetschnigg

Alois Fürnkranz, Manfred Nahold, Roman Prantl, Josef Ringhofer, Jörg Weindl

Mai 2010

Leiter des ÖVA Arbeitskreises "Technologieplattform"

Manfred Nahold, *G.U.T GRUPPE UMWELT + TECHNIK GMBH*

Autoren

Timo Dörrie, *Umweltbundesamt GmbH*

Helmut Längert-Mühlegger, *Umweltbundesamt GmbH*

Beiträge und Beratung durch Experten der Technologieplattform

Alois Fürnkranz, *Saubermacher Dienstleistungs AG*

Thilo Hofmann, *Universität Wien*

Hans-Peter Koschitzky, *Universität Stuttgart, VEGAS*

Manfred Nahold, *G.U.T GRUPPE UMWELT + TECHNIK GMBH*

Roman Prantl, *blp GeoServices gmbh*

Johann Punesch, *Amt der Niederösterreichischen Landesregierung*

Thomas Reichenauer, *AIT Austrian Institute of Technology*

Werner Repetschnigg, *Amt der Salzburger Landesregierung*

Josef Ringhofer, *RCE -Ringhofer Consulting & Engineering ZT-GmbH*

Jörg Weindl, *bfm Umwelt Beratung Forschung Management GmbH*

Die Technologieplattform des ÖVA ist eine korrespondierende Initiative zu dem seitens des Lebensministeriums initiierten Projekt "Neuausrichtung der Beurteilung und Sanierung von kontaminierten Standorten – Altlastenmanagement 2010".

Finanziert aus Mitteln des
Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
Finanzierungsabwicklung durch Kommunalkredit Public Consulting GmbH



lebensministerium.at



Weitere Informationen zu ÖVA-Publikationen unter: <http://www.altlastenmanagement.at/>

Inhaltsverzeichnis

Präambel.....	4
1. Zweck und Gliederung des Berichtes.....	5
2. Grundlagen zu In-situ-Technologien.....	8
3. Biologische Verfahren	12
3.1. Mikrobiologische Verfahren	12
3.1.1. Aerobe Verfahren.....	12
3.1.1.1. Bioventing	12
3.1.1.2. Biosparging.....	15
3.1.1.3. Aerobe Verfahren unter Zugabe von Sauerstoffträgern	18
3.1.1.4. Aerobe Verfahren unter Zugabe von Methan	20
3.1.2. Anaerobe Verfahren	22
3.1.2.1. Anaerobe Verfahren unter Zugabe von Co-Substraten	22
3.1.2.2. Anaerobe Verfahren unter Zugabe von Nitrat	23
3.2. In-situ-Aerobisierung.....	25
3.3. Phytoremediation	28
4. Chemische Verfahren	32
4.1. In-situ-chemische-Oxidation (ISCO).....	32
4.2. In-situ-chemische-Reduktion (ISCR)	38
5. Physikalische Verfahren.....	43
5.1.1. Dampf-Luft-Injektion	43
5.1.2. Feste Wärmequellen.....	46
5.1.3. Radiofrequenz-Bodenerwärmung	49
5.1.4. Elektrisches Widerstands-Heizen	51
5.3. Pneumatische und Hydraulische Verfahren	56
5.3.5. Air Sparging	56
5.3.6. Spülungen	58
5.3.7. Grundwasserzirkulationsbrunnen	62
6. Permeable Wände	65
7. In-situ-Immobilisierung.....	69
8. Stand der Entwicklung und Anwendungspotential.....	72
8.1 Stand der Entwicklung	72
8.2 Zukünftiger Sanierungsbedarf in Österreich.....	74
8.3 Anwendungsreife Technologien mit erhöhtem Marktpotential.....	75
8.4 Technologien für Demonstrationsprojekte	76
8.5 Technologien mit Entwicklungsbedarf und -potential	77
Literatur.....	78
Anhang I: Verfahrensübersicht Einsatzbereiche.....	80
Anhang II: Definition der Durchlässigkeit	81

Präambel

Die **Technologieplattform des ÖVA** ist eine korrespondierende Initiative zu dem seitens des Lebensministeriums initiierten Projekt **"Neuausrichtung der Beurteilung und Sanierung von kontaminierten Standorten – Altlastenmanagement 2010"**. Eines der wesentlichen Ziele ist es dabei die Voraussetzungen für eine Optimierung des Managements und der Sanierung von kontaminierten Standorten in Österreich zu verbessern. Neben der Umsetzung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse bei der Gefährdungsabschätzung sowie der Entwicklung umweltökonomischer Bewertungsansätze, Diskussionen und möglichen Anpassungen bei gesetzlichen Grundlagen und technischen Normen, wäre vor allem auch die Anwendung fortschrittlicher Sanierungstechnologien in der Sanierungspraxis ein wichtiger Bestandteil, der zu einem kosten- und leistungseffizienten Altlastenmanagement und einer Schonung natürlicher Ressourcen beitragen kann.

Die Studie **"Altlastensanierung in Österreich – Effekte und Ausblick"** (BMLFUW, 2007) und auch eine aktuelle, im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführte, Umfrage unter Sanierungsfachleuten in Österreich zeigen, dass in Österreich im Vergleich zu anderen europäischen Ländern nur wenige Anwendungen von fortschrittlichen bzw. innovativen In-situ-Sanierungstechnologien zu verzeichnen sind. Maßnahmen an kontaminierten Standorten haben sich bis dato weitgehend auf Räumungen, Umschließungen, sowie hydraulische und pneumatische Maßnahmen (pump & treat) und deren Kombinationen beschränkt.

Um dem über die **Umweltqualitätsziele** (BMLFUW 2005) und das **"Leitbild Altlastenmanagement"** (BMLFUW 2009) definierten, langfristigen Ziel der Bewältigung der Altlastenproblematik bis 2050 näherzukommen, wird es notwendig sein, die Anwendungsmöglichkeiten neuer Technologien auszuschöpfen und die notwendigen Voraussetzungen wie z.B. technisches Know-How und Akzeptanz zu schaffen.

Der vorliegende **Technologie-Quickscan** soll einen überschaubaren Überblick und zusammengefasste Informationen zu fortschrittlichen In-situ-Sanierungsmethoden geben. Die Einschätzung zu den Anwendungspotentialen wurde seitens des Umweltbundesamtes vorbereitet, den MitarbeiterInnen des ÖVA-Arbeitskreises "Technologieplattform" zur Stellungnahme vorgelegt und durch das zugehörige Expertenpanel beraten. In weiterer Folge sollen durch Technologie- oder Projektbulletins sowie Workshops gezielte Informationen zu ausgewählten Technologien angeboten werden, die in anderen Ländern schon erfolgreich angewandt werden und deren Anwendung in Österreich vielversprechend erscheint.

1. Zweck und Gliederung des Berichtes

Im vorliegenden Technologiequicksan werden **ausgewählte innovative In-situ-Sanierungstechnologien** unter Berücksichtigung ihres Entwicklungsstandes sowie verfügbarer, internationaler Anwendungserfahrungen vorgestellt.

Ziel des vorliegende Dokumentes ist es dem Leser einen einfachen Einstieg, sowie einen ersten **Überblick über neue** bereits verfügbare sowie ebenso in naher Zukunft vielversprechende **In-situ-Technologien** zu ermöglichen. Dabei wird darauf hingewiesen, dass ein "Quicksan" keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt und auch dem beschränkten Umfang entsprechend keinesfalls einen Leitfaden oder eine praktische Arbeitshilfe für die Auswahl und Anwendung von Sanierungstechnologien darstellt oder ersetzen kann.

Der **Schwerpunkt** der ausgewählten Technologien liegt auf **Verfahren zur Anwendung auf Altstandorten**. Innovative Verfahren zur In-situ-Behandlung von Altablagerungen sowie Anwendungserfahrungen hierzu existieren nur sehr untergeordnet und wurden, soweit diese vielversprechend erscheinen, in den Quicksan aufgenommen.

In-situ-Technologien, die bereits seit vielen Jahren als Stand der Technik in der österreichischen Altlastenpraxis angewandt werden, finden in diesem Quicksan mit dem gewählten Fokus auf innovativen Technologien keine nähere Betrachtung. Zu nennen wären hier beispielsweise die in Österreich vielfach eingesetzten hydraulischen ("pump & treat") und pneumatischen Verfahren ("kalte" Bodenluftabsaugung).

Die Beschreibungen der in diesem Quicksan dargestellten innovativen In-situ-Technologien wurden auf Basis ausgewählter zusammenfassender Literatur der letzten Jahre (s. Literatur) zusammengestellt. Soweit dieses im Rahmen eines Quicksans möglich war, wurde eine Prüfung der Plausibilität der dargestellten Verfahrensbeschreibungen sowie ihrer Vor- und Nachteile durchgeführt.

Explizit ist darauf hinzuweisen, dass eine Überprüfung von Anwendungserfahrungen sowie der Wirkung und des Erfolges von Sanierungsmaßnahmen an konkreten Standorten eine eingehende Erhebung und Auswertung standortspezifischer Daten erfordert. Eine auf entsprechende Arbeiten aufbauende, umfassende Beurteilung einzelner Sanierungstechnologien und nachvollziehbar begründete Darstellung der Anwendungsbereiche und -grenzen ("Operating Window") müsste im Vergleich der Anwendungserfahrungen an mehreren Standorten erfolgen und ist eine entsprechend aufwändige und komplexe Aufgabe. Der "Quicksan" wurde bewusst auf einen Überblick, zusammenfassende Informationen und eine Gruppierung fortschrittlicher Sanierungstechnologien in Bezug auf den Stand der Entwicklung und ein mögliches kurz- bis mittelfristiges Anwendungspotential in Österreich beschränkt. In Bezug auf Anwendungser-

fahrungen in Österreich wurden auch Ergebnisse einer im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Umfrage¹ zum bisherigen Einsatz der beschriebenen Technologien mit eingearbeitet.

Den einzelnen Beschreibungen zu spezifischen Technologien wurde in Kapitel 2 zusammenfassend vorangestellt, welche Voraussetzungen und Randbedingungen bei der Planung und Anwendung von In-situ-Sanierungstechnologien allgemein von Bedeutung sind.

Die einzelnen Verfahren wurden aufgrund ihrer Wirkungsmechanismen bei der Dekontamination in **biologische** (Kapitel 3), **chemische** (Kapitel 4) und **physikalische Verfahren** (Kapitel 5), sowie in **Permeable Wände** (Kapitel 6) und **In-situ-Immobilisierung** (Kapitel 7) gegliedert, wobei darauf hingewiesen wird, dass bei In-situ-Sanierungen häufig Kombinationswirkungen von mehreren Wirkungsmechanismen (z.B. Bioventing – biologischer Abbau und Desorption) gegeben sind. Bei physikalischen Verfahren können Schadstoffe im Untergrund entweder durch Verfestigung immobilisiert werden, wodurch sie dem Stoffkreislauf und somit der biologischen Verfügbarkeit entzogen werden, oder sie werden durch Überführung in eine flüssige oder gasförmige Phase (z.B. durch Erhitzung) mobilisiert und so aus dem Untergrund entfernt. Ein Abbau von organischen Schadstoffen ist mit rein physikalischen Methoden nur bedingt möglich. Im Vergleich dazu können chemische Methoden einen Abbau organischer Schadstoffe (z.B. durch Elektronenübertragung bei der Oxidation oder der Reduktion), aber ebenso eine Immobilisierung oder Mobilisierung von Schadstoffen (z.B. Schwermetalle durch Änderung des pH-Wertes oder der Redox-Bedingungen) bewirken. Biologische Verfahren ermöglichen einen enzymatischen Abbau von organischen Schadstoffen, können aber auch wie physikalische und chemische Verfahren zu einer Immobilisierung, sowie Mobilisierung von Schadstoffen beitragen. Im Kapitel In-situ-Immobilisierung werden dementsprechend auf physikalischen und chemischen Mechanismen beruhende Methoden zur Unterbindung der Schadstoffmobilität beschrieben. Den im Kapitel 6 beschriebenen Permeablen Wänden liegen je nach Ausführung biologische und chemische Prozesse zugrunde, die einen Schadstoffabbau bewirken (Reaktive Wände) oder chemische und physikalische Prozesse, die zu einer Immobilisierung von Schadstoffen führen (Adsorptive Wände).

Generell wurden die einzelnen Verfahrensbeschreibungen wie folgt gegliedert:

- Verfahrensbeschreibung
- Anwendungsmöglichkeiten
- Vor- und Nachteile
- Stand der Entwicklung/Anwendung
- Möglich Verfahrenskombinationen

¹ durchgeführt als Fragebogenaktion unter mehr als 100 österreichischen Firmen und Ingenieurbüros

Im Abschnitt Verfahrensbeschreibung werden Verfahrensziel, Hauptprinzip sowie die generelle Eignung zum Einsatz in der wassergesättigten sowie in der ungesättigten Zone beschrieben als auch mögliche Anwendungen zur Quellen- und/oder Fahnensanierungen betrachtet (s.a. Anhang I). Wenn erforderlich werden weitere verfahrensrelevante Anforderungen aufgeführt. Unter Anwendungsmöglichkeiten werden die behandelbaren Schadstoffe, notwendige spezifische Standortvoraussetzungen sowie Einschränkungen und Ausschlussgründe für den Einsatz aufgeführt. Der Beschreibung von Vor- und Nachteilen folgt ein Kapitel zum Stand der Entwicklung/Anwendung mit Information zum nationalen sowie internationalen Anwendungsstand. Wenn zweckmäßig, schließt jede Verfahrensdarstellung mit Hinweisen zu sinnvollen Kombinationen mit anderen Verfahren.

Mit einem **Fazit zum Stand der Entwicklung und Anwendungspotential** (Kapitel 8) schließt der Quicksan und formuliert Empfehlungen welche innovativen In-situ-Technologien – unter den Rahmenbedingungen Österreichs – als vielversprechend angesehen werden können und welches die nächsten Schritte für eine verstärkte Anwendung in der Altlastensanierung sein könnten.

2. Grundlagen zu In-situ-Technologien

In-situ Technologien nutzen den Untergrund als Reaktionsraum. Dies bedingt, dass in der Regel das Verständnis des Untergrundes im Vergleich zu anderen Sanierungsverfahren noch detaillierter sein muss. Eine **Grundvoraussetzung für** die Durchführung einer **wirksamen Sanierung** ist damit die sehr gute Kenntnis der hydrogeologischen Untergrundverhältnisse, insbesondere der Hydrochemie, der Hydraulik, sowie eine möglichst gute dreidimensionale Kenntnis der Schadstoffverteilung. Ohne diese Kenntnisse kann nicht das geeignete Sanierungsverfahren ausgewählt werden, die Wirksamkeit der Maßnahmen kann stark eingeschränkt sein und es können unerwünschte, negative Auswirkungen auf die Umwelt eintreten.

Eine weitere Grundvoraussetzung zur Auswahl des geeigneten Verfahrens ist dessen **Eignung für** das jeweilige am Standort **vorliegende Schadstoffspektrum**. Insbesondere bei Mischkontaminationen muss die Verfahrensauswahl nicht nur auf eine Stoffgruppe ausgerichtet sein, sondern die Eigenschaften aller Schadstoffe am Standort berücksichtigen.

Je nach Verfahren müssen die **standortspezifischen Voraussetzungen** für eine Anwendung durch eine detaillierte Erkundung vorab erfasst werden. Diese Voraussetzungen können in Lockergesteinen erheblich besser erfasst werden als in Festgesteinen, in denen die lokalen Fließverhältnisse und die Schadstoffverlagerung häufig nicht beschreibbar sind. Grundsätzlich benötigen Verfahren, bei denen Gas oder Flüssigkeit entnommen oder injiziert wird (z.B. Grundwasser, Bodenluft, Heißdampf, Nährstoffe) eine ausreichende Durchlässigkeit² für das eingesetzte Fluid. Da bei den In-situ-Verfahren sowohl die Verteilung und der gezielte Transport zur Kontamination hin als auch das kontrollierte Abströmen und die Erfassung der eingesetzten Fluide und (Schad-)Stoffe im Untergrund erfolgen, sind Daten zur Durchlässigkeit des Grundwasserleiters (bzw. der Durchlässigkeit in der ungesättigten Zone) sowie zur Permeabilität für nicht wässrige Flüssigkeiten nicht nur im Mittel, sondern auch bezüglich der räumlichen Verteilung notwendig. Dies gilt, wenn auch nicht in gleichem Maße, ebenfalls für die Porosität. Eine stark ausgeprägte Heterogenität des Untergrundes sowie eine geringe hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserleiters können die Wirksamkeit von In-situ-Verfahren beträchtlich einschränken (im Detail bei den jeweiligen Verfahren in den folgenden Kapiteln beschrieben).

Je wichtiger für die Wirksamkeit einer Sanierung die hydraulischen Eigenschaften des Untergrundes sind, desto genauer müssen diese und die hydrogeologischen Randbedingungen erfasst werden. Hierzu gehört neben der Kenntnis des Grundwasseran- und abstromes auch die Grundwasserneubildung sowie hydraulische Randbedingungen (z.B. genau Kenntnis über Lage und Ausbildung des

² Die konkrete Festlegung einer "ausreichenden" Durchlässigkeit erfolgt in den Unterkapiteln "Standortvoraussetzungen" für jedes Verfahren separat sowie im Kontext zum Anhang II.

Grundwassernichtleiters (Stauer), Zuflüsse, Abflüsse, Entnahmen, Versickerungen). Viele Verfahren sind nur dann sinnvoll einsetzbar, wenn z.B. die Lage und Ausbildung des Stauers bekannt und geeignet ist (z.B. permeable Wände), oder die ungesättigte Zone eine ausreichende Mächtigkeit aufweist (z.B. Bioventing). Nach Erfassung dieser hydrogeologischen Randbedingungen und Erstellung eines Standortmodelles kann es zweckmäßig, oder zur Prognose notwendig sein, ein numerisches Grundwasserströmungs- und ggf. Transportmodell zu erstellen (z.B. bei permeablen Wänden, Funnel und Gate Systemen). Für weniger komplexe Standorte können auch analytische Modelle gut geeignet sein. Beide Modelltypen sind aber meist nur in Lockergesteinen mit einem vertretbaren Arbeitsaufwand zu realisieren.

Neben den genannten physikalischen Standortbedingungen, ist insbesondere bei den chemischen und biologischen Verfahren eine **sehr gute Kenntnis der hydrochemischen** (z.B. Wasserinhaltsstoffe, physikalisch/chemische Parameter), **geochemischen** (z.B. Sediment-/Bodenzusammensetzung, Nährstoffgehalte) **und mikrobiologischen Verhältnisse**, sowie deren Veränderung und Beeinflussung durch die Sanierungsmethode notwendig. Die getroffenen Aussagen bezüglich der Heterogenität physikalischer Eigenschaften des Untergrundes gelten in ähnlicher Weise auch für die chemischen und mikrobiologischen Untergrundverhältnisse.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass In-situ-Sanierungsverfahren eine gute und detaillierte Kenntnis der physikalischen und chemischen Verhältnisse im Untergrund erfordern, die eine eingehende, zunächst kostenintensivere Erkundung voraussetzt. Diese Planungsgrundlagen können jedoch gemeinsam mit einem guten Prozessverständnis erhebliche Vorteile für eine effiziente und langfristig wirtschaftliche und nachhaltige Sanierung ergeben.

Bei Altablagerungen ist neben der Kenntnis des Untergrundes die Erkundung des Deponiekörpers selbst von großer Bedeutung. Abfallart und -eigenschaften beeinflussen die Wahl des Sanierungsverfahrens und dessen Verlauf maßgeblich. Auch die räumliche Verteilung der chemischen und physikalischen Abfalleigenschaften ist entscheidend für die Wahl des Sanierungsverfahrens und dessen Erfolg. Insbesondere bevorzugte Wegigkeiten eines Deponiekörpers in Bezug auf Luft und Wasser können die Wirksamkeit von Sanierungsmaßnahmen maßgeblich einschränken.

Die Erkundung eines Standortes und die **Auswahl geeigneter Verfahren** erfolgen im Allgemeinen schrittweise (s. dazu auch ÖNORM S 2085 und ÖNORM S 2089). Zur Erstellung eines Sanierungsprojektes (s. ÖNORM S 2089 – Bild 1: Ablaufschema einer Sanierung) können dabei für In-situ-Sanierungsmaßnahmen, die in Abbildung 1 dargestellten Schritte notwendig sein.

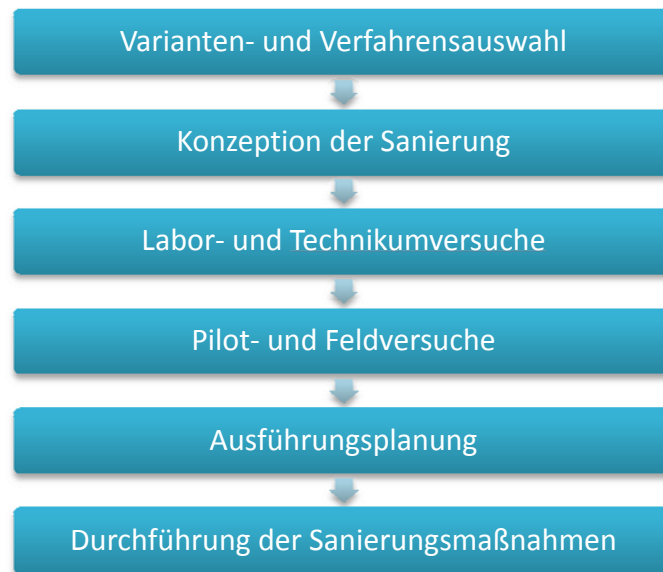


Abbildung 1: Arbeitsschritte bei der Erstellung eines Sanierungsprojektes zur Anwendung von In-situ-Sanierungstechnologien³

Im Zuge der Planung ist zu prüfen, ob und in welchem Ausmaß Unsicherheiten in Hinblick auf die Wirksamkeit der Maßnahmen gegeben sind, so dass das Sanierungsziel nicht, nicht im geplanten Zeitraum oder nicht mehr wirtschaftlich zu erreichen ist. Die Anwendung von In-situ-Sanierungstechnologien setzt im Vergleich mit anderen etablierten Technologien im Allgemeinen einen erhöhten Aufwand bei der Planung sowie Überwachung (s. unten) voraus. Zweck ist dabei wie allgemein bei Planungsprozessen die Durchführung und Durchführungskosten, die meist in der Größenordnung um den Faktor 10 größer sind als Planungskosten, zu optimieren und darüber hinaus das Risiko von unerwarteten und großen Kostenerhöhungen sowie Zeitverlusten bei der Durchführung der Sanierung zu minimieren.

Beim Einsatz aller In-situ-Verfahren sind sowohl **gezielte Überwachungsmaßnahmen** zur Prozesssteuerung während der Sanierungsmaßnahme als auch **umfassende Beweissicherungsmaßnahmen**⁴ zum Fortschritt und Erfolg der Sanierung durchzuführen. Das **Prozessmonitoring** dient der Beobachtung von verfahrensspezifischen Parametern, die Aufschluss über z.B. die Kontrolle der Verteilung von Reaktionsmitteln (Reichweite und Menge), die Reaktionen im Untergrund (Abbauprodukte, Milieuveränderungen oder Matrixeffekte) sowie die Entwicklung der Schadstoffkonzentrationen geben. Das Prozessmonitoring überwacht den Ablauf der Sanierung, ermöglicht eine Qualitätskontrolle und entscheidet maßgeblich über die Notwendigkeit weiterer Maßnahmen und deren Zeitpunkte. Je nach Verfahren (z.B. beim Einsatz bzw. bei der Entstehung von Gasen, aggressiven Chemikalien, toxischen und reaktiven Stoffen, heißen Dämpfen, Strom, Strahlung, usw.) kommt bei der Prozessüberwachung neben dem Umwelt- auch dem Arbeitnehmerschutz eine größere Bedeutung zu.

³ nicht alle Schritte sind immer obligatorisch

⁴ Beweissicherungsmaßnahmen i.S. von Kontrolluntersuchungen gemäß der ÖNORM 2089

In-situ-Verfahren nehmen Einfluss auf das Untergrundmilieu und bewirken neben den gewollten Effekten zum Teil auch unerwünschte Veränderungen. Die **Beobachtung und Kontrolle** des pH-Wertes und des Redoxpotentials z.B. ist insbesondere bei biologischen Verfahren zum Ablauf der Reaktionen essentiell. Bei den chemischen Verfahren verändern die eingebrachten Reagenzien in der Regel das Milieu. Hier ermöglicht die Kontrolle der Milieuparameter die indirekte Beobachtung der Effizienz und der Reaktivität. Führen die eingesetzten Wirkstoffe zu Milieuänderungen, so muss z.B. kontrolliert werden, ob Redox- und/oder pH-Verschiebungen Schwermetalle aus Mischkontaminationen oder dem geogenen Hintergrund mobilisiert haben. Für die in einigen Fällen notwendige pH-Änderung ist die Beurteilung der Pufferkapazität für die Festlegung des Reagenzbedarfs notwendig. Bei vielen Verfahren können Metabolite entstehen, die toxischer als der Ausgangsstoff oder in ihrem Verhalten unbekannt sind. Bei der Dotation von Chemikalien und Nährstoffen sowie bei der Entstehung von wassergefährdenden oder toxischen Metaboliten sind insbesondere wasserrechtliche Vorgaben unbedingt vorab zu prüfen.

Da einige Verfahren zur Sanierung des Grundwassers durch Reduktion der Porosität (durch z.B. Verblockungen, clogging) nicht nur die Zugänglichkeit zum Schadstoff, sondern auch Fließrichtung, -weg und -geschwindigkeit beeinflussen, sind mögliche Veränderungen der Strömungsverhältnisse, die die Wirksamkeit einer Maßnahme beeinflussen, aber auch zu unkontrollierten Ausbreitungen der Schadstoffe und/oder der Wirkstoffe führen können, unbedingt regelmäßig zu beobachten.

Die **Kontrolle des Fortschrittes und Erfolges von Sanierungsmaßnahmen** erfolgt im Vergleich mit vorab definierten Kriterien (Sanierungsziele, als qualitative Kriterien zur Beschreibung des Umweltzustandes nach Abschluss der Sanierung sowie Sanierungszielwerte, als messbare Größen). Als Voraussetzung dafür sind sowohl die Daten zum Prozessmonitoring als auch Daten der allgemeinen Beweissicherungsmaßnahmen fortlaufend zu dokumentieren und auszuwerten. Dabei ist auch zu beachten, dass als Nachweis für den dauerhaften Erfolg einer Maßnahme zumindest die allgemeinen Beweissicherungsmaßnahmen auch nach Einstellung von Maßnahmen in Abhängigkeit der standortspezifischen Verhältnisse zumindest einige Monate (bis zu max. 2 Jahre) weiterzuführen sind.

Die dargestellten Ausführungen zur Anwendung führen nur in aller Kürze die wesentlichen Grundvoraussetzungen und Einschränkungen für eine Auswahl und den erfolgreichen Einsatz von In-situ-Sanierungsverfahren auf. Einzelverfahrensspezifische Standortansprüche, Einschränkungen und Ausschlussgründe, aber auch Ausnahmen zum Gesagten finden sich in den jeweiligen Kapiteln der Einzelverfahren.

3. Biologische Verfahren

3.1. Mikrobiologische Verfahren

Ziel der mikrobiologischen In-situ-Sanierungsverfahren (Bioremediation) ist der Abbau von organischen Schadstoffen durch Mikroorganismen. Meist wird dabei versucht die Milieubedingungen für die Mikroorganismen, die bereits am Standort vorhanden sind, zu optimieren (z.B. durch Einbringung von Sauerstoff- oder auch Elektronendonatoren zur Optimierung von oxidativen und reduktiven Abbauwegen, oder durch Zusatz von Nährstoffen (vor allem Stickstoff) und Spurenelemente, die häufig das Wachstum von Mikroorganismen limitieren). Daneben besteht die Möglichkeit einer Animpfung (= Inokulation) des Bodens mit ausgewählten Mikroorganismenstämmen (Bioaugmentation). Dabei besteht eine häufig auftretende Schwierigkeit darin, dass sich die inokulierten Stämme nicht gegen bereits vorhandene Mikroorganismen-Population durchsetzen können.

Im Idealfall kommt es bei einem oxidativen Abbau zu einem vollständigen biologischen Abbau (= Mineralisierung) der vorhandenen organischen Schadstoffe. Dabei wird der vorhandene Kohlenstoff teilweise auch zum Aufbau von Biomasse der Mikroorganismen verwendet.

Die anzuwendenden mikrobiologischen Verfahren sind vom jeweils am Standort vorhandenen Untergrundmilieu abhängig, wobei i.d.R. ganz allgemein zwischen dem Abbau im aeroben und im anaeroben Milieu unterschieden wird. In Abhängigkeit der angestrebten Milieubedingungen und der zu behandelnden Schadstoffe erfolgt häufig eine weitere Untergliederung auf Basis der in den Untergrund eingebrachten Substanzen:

- Aerobe Verfahren unter Einbringung von Luftsauerstoff (z.B. Bioventing oder Biosparging)
- Aerobe Verfahren mit Zugabe von weiteren Sauerstoffträgern
- Aerobe Verfahren mit Zugabe von Methan
- Anaerobe Verfahren mit Zugabe von Co-Substraten
- Anaerobe Verfahren mit Zugabe von Nitrat

3.1.1. Aerobe Verfahren

3.1.1.1. Bioventing

Verfahrensbeschreibung

Ziel des Verfahrens ist der biologische Abbau von organischen Schadstoffen in der ungesättigten Zone. Beim Bioventing wird im Bereich von Kontaminationen in der ungesättigten Zone durch Eintrag von Luft der Schadstoffabbau durch

vorhandene Mikroorganismen initiiert bzw. beschleunigt. Der gesteigerte Lufteintrag kann entweder über gezielte Absaugung und dadurch bedingtes Nachströmen von sauerstoffreicherer Außenluft oder direkt durch Einbringen von Luft über Belüftungsanlagen erfolgen. Da für den Schadstoffabbau in der ungesättigten Zone in der Regel nur wenige Prozent Sauerstoff notwendig sind, kann das Verfahren im Vergleich mit einer herkömmlichen Bodenluftabsaugung mit geringen Volumenströmen betrieben werden. Bei der Belüftung und Absaugung ist darauf zu achten, dass der Wassergehalt des Untergrundes durch die Luftzirkulation nicht zu stark abnimmt (bzw. sich innerhalb eines optimalen Bereiches bewegt), da die Mikroorganismen ausreichend Wasser für den Schadstoffabbau benötigen.

Zur Erzeugung einer Durchströmung des Untergrundes werden in Abhängigkeit von den Randbedingungen in einem Abstand von üblicherweise 5 bis 20 m Absaugpegel errichtet und die Bodenluft abgesaugt und einer Abluftreinigungsanlage zugeführt. Leichtflüchtige Schadstoffe (z.B. niedrigsiedende Benzine, chlorierte Kohlenwasserstoffe) gehen durch die verbesserte Durchlüftung vermehrt in die Gasphase über und müssen über Absaugpegel erfasst werden. In diesem Fall ist darauf zu achten, dass es zu keiner unkontrollierten Ausgasung schadstoffbelasteter Luft oder Verfrachtung in unbelastete Bereiche kommt.

Die Lufteinbringung kann entweder direkt im Bereich der Kontaminationen oder außerhalb erfolgen (siehe Abbildung 2), wobei das Ziel immer eine möglichst vollständige Zufuhr von sauerstoffreicher Luft über den gesamten kontaminierten Bereich ist. Oft kann eine effektivere Belüftung durch Intervallbetrieb erreicht werden. Die Notwendigkeit einer Sicherung des Grundwasserabstroms ist im Einzelfall zu prüfen.

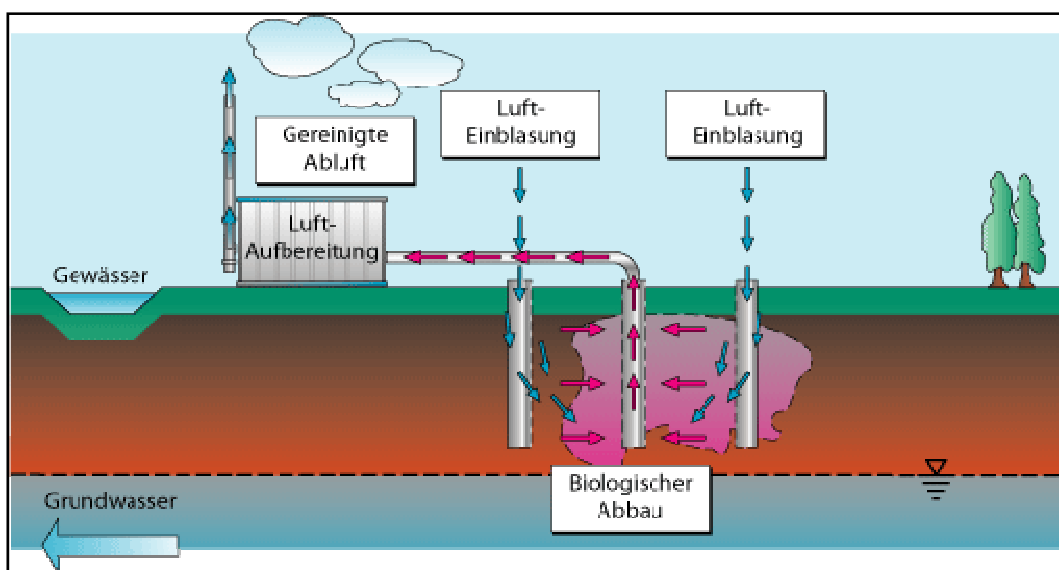


Abbildung 2: Schematisches Funktionsprinzip des Bioventing
(Quelle: Bundesamt für Umwelt, BAFU)

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Bioventing ist grundsätzlich für leicht oxidierbare Schadstoffe geeignet, z.B. für Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW), aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX) und eingeschränkt auch für niedermolekulare polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK).

Standortvoraussetzungen

Die Anwendung des Verfahrens setzt voraus, dass in der ungesättigten Zone eine ausreichende Möglichkeit für die konvektive Ausbreitung von Gasen gegeben ist. Mitteldurchlässiger Untergrund kann mit dem Verfahren noch behandelt werden. Eine effiziente Betriebsweise ist insbesondere bei ausreichender Mächtigkeit der ungesättigten Zone (> 5 m) möglich.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Die Bioverfügbarkeit des abzubauenen Schadstoffes muss gegeben sein, hohe TOC-Gehalte können die Verfügbarkeit einschränken. Das Vorliegen toxischer Schadstoffe (z.B. Mischkontaminationen mit Schwermetallen) bzw. eine zu hohe Schadstoffkonzentration der abzubauenen Schadstoffe selbst kann zu einer Hemmung des biologischen Abbaus führen. Aufschwimmende Schadstoffphasen sind vor oder während der Sanierung zu entfernen, da die Sanierungsdauer ansonsten durch permanente Schadstoffnachlieferung unverhältnismäßig lang wird. Die Absaugpegel sind so zu betreiben, dass es zu keiner unkontrollierten Ausgasung oder Verlagerung von Schadstoffen in nicht kontaminierte Bereiche kommt.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Bei geeigneten Randbedingungen kann Bioventing ein sehr effektives Verfahren zur Reinigung von Kontaminationen in der ungesättigten Zone darstellen. Die notwendige gerätetechnische Ausstattung entspricht im Wesentlichen einer konventionellen Belüftung und Bodenluftabsaugung und ist bereits vielfach erprobt.

Nachteile/besondere Hinweise

Bei Vorhandensein von residual gesättigten Kontaminationsbereichen oder von am Grundwasser aufschwimmenden Schadstoffphasen ist eine Sanierung mittels Bioventing nicht möglich.

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

Bioventing wurde grundsätzlich sowohl im nordamerikanischen als auch im europäischen Raum vielfach angewandt, wird aber oftmals nur auch "Bodenbelüftung" genannt und meist nicht als alleiniges Verfahren eingesetzt.

Im Rahmen von aus ALSAG-Mitteln geförderten Sanierungsprojekten hat es in Österreich bisher keine gezielte Anwendung gegeben. Die Auswertung der Fragebogenaktion zeigte aber, dass das Verfahren in Österreich bereits relativ häufig eingesetzt wird und entsprechende Erfahrungen existieren. Empfehlungen zur technischen Umsetzung wurden im Rahmen des Forschungsprojektes INTERLAND in einem Bericht zusammengefasst⁵.

Mögliche Verfahrenskombinationen

Bei Vorliegen abbaubarer Schadstoffe in der wassergesättigten Zone ist die Kombination mit Air Sparging (Belüftung der wassergesättigten Zone) möglich. In manchen Fällen kann eine begleitende Zugabe von Nährstoffen zur Optimierung des gewünschten biologischen Schadstoffabbaus sinnvoll sein.

3.1.1.2. Biosparging

Verfahrensbeschreibung

Ziel des Verfahrens ist der biologische Abbau von Schadstoffen in der wassergesättigten Zone. Beim Biosparging wird unterhalb der Kontamination Luft in die wassergesättigte Zone eingeblasen. Dies erfolgt in der Regel mit Belüftungsanlagen. Die eingeblasene Luft steigt auf und bildet einen Belüftungskegel aus. Durch den mit der Luft eingebrachten Sauerstoff wird der biologische Abbau von gut abbaubaren Schadstoffen (z.B. MKW) durch vorhandene Mikroorganismen initiiert bzw. beschleunigt. Biosparging kann sowohl zur Quellen- als auch zur Fahnenanierung verwendet werden, in hochbelasteten Bereichen ist jedoch der biologische Abbau durch die toxische Wirkung hoher Schadstoffkonzentrationen oft gehemmt.

Generell ist die eingeblasene Luft in der ungesättigten Zone durch Absaugpegel zu fassen und fallweise einer Abluftreinigungsanlage zuzuführen. Bei Vorliegen leichtflüchtiger Schadstoffe ist jedenfalls eine Abluftreinigung zu betreiben. Die Absaugrate ist höher als die Infiltrationsrate, üblicherweise um den Faktor 1,3 bis 5. Da eine Schadstoffmobilisierung erfolgt und um eine unkontrollierte Ausbreitung von Schadstoffen mit dem Grundwasser zu verhindern, sollte im Grundwasserabstrom eine Sicherung erfolgen.

⁵ verfügbar über die Homepage des ÖVA, s. www.altlastenmanagement.at

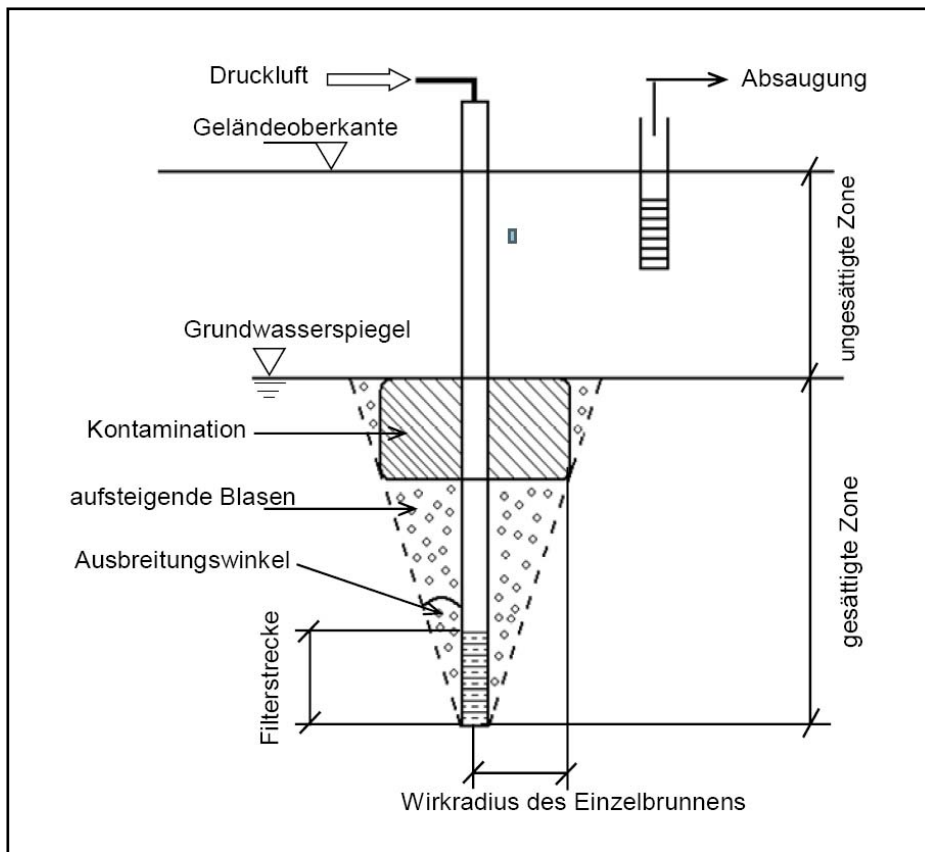


Abbildung 3: Vereinfachtes Schematisches Funktionsprinzip des Biosparging
(Quelle: Interland 2006)

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Biosparging ist grundsätzlich für leicht oxidierbare Schadstoffe geeignet, z.B. für Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW), aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX), niedermolekulare polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) oder *tert*-Butylmethylether (MTBE). Leichtflüchtige Schadstoffe gehen in die Gasphase über (siehe Air Sparging).

Standortvoraussetzungen

Die Anwendung des Verfahrens setzt eine ausreichende Möglichkeit zur Gasdiffusion im Untergrund voraus. Mitteldurchlässiger, homogener aufgebauter Untergrund kann mit dem Verfahren noch behandelt werden. Der Aquifer muss eine ausreichende Mächtigkeit aufweisen, da für eine wirksame Betriebsweise die Luft in der Regel mindestens 2 bis 3 m unterhalb der Kontaminationsunterkante eingebracht werden sollte. Eine Bodenluftabsaugung in der ungesättigten Zone muss möglich sein.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Die Bioverfügbarkeit des abzubauenen Schadstoffes muss gegeben sein. Das Vorliegen von für Mikroorganismen toxischen Schadstoffen (z.B. Mischkontaminationen mit Schwermetallen) bzw. eine zu hohe Schadstoffkonzentration der

abzubauenen Schadstoffe selbst kann zu einer Hemmung des biologischen Abbaus führen. Im Bereich von aufschwimmenden Schadstoffphasen ist das Verfahren ungeeignet, da die Gefahr einer Verschleppung der Kontamination besteht. Bei Kontaminationen, die bis bzw. bis nahe an den Grundwasserstauer heran reichen, ist das Verfahren nicht geeignet, da die tiefliegenden Kontaminationsbereiche nicht ausreichend erfasst werden können. Bei höheren Eisen- und Mangangehalten im Grundwasser (Fe(III) und Mn(IV)) kann es durch den Lufteintrag zu verstärkten Ausfällungen von Eisen- und Manganhydroxiden kommen. Diese Verringerung des Porenraumes bedeutet eine Herabsetzung der Durchlässigkeit des Untergrundes und kann zur Ausbildung bevorzugter Fließwege führen. Bei gespannten Grundwasserverhältnissen ist das Verfahren nicht geeignet.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Die notwendige gerätetechnische Ausstattung entspricht im Wesentlichen einer konventionellen Belüftung (Air-Sparging) und Bodenluftabsaugung und ist bereits vielfach erprobt.

Nachteile/besondere Hinweise

Bei Vorhandensein von nicht erkannten aufschwimmenden Phasenbereichen kann es zu einer nicht kontrollierbaren lateralen Ausbreitung von Schadstoffen kommen.

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

Biosparging bzw. Air Sparging wurde vor allem im nordamerikanischen Raum vielfach angewandt, auch im europäischen Raum gibt es zahlreiche Anwendungen.

Im Rahmen von aus ALSAG-Mitteln geförderten Sanierungsprojekten hat es bisher keine Anwendung in Österreich gegeben. Die Auswertung der Fragebogenaktion lässt aber darauf schließen, dass das Verfahren auch in Österreich bereits mehrfach zu Anwendungen gekommen ist. Dabei lässt sich aber keine Abgrenzung zwischen Bio-Sparging und Air-Sparging treffen. Empfehlungen zur technischen Umsetzung wurden im Rahmen des Forschungsprojektes INTERLAND in einem Bericht zusammengefasst⁶.

Mögliche Verfahrenskombinationen

Bei Vorliegen abbaubarer Schadstoffe in der ungesättigten Zone ist die Kombination mit Bioventing (Belüftung der ungesättigten Zone) meist empfehlenswert. In Einzelfällen kann auch eine begleitende Zugabe von Nährstoffen zur Optimierung des gewünschten biologischen Schadstoffabbaus sinnvoll sein.

⁶ verfügbar über die Homepage des ÖVA, s. www.altlastenmanagement.at

3.1.1.3. Aerobe Verfahren unter Zugabe von Sauerstoffträgern

Verfahrensbeschreibung

Ziel dieser Verfahrensgruppe ist die Stimulation des aeroben mikrobiellen Abbaus in der wassergesättigten Zone, wobei alle Verfahren dieser Verfahrensgruppe primär zur Behandlung der Schadstoffquelle bis in Randbereiche der Schadstoffquelle eingesetzt werden.

Als gasförmige Sauerstoffträger werden neben Luft (21 % O₂) auch mit Sauerstoff angereicherte Luft, reiner Sauerstoff oder Ozon (O₃) verwendet. Als flüssige Sauerstoffträger werden z.B. Wasserstoffperoxidlösungen, als feste Sauerstoffträger z.B. Peroxide verwendet.

Gasförmige Sauerstoffträger werden mittels konventioneller Belüftungstechnologie sowohl direkt in das Grundwasser (z.B. Biosparging, Kap. 3.1.1.2.) als auch in die ungesättigte Zone eingeblasen (z.B. Bioventing, Kap. 3.1.1.1.). Weiterentwickelte Belüftungstechnologien, wie z.B. Injektionsschläuche zielen darauf ab eine möglichst gleichmäßige (d.h. feinperlige oder diffusive) Einbringung des Sauerstoffs in das Grundwasser zu ermöglichen.

Die Art der Einbringung von löslichen bzw. flüssigen Sauerstoffträgern in die wassergesättigte Zone wird in der Regel über konventionelle Brunnen im Grundwasseranstrom oder oberhalb der zu behandelnden Kontamination durchgeführt. Möglich ist auch die Einbringung von flüssigen Sauerstoffträgern in Spülkreisläufe (Kapitel 5.3.6) oder Grundwasserzirkulationsbrunnen (Kapitel 5.3.7). Bei flüssigen Sauerstoffträgern kann eine Zugabe von Nährstoffen, wie Stickstoff (z.B. in Form von Harnstoff; CH₄N₂O) und Phosphor (in Form von Phosphaten; PO₄³⁻) in manchen Fällen sinnvoll sein.

Der Eintrag fester Sauerstoffträger erfolgt meist einmalig durch Injektion in die wassergesättigte Zone. Möglich ist aber auch das Einbringen in vorhandene Brunnen in Form sogenannter Filterstrümpfe. Hierzu werden als Reagenzien derzeit hauptsächlich Stoffe auf Basis von Magnesiumperoxid und Kalziumperoxid eingesetzt. Diese Substrate setzen über einen Zeitraum von mehreren Monaten rund 10 bis 15 % ihres eigenen Gewichtes an Sauerstoff frei.

Die Notwendigkeit einer Sicherung des Grundwasserabstroms ist im Einzelfall zu prüfen.

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Die mit diesen Verfahren behandelbare Schadstoffe sind im wesentlichen BTEX, MTBE, MKW, niedermolekulare PAK sowie eingeschränkt Trichlorethen (TCE) aber

insbesondere seine Abbauprodukte cis-Dichlorethen (cis-DCE) und Vinylchlorid (VC).

Standortvoraussetzungen

Für den Einsatz dieser Verfahren ist ein entsprechend durchlässiger homogener Untergrund, der eine möglichst gleichmäßige Ausbreitung der eingebrachten Sauerstoffträger ermöglicht erforderlich. Mitteldurchlässige Untergründe mit geringen Heterogenitäten sind zum Teil noch behandelbar. Der Einsatz von festen Sauerstoffträgern hat sich bei oberflächennahen Grundwasserleitern, in denen mit vertretbarem Aufwand ein enges Raster von Injektionsbohrungen niedergebracht werden kann, bewährt. Prinzipiell ist aber auch der Einsatz in tiefen Grundwasserleitern möglich.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Die Bioverfügbarkeit des abzubauenen Schadstoffes muss gegeben sein. Das Vorliegen von für Mikroorganismen toxischen Schadstoffen kann zu einer Hemmung des biologischen Abbaus führen. Bei stark inhomogenem Aufbau des Untergrundes sowie bei in Phase vorliegenden Schadstoffen ist das Verfahren nicht sinnvoll einsetzbar. Die Gefahr einer Verockerung (= Ablagerung von zweiwertigem Eisen- oder Manganoxid) von Brunnen oder sandigen Aquiferschichten kann bestehen.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Chemische Reaktionen der Oxidationsmittel mit natürlichen Bestandteilen des Untergrundes erzeugen soweit bisher bekannt ist keine schädlichen Stoffe. Der Vorteil von festen Sauerstoffträgern ist, dass keine permanente Dotation notwendig ist, da die Feststoffe über lange Zeiträume Sauerstoff freisetzen. Dagegen ermöglicht ein kontinuierlicher Eintrag (flüssig oder gasförmig) eine Variation der Sauerstoffkonzentration und durch Beimischung von z.B. Nährstoffen eine gewisse Prozesssteuerung.

Nachteile:

Für einen permanenten Eintrag ist der Einsatz entsprechender Anlagentechnik erforderlich. Die hervorgerufenen chemischen Veränderungen und die damit einhergehenden biologische Vorgänge können die Beschaffenheit des Grundwassers signifikant verändern.

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

Der Großteil dieser Verfahren wird in den USA, in Deutschland und den Niederlanden seit einigen Jahren eingesetzt.

Im Rahmen von aus ALSAG-Mitteln geförderten Sanierungsprojekten hat es bisher keine Anwendung gegeben. Die Auswertung der Fragebogenaktion zeigt,

dass sich die Einbringung von flüssigen und festen Sauerstoffquellen bisher auf Einzelfälle in Österreich beschränkt.

Mögliche Verfahrenskombinationen

Die Kombination mit hydraulischen Verfahren zur gezielten Stoffverteilung ist sinnvoll. Der Einsatz fester Sauerstoffträger bietet sich auch im Rahmen des Einsatzes von Permeablen Wänden (Kapitel 6) an.

Die Verfahren sind auch zur Behandlung verbleibender Restschadstoffkonzentrationen im Anschluss an andere Maßnahmen zur Quellensanierung einsetzbar.

3.1.1.4. Aerobe Verfahren unter Zugabe von Methan

Verfahrensbeschreibung

Ziel der Zugabe geringer Konzentrationen Methan zur eingebrachten Luft im Rahmen von biologischen In-situ-Bodenbehandlungen ist es, das selektive Wachstum der ubiquitär verbreiteten methanotrophen Mikroorganismen, die neben dem Methan auch andere Kohlenwasserstoffe wie leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW) als Kohlenstoffquelle nutzen können, zu forcieren. Der Einsatz erfolgt in der Regel von der Schadstofffahne bis in die Randbereiche der Schadstoffquelle.

Die methanotrophen Mikroorganismen produzieren zur Verwertung des eingebrachten Methans das Enzym Methan-Monooxygenase, das als Nebenreaktion die Oxidation von LCKW katalysiert. Dabei wird in einem ersten Schritt aus den LCKW ein Epoxid gebildet, das in weiterer Folge in CO_2 und Cl^- zerfällt.

Die Einbringung des Methan-Luftgemisches erfolgt mittels konventioneller Belüftungstechnologie über Belüftungsanlagen, wobei die mit 0,5 bis 2,2 Vol.-% Methan angereicherte Luft in die wassergesättigte oder ungesättigte Zone eingeblasen wird. Die Zugabe von Methan erfolgt über den gesamten Sanierungszeitraum. Zur weiteren Erhöhung des Nährstoffangebotes können in Ergänzung auch geringe Mengen Lachgas (N_2O) als Stickstoff-Quelle und Triethylphosphat ($\text{C}_6\text{H}_{15}\text{O}_4\text{P}$) als Phosphat-Quelle zugesetzt werden.

Meist werden diese Verfahren mit einer Sicherung des Grundwasserabstroms angewandt.

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Die Verfahren werden zum Abbau von niedrig chlorierten LCKW eingesetzt.

Standortvoraussetzungen

Zur Ermittlung und Optimierung der Abbaubedingungen sind Mikrokosmosuntersuchungen sowie Ausbreitungsversuche durchzuführen. Die Anwendung des Verfahrens setzt eine ausreichende Möglichkeit zur Gasdiffusion im Untergrund voraus. Mitteldurchlässiger, möglichst homogen aufgebauter Untergrund kann mit dem Verfahren noch behandelt werden.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Das Vorliegen von für Mikroorganismen toxischen Schadstoffen kann zu einer Hemmung des biologischen Abbaus führen. Bei stark inhomogenem Aufbau des Untergrundes ist das Verfahren nicht einsetzbar.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Die Verfahren ermöglichen den LCKW-Abbau unter aeroben Bedingungen (eine Ausnahme bildet Perchlorethen (PCE), das nur anaerob abbaubar ist). Der Abbau von LCKW erfolgt direkt, eine Bildung des krebserregenden VC wird aufgrund der aeroben Verhältnisse unterbunden. Der biologische Abbau ist unabhängig von der Schadstoffkonzentration, da das eingetragene Methan für die methanotrophen Mikroorganismen Kohlenstoff- und Energiequelle ist.

Nachteile:

Die Gefahr einer Verockerung durch zweiwertiges Eisen- und Manganoxid kann bestehen. Biologische Vorgänge können die Beschaffenheit des Grundwassers signifikant verändern. Aufgrund der Stoffeigenschaften von Methan ist ein ausreichender Explosions- und Brandschutz zu gewährleisten.

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

Methan-Biostimulationen wurde in den USA mehrfach eingesetzt. In Deutschland gibt es bisher nur wenige Anwendungsfälle.

In Österreich ist keine Anwendung bekannt.

Mögliche Verfahrenskombinationen

Das Verfahren ist auch zur Behandlung verbleibender Restschadstoffkonzentrationen im Anschluss an andere Maßnahmen zur Quellensanierung einsetzbar.

3.1.2. Anaerobe Verfahren

3.1.2.1. Anaerobe Verfahren unter Zugabe von Co-Substraten

Verfahrensbeschreibung

Ziel der Zugabe von organischen Kohlenstoffverbindungen ist es den anaeroben Abbau von LCKW in der wassergesättigten Zone zu forcieren. Als gut abbaubare Co-Substrate werden lösliche Stoffe, wie z.B. Melasse, Lactat oder Ethanol oder unlösliche, langsam hydrolysierende Produkte verwendet. Mit dem Abbau der Co-Substrate entsteht Wasserstoff, der im anaeroben Milieu als Reduktionsmittel (= Elektronendonator) wirkt, also Elektronen abgibt. Diese Elektronen dienen der stufenweisen Reduktion von LCKW bei der jeweils ein Chloratom durch eine Elektron und einen angelagerten Wasserstoffkern ersetzt wird (reduktive Dechlorierung).

Die Einbringung der Substrate erfolgt in der Regel über konventionelle Brunnen bzw. Hochdruckinjektionsbrunnen in die wassergesättigte Zone. Die Verteilung der Substrate im Aquifer erfolgt konvektiv über die natürliche Grundwasserströmung. Lösliche Stoffe werden direkt, schwerlösliche Stoffe, wie Pflanzenöle werden entweder direkt oder als tensidstabilisierte Emulsionen infiltriert.

In der Regel wird während der Maßnahmen im Grundwasserabstrom eine Sicherung betrieben.

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Abbau von LCKW durch reduktive Dechlorierung.

Standortvoraussetzungen

Eine stabile Aufrechterhaltung sulfatreduzierender bis methanogener Bedingungen ist zwingend erforderlich. Das Verfahren ist für gut bis mitteldurchlässige, möglichst homogene Grundwasserleiter geeignet. Eine hohe Grundwasserfließgeschwindigkeit bedingt ein schnelles "Wegspülen" der Substrate.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Das Vorliegen von für Mikroorganismen toxischen Schadstoffen kann zu einer Hemmung des biologischen Abbaus führen. Von der Anwendung bei residual gesättigten Kontaminationsbereichen ist abzuraten.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Durch langsames Lösen schwerlöslicher Substrate entsteht eine Depotwirkung, wodurch die Infiltrationen in größeren Zeitabständen ausgeführt werden können.

Nachteile:

Die geringe Löslichkeit einiger Co-Substrate bedingt einen langen Zeitraum bis sich ein ausreichend reduzierendes Milieu im Grundwasser für die reduktive Dechlorierung ausbildet. Die entstehenden Zwischenprodukte (Metabolite) sind zum Teil toxischer als die Ausgangsstoffe (z.B. VC). Bei der Anwendung kann der pH-Wert infolge der Bildung von organischen Säuren auf unter pH 5 absinken und damit die biologische Dechlorierung stagnieren. Durch die Milieuänderung können außerdem Mobilisierungseffekte auftreten (z.B. As). Eine Milieuumstellung auf anaerobe Verhältnisse kann zur Freisetzung von brennbaren, bzw. explosiven Methan-Luftgemischen führen. Die mikrobielle Aktivität kann zum "Zuwachsen" von geringer durchlässigen Untergrundbereichen führen (z.B. durch Bildung sogenannter Exopolymere durch methanotrophe Mikroorganismen).

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

In den USA existieren diverse Anwendungen. In Deutschland und den Niederlanden werden Verfahren der reduktiven Dechlorierung mit Einsatz von Co-Substraten seit mehreren Jahren zur Sanierung von LCKW-Schäden eingesetzt. Es liegt ein vergleichsweise guter Kenntnisstand vor.

In Österreich ist keine Anwendung bekannt.

Mögliche Verfahrenskombinationen

Die Verfahren sind im Anschluss an diverse Verfahren zur Quellensanierung sinnvoll einsetzbar.

3.1.2.2. Anaerobe Verfahren unter Zugabe von Nitrat

Verfahrensbeschreibung

Ziel der Zugabe von Nitraten ist es den anaeroben Abbau nicht chlorierter Kohlenwasserstoffe zu unterstützen, wobei die Verfahren in der Schadstofffahne bis in Randbereiche der Schadstoffquelle sinnvoll eingesetzt werden können. Nitrat wirkt als Elektronenakzeptor bei der anaeroben Atmung (Denitrifikation, Nitrat-Atmung) und unterstützt so den Abbau organischer Schadstoffe. Die Kohlenwasserstoffe werden zum Zellaufbau und für Stoffwechselprozesse verwendet und dabei zu Kohlendioxid, Wasser und Wärme umgesetzt.

Für die Anwendung werden dem Grundwasserleiter gelöste Nitratsalze über Infiltrationsbrunnen oder Rigolen zugeführt. Bei den meisten Anwendungsfällen werden Spülkreisläufe betrieben. Bei nicht geschlossenen Kreisläufen ist in der Regel eine Sicherung im Grundwasserabstrom notwendig

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Insbesondere BTEX und niedermolekulare PAK.

Standortvoraussetzungen

Das Verfahren ist für homogene stark bis mitteldurchlässige Grundwasserleiter geeignet. Da nicht nur die Schadstoffe sondern auch andere Stoffe (z.B. Eisen oder organische Stoffe) mit dem Nitrat reagieren, ist eine gute Kenntnis der geochemischen Untergrundverhältnisse notwendig. Zur Ermittlung und Optimierung der Abbaubedingungen sind Vorversuche wie Mikrokosmenversuche oder Feldversuche zu empfehlen.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Das Vorliegen von für Mikroorganismen toxischen Schadstoffen kann zu einer Hemmung des biologischen Abbaus führen. Die Anwendung bei flüssigen Schadstoffphasen ist nicht zweckmäßig. Durch eine kontrollierte Prozesssteuerung ist die Bildung von NH_4 bzw. NO_2 zu vermeiden

Vor-/Nachteile

Vorteile

Das Verfahren ist geeignet einen anaeroben Abbau von organischen Schadstoffen zu unterstützen und zu beschleunigen.

Nachteile:

Biologische Vorgänge können das Wasser in vielfältiger Richtung verändern. Bei hohem Grundwasserdurchfluss sind große Mengen an Nitrat notwendig, eine gezielte Unterstützung unterschiedlich belasteter Bereiche wird schwieriger und auch Verzögerungen bei der Konsumation durch Mikroorganismen können den Wirkungsgrad vermindern, so dass erhöhte N-Frachten in den Abstrom gelangen können (Sicherung s. Verfahrensbeschreibung).

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

Zur Sanierung nicht chlorierter Kohlenwasserstoffe mit Nitrat als Elektronenakzeptor sind in den USA und Europa zahlreiche Anwendungen bekannt.

Im Rahmen von aus ALSAG-Mitteln geförderten Sanierungsprojekten hat es in Österreich bisher keine Anwendung gegeben. Die über den Fragebogen erhobenen Informationen lassen darauf schließen, dass es darüber hinaus aber bereits vereinzelt auch zu Anwendungen in Österreich gekommen ist.

Mögliche Verfahrenskombinationen

Die Verfahren können im Anschluss, zum Teil auch ergänzend, zu diversen Sanierungsverfahren zur Quellensanierung sinnvoll eingesetzt werden.

3.2. In-situ-Aerobisierung

Verfahrensbeschreibung

Ziel des Verfahrens ist es durch Zufuhr von Luft bzw. Sauerstoff in eine Altablagerung bzw. einen Deponiekörper die Umsetzung der organischen Substanz zu beschleunigen, bzw. zu steigern und dadurch einen biologisch stabileren Zustand des Deponiekörpers zu erreichen.

In Hausmülldeponien kommt es durch anaerobe Abbauvorgänge des organischen Materials zu jahrzehntelangen Emissionen von Deponiegas sowie von organisch belastetem Sickerwasser. Beim der In-situ-Aerobisierung wird Luft in den Deponiekörper eingebracht. Durch Einbringen von ausreichend Sauerstoff in den Deponiekörper werden aerobe Verhältnisse geschaffen ("Aerobisierung") und dadurch ein gesteigerter und rascherer Ab- und Umbau der organischen Substanzen mit einem erhöhten Kohlenstoffaustrag über den Gaspfad erzielt.

Technisch wird über Belüftungsbrunnen oder -lanzen Umgebungsluft in den Deponiekörper gepresst. Durch gleichzeitiges Absaugen über Belüftungspegel wird eine horizontale Strömung erzeugt, sodass eine möglichst homogene Sauerstoffverteilung im Deponiekörper erreicht werden soll. Zur Kontrolle der Sauerstoffverteilung empfiehlt sich ein möglichst dichtes Netz an verschiedenen Messsonden (z.B. Temperatur, Druck, Gaszusammensetzung). Teilweise Strömungsumkehr bzw. Betriebsweisen mit veränderlichen Belüftungs- und Absaugraten oder Einbringdrücken können fallweise zu einer verbesserten und vollständigeren Durchströmung des Deponiekörpers beitragen. Das abgesaugte Gasgemisch wird in der Regel gereinigt (z.B. durch thermische Oxidation und/oder Biofilter). Durch die aeroben Verhältnisse im Deponiekörper kommt die Deponiegasproduktion weitestgehend zum Erliegen, die organische Belastung des Sickerwassers wird stark reduziert.

Da zu Beginn einer Belüftungsmaßnahme durch temporäre Mobilisierungseffekte kurzzeitig erhöhte Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser zu erwarten sind, sollten im Grundwasserabstrom jedenfalls Maßnahmen zur Kontrolle sowie falls erforderlich zur Sicherung vorgesehen werden.

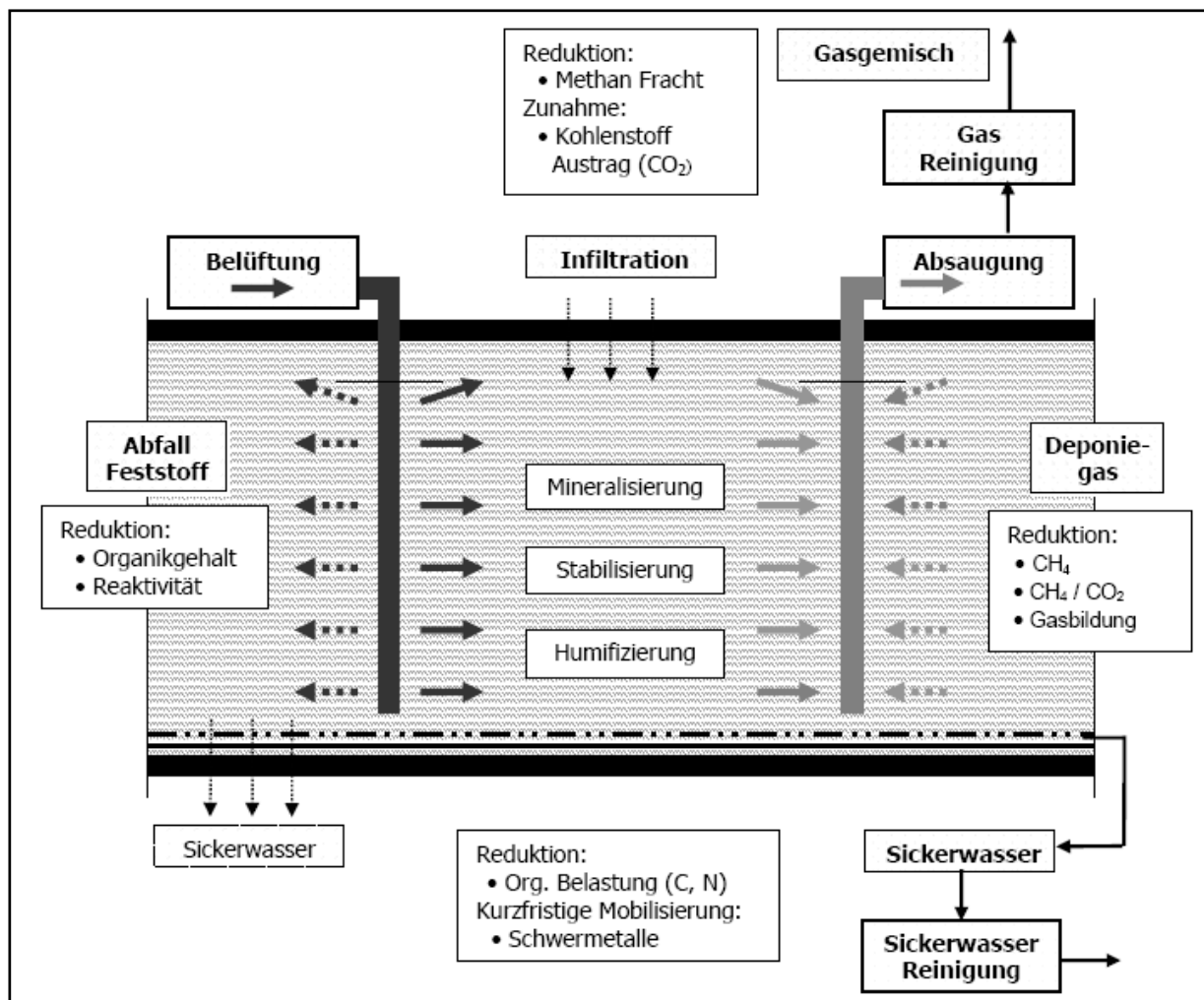


Abbildung 4: Prinzip der In-situ-Aerobisierung (Quelle: Interland 2006)

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Die In-situ-Aerobisierung ist bei kommunalen Altablagerungen ("Hausmülldeponien") bzw. Ablagerungen anwendbar, deren stoffliches Gefährdungspotential maßgeblich durch Siedlungsabfälle oder ähnliche organische Abfälle bestimmt wird.

Standortvoraussetzungen

Voraussetzung für eine aktive Belüftung ist eine ausreichende Durchlässigkeit des Deponiekörpers und eine ausreichende Homogenität. Eingestaute Deponiebereiche sind ein Hinweis auf Verdichtungen und müssen in Hinblick auf ihre Beeinflussung der Gaskonvektion geprüft und vorab entwässert werden. Falls keine vollständige Sickerwasserfassung vorhanden ist, muss ein entsprechendes Netz an Grundwassermessstellen für das erforderliche Grundwassermonitoring bzw. ggf. zum Sperrbrunnenbetrieb vorhanden sein. Bei geringmächtigen Schüttungen (< 5 m) ist eine erhöhte Anzahl an Belüftungs- und Absaugpegeln notwendig, sodass die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens möglicherweise nicht gegeben ist. Auch bei sehr mächtigen Schüttungen kann die Ausführung technisch schwierig und/oder teuer sein.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Bei Ablagerungen, bei denen eine energetische Nutzung des Deponiegases noch wirtschaftlich ist, ist eine Aerobisierung nicht sinnvoll. Das Verfahren ist bei eingestauten Deponiebereichen, die nicht mit einfachen Mitteln entwässert werden können, nicht anwendbar. Bei Vorliegen von toxisch wirkenden Schadstoffen, die einen mikrobiologischen Abbau hemmen, führt das Verfahren nicht oder nur in einem unverhältnismäßig langen Zeitraum zum Erfolg. Bei einer Bebauung des Deponiekörpers ist zu berücksichtigen, dass es durch den beschleunigten Ab- und Umbau der organischen Substanz meist zu großen Setzungen kommen kann (bis zu 5 % der Schütthöhe).

Vor-/Nachteile

Vorteile

Mittels In-situ-Aerobisierung können mit relativ geringem Aufwand in überschaubaren Zeiträumen (rund 5 bis 10 Jahre) die Deponiegas- sowie die Sickerwasseremissionen aus kommunalen Altablagerungen deutlich verringert werden. Bei jüngeren Deponien für Siedlungsabfälle kann der erforderliche Nachsorgezeitraum deutlich verkürzt werden.

Nachteile

Anfänglich können durch Änderung der Milieubedingungen vermehrt Schadstoffe freigesetzt werden. Schadstoffe, die zwar im Allgemeinen für kommunale Altablagerungen von nachrangiger Bedeutung sind, jedoch in Einzelfällen relevant sein können, wie z.B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, Schwermetalle oder chlorierte Kohlenwasserstoffe, werden durch die Deponiebelüftung in der Regel kaum vermindert. Um langfristig aerobe Verhältnisse aufrecht zu erhalten, sind Belüftungsmaßnahmen (z.B. passive Belüftung oder periodische Belüftung) oft auch längerfristig fortzuführen.

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

Im europäischen Raum wurden einige Projekt zur In-situ-Aerobisierung von kommunalen Altablagerungen und auch neueren Siedlungsabfalldponien begonnen. Bis dato liegen aber noch keine gesicherten Ergebnisse eines vollkommen abgeschlossenen Belüftungsprojektes vor. Erste Projekte in Deutschland zeigen nach 10 Jahren Belüftung deutliche Emissionsreduktionen. Dabei ist jedoch noch offen, ob die erzielte Verminderung des Reaktionspotentials einen langfristig stabilen Zustand darstellt oder auch standortspezifisch zu beurteilen ist.

Im Rahmen von aus ALSAG-Mitteln geförderten Sanierungsprojekten befinden sich drei Projekte in Umsetzung bzw. Planung. Empfehlungen zur technischen Umsetzung wurden im Rahmen des Forschungsprojektes INTERLAND in einem Bericht zusammengefasst⁷.

⁷ verfügbar über die Homepage des ÖVA, s. www.altlastenmanagement.at

Mögliche Verfahrenskombinationen

In der Regel wird die In-situ-Aerobisierung nicht mit anderen Sanierungsverfahren kombiniert. Eine Kombination mit einer Evapotranspirationsschicht oder Methanoxidationsschicht kann in Abhängigkeit vom jeweiligen Standort zweckmäßig sein. In manchen Fällen kann eine Zugabe von Wasser und Nährstoffen zur Optimierung der Milieubedingungen im Deponiekörper den Wirkungsgrad des Verfahrens verbessern.

3.3. Phytoremediation

Verfahrensbeschreibung

Ziel einer Phytoremediation ist es mit Hilfe von Pflanzen anorganische oder organische Schadstoffe zu entfernen, zu stabilisieren oder abzubauen, wobei generell die folgenden Wirkungsprinzipien unterschieden werden:

Bei der **Rhizodegradation** erfolgt ein Abbau organischer Schadstoffe durch Mikroorganismen, die im Wurzelraum von Pflanzen leben. Die Schadstoffabbauenden Mikroorganismen werden dabei durch die Pflanzenwurzeln über zwei Arten von Effekten gefördert:

- **unspezifische Effekte** z.B. verbesserte Sauerstoffversorgung entlang der Wurzelkanäle im Boden, Regulation des Wasserhaushaltes, "Düngeeffekt" durch Abgabe von organischen Substanzen wie Zucker und Aminosäuren über die Pflanzenwurzeln (= Wurzelexudate)
- **spezifische Effekte** z.B. Stimulation von Genen für katabolische Enzyme durch Wurzelexudate, Erhöhung der Bioverfügbarkeit von Schadstoffen durch Abgabe von Biodetergenzien über die Wurzeln

Eine "klassische" Anwendung einer Rhizodegradation sind Pflanzenkläranlagen. Diese wurden für die Reinigung von kommunalen Abwässern entwickelt, sie sind aber im Prinzip auch für die on-site Behandlung von Grundwasser an kontaminierten Standorten einsetzbar.

Bei der **Phytoextraktion** werden anorganische Schadstoffe direkt durch die Pflanzen aufgenommen und in der oberirdischen Biomasse angereichert. Diese können in weiterer Folge geerntet und einer Behandlung zugeführt werden.

Bei der **Phytotransformation** werden organische Schadstoffe (z.B. aromatische und chlorierte Aliphaten) von Pflanzen aufgenommen und anschließend im Pflanzengewebe durch Enzyme zu nicht-phytotoxischen Substanzen metabolisiert. Diese Metabolisierung erfolgt nach demselben Prinzip und mit sehr ähnlichen Enzymen wie die Entgiftung von Schadstoffen in der Leber. Man spricht daher in diesem Zusammenhang auch vom "Green Liver"-Konzept.

Bei der **Phytoimmobilisierung** erfolgt durch Stoffe, die in den Pflanzen gebildet und über die Wurzeln abgegeben werden (Wurzelexudate) eine Fixierung der anorganischen (z.B. Komplexbildung von Schwermetallen durch organische Säuren) und organischen Schadstoffe im Übergangsbereich Boden/Wurzel.

Rhizofiltration bedeutet die Filterung von Schadstoffen aus Oberflächengewässern durch Adsorption an oder Absorption durch Pflanzenwurzeln. Dabei werden Landpflanzen eingesetzt, die auf Flößen schwimmen und deren Wurzeln ins Wasser reichen. Diese Methode ist sowohl für anorganische Schadstoffe (z.B. Radionuklide), wie auch für organische Schadstoffe einsetzbar.

Unter **Phytovolatilisation** versteht man den Transfer von Schadstoffen aus dem Boden oder Grundwasser über den Transpirationsstrom der Pflanze in die Atmosphäre. Die Phytovolatilisation kann auch als unerwünschter Nebeneffekt beim Einsatz von Phytoremediation eintreten.

Bei der **Hydraulischen Kontrolle** werden Pflanzen (vor allem Bäume), die ein tiefreichendes Wurzelsystem und einen hohen Wasserbedarf haben dazu eingesetzt, die horizontale Ausbreitung von Schadstofffahnen einzuschränken, sowie die vertikale Verlagerung von Schadstoffen aus der ungesättigten Zone ins Grundwasser zu minimieren. Eine bereits relativ gut untersuchte Anwendung für eine hydraulische Kontrolle ist die Aufbringung von Evapotranspirationsschichten zur Verminderung der Sickerwassermengen bei Deponien. Dabei erfolgt die Regulation des Wasserhaushaltes hauptsächlich über die Wasseraufnahme mittels der Pflanzenwurzeln gefolgt von einer Transpiration über die Blätter.

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Die verschiedenen Methoden der Phytoremediation können für unterschiedliche Schadstoffklassen wie anorganische Schadstoffe (z.B. Schwermetalle, Radionuklide), organische Schadstoffe (z.B. Pestizide, PAK, LCKW) aber auch für Deponiesickerwässer angewendet werden.

Standortvoraussetzungen

Die oben genannten Methoden der Phytoremediation sind an unterschiedlichen kontaminierten Standorten einsetzbar, so dass keine einheitlichen Standortvoraussetzungen angegeben werden können.

Die Phytodegradation, Phytoextraktion und Phytostabilisierung sind vor allem für relativ geringbelastete und großflächige Standorte geeignet.

Die Phytotransformation mit hydraulischer Kontrolle wurde bisher nur in Pilotversuchen für den Abbau von LCKW in oberflächennahen und gering mächtigen Grundwasserleitern eingesetzt. Darüber hinaus ist auch eine relativ geringe Fließgeschwindigkeit des Grundwassers eine Voraussetzung für die Anwendung dieser Methode.

Evapotranspirationsschichten werden auf Altablagerungen zur Verringerung des Sickerwassers eingesetzt. Standortvoraussetzungen sind geeignete Klimaverhältnisse sowie relativ geringe oder verminderte Methanemissionsraten, so dass im Wurzelraum genügend Sauerstoff für ein ausreichendes Pflanzenwachstum zur Verfügung steht.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Liegen pflanzentoxische Schadstoffe in hohen Konzentrationen vor, sind Phytoremediationsmethoden nicht anwendbar. Die Wirkungstiefe ist auf den Wurzelraum der jeweiligen Pflanzen beschränkt (z.B. Gräsern und Kräutern 0,2 - 2 m, Baumwurzeln bis 18 m Tiefe), wobei für die Phytoremediationsmethoden vor allem die Feinwurzeln von Bedeutung sind und diese mit der Tiefe linear abnehmen, so dass bei Schadstoffen in der ungesättigten Zone nur die obersten 2 m erreicht werden können. Für die hydraulische Kontrolle können aber auch einzelne, tiefer reichende Wurzeln von Bedeutung sein. Wie bei allen biologischen Verfahren wird auch die Wirksamkeit von Phytoremediationsmethoden durch die Bioverfügbarkeit der vorhandenen Schadstoffe wesentlich beeinflusst.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Besonders vorteilhaft ist die Erhaltung der Bodenfunktionen. Phytoremediationen integrieren sich ins Landschaftsbild und sind in der Regel kostengünstige und genehmigungsfreie Verfahren.

Nachteile

Der Einsatz von Phytoremediationsmethoden für die ungesättigte Zone (Phytoextraktion, Rhizodegradation, Phytoimmobilisierung, Phytovolatilisation) beschränkt sich auf oberflächennahe, gering belastete Standorte. Eine Phytoextraktion dauert ohne begleitende chemische Maßnahmen (z.B. Zugabe von Chelatoren) verhältnismäßig lange, da durch die Vegetationsperiode meist nur wenige Prozent der vorhandenen anorganischen Schadstoffe entzogen werden können. Die mit Schadstoffen angereicherten Pflanzen müssen oft kostenintensiv entsorgt werden. Bei einigen dieser Verfahren werden Schadstoffe von einem Medium in ein anderes verfrachtet (z.B. Phytovolatilisation) oder ihre Bioverfügbarkeit wird erhöht (z.B. für Tiere). Metabolite und deren Toxizität sind oftmals nicht bekannt. Auf dem Gebiet der Phytoremediation besteht daher noch großer Forschungsbedarf.

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

Zwischen 1982 und 2005 wurden in den Vereinigten Staaten rund 20 Phytoremediationsprojekte realisiert.

Im Rahmen von aus ALSAG-Mitteln geförderten Sanierungsprojekten hat es in Österreich bisher keine Anwendung gegeben. Anwendungen haben sich bisher auf Pilotversuche im Feld beschränkt. Für die Phytoextraktion sowie für die

Anwendung von Evapotranspirationsschichten wurden Empfehlungen zur technischen Umsetzung im Rahmen des Forschungsprojektes INTERLAND in einem Bericht zusammengefasst⁸.

Mögliche Verfahrenskombinationen

Die unterschiedlichen Methoden der Phytoremediation können als Ergänzungen, bzw. als Kombinationsmethoden zu intensiveren Maßnahmen zur Dekontamination von Böden oder Grundwasser zweckmäßig sein.

⁸ verfügbar über die Homepage des ÖVA, s. www.altlastenmanagement.at

4. Chemische Verfahren⁹

4.1. In-situ-chemische-Oxidation (ISCO)

Verfahrensbeschreibung

Ziel der In-situ-chemischen-Oxidation (ISCO) durch Einbringung eines Oxidationsmittels ist eine rasche und möglichst weitgehende chemische Umwandlung einer vielfältigen Palette von Schadstoffen in inerte, weniger mobile und/oder weniger toxische Stoffe. Die hierfür am häufigsten eingesetzten Reagenzien sind Permanganate, Ozon und Peroxide. Die Einbringung in den Untergrund kann gasförmig sowie in flüssiger Form durch Injektion als gelöstes Reagenz erfolgen.

Ozon wird im Gegensatz zu den meisten Oxidationsmitteln primär mittels Lanzen direkt als Gas in den Kontaminationsherd injiziert. Dafür wird Ozon in der Regel elektrisch über Hochspannung erzeugt, verdichteter Luft beigesetzt und sowohl in die ungesättigte als auch die wassergesättigte Zone eingeblasen. Die Oxidation der organischen Schadstoffe erfolgt entweder direkt oder durch die Bildung freier Radikale wie Hydroxylradikale, wobei diese als nicht-selektive Oxidationsmittel alle organischen Verbindungen angreifen und ihre Kohlenstoffbindungen aufbrechen. Aufgrund seiner geringen Stabilität erfordert die Anwendung von Ozon ein relativ enges Injektionsraster.

Im Gegensatz zum gasförmigen Ozon werden die in Lösung befindlichen Reagenzien über Grundwasserbrunnen oder Injektionslanzen in den Grundwasserleiter, bzw. in die in der wassergesättigten Zone liegende Schadstoffquelle infiltriert. Als Reagenzien werden Permanganate, Ozon (Reaktion s.o.) und Wasserstoffperoxid aber auch Persulfat eingesetzt.

Am häufigsten werden **Kaliumpermanganat** und **Natriumpermanganat** eingesetzt. Die Reaktions-Stöchiometrie ist sehr komplex; aufgrund der verschiedenen Wertigkeitsstufen und Mineralformen von Mangan sind verschiedenste Reaktionen möglich. In Abhängigkeit vom pH-Wert kann die Reaktion durch z.B. direkten Elektronentransfer oder durch freie Radikal-Oxidation ablaufen.

Wasserstoffperoxid (H_2O_2) bildet unter Anwesenheit eines Metallkatalysators (meist Eisen, welches entweder separat oder als "klassisches **Fenton's Reagenz**"

⁹ Besonderer Hinweis - rechtliche Aspekte/Akzeptanz: Auf Grund der rechtlichen Situation in Zusammenhang mit dem Wasserrechtsgesetz (Vorsorgeprinzip und Verunreinigungsverbot für Grundwasser) muss nach derzeitigem Stand davon ausgegangen werden, dass die Anwendung chemischer In-situ-Technologien nur erschwert bzw. im Zusammenhang mit einigen in den Boden einzubringenden Substraten und Reagenzien nicht möglich ist. Im Unterschied zu den allgemeinen Zielbestimmungen des WRG zur Reinhaltung von Gewässern ist bei kontaminierten Standorten zu beachten, dass oft massive, kaum sanierbare Grundwasserschäden bestehen. Dementsprechend könnte in Zukunft eine Abwägung von Vor- und Nachteilen bei der Anwendung von chemischen in-situ-Technologien zweckmäßig sein. Als Voraussetzung dafür müssten zuerst fachliche und rechtliche Aspekte im Kreise aller Beteiligten diskutiert werden, um feststellen zu können, ob und unter welchen Voraussetzungen chemische Verfahren eingesetzt werden könnten.

(= H_2O_2 + Eisen(II)) eingebracht wird) freie Hydroxyl-Radikale ($\cdot\text{OH}$), welche als sehr starke, nicht-spezifische Oxidationsmittel dienen. Weiters setzen diese Radikale eine Kettenreaktion in Gang, in der Superoxidationen ($\cdot\text{O}_2^-$), Hydroperoxidationen ($\text{HO}_2\cdot$) und organische Radikale ($\text{R}\cdot$) gebildet werden, welche wiederum mit dem Schadstoff reagieren.

Relativ neu ist die Verwendung von **Persulfat (Peroxodisulfat)**, wobei dieses in der Regel in der Form von Natriumpersulfat eingesetzt wird. Das in wässriger Lösung vorliegende Persulfat-Anion $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ stellt ein starkes Oxidationsmittel dar, welches mit einigen Schadstoffen direkt reagiert. Unter Katalyse (z.B. durch Eisen(II)-Salze) oder durch Erwärmen reagiert das Anion weiter zu Sulfat-Radikalen, welche ein noch stärkeres Oxidationsmittel darstellen. Diese Sulfatradikale sind stabiler als Hydroxyl-Radikale und erzielen dadurch größere Wirkungsradien als z.B. das Fenton's Reagenz. Die weiteren Abbaureaktionen führen je nach pH-Wert und Persulfatkonzentration zu Sauerstoff, Wasserstoffperoxid und Peroxomonosulfat.

Beim Einsatz von Verfahren zur In-situ-chemischen-Oxidation ist eine Abstromsicherung vorzusehen. Bei hohen Schadstoffkonzentrationen kann aufgrund der exothermen Reaktion eine Überführung von flüchtigen Schadstoffen in die Bodenluft erfolgen, so dass eine begleitende Absaugung der Bodenluft erforderlich werden kann. Gleiches gilt beim Einblasen von Ozon-Luft-Gemischen.

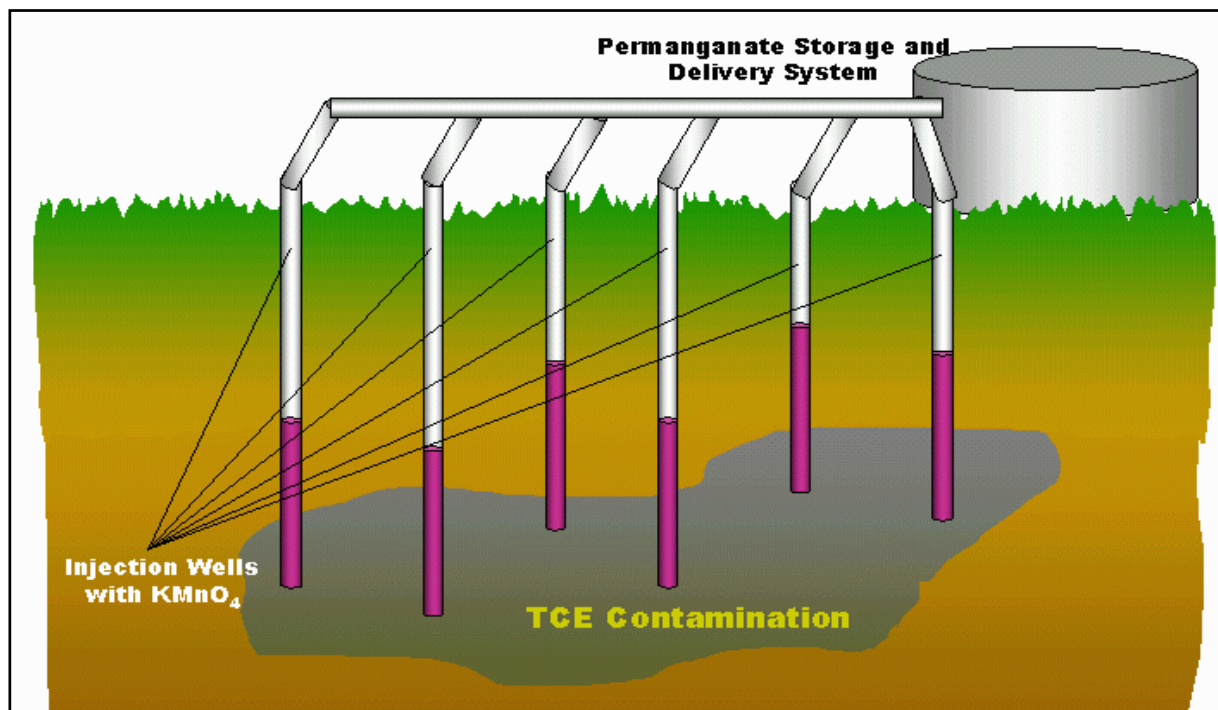


Abbildung 5: Prinzipskizze zur In-situ-chemischen-Oxidation (Quelle: US-EPA)

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Prinzipiell kann eine große Anzahl an Schadstoffen mittels ISCO behandelt werden, wobei hier nach dem Oxidationsmittel unterschieden werden muss (s. Tab.1).

Mittels **Permanganat** werden primär organische Stoffe mit Kohlenstoffdoppelbindungen oxidiert. Eine direkte Zerstörung organischer Phasen ist nicht möglich und kann erst nach Überführung der Phase in die Lösungsform erfolgen. Es wird beispielsweise für die Oxidation von chlorierten Kohlenwasserstoffen und PAK eingesetzt.

Für **Wasserstoffperoxid** (Einsatz als Fenton's Reagenz) wird der Abbau von chlorierten Kohlenwasserstoffen (PCE, TCE), Sprengstoffen (TNT, RDX), Pestiziden (Atrazine, Pendimethalin), Mineralölen (BTEX, PAK, TPH, MTBE, Dieselkraftstoff) sowie Teeröl genannt.

Anwendungen mit **Ozon** sind für aromatische Kohlenwasserstoffe, Pestizide, chlorierte Kohlenwasserstoffe und Kampfmittel (z.B. Sprengstoffe) bekannt, wobei es auch für Stoffgruppen anwendbar ist, die normalerweise resistent gegen Oxidation sind. Bei der Oxidation von PAK mittels Ozon haben sich Hinweise ergeben, dass hoch toxische Metabolite entstehen können. Die in der nachstehenden Tabelle angeführte Eignung von Ozon bei PAK sollte daher im Einzelfall kritisch hinterfragt werden.

Tab.1: Behandelbarkeit verschiedener Kontaminationen mit ISCO (Lorenz et al. 2008)

Schadstoff	Permanganat	Persulfat	Persulfat mit Katalysator	Fenton's	Ozon
Alkane	-	-	+	+	+
Alkene	+	+	+	+	+
Benzol	-	+	+	+	+
Chlorphenole	+	-	+	+	+
Nitrophenole	-	-	-	?	?
PCE, TCE	+	+	+	+	+
Tetrachlor-kohlenstoff	-	-	+/-	+/-	+/-
chlorierte Ethane	-	-	-	-	+
Toluol	+	+	+	+	+
Ethylbenzol	+	+	+	+	+
PAK	+	+	+	+	+
PCB	-	-	-	-	+?
MTBE	+	+/-	+	+	+

+ geeignet +/- möglicherweise geeignet - nicht geeignet

Standortvoraussetzungen

Für eine erfolgreiche Sanierung sind die gleichmäßige und flächendeckende Verteilung der Oxidantien sowie die Sicherstellung einer möglichst guten Vermischung von Oxidans und Schadstoff im kontaminierten Aquifer entscheidend. Der Untergrund sollte mittel- bis stark durchlässig und möglichst homogen sein.

Die richtige Dimensionierung der zuzuführenden Mengen an Oxidantien, deren Verdünnungsgrad bzw. deren Verteilung sowie das geeignete Verfahren zur Beschickung der Oxidantien sind entscheidende Faktoren, die zum Gelingen einer Sanierung durch Oxidation *in situ* beitragen. Hierfür ist insbesondere die Kenntnis der geochemischen Randbedingungen vor und während der Sanierung essentiell, da sie verschiedene Reaktionen in ihrer Wirkung eingrenzen. Als die maßgebendsten Parameter sind pH-Wert, Temperatur, Druck, Redoxpotential, gelöster Sauerstoff, Leitfähigkeit, Eisen, CO₂, der natürliche Oxidationsmittelbedarf, reduzierte Minerale sowie Karbonate und weitere Radikalfänger zu nennen. Zum Beispiel kann Karbonat die Anwendung von Radikalbildnern wie Fenton's Reagenz und Persulfat stark einschränken oder die Anwesenheit von Radikalfängern wie Säuren die Effektivität eines Eintrags von Ozon deutlich beeinflussen. Diese sog. Matrixeffekte führen zu einem stark überstöchiometrischen Oxidationsmittelbedarf. Das Ausmaß der Matrixeffekte muss vor der Planung von ISCO-Maßnahmen mittels sogenannter SOD- oder NOD-Tests (soil oder natural oxygen demand) bestimmt werden. Zusätzlich sind oxidationsmittelspezifisch weitere Parameter zu bestimmen.

Zur Verhinderung der Bildung fester Eisen(III)-hydroxyde, die die Effektivität der Reaktion negativ beeinflussen können, sollte z.B. beim Einsatz von H₂O₂ der pH-Wert bei 4 bis 6 liegen. Ein anderer Weg zur Erhöhung der Eisenlöslichkeit wäre der Einsatz eines Chelatbildners.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Auflagen zum Umgang mit großen Mengen an Oxidationsmitteln (gefährliche Substanzen) in Folge eines sehr hohen Sauerstoffbedarfs zur Schadstoffoxidation aber auch aufgrund des natürlichen Oxidationsmittelbedarfs der Böden (z.B. Torfeinlagerungen) können zu Einzeinschränkungen führen.

Die Oxidation mit Ozon und Fenton's Reagenz ist am effektivsten im stark sauren Milieu und wird im neutral bis alkalischen Bereich schnell uneffektiv. Weiters ist ein starkes Ansäuern des Bodens, insbesondere von Böden mit hohen Pufferkapazitäten (Carbonate), in der Praxis häufig schwierig bis unmöglich und nicht sinnvoll. Aus Gründen des Arbeitsschutzes können Limitierungen zum Einsatz des giftigen Gases Ozon oder der sehr stark exothermen Reaktion von Ozon und insbesondere Fenton's Reagenz bestehen.

Generell kann zwar bei hohen Belastungen im Bereich einer Schadstoffquelle eine weitgehende Verringerung erreicht werden, aber es ist auch mit deutlichen Restbelastungen zu rechnen, so dass zusätzliche, nachgeschaltete Maßnahmen

(räumliche oder zeitliche Verfahrenskombination) im Allgemeinen einzuplanen sind. Die Sanierung der Fahne mittels ISCO ist meist aufgrund der geringen Stabilität der Oxidationsmittel und des hohen Oxidationsmittelverbrauchs durch Matrixeffekte nicht wirtschaftlich möglich.

Eine oxidative Umsetzung von Schadstoffphasen mittels Permanganat ist im Regelfall nicht möglich, da durch Braunsteinbildung an der Phasengrenzfläche ein ausreichender Zutritt von Oxidationsmittel unterbunden wird.

Generell ist zu beachten, dass sich bei ISCO, insbesondere beim Einsatz von Persulfat, ein betonaggressiver Grundwasserchemismus einstellen kann. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn im Nahbereich oder Abstrom der Sanierungsmaßnahme Einbauten (Keller, Fundamente, Kanäle etc.) in der wassergesättigten Zone vorliegen.

Zu beachten ist, dass bei einer unvollständigen Umsetzung von Schadstoffen beispielsweise aufgrund starker Matrixeffekte die Bildung mobiler und hoch toxischer Metabolite nicht ausgeschlossen werden kann. Zudem ist eine Mobilisierung geogener Bodeninhaltsstoffe (z.B. Oxidation von Cr(III) zu Chromat) möglich, so dass sich aus dem natürlichen Bodenchemismus Ausschlussgründe ergeben können.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Der größte Vorteil der ISCO sind die schnell ablaufenden Reaktionsprozesse. Ozon und Wasserstoffperoxid ermöglichen sehr schnelle Reaktionsraten, bieten hierdurch die Möglichkeit einer hohen Schadstoffmassenverringerung und sind damit insbesondere zur Quellensanierung geeignet. Da beide in der Umwelt relativ schnell abgebaut werden, stellen die verbleibenden Oxidationsmittel im Untergrund langfristig kein Umweltproblem dar.

Die besondere Eignung von Persulfat und Permanganat resultiert aus deren hohen Stabilitäten. Sie können Wochen oder länger (Permanganat bis zum vollständigen Verbrauch) im Untergrund verbleiben und dabei durch Konvektion oder Diffusion transportiert werden. Aus diesem Grund sind sie auch effektiv zur Sanierung von Residualkontaminationen einsetzbar. Weiters haben beide einen deutlich größeren pH-Wirkungsbereich (Persulfat 3-7, Permanganat 3,5-12) als Ozon und Fenton´s Reagenz.

Nachteile:

Generell verläuft die chemische Oxidation unselektiv, d.h., dass konkurrierende Oxidationsreaktionen (z.B. erhöhter Oxidationsmittelverbrauch bei hohen geogenen Eisenkonzentration oder hohem Anteil an organischer Substanz) den Sanierungsprozess stark beeinflussen. Um den natürlichen Sauerstoffbedarf zu überschreiten und somit die Oxidation des Schadstoffs zu erreichen, sind in der

Regel mehrere Injektionen und das Vorhalten von Anlagentechnik erforderlich. Die Schwierigkeit besteht weiters darin, das Oxidationsmittel in der erforderlichen Dosierung über kontaminierte Schichten zu verteilen. Das gilt insbesondere bei Schadensherden in Bereichen mit lateral und vertikal stärker wechselndem Untergrundaufbau. Dieses führt in der Regel zu einer heterogenen Verteilung kontaminierter Bereiche, wobei häufig in den schwach durchlässigen Bodenbereichen, eine Anreicherung von Schadstoffen festzustellen ist.

Weiters können bei der Anwendung der Oxidationsmittel Abbauprodukte entstehen, die toxischer, resistenter gegenüber einem weiteren Abbau oder löslicher als der Ausgangsstoff sind. Ein niedriger pH-Wert erhöht die Mobilität von z.B. Schwermetallen im Grundwasser stark (insbesondere bei Ozon und Fenton's Reagenz). Beim Einsatz von Persulfat kann betonaggressives Sulfat entstehen. Bei der Reduktion von Permanganaten entsteht Braunstein, welcher zur Verblockung des Untergrundes und damit zum Erliegen der Reaktionen führen kann (Einkapselung des Schadstoffes insbesondere am Rande von Phasenpools und höher belasteten Bereichen und bei Feinsedimenten). In hohen Konzentrationen agiert Ozon als Sterilisationsmittel. In Böden mit einem hohen Anteil an organischem Material oder Phasenkontamination können bei den sehr stark exothermen Reaktionen von Ozon und Fenton's Reagenz hohe Drücke und Temperaturen entstehen und Dampf- oder flüchtige Kohlenwasserstoffdämpfe austreten, welches einen erhöhten Arbeitsschutz erfordert.

Durch seine Persistenz im Untergrund kann die Anwendung von Permanganat zur Gefährdung abstromiger Schutzgüter (z.B. Brunnen oder Oberflächengewässer) führen, weshalb wie bereits oben gefordert eine hydraulische Sicherung des abströmenden Grundwassers vorzusehen ist.

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

In den USA wurden In-situ-chemisch-Oxidationen bereits vielfach eingesetzt. Insgesamt wurden zwischen 1982 und 2005 mehr als 50 ISCO-Projekte im Rahmen von Grundwasser- und Quellsanierungen publiziert (US-EPA). Eine Vielzahl von Anwendungsfällen ist für Deutschland und die Beneluxländer bekannt. Für DNAPL kontaminierte Standorte wurden die meisten Anwendungen mit Permanganat bzw. Wasserstoffperoxid durchgeführt. Ozon wurde häufig in der ungesättigten Zone und für LNAPL-Kontaminationen im Kapillarsaum eingesetzt. Für Persulfat sind nur wenige Anwendungen beschrieben, da das Verfahren noch relativ neu ist. Die Permanganat-Anwendungen bezogen sich immer auf die Schadstoffgruppe der LCKW. Fenton's Reagenz überwiegt bei MTBE-Schäden und Ozon wurde hauptsächlich für BTEX/MTBE-Schäden eingesetzt.

Im Rahmen von aus ALSAG-Mitteln geförderten Sanierungsprojekten hat es in Österreich bisher keine Anwendung gegeben. Auf Grund der Auswertung einer 2009 durchgeführten Fragebodenaktion ergibt sich, dass es jedoch bereits

wiederholt Anwendungen von Wasserstoffperoxid sowie auch einzelne Anwendungen von Ozon und Persulfat in Österreich gibt. Zu Permanganat ergaben sich keine Hinweise auf Anwendungen in Österreich. Empfehlungen zur technischen Umsetzung wurden im Rahmen des Forschungsprojektes INTERLAND in einem Bericht zusammengefasst¹⁰. Der Bericht formuliert dabei in Bezug auf die Anwendung bestimmter Oxidationsmittel (z.B. Persulfat) und für mögliche Kombinationen mit anderen Verfahren (z.B. biologische Verfahren) noch weiteren Forschungsbedarf.

Mögliche Verfahrenskombinationen

Zum Teil ist auch die Kombination von Oxidationsmitteln möglich, so wird Ozon zum Beispiel zusammen mit Wasserstoffperoxid eingesetzt. Zur Beschleunigung der Sanierung kann ein Spülkreislauf eingerichtet werden, wofür das im Grundwasserabstrom des Schadensherdes über Brunnen gefasste Grundwasser im Gebiet des Schadenherdes nach Anreicherung über Schluckbrunnen injiziert wird. Gegebenenfalls kann aufgrund der Freisetzung flüchtiger Schadstoffe durch Wärmefreisetzung eine begleitende Bodenluftabsaugung erforderlich werden.

4.2. In-situ-chemische-Reduktion (ISCR)

Verfahrensbeschreibung

Ziel In-situ-chemischer-Reduktionen ist zum einen der Abbau von chlorierten Kohlenwasserstoffen sowie zum anderen die Immobilisierung und Änderung der Wertigkeit von Schwermetallen, insbesondere des toxischen Chrom(VI), in der Schadstoffquelle und auch in der Schadstofffahne.

Bezüglich der chemischen **Reduktion von chlorierten Kohlenwasserstoffen** wird in der Regel als Reduktionsmittel nullwertiges Eisen eingesetzt. Elementares Eisen ist unter neutralen pH-Bedingungen nicht stabil, so dass sich beim Kontakt mit Wasser Wasserstoff bildet. Diese als anaerobe Korrosion bezeichnete Reaktion führt zur Bildung von Fe^{2+} -Ionen und zu einem Anstieg des pH-Wertes. Gleichzeitig reagieren sowohl elementares Eisen als auch gelöste Fe^{2+} -Ionen mit im Wasser gelöstem Sauerstoff oder anderen Oxidationsmitteln. Hierbei entstehen bevorzugt Fe^{3+} -Ionen, welche aufgrund ihrer schlechten Löslichkeit in Form von Hydroxiden ausgefällt werden. Der Schadstoffabbau selbst erfolgt unter den sich einstellenden anaeroben Bedingungen für chlorierte organische Schadstoffe durch Reduktion, wobei hier die Halogenatome am Schadstoff abgespalten werden und nullwertiges Eisen zu zweiwertigem oxidiert wird. Weiters trägt auch der bei der Reaktion von Eisen mit Wasser entstandene Wasserstoff zur reduktiven Dechlorierung bei. Ebenso kann elementares Eisen

¹⁰ verfügbar über die Homepage des ÖVA, s. www.altlastenmanagement.at

Ionen edlerer Metalle reduzieren und sie so entweder in die elementare oder in eine unlösliche Form überführen (s.u.).

Bezüglich der Einbringung des Eisens werden generell zwei Methoden eingesetzt. Entweder wird das Eisen in Bauwerken in den Untergrund eingebracht (s. Permeable Wände, Kap. 6) oder es wird als Nano-Eisen Partikel in den Untergrund injiziert. Bei der Injektion von Nano-Eisen Partikeln unterscheidet man zwischen der Einbringung von bimetallischem Nano-Eisen (Dotierung zusammen mit anderen Metallen) und emulgiertem Nano-Eisen. Erfolgt die Einbringung des Reduktionsmittels über eine Injektion, ist eine Abstromsicherung in Form einer Grundwasserentnahme umzusetzen.

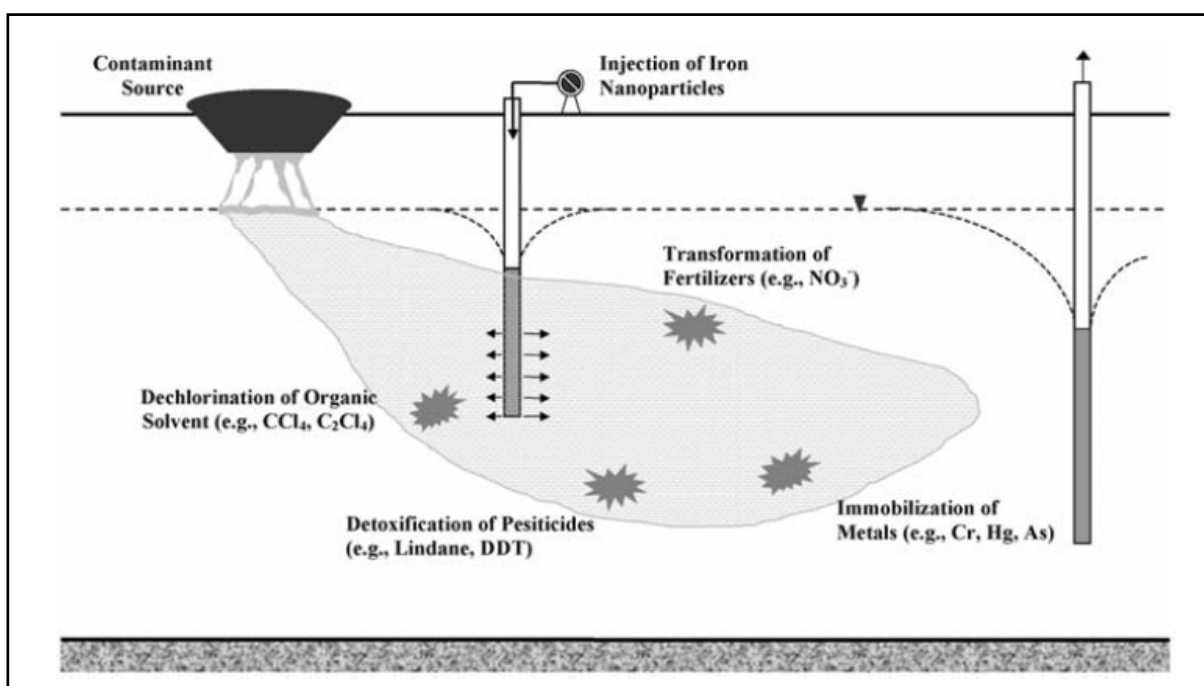


Abbildung 6: Prinzip zur Einbringung von NanoEisen (Quelle: Lehigh University)

Die chemische **Reduktion von Chrom(VI)** erfolgt in der Regel mittels Eisen(II)sulfat, Natriumdithionit oder Kaliumdisulfit. In wässrigen Lösungen werden diese über Injektionsbrunnen oder Drainageleitungen in das Grundwasser eingebracht und in der Reaktion mit Chromat das Fe(II) zu Fe(III) bzw. die Schwefelverbindungen zu Sulfat oxidiert. In Folge der chemischen Reaktion wird das sechswertige Chromat zu dreiwertigem Chrom reduziert und als Chrom(III)hydroxid oder Chromit ausgefällt, häufig vergesellschaftet mit Eisenoxiden oder -hydroxiden. Auch wenn nicht immer ein kolloidaler Transport von Cr(III) vollständig ausgeschlossen werden kann – insbesondere wenn Huminstoffe als Sorptionsmatrix zur Verfügung stehen – ist für die Reaktion weiterhin wesentlich, dass die toxikologische Relevanz von Cr(III) gegenüber Cr(VI) als untergeordnet zu bewerten ist.

Da der gelöste Transport von Chromat im Regelfall nur in oxischen Grundwasserleitern mit hohen Redoxpotentialen auftritt, ergibt sich vielfach die Problematik hoher Matrixeffekte, d.h. durch Reaktion mit anderen Wasserinhaltsstoffen treten starke Zehrungen des eingesetzten Reduktionsmittels auf, die erzielten Reichweiten bleiben gering. Es kann daher sinnvoll sein, durch vorausseilende Injektion organischer Elektronendonatoren (z.B. Melasse, Essigsäure, Ethanol etc.) gezielt den Sauerstoff im Grundwasser zu zehren und das Redoxpotential abzusenken. Zugleich erfolgt auch dabei bereits eine teilweise Reduktion des Chromats.

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Haupteinsatzgebiet der In-situ-chemischen-Reduktion mit nullwertigem Eisen ist insbesondere die Behandlung von LCKW-Kontaminationen. Hauptschadstoff bei der Injektion von Eisen(II)sulfat, Natriumdithionit oder Kaliumdisulfit ist Chrom(VI). Generell ist aber auch eine Immobilisierung weiterer Schwermetalle wie Quecksilber, Nickel, Cadmium oder Blei möglich.

Standortvoraussetzungen

Bei der Injektion des Reduktionsmittels ist dessen gleichmäßige und flächendeckende Verteilung im Untergrund entscheidend, womit dieser mittel- bis stark durchlässig und möglichst homogen sein sollte.

Beim Einsatz von Reduktionsmitteln muss der Reduktionsmittelbedarf durch vorherige Labor- und Feldversuche ermittelt werden und eine möglichst genaue Kenntnis der Schadstoffmengen vorliegen. Als Monitoringparameter sind insbesondere die Milieubedingungen (z.B. der pH-Wert) sowie die Sauerstoffträger wie Nitrat, Sulfat und Sauerstoff anzuführen. Sulfat und/oder Natrium bzw. Kalium sollten im Rahmen des Monitorings bei der Injektion von Eisen(II)sulfat, Natriumdithionit oder Kaliumdisulfit immer mit bestimmt werden, da über deren Gehalte im Grundwasser, vergleichbar einem Tracer, die Reichweite und Verteilung der Injektionen kontrolliert werden kann.

Verfahrensspezifisch ist bei der Injektion von Eisen(II)sulfat, Natriumdithionit oder Kaliumdisulfit darauf zu achten, dass es durch den mikrobiologischen Abbau organischer Substrate sowie die Bildung von Präzipitaten aus Eisenoxiden und -hydroxiden sowie Chrom(III)hydroxid zu Ausfällungen und Ablagerungen kommen kann, die insbesondere bei geringer durchlässigen Aquiferen und geringer effektiver Porosität des Aquifers zu Verblockungen führen können.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Da die Reaktivität von Nano-Eisen Partikel sehr spezifisch ist, können nicht alle Kontaminanten gleich gut behandelt werden. Beispielsweise ist 1,2-Dichlorethan nur mit bimetallischem Nano-Eisen behandelbar. Für stark inhomogene oder gering durchlässige Böden ist das Verfahren ungeeignet. Durch die Reaktion mit Wasser entsteht Wasserstoff, der bei Anreicherung in geschlossenen Bereichen

explosionsfähige Atmosphären (Knallgas) bilden kann. Die Suspension hat basische Eigenschaften (pH 11) und kann Augen und Haut reizen. Auf ausreichenden Arbeitsschutz bei der Manipulation ist zu achten.

Nicht eingesetzt werden darf das Verfahren zur In-situ-chemischen-Reduktion bei Mischschäden, die im reduzierenden Bereich eine Freisetzung von Schadstoffen bewirken. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn neben Chromat Belastungen durch Arsen vorliegen. In diesem Fall kann der Einsatz des Verfahrens eine Reduktion von As(V) zu As(III) bewirken. Im Gegensatz zu Chrom ist bei Arsen die reduzierte Form gut wasserlöslich und wesentlich toxischer.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Prinzipiell kann nullwertiges Eisen direkt als Suspension in den Schadensherd injiziert werden, wobei die Verteilung und die Ausbreitung nach wie vor ein Problem darstellt. Teilchengrößen zwischen 10 und 100 nm haben eine 10 bis 100-fach höhere Reaktivität als konventionelle Eisenpartikel und können auch in den Bodenporen transportiert werden. Eisen ist ein moderates Reduktionsmittel, das zu zweiwertigem Eisen reagiert; das Risiko für den Untergrund und das Grundwasser ist damit als gering einzuschätzen.

Nachteile

Die Fällung von Oxiden, Karbonaten und Sulfiden reduziert die Langlebigkeit und erhöht den Verbrauch der Nano-Eisen Partikel erheblich. Reaktionen mit z.B. Nitrat, Sulfat und Sauerstoff führen zum Effizienzverlust. Eine weitreichende Sanierung ist meist nur mit mehreren Injektionskampagnen erzielbar. Zur Reichweite der Injektion von Nano-Eisen Suspensionen liegen keine gesicherten Erkenntnisse vor, da diese zurzeit noch nicht bestimmbar und damit auch nicht kontrollierbar ist. Die Agglomeration von Nanoeisen-Partikeln kann die Verteilung im Untergrund behindern (oberflächenbehandelte Nano-Eisen Partikel können eine Agglomeration aber minimieren). Durch die bei der Injektion von Nanoeisen auftretende Gasentwicklung kann eine deutliche Reduktion der hydraulischen Durchlässigkeit des Aquifers, verbunden mit Aufstau und Umlenkung des Grundwassers bewirkt werden. Auch bei reaktiven Wänden mit nullwertigem Eisen wurde dieser als "Gasclogging" bezeichnete Effekt beobachtet.

Bei der In-situ-chemischen-Reduktion noch vorhandener Chrom(VI)-Schäden ergeben sich meist sehr lange Sanierungszeiträume. Daher sollte grundsätzlich eine ergänzende Quellensanierung angestrebt werden und das Verfahren primär zur Abwehr von Restbelastungen sowie von Freisetzungen aus unbekanntem oder unzugänglichen Schadstoffquellen eingesetzt werden. Neben der reinen Fahnen-sanierung ist aber auch eine direkte Injektion in Quellbereiche möglich.

Stand der Anwendung

Die Injektion von Nano-Eisen ist ein relativ neues Verfahren, welches erstmals 1997 beschrieben wurde. Aus den USA werden mehrere Sanierungsvorhaben genannt, in Deutschland befinden sich einige F&E Projekte in der Umsetzung, weitere sind gerade am Anlaufen.

Das Verfahren der In-situ-chemischen-Reduktion von Chrom(VI) wurde in Süddeutschland im Rahmen von Labor-, Technikums- und Feldversuchen zur Sanierung eines ehemaligen Galvanikstandortes erprobt. Daneben sind diverse Veröffentlichungen, insbesondere der US-EPA, zur Chromatreduktion bekannt.

Aus Österreich sind keine Anwendungen zur In-situ-chemischen-Reduktion bekannt.

Mögliche Verfahrenskombinationen

Möglich bei der Chromatreduktion sowie in der Anfangsphase standortspezifisch sinnvoll ist die Kombination mit Pump-and-Treat-Verfahren. Hier kann das überstöchiometrisch mit Reduktionsmittel aufbereitete Grundwasser oberstromig versickert und damit gleichzeitig der Andrang sauerstoffreichen Grundwassers aus dem Oberstrom unterbunden werden.

Die Kombination z.B. mit biologischen Verfahren zur Sanierung nur noch sehr gering kontaminierter Bereiche kann zielführend sein.

5. Physikalische Verfahren

5.1. Thermische In-situ-Verfahren

5.1.1. Dampf-Luft-Injektion

Verfahrensbeschreibung

Ziel der Dampf-Luft-Injektion (SEE - Steam enhanced extraction) ist es, durch die Erwärmung der ungesättigten sowie wassergesättigten Zone organische Schadstoffe zu verdampfen (in die Gasphase überführen) und über die ungesättigte Zone mittels Bodenluftabsaugung abzusaugen.

Bei der Dampf-Luft-Injektion wird ein Dampf- oder ein Dampf-Luft-Gemisch in die ungesättigte Zone im oder am Rand des Schadenszentrums injiziert. Der injizierte Dampf kondensiert an der kalten Feststoffmatrix und gibt dadurch seine Energie (Verdampfungsenthalpie) an die Feststoffmatrix ab. Durch den fortlaufenden Kondensationsprozess – bis der Boden die Dampftemperatur erzielt hat – kann Dampf von der Injektionsstelle an die Dampffront strömen. Es bildet sich eine räumlich mehr oder weniger ausgedehnte Wärmefront aus, die sich von der Injektionsstelle aus idealer Weise radialsymmetrisch ausbreitet. Im erwärmten Bereich werden die flüssigen, leicht- bis mittelflüchtigen organischen Schadstoffe verdampft. Die mit Schadstoffen beladene Bodenluft wird 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 Einsatz mit alleiniger Dampf-Injektion nur bei organischen Schadstoffen mit einer Dichte $< 1 \text{ kg/l}$ (LNAPL) möglich und muss dann mit geeigneten hydraulischen Methoden (Sicherung durch Sperrbrunnen oder Phasenabschöpfung) kombiniert werden. Im Falle von "schweren" organischen Schadstoffen (DNAPL, z.B. CKW) wird ein Dampf-Luft-Gemisch injiziert. Die mit dem Dampf injizierte Luft wirkt als inertes Trägergas, durchdringt die Kondensationsfront und trägt die Kontaminanten gasförmig mit der Bodenluft aus.

Befindet sich die Kontamination in der wassergesättigten Zone erfolgt die Injektion eines Dampf-Luft-Gemisches unterhalb des Schadenszentrums. Die Schadstoffe werden infolge der sich um die Injektionsbrunnen ausbreitenden Dampf- und Wärmefronten verdampft. Die mit dem Dampf injizierte Luft trägt, als inertes Trägergas, dann die Kontaminanten gasförmig in Richtung der ungesättigten Zone aus.

Die Entfernung der Schadstoffe aus der ungesättigten Zone erfolgt über eine Bodenluftabsaugung. Zur nachgeschalteten Reinigung der Abluft wird in der Regel Aktivkohle eingesetzt, je nach Schadstoff kommen aber auch andere Reinigungstechnologien wie z.B. katalytische Nachverbrennungen zum Einsatz.

Neben der Mobilisierung über die Gasphase erhöhen sich auch die Löslichkeit und die Gleichgewichtskonzentration der Schadstoffe im Grundwasser. Es ist daher zu empfehlen, dass in Kombination zu SEE-Anwendungen generell eine Grundwassersicherung durchgeführt wird, um die mögliche Ausbreitung von gelösten Schadstoffen kontrollieren zu können.

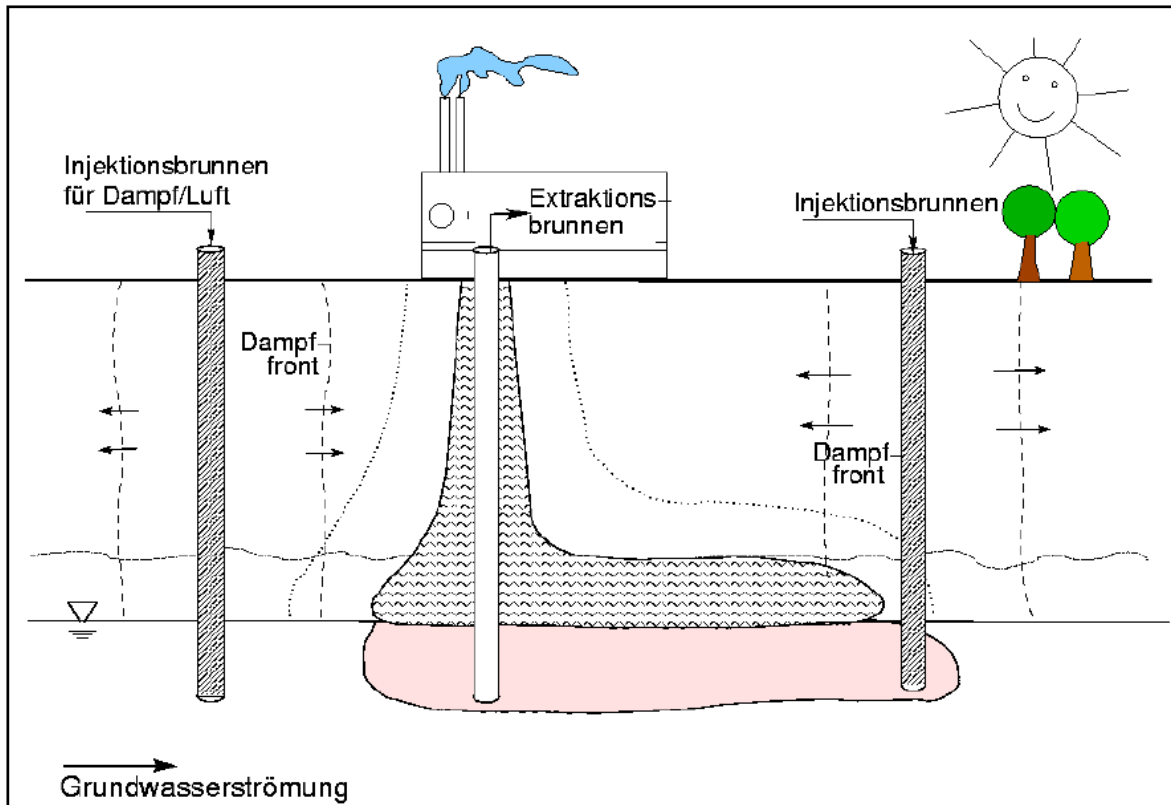


Abbildung 7: In-situ-Dampf-Luft-Injektion (Quelle: Universität Stuttgart)

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Die mit diesen Verfahren behandelbare Schadstoffe sind im wesentlichen leicht- bis mittelflüchtigen organischen Schadstoffen wie z.B. LCKW, BTEX und MKW. Dampf-injektionen sind noch relativ effektiv bei Kohlenwasserstoffen mit Siedepunkten bis zu 170 °C einsetzbar. Da die Verfahren damit insbesondere für die mobilen Anteile des Öls einsetzbar sind, kann die Grundwasserbelastung bedeutend reduziert werden. Die Sanierung von Naphthalin und PCP erfordert im Vergleich zu LCKW eine längere Anwendungsdauer, wird aber auch für diese Schadstoffe als gut eingestuft.

Standortvoraussetzungen

Im Gegensatz zu anderen physikalischen In-situ-Verfahren spielt für die Aufheizung des Untergrunds dessen Inhomogenität eine untergeordnete Rolle, da die Wärmeausbreitung weniger sensitiv durch diese beeinflusst wird. Mitteldurchlässiger Untergrund kann mit dem Verfahren noch behandelt werden. Voraussetzungen für eine begleitende Bodenluftabsaugung sind in Kapitel 3.1.1.1 erläutert.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Maßgeblicher Faktor für den Einsatz ist der Gemischtsiedepunkt des Wasser-Schadstoff Gemisches. Das Verfahren ist bei schwerflüchtigen Schadstoffen und geringen Schadstoffkonzentrationen nicht zweckmäßig. Weiters kann auch die Einbautensituation vor Ort zu einem Ausschluss des Verfahrens führen. Die Sanierung gering durchlässiger Bereiche über konduktive Verdampfung führt zur verlängerten Sanierungszeiten bei gleichzeitig verringertem Energieeintrag. Da sich der Dampf in der wassergesättigten Zone durch Auftriebseffekte nicht nur horizontal im Aquifer sondern auch vertikal nach oben ausbreitet, ist zwar einerseits die Reichweite eines Injektionsbrunnens begrenzt, andererseits kann aber dadurch das Verfahren zur simultanen Sanierung der wassergesättigten und ungesättigten Zone eingesetzt werden. Hat die Dampf front den Grundwasserspiegel durchdrungen, breitet sich die Front auch in der ungesättigten Zone aus und führt auch dort die Schadstoffe in die Gasphase über.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Das Verfahren eignet sich besonders bei stark kontaminierten Standorten. Mit der thermischen Mobilisierung der Schadstoffe ist eine deutliche Verkürzung der Sanierungszeit möglich. Das Verfahren zeichnet sich durch den geringen Eingriff in den Wasserhaushalt aus. Schadstoffe mit Siedepunkten unterhalb des Siedepunktes von Wasser können nahezu vollständig entfernt werden. Durch die Injektion von Satttdampf oder der Dampf-Luft-Mischung beginnen die Schadstoffe bereits bei Temperaturen unterhalb der Dampf temperatur von 100°C (bei Atmosphärendruck), bei der Gemischtsiedetemperatur zu verdampfen (Wasserdampfdestillation). Im Gegensatz zu anderen thermischen Verfahren treten bei SEE keine Setzungen auf. Injektionstiefen bis zu 60 m wurden in Praxis erreicht. Auch nicht flüchtige viskose Schadstoffe können mobilisiert werden.

Nachteile

Zu beachten ist, dass bei unsachgemäßer Anwendung unkontrollierte Kondensationsfronten auftreten können, die zu einer massiven vertikalen Verlagerung von Schadstoffen – Eintrag ins Grundwasser oder Verlagerung von DNAPLs in die wassergesättigte Zone – führen können. Die Auslegung der Bodenluftabsauganlage hat sicherzustellen, dass diese geeignet ist, gefährliche und/oder heiße Dämpfe sicher zu fassen und zu behandeln.

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

Das Verfahren wird in den USA und Deutschland für unterschiedliche Schadensfälle eingesetzt. In Deutschland wurden vereinzelt Sanierungsprojekte durchgeführt. In den USA wurden bis ins Jahr 2005 mehr als 10 Sanierungen abgeschlossen, waren in Betrieb oder befanden sich im Aufbau und Vorbereitung.

Im Rahmen von aus ALSAG-Mitteln geförderten Sanierungsprojekten hat es in Österreich bisher keine Anwendung gegeben. Darüber hinaus zeigte jedoch die Umfrage mittels Fragebogen, dass das Verfahren auch in Österreich bereits sehr vereinzelt angewandt wurde.

Mögliche Verfahrenskombinationen

Eine unterstützende Grundwasserabsenkung kann durch Erhöhung des Grundwassergefälles den Schadstoffaustrag aus der wassergesättigten Zone deutlich erhöhen. Bei der "Hydrous Pyrolysis Oxidation" wird alternierend zum Dampf O₂ injiziert, so dass die Oxidation von gelösten Schadstoffe forciert wird.

Die Kombination von nachgeschalteten Verfahren ist fallspezifisch zu prüfen.

5.1.2. Feste Wärmequellen

Verfahrensbeschreibung

Ziel des Einsatzes von Festen Wärmequellen (TCH – Thermal Conductive Heating) ist es, durch konduktive Erwärmung primär der ungesättigten Zone Schadstoffe zu mobilisieren (verdampfen) und diese anschließend mittels Bodenluftabsaugung zu fassen. Hierzu erfolgt der Einbau von Heizelementen, in Form von elektrisch betriebenen Wärmequellen (Heiztemperaturen bis 600 °C), in die ungesättigte (teilweise auch in die wassergesättigte) Zone. Durch die kontinuierliche Aufheizung des Untergrunds wird das Bodenwasser verdampft (bis 100 °C). Das Wasser und die leicht bis schwerflüchtigen Schadstoffe in der Umgebung der Wärmequellen werden in die Gasphase übergeführt (Prinzipien Sieden und Verdampfen, s. 5.1.1). Wenn notwendig kann der Untergrund vollständig getrocknet und bei Bedarf auch auf Temperaturen von weit über 100 °C aufgeheizt werden.

Die gasseitige Entfernung der Schadstoffe erfolgt über eine Bodenluftabsaugung aus der ungesättigten Zone. Zur nachgeschalteten Reinigung der Abluft wird in der Regel Aktivkohle eingesetzt, je nach Schadstoff kommen aber auch andere Reinigungstechnologien wie z.B. katalytische Nachverbrennungen zum Einsatz.

Neben der Mobilisierung über die Gasphase erhöhen sich auch die Löslichkeit und die Gleichgewichtskonzentration der Schadstoffe im Grundwasser. Es ist daher zu empfehlen, dass in Kombination zu TCH-Anwendungen generell eine Grundwassersicherung durchgeführt wird, um die mögliche Ausbreitung von gelösten Schadstoffen kontrollieren zu können.

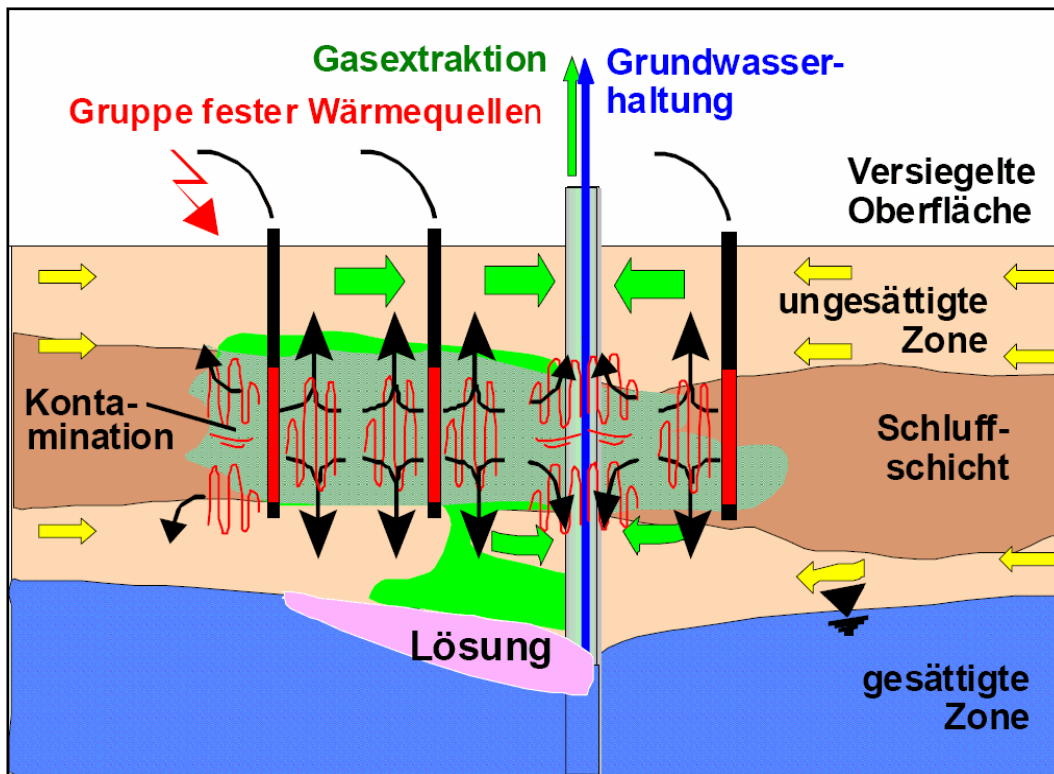


Abbildung 8: Prinzip einer Festen Wärmequelle (Quelle: Universität Stuttgart)

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Die mit diesen Verfahren behandelbare Schadstoffe sind im wesentlichen leicht- bis schwerflüchtige organische Schadstoffe (z.B. LCKW, BTEX, leichte bis schwere MKW).

Standortvoraussetzungen

Im Gegensatz zu anderen physikalischen In-situ-Verfahren spielt für die Aufheizung des Untergrunds dessen Inhomogenität eine untergeordnete Rolle, da die Wärmeausbreitung weniger sensitiv durch diese beeinflusst wird. Im Vergleich mit Dampf-Luft-Injektionen (s. 5.1.1) kann das Verfahren auch bei geringer durchlässigen, sandigen bis tonigen Böden eingesetzt werden. Durch die stattfindende Austrocknung des Untergrunds wird die Permeabilität erhöht, welches die Rückgewinnung der gasförmigen Schadstoffe begünstigt. Voraussetzungen für die begleitende Bodenluftabsaugung sind in Kapitel 3.1.1.1 erläutert.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Maßgeblicher Faktor für den Einsatz fester Wärmequellen ist der Siedepunkt des Wasser-Schadstoff-Gemisches. Weiters ist zu beachten, dass für trockene Böden deutlich höhere Temperaturgradienten erforderlich sind, um die notwendige Wärmeenergie zu transportieren. Wird das Verfahren in der wassergesättigten Zone eingesetzt, beeinflusst der Grundwasserstrom die Wärmeverteilung, so dass es sinnvoll sein kann, den Grundwasserzufluss zu minimieren, um den aufzubringenden Energieeintrag möglichst gering zu halten. Grundsätzlich ist

aufgrund eines aggressiven Milieus im Untergrund (Säuren und Temperatur) der Einsatz von korrosionsfestem Material anzuraten.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Im Vergleich zu anderen Verfahren wird das Verfahren nur in relativ geringem Umfang von der Heterogenität des Untergrundes beeinflusst. Eine effektive Absaugung der Bodenluft muss aber möglich sein. Mit der thermischen Mobilisierung der Schadstoffe ist eine deutliche Verkürzung der Sanierungszeit möglich. Es können Einsatztiefen bis über 30 m beherrschbar sein. Auch Einbauten behindern in der Regel den Wärmetransport nicht. Da im Gegensatz zur Dampf- oder Dampf-Luft-Injektion kein Wärmeträgermedium (Dampf) injiziert wird, können auch gering durchlässige Untergrundbereiche gereinigt werden.

Aufgrund der sehr hohen Temperaturen im Bereich der Wärmequellen ist auch eine Pyrolyse und Oxidation von organischen Schadstoffen möglich.

Nachteile

Das Verfahren ist in stärker durchlässigen Böden weniger geeignet, da der Wärmeeintrag lange braucht und viel geringer ist als z.B. bei der Dampf-Luft-Injektion. Im unmittelbaren Nahbereich der Heizelemente, die mit bis zu 500 - 600 °C betrieben werden, können sich Temperaturen weit über 100 °C nach der Trocknung des Untergrundes ausbreiten. Bei diesen hohen Temperaturen können LCKW zerstört und HCl gebildet werden. Anorganische Komponenten wie Karbonate können dabei als Puffer wirken und sind demnach mit in das Monitoring aufzunehmen. Handelt es sich bei den Schadstoffen um DNAPL, können diese durch die Aufheizung des Untergrunds zu einer forcierten Abwärtsverlagerung angeregt werden, diese kann jedoch durch geeignete Steuerung des Wärmetransportes weitgehend unterbunden werden. Aufgrund der Austrocknung des Untergrunds kann es zu Schrumpfungen und Setzungen und damit zu Gefährdungen an Fundamenten und Bauwerken kommen. Weiters können durch die hohen Temperaturen Kunststoffleitungen oder andere temperaturempfindliche Einbauten beeinflusst werden. Vegetation und die Bodenbiologie werden durch das Verfahren sehr stark beeinträchtigt, erholen sich aber nach Beendigung im Regelfall wieder sehr schnell. Die Auslegung der Bodenluftabsauganlage hat sicherzustellen, dass diese geeignet ist, gefährliche und/oder heiße Dämpfe sicher zu fassen und zu behandeln.

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

Das Verfahren ist bereits mehrfach erfolgreich in den USA und Deutschland für unterschiedliche Schadensfälle eingesetzt worden. In Deutschland wurden mehrere Feldsanierungen mit TCH durchgeführt. In den USA wurden bis 2005

mehr als 15 Sanierungen abgeschlossen, waren in Betrieb oder befanden sich im Aufbau und Vorbereitung.

Im Rahmen von aus ALSAG-Mitteln geförderten Sanierungsprojekten befinden sich 2 Projekte in Planung bzw. Umsetzung. Darüber hinaus zeigte die Fragebogenaktion, dass bereits vereinzelt Anwendungen in Österreich existieren.

Mögliche Verfahrenskombinationen

Die Kombination von nachgeschalteten Verfahren ist fallspezifisch zu prüfen.

5.1.3. Radiofrequenz-Bodenerwärmung

Verfahrensbeschreibung

Bei der Radiofrequenz-Bodenerwärmung (RFH - Radio frequency heating) werden organische Schadstoffe durch Aufheizen der ungesättigten oder wassergesättigten Zone mittels niederfrequenter RF-Strahlung aus der Feststoffmatrix in die Gasphase übergeführt und anschließend über eine Bodenluftabsauganlage gefasst. Die Technik ist zur Erwärmung von elektrisch nichtleitenden Materialien geeignet und arbeitet nach demselben Prinzip wie der Mikrowellenofen. Mittels der eingebrachten Strahlungen im Frequenzbereich von 3-50 MHz können definierte Untergrundbereiche mit hohen Heizraten gleichmäßig erwärmt werden. Die Erwärmung des Untergrunds führt zu einer erhöhten Freisetzung der an die Feststoffmatrix gebundenen Schadstoffe. Schadstoffe, die bei natürlichen Temperaturen flüssig sind, werden erheblich schneller in die Gasphase überführt (Thermodesorption i.d.R. bei bis zu 200 °C). Weiters werden durch Vorliegen einer Wasserdampf-Luft-Mischung im Porenraum die Schadstoffe bereits bei Temperaturen unterhalb der Dampftemperatur von 100°C, bei der Siedetemperatur des jeweiligen Gemisches verdampft (Wasserdampfdestillation).

Die gasseitige Entfernung der Schadstoffe erfolgt über eine Bodenluftabsaugung aus der ungesättigten Zone. Zur nachgeschalteten Reinigung der Abluft wird in der Regel Aktivkohle eingesetzt, je nach Schadstoff kommen aber auch andere Reinigungstechnologien wie z.B. katalytische Nachverbrennungen zum Einsatz.

Neben der Mobilisierung über die Gasphase erhöhen sich auch die Löslichkeit und die Gleichgewichtskonzentration der Schadstoffe im Grundwasser. Es ist daher zu empfehlen, dass in Kombination zu RFH-Anwendungen generell eine Grundwassersicherung durchgeführt wird, um die mögliche Ausbreitung von gelösten Schadstoffen kontrollieren zu können.

Neben der Verdampfung der Schadstoffe ist es mittels RFH ebenso möglich den Untergrund bis auf mehrere 100°C aufzuheizen, um auch die chemische Umwandlung von Stoffen durch Hydrolyse, Oxidation oder sogar Pyrolyse zu er-

zwingen. Weiters kann zur Unterstützung eines mikrobiellen Schadstoffabbaus der Boden auch auf nur 30 bis 40 °C erwärmt werden, um optimale Temperaturmilieus zu schaffen. Die Bioverfügbarkeit der Schadstoffe wird damit erhöht und ein jahreszeitlich unabhängiger Sanierungsfortschritt kann gewährleistet werden.

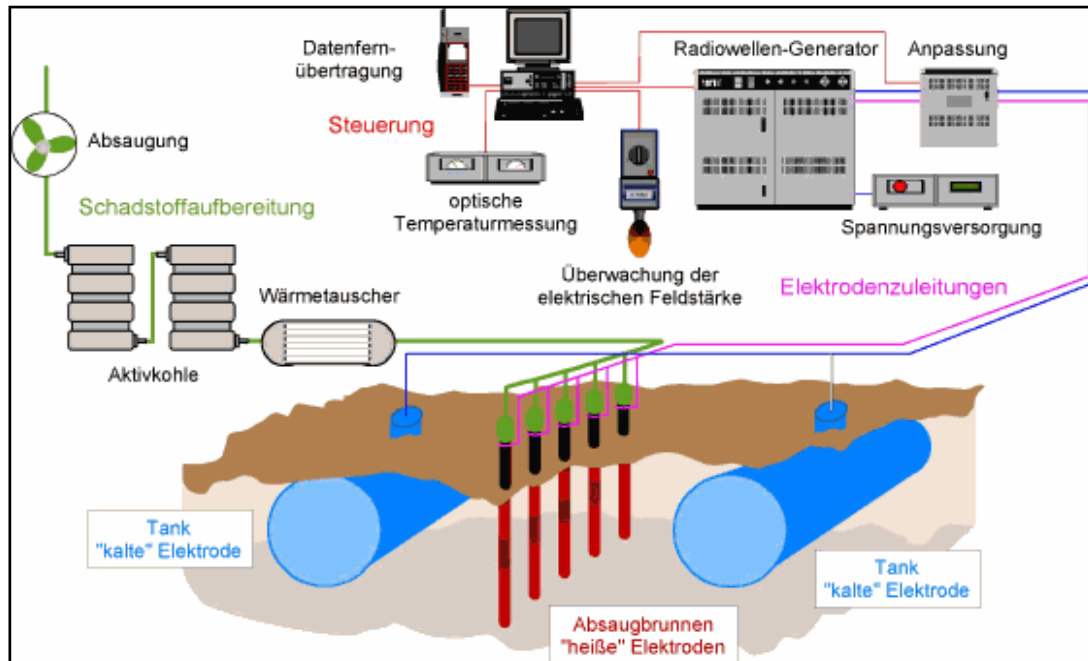


Abbildung 9: Radiofrequenz(RF)-Bodenerwärmung (Quelle: UFZ)

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Die mit diesen Verfahren behandelbare Schadstoffe sind im wesentlichen leicht- bis schwerflüchtige organische Schadstoffe (z.B. LCKW, BTEX oder leichte bis schwere MKW aus allen Arten von Phasenkontaminationen). Prinzipiell ist auch die Eliminierung weiterer Schadstoffe mit niedrigen Siedepunkten wie z.B. Quecksilber möglich.

Standortvoraussetzungen

Im Gegensatz zu anderen Verfahren ergeben sich in Zusammenhang mit dem Aufbau und der Beschaffenheit des Untergrunds keine unmittelbaren Einschränkungen für die Anwendung der Technologie. Das Verfahren ist auch für trockene Böden anwendbar. Voraussetzungen für die begleitende Bodenluftabsaugung sind in Kapitel 3.1.1.1 erläutert. Beim Einsatz zur Unterstützung des mikrobiellen Abbaus ist sicherzustellen, dass die angewandten elektromagnetischen Felder diese nicht schädigen.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Maßgeblicher Faktor für den Einsatz der Radiofrequenz-Bodenerwärmung ist der Siedepunkt der Schadstoffe.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Das Verfahren eignet sich für alle Arten von phasenkontaminierten Standorten und ist auch in bindigen Böden gut einsetzbar. Mit der thermischen Mobilisierung der Schadstoffe ist eine deutliche Verkürzung der Sanierungszeit auf wenige Monate und die Steigerung des Wirkungsgrades möglich. Das Verfahren kann einen oder mehrere definierte Tiefenbereiche behandeln. Es erfolgt keine direkte Erwärmung der Feststoffmatrix. Es werden auch keine zusätzlichen Medien für die Wärmeübertragung benötigt. Die Einstellung bezüglich Heizraten und Endtemperaturen ist sehr variabel.

Nachteile

Die Möglichkeit der Freisetzung heißer Dämpfe in die Umgebung ist zu berücksichtigen. Die Auslegung der Bodenluftabsauganlage hat sicherzustellen, dass diese geeignet ist, gefährliche und/oder heiße Dämpfe sicher zu fassen und zu behandeln. Dazu sind entsprechende Arbeitsschutzmaßnahmen zu treffen. Handelt es sich bei den Schadstoffen um DNAPL, können diese durch die Aufheizung des Untergrunds zu einer forcierten Abwärtsverlagerung angeregt werden. Die Eigenschaften des Untergrundes und von Böden können durch Austrocknungseffekte verändert werden. Dementsprechend kann die Mikrobiologie stark reduziert werden. Aufgrund der Austrocknung des Untergrunds kann es zu Schrumpfungen und Setzungen und damit zu Gefährdungen an Fundamenten und Bauwerken kommen.

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

Das Verfahren befindet sich allgemein noch in Entwicklung. Die erste kommerzielle Anwendung in Europa erfolgt seit 2009 auf zwei Altstandorten in Großbritannien. Auch in den USA wurde das Verfahren bis dato nur sehr vereinzelt angewandt.

In Österreich liegen keine Erfahrungen vor.

Mögliche Verfahrenskombinationen

Die Kombination von nachgeschalteten Verfahren ist fallspezifisch zu prüfen.

5.1.4. Elektrisches Widerstands-Heizen

Verfahrensbeschreibung

Beim Elektrischen Widerstands-Heizen (ERH – Electrical resistive heating) werden flüssige organische Schadstoffe durch Aufheizen der ungesättigten und wassergesättigten Zone mittels Wechselstrom in die Gasphase überführt mobilisiert und anschließend in einer Bodenluftabsaugung gefasst. In der

Anwendung unterscheidet man zwischen Sechsstufen-Wechselstrom mit um 60° verschobenen Phasen und Dreiphasensystem mit um 120° verschobenen Phasen. Im Feld werden die Elektroden direkt in den schadstoffbelasteten Untergrund eingebracht. Diese Elektroden werden je nach Geometrie der Fläche hexagonal oder in Dreiecksanordnung installiert. Durch Anlegen einer Spannung an die Elektroden wird Wechselstrom in den Untergrund geleitet und dieser dadurch bis zum Siedepunkt des Wassers erwärmt. Die Erwärmung führt zu einer Verdampfung der an die Feststoffmatrix in flüssiger Form gebundenen Schadstoffe. Je geringer der Dampfdruck des entsprechenden Schadstoffes ist bzw. je niedriger sein Siedepunkt, desto schneller werden die Schadstoffe verdampft. Durch Vorliegen eines heißen Wasserdampf-Luft-Gemisches im Porenraum werden die Schadstoffe bereits bei Temperaturen unterhalb der Dampftemperatur von 100°C , bei der Siedetemperatur des jeweiligen Gemisches verdampft (Wasserdampfdestillation).

Durch die Überführung in die Gasphase werden die Schadstoffe mobilisiert und können über – oftmals zusammen mit den Elektroden eingebrachten – Lanzen mittels einer Unterdruckabsauganlage (Bodenluftabsaugung) gefasst und in einer nachgeschalteten Reinigungsstufe behandelt werden. In der Regel wird für die Reinigung Aktivkohle eingesetzt, je nach Schadstoff kommen aber auch andere Reinigungstechnologien wie z.B. katalytische Nachverbrennungen zum Einsatz. Darüber hinaus kann die Erwärmung in bestimmten Temperaturbereichen die biologische Aktivität (20 bis 50°C) oder auch chemische Reaktion erhöhen.

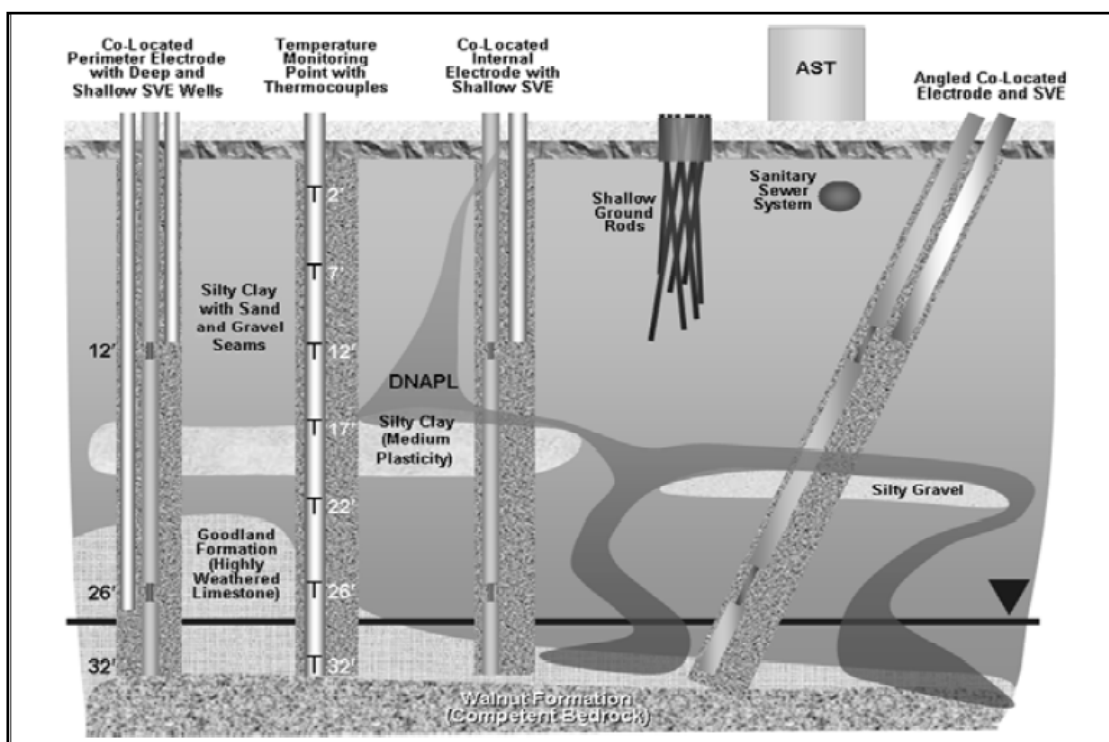


Abbildung 10: Elektrisches Widerstands-Heizen (Quelle: TRS Group)

Neben der Mobilisierung über die Gasphase erhöht sich die Löslichkeit der Schadstoffe, so dass ein erhöhter Eintrag von Schadstoffen ins Grundwasser möglich ist. Es ist daher zu empfehlen, dass in Kombination zu RFH-Anwendungen generell eine Grundwassersicherung durchgeführt wird, um die mögliche Ausbreitung von gelösten Schadstoffen kontrollieren zu können.

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Die mit diesen Verfahren behandelbare Schadstoffe sind im wesentlichen leicht- bis schwerflüchtigen organischen Schadstoffen (z.B. LCKW, BTEX, leichte bis schwere MKW).

Standortvoraussetzungen

Da Bereiche mit höheren Gehalten an Tonmineralien eine höhere elektrische Leitfähigkeit besitzen als durchlässige Böden sind Bodenbereiche mit geringer Durchlässigkeit durch die Ohmsche Erwärmung gut aufheizbar. In der ungesättigten Zone ist, bei Vorliegen von geschichteten Böden (Heterogenitäten), eine Trennung der Fließpfade von Gasphase und elektrischem Strom möglich. Die Voraussetzungen für die begleitende Bodenluftabsaugung sind in Kapitel 3.1.1.1 erläutert.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Maßgeblicher Faktor für den Einsatz des Elektrischen Widerstands-Heizens ist der Siedepunkt der Schadstoffe.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Das Verfahren eignet sich generell für kontaminierte Standorte an denen flüssige Schadstoffphasen im Untergrund ausgebildet sind. Mit der thermischen Mobilisierung der Schadstoffe kann eine deutliche Verkürzung der Sanierungszeit und die Steigerung des Wirkungsgrades erreicht werden. Die Anwendung des Verfahrens kann für ein oder mehrere definierte Tiefenbereiche erfolgen.

Nachteile

Handelt es sich bei den Schadstoffen um DNAPL, können diese durch die Aufheizung des Untergrunds zu einer forcierten Abwärtsverlagerung angeregt werden. Die Eigenschaften des Untergrundes und von Böden können durch Austrocknungseffekte verändert werden. Dementsprechend kann die Mikrobiologie stark reduziert werden.

Da der Spannungsabfall nahe der Elektroden seinen maximalen Wert hat, erfolgt die Austrocknung und damit die Erwärmung in diesem Bereich am schnellsten. Durch die sich daraus ergebende Abnahme des Feuchtegehalts schrumpft der Boden, wodurch der optimale Kontakt zwischen Elektrode und Boden abnimmt und die Wirkung stark nachlassen kann. Aufgrund der Austrocknung des

Untergrunds kann es zu Schrumpfungen und Setzungen und damit zu Gefährdungen an Fundamenten und Bauwerken kommen. Es ist zu prüfen, ob durch die Wärmeeinwirkung Schäden an unterirdischen Einbauten oder Leitungen entstehen können. Die Auslegung der Bodenluftabsauganlage hat sicherzustellen, dass diese geeignet ist, gefährliche und/oder heiße Dämpfe sicher zu fassen und zu behandeln.

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

In den USA wurden bis 2009 insgesamt mehr als 30 Sanierungen unter Einsatz des Elektrischen Widerstands-Heizens durchgeführt oder waren in Planung. In Deutschland und Österreich sind allgemein keine Anwendungen bekannt.

Mögliche Verfahrenskombinationen

Die Kombination von nachgeschalteten Verfahren ist fallspezifisch zu prüfen.

5.2. Elektrokinetische Separation

Verfahrensbeschreibung

Bei der Elektrokinetischen Separation (ER – Electrokinetic Remediation) werden ionisierbare Schadstoffe durch elektrischen Strom mobilisiert. Dazu werden die Elektroden direkt in den Schadensherd (ungesättigte Zone, in seltenen Fällen auch in die wassergesättigte Zone) eingebracht und an eine Gleichstromquelle angeschlossen. Das sich ausbildende elektrische Feld bewirkt einen Transport des Bodenwassers und der darin gelösten Schadstoffe. Generell werden positiv geladene Moleküle und Ionen wie Metallionen, Ammonium oder organische Verbindungen zur Kathode und negativ geladene Ionen oder Moleküle, wie Chloride, Cyanide, Fluoride, Nitrat und organische Verbindungen zur Anode transportiert. Die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse sind zum einen die Elektroosmose, die den Transport organischer Schadstoffmoleküle (z.B. Mineralöle, Phenole) bewirkt, zum anderen die Elektromigration, die den Transport geladener Schadstoffe wie z.B. Schwermetalle bewirkt. Der wesentliche Transportprozess bei der Elektrokinetischen Separation ist die Elektromigration.

Im Anschluss an die elektrokinetischen Prozesse erfolgt ein Abpumpen des mit Schadstoffen aufkonzentrierten Grundwassers aus den (Elektroden-)Brunnen, bzw. werden in der ungesättigten Zone die Schadstoffe durch Spülverfahren an den Elektroden entfernt. Weiters kommt auch die Komplexierung der aufkonzentrierten Schadstoffe *in situ* oder der Aushub der schadstoffangereicherten Untergrundbereiche zu Anwendung.

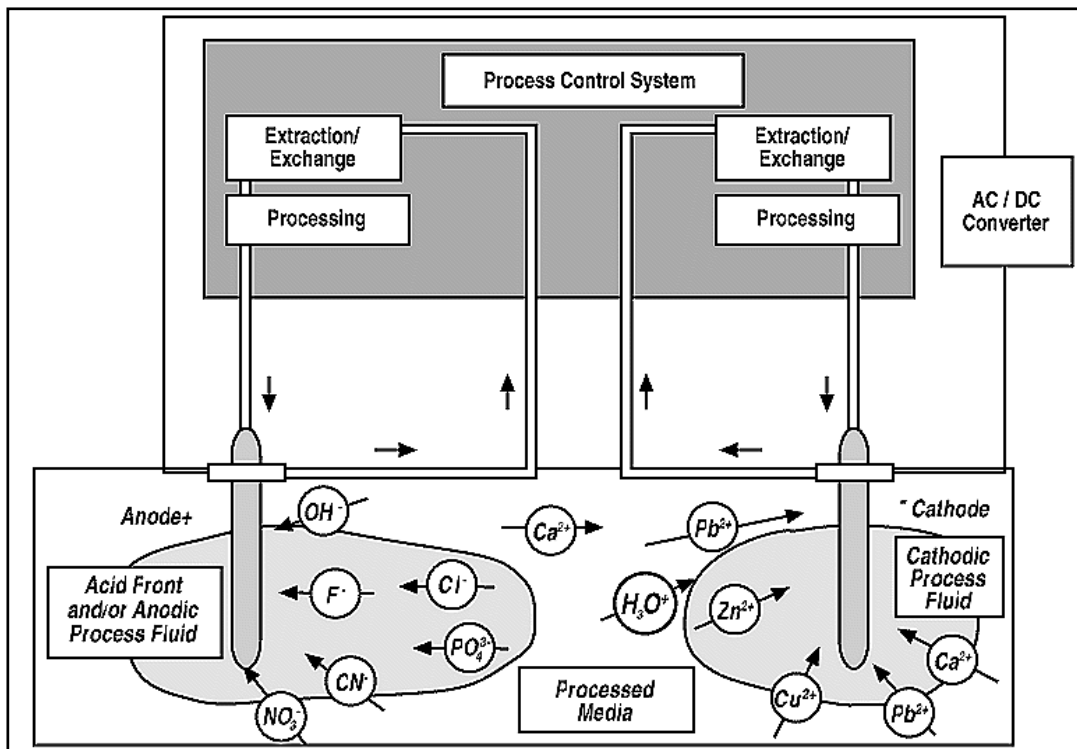


Abbildung 11: Prinzipskizze einer Elektrokinetischen Separation (Quelle: US-EPA)

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Voraussetzung für eine Sanierung mittels Elektrokinetischer Separation ist, dass die Schadstoffe gelöst und in ionischer Form vorliegen. Der Hauptanwendungsbereich liegt in der Entfrachtung von Schwermetallen, Anionen sowie von aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen, 2- und 3-kernige sowie niedermolekulare alkylierte PAK und BTEX, wobei die Konzentrationen zwischen wenigen ppm und mehrere tausend ppm liegen können.

Standortvoraussetzungen

Im Gegensatz zu anderen Verfahren ergeben sich in Zusammenhang mit dem Aufbau und der Beschaffenheit des Untergrunds keine unmittelbaren Einschränkungen für die Anwendung der Technologie. Das Verfahren ist insbesondere für feinkörnige, mineralische Böden geeignet.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Die Wirksamkeit des Verfahrens ist stark von der Art der Bindung des Schadstoffes an die Feststoffmatrix abhängig (pH-Wert abhängige Löslichkeit). Die Größe des wirksam behandelbaren Bereiches ist durch die maximale Distanz der Elektroden und die benötigte Energie limitiert. Es sollten nur inerte Elektroden (Kohle, Platin, ...) zum Einsatz gebracht werden, da sich metallische Elektroden in Folge der Elektrolyse auflösen können. Oxidations- und Reduktionsreaktionen können zu nicht erwünschten Reaktionsprodukten, wie z.B. Chlorgas führen.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Das Verfahren ist für belastete feinkörnige Böden, die mit anderen Verfahren kaum wirksam behandelt werden können, geeignet und kann gut mit konventionellen Sanierungstechniken kombiniert werden.

Nachteile

Eine starke Änderung des pH-Wertes in der Porenflüssigkeit kann auch zur Blockierung der Schwermetallmigration führen.

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

In den USA wurde das Verfahren vereinzelt bereits angewandt. In Deutschland wurden die Möglichkeiten einer Anwendung des Verfahrens in Forschungsprojekten erprobt. Zu diesen Projekten sind keine Nachfolgeaktivitäten zur Weiterentwicklung bekannt. In Österreich sind weder Forschungsaktivitäten noch Anwendungen bekannt.

5.3. Pneumatische und Hydraulische Verfahren

5.3.5. Air Sparging

Verfahrensbeschreibung

Beim Air Sparging handelt sich um ein pneumatisches Verfahren bei dem leichtflüchtige Schadstoffe aus der wassergesättigten Zone entfernt werden. Es wird sowohl zur Quellen- als auch zur Fahnenanierung eingesetzt. Zum Schadstoffaustrag wird Luft direkt in das Grundwasser eingeblasen, wobei dieses in der Regel über Druckluftanlagen erfolgt. Die eingeblasene Luft steigt im Grundwasser auf und bildet einen Belüftungskegel aus. Durch die aufsteigenden Luftblasen werden die Gleichgewichtsbedingungen im Grundwasser so geändert, dass leichtflüchtige Stoffe (z.B. LCKW, BTEX) vermehrt in die Gasphase übergehen und in die ungesättigte Zone ausgetragen werden (Strippung).

Die eingeblasene und schadstoffbelastete Luft wird in der ungesättigten Zone durch Absaugpegel erfasst und einer Abluftbehandlungsanlage zugeführt. Die Absaugrate ist üblicherweise um den Faktor 1,3 bis 5 höher als die Infiltrationsrate.

Aufgrund erhöhter Schadstoffmobilisierung und der möglichen Ausbreitung im Grundwasser sollten im Allgemeinen im Grundwasserabstrom Sicherungsbrunnen betrieben werden.

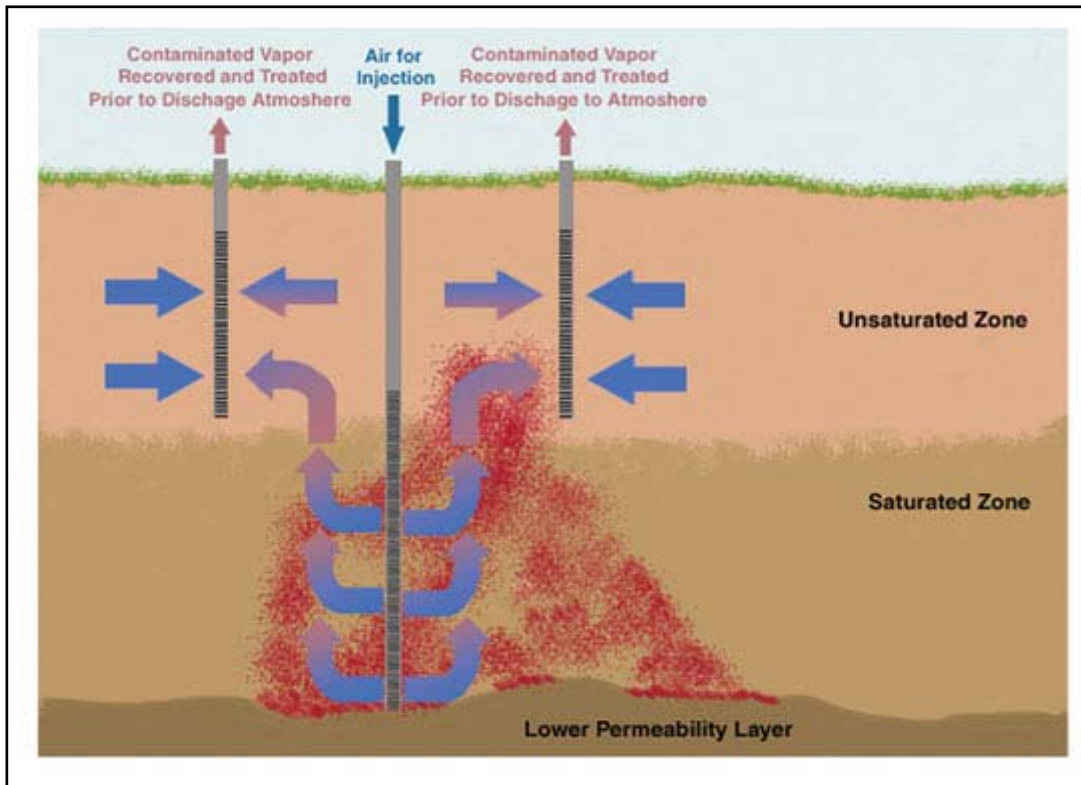


Abbildung 12: Vereinfachtes Schematisches Funktionsprinzip des Air Sparging
(Quelle: US-EPA)

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Air Sparging ist grundsätzlich für alle leichtflüchtigen Schadstoffe geeignet, z.B. für leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe, aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX) und niedrigsiedende Benzinkohlenwasserstoffe (bis C_{10}). In Einzelfällen kann eine Anwendung auch bei Verunreinigungen durch niedermolekulare polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe zweckmäßig sein.

Standortvoraussetzungen

Das Verfahren ist generell für mittel bis stark durchlässige Lockergesteine geeignet. Die laterale Ausbreitung des Belüftungskegels und der Abstand der Druckluftanlagen stehen in Relation zur Mächtigkeit der wassergesättigten Zone. Für eine wirtschaftliche Betriebsweise sollte die Luft in der Regel mindestens 2 bis 3 m unterhalb des Schadenherdes eingebracht werden. Da eine Bodenluftabsaugung notwendig ist, sind auch die Bebauung des Standortes sowie Mächtigkeit und Durchlässigkeit der ungesättigten Zone zu berücksichtigen.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Im Bereich von aufschwimmenden Schadstoffphasen ist das Verfahren ungeeignet, da die Gefahr einer Kontaminationsverschleppung besteht. Bei Kontaminationen, die bis bzw. bis nahe an den Grundwasserstauer heran reichen, ist das Verfahren nicht geeignet, da die tiefliegenden Kontaminationsbereiche nicht ausreichend erfasst werden können. Bei höheren Eisen- und Mangangehalten im

Grundwasser (Fe(III) und Mn(IV)) kann es durch den Lufteintrag zu verstärkten Ausfällungen von Eisen- und Manganhydroxiden und dadurch zu Herabsetzung der Durchlässigkeit und Ausbildung bevorzugter Fließwege kommen. Bei gespannten Grundwasserverhältnissen ist das Verfahren nicht geeignet, da eine nachfolgende kontrollierte Bodenluftabsaugung nicht möglich ist.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Die notwendige gerätetechnische Ausstattung entspricht im Wesentlichen einer konventionellen Belüftung und Bodenluftabsaugung und ist bereits vielfach erprobt.

Nachteile

Bei Vorhandensein von nicht erkannten aufschwimmenden Phasenbereichen kann es zu einer unkontrollierbaren lateralen Ausbreitung von Schadstoffen kommen.

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

Air Sparging wird sowohl im nordamerikanischen Raum als auch im europäischen Raum routinemäßig angewandt.

Im Rahmen von aus ALSAG-Mitteln geförderten Sanierungsprojekten hat es in Österreich bereits eine Anwendung gegeben. Darüber hinaus zeigte die mittels Fragebogen durchgeführte Umfrage, dass vereinzelt weitere Anwendungen in Österreich existieren. Empfehlungen zur technischen Umsetzung wurden im Rahmen des Forschungsprojektes INTERLAND in einem Bericht zusammengefasst¹¹.

Mögliche Verfahrenskombinationen

Bei Vorliegen abbaubarer Schadstoffe und in Abhängigkeit des Schadensbildes kann die kombinierte Anwendung mit Biosparging (vgl. 3.1.1.2) und/oder Bioventing (vgl. 3.1.1.1) zweckmäßig sein.

5.3.6. Spülungen

Verfahrensbeschreibung

Bei der Spülung werden Schadstoffe in der wassergesättigten Zone (im Sonderfall auch in der ungesättigten Zone oder auf dem Grundwasser aufschwimmende Schadstoffphasen) mobilisiert. Spülungen werden immer in Verbindung mit dem Betrieb entsprechender Sanierungs- und Sicherungsbrunnen sowie einer Behandlung des abgepumpten verunreinigten Wassers betrieben. Als Spülmittel können entweder reines Wasser oder Lösungsvermittler, wie Tenside oder Alkohole (s.u.), verwendet werden.

¹¹ verfügbar über die Homepage des ÖVA, s www.altlastenmanagement.at

Das jeweilige Spülmittel wird in der Regel über Drainageleitungen oder Spül-
lanzen in der wassergesättigten Zone knapp oberstromig bzw. im Bereich der
Kontamination versickert. Die gelösten Schadstoffe sowie gegebenenfalls beige-
gebene lösungsvermittelnden Substanzen müssen über den Betrieb von Brunnen
erfasst werden. Nach entsprechender Behandlung wird das gereinigte Wasser im
Allgemeinen wieder zur Spülung verwendet.

Spülungen mit reinem **Wasser** können durch verstärkte Durchströmung bzw.
Durchsickerung in der ungesättigten Zone eine verstärkte Mobilisierung bewir-
ken. Die Schadstoffmobilisierung kann dabei durch Versickern von Warmwasser
weiter gesteigert werden. In der wassergesättigten Zone ist die Anwendung von
Warmwasser aufgrund der hohen notwendigen Energiemengen in der Regel
nicht zweckmäßig.

Durch den Einsatz von Tensiden kann die Löslichkeit organischer Schadstoffe
stark erhöht werden. Auch flüssige Schadstoffphasen werden durch die Spülung
mit Tensiden und die Herabsetzung der Oberflächenspannung fließfähiger. In
diesem Fall müssen zusätzlich zu hydraulischen Maßnahmen zur Kontrolle und
Erfassung des belasteten Grundwassers auch geeignete Maßnahmen zur
Kontrolle und Erfassung der jeweiligen Schadstoffphase (z.B. Skimmer bei
LNAPL) durchgeführt werden.

Die Spülung mit **Alkohol** bewirkt ähnlich den Tensiden eine stark erhöhte
Löslichkeit organischer Schadstoffe und Mobilisierung von freien Schadstoffpha-
sen. Mit spezifisch auf die Zusammensetzung der Kontamination abgestimmten
Alkoholmischungen kann die Dichte in DNAPL-Mischphasen so weit herabgesetzt
werden, dass zum einen ein Absinken der Schadstoffe verhindert und zu anderen
ein Alkohol-Wasser-Schadstoffgemisch erzeugt wird, das hydraulisch kontrolliert
werden kann.

Nach Beendigung der Zugabe von Spülzusätzen bzw. Spülmittel ist in der Regel
eine Nachspülung des Untergrundes mit Reinwasser zur Auswaschung von Spül-
mittelresten notwendig.

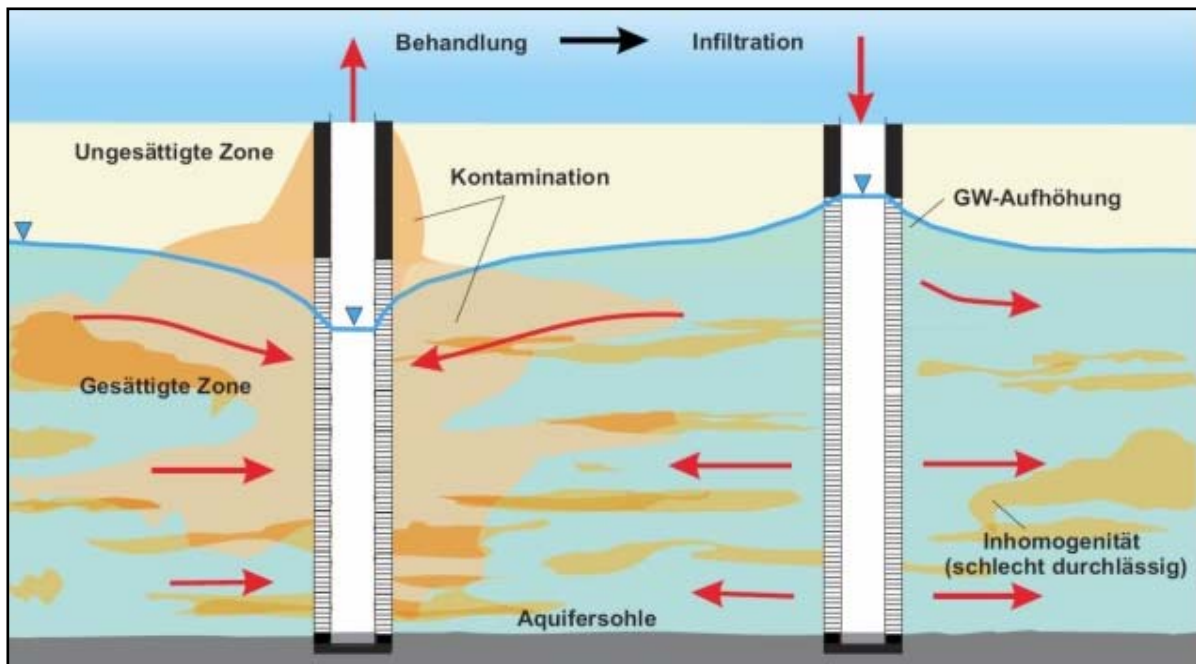


Abbildung 13: Schematischen Funktionsprinzip der Spülung in der ungesättigten Zone
(Quelle: www.ieg-technology.com)

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Spülungen sind grundsätzlich bei gut bis mittel löslichen organischen Schadstoffen (MKW, PAK, BTEX, LCKW, Phenole) anwendbar. Bei Schwermetallen und anderen anorganischen oder schwer löslichen Schadstoffen ist das Verfahren nur bedingt geeignet bzw. die Eignung im Einzelfall standortspezifisch zu prüfen. Das gilt auch für die gezielte Mobilisierung von auf dem Grundwasser aufschwimmenden Schadstoffphasen (LNAPL) und bei der Anwendung zur Mobilisierung und Entfernung von Schadstoffen aus der ungesättigten Zone.

Standortvoraussetzungen

Für eine erfolgreiche Sanierung ist die gleichmäßige Verteilung des Spülmittels im kontaminierten Untergrund entscheidend, womit der Untergrund mittel bis stark durchlässig und möglichst homogen sein sollte. Die Grundwasserfließverhältnisse müssen gut bekannt sein, damit der gesamte Grundwasserabstrom mittels Sperrbrunnen erfasst werden kann. Schadstoffe, die sehr stark an die Bodenmatrix gebunden sind (PAK, PCB, Dioxine etc.), werden aufgrund der sehr langsamen Desorption nur schlecht erfasst.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Bei geringer Mobilisierung von Schadstoffen oder gering löslichen Schadstoffen (z.B. PCB) ist die Anwendung von Spülungen nicht zweckmäßig. Bei sehr komplexen oder stark wechselnden Grundwasserströmungsverhältnissen kann die erforderliche Erfassung und Reinigung des verunreinigten Grundwassers sehr aufwändig sein, oder auch möglicherweise nicht vollständig gewährleistet werden. Bei Spülung von Schadstoffen mit höherer Dichte ist zu berücksichtigen, dass es

zu einer Schadstoffverlagerung in größere Tiefen und zu einer unkontrollierten Ausbreitung kommen kann. Wenn DNAPL-Phasenkörpern am Grundwasserstauer ausgebildet sind, wird die Ausbreitung maßgeblich durch das Relief des Stauers beeinflusst, so dass eine Kontrolle der Mobilisierung der Phase schwierig und nur in Einzelfällen möglich ist. Ein Ausschlussgrund ist in der Regel gegeben, wenn Verunreinigungen an einem kontaminierten Standort auf die ungesättigte Zone beschränkt sind.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Bei geeigneten Randbedingungen können Spülungen ein effektives Verfahren zur Reinigung von kleinräumigen Kontaminationen darstellen. Die notwendige gerätetechnische Ausstattung entspricht im Wesentlichen einer konventionellen "pump & treat" Maßnahme und ist bereits vielfach erprobt.

Nachteile/besondere Hinweise

Bei Spülungen kann es in Abhängigkeit von Schichtungen des Untergrundes zu lateraler Verschleppung von Schadstoffen und einer Vergrößerung des Schadensbereiches kommen. Die eingebrachten Spülmittel können toxisch auf Mikroorganismen wirken und eine nachfolgende biologische Sanierung erschweren. Spülungen mit Zusatzstoffen (z.B. Tensiden) können zu hohem Bakterienwachstum und damit zur Verschleimung der Infiltrationsstellen und der Poren des Grundwasserleiters führen. Für die gezielte Versickerung des Spülmittels sind höhere steuerungstechnische Anforderungen gegeben.

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

Spülungen sind im nordamerikanischen Raum bereits mehrfach angewandt worden. Nachvollziehbare Zahlenangaben zum Einsatz der unterschiedlichen Spülmittel liegen nicht vor. Für den europäischen Raum sind bisher vereinzelt Anwendungen dokumentiert.

Im Rahmen von aus ALSAG-Mitteln geförderten Sanierungsprojekten hat es in Österreich bereits zwei Anwendungsfälle gegeben. Die Auswertung der Fragebogenaktion zeigte weiters vereinzelt Anwendungen, welche im Allgemeinen Spülungen mit Wasser bzw. Warmwasser waren. Spülungen mit Beigabe von Tensiden oder sonstigen Lösungsvermittlern sind nicht bekannt.

Mögliche Verfahrenskombinationen

Spülungen können je nach Einsatzbereich in Kombination mit zahlreichen anderen Sanierungsverfahren angewandt werden.

5.3.7. Grundwasserzirkulationsbrunnen

Verfahrensbeschreibung

Ziel des Einsatzes von Grundwasserzirkulationsbrunnen ist die Ausstrippung leichtflüchtiger Schadstoffe – in manchen Fällen auch der biologische Abbau von Schadstoffen – in der wassergesättigten Zone. Beim Grundwasserzirkulationsbrunnen wird durch Einblasen von Luft in das Grundwasser eine Aufwärtsströmung im Brunnen erzeugt (vgl. Abbildung 14). Durch die veränderten Druckverhältnisse im Brunnen (Mammutpumpeneffekt) fließt im oberen Bereich des Brunnens Wasser in die Umgebung ab und im unteren, durch niedrigere Druckverhältnisse, zu. Dadurch entsteht eine walzenförmige Wasserbewegung rund um den Brunnen.

Durch die intensive Durchmischung der eingebrachten Luft mit dem Grundwasser im Zuge der Aufwärtsströmung im Brunnen erfolgt einerseits ein Übergang von leichtflüchtigen Stoffen (z.B. von LCKW, BTEX) aus dem Wasser in die Gasphase (Strippeffekt) und andererseits eine Erhöhung des Sauerstoffgehaltes des aufsteigenden Grundwassers durch Aufnahme von Luftsauerstoff. Der Sanierungseffekt des Grundwasserzirkulationsbrunnens besteht daher grundsätzlich aus der Austreibung leichtflüchtiger Schadstoffe mit anschließender Abluftfassung und -reinigung. Weiters kann durch den in das Grundwasser eingebrachten Sauerstoff aber auch der Abbau von biologisch gut abbaubaren Schadstoffen (z.B. von MKW) durch vorhandene Mikroorganismen initiiert bzw. beschleunigt werden. Um den biologischen Abbau von Schadstoffen anzuregen, kann der Grundwasserzirkulationsbrunnen auch zur Einbringung von Nährstoffen oder Sauerstoffträgern (z.B. als H_2O_2) verwendet werden. Grundwasserzirkulationsbrunnen können sowohl zur Quellen- als auch zur Fahnenanierung verwendet werden.

Aufgrund möglicher Schadstoffmobilisierung und der möglichen Ausbreitung im Grundwasser sollten im Allgemeinen im Grundwasserabstrom Sicherungsbrunnen betrieben werden.

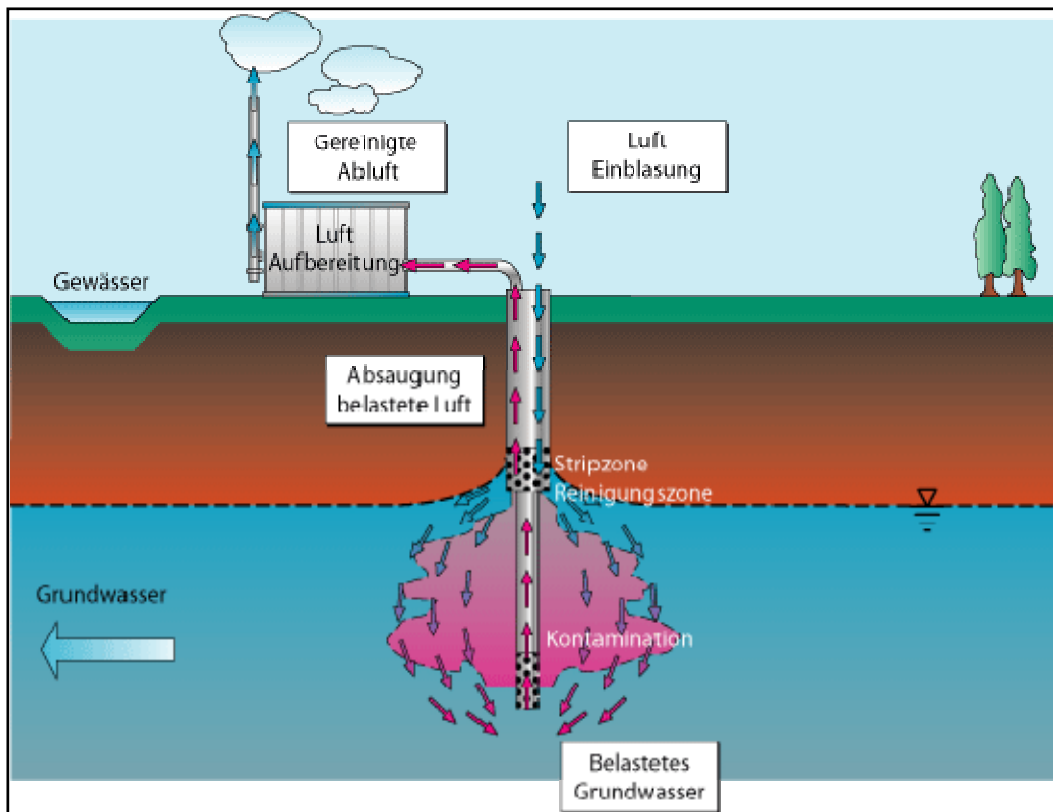


Abbildung 14: Schematischen Funktionsprinzip des Grundwasserzirkulationsbrunnens (Quelle: BAFU)

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Der Grundwasserzirkulationsbrunnen ist grundsätzlich für alle leichtflüchtigen Schadstoffe geeignet, z.B. für leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe, aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX) und niedrigsiedende Benzinkohlenwasserstoffe (bis C₁₀). In Einzelfällen kann eine Anwendung auch bei Verunreinigungen durch niedermolekulare polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe zweckmäßig sein.

Standortvoraussetzungen

Das Verfahren ist für mittel bis stark durchlässige Lockergesteine geeignet. Die laterale Ausbreitung der Wasserbewegung und der Abstand der Grundwasserzirkulationsbrunnen stehen in Relation zur Mächtigkeit der wassergesättigten Zone sowie zur Filterstrecke. Da eine Bodenluftabsaugung in der ungesättigten Zone möglich sein muss, sind auch die Bebauung des Standortes sowie Mächtigkeit und Durchlässigkeit der ungesättigten Zone zu berücksichtigen.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Bei geringer durchlässigen Zwischenschichten sowie stark geschichteten Grundwasserleitern oder starkem Grundwassergefälle ist das Verfahren aufgrund möglicher Schadstoffverschleppungen nicht geeignet. Im Bereich von aufschwimmenden Schadstoffphasen ist das Verfahren nur bedingt geeignet, es müssen gesonderte Maßnahmen zu einer begleitenden Phasenentfernung getroffen

werden. Bei höheren Eisen- und Mangangehalten im Grundwasser (Fe(III) und Mn (IV)) kann es durch den Lufteintrag zu verstärkten Ausfällungen von Eisen- und Manganhydroxiden und dadurch zur Herabsetzung der Durchlässigkeit und zur Ausbildung bevorzugter Fließwege kommen. Bei gespannten Grundwasser- verhältnissen ist das Verfahren nicht geeignet.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Bei geeigneten Randbedingungen kann der Grundwasserzirkulationsbrunnen ein wirksames Verfahren zur Sanierung von leichtflüchtigen Schadstoffen in der wassergesättigten Zone darstellen. Die notwendige gerätetechnische Ausstattung entspricht im Wesentlichen einer konventionellen Belüftung und Bodenluftabsaugung sowie Sperrbrunnen und ist bereits vielfach erprobt.

Nachteile

Der Einfluss eines Grundwasserzirkulationsbrunnens ist räumlich begrenzt, insbesondere bei geringmächtigen Grundwasserleitern.

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

Für den nordamerikanischen Raum sind zahlreiche Anwendungen bekannt und auch im europäischen Raum gibt es einige Beispiele.

Im Rahmen von aus ALSAG-Mitteln geförderten Sanierungsprojekten hat es in Österreich bisher keine Anwendungsfälle gegeben. Auf Grund der Auswertung der Fragebogenaktion ergibt sich, dass es jedoch bereits vereinzelt Anwendungen in Österreich gibt. Empfehlungen zur technischen Umsetzung wurden im Rahmen des Forschungsprojektes INTERLAND in einem Bericht zusammengefasst¹².

Mögliche Verfahrenskombinationen

Bei Vorliegen abbaubarer Schadstoffe in der ungesättigten Zone kann die Kombination mit Bioventing (3.1.1.1) bzw. mit einer konventionellen Bodenluftabsaugung sinnvoll sein. In manchen Fällen ist eine begleitende Zugabe von Nährstoffen zur Optimierung des gewünschten biologischen Schadstoffabbaus sinnvoll.

¹² verfügbar über die Homepage des ÖVA, s. www.altlastenmanagement.at

6. Permeable Wände

Verfahrensbeschreibung

Permeable Wände (permeable (reactive) barriers) werden meist senkrecht zur Grundwasserströmungsrichtung im Grundwasserabstrom von kontaminierten Standorten errichtet und wirken als Sicherungsmaßnahme, die die Ausbreitung einer Schadstofffahne (gelöste Schadstoffe) verhindert. Hydraulisch handelt es sich dabei um eine passive Maßnahme, bei der die Grundwasserströmungsverhältnisse kontrolliert verändert werden, jedoch kein Abpumpen des Grundwassers erfolgt. Diese passive, hydraulische Kontrolle der Schadstofffahne kann, in Abhängigkeit der standortspezifischen Voraussetzungen, durch unterschiedliche Bauweisen erfolgen:

Vollflächig durchströmte Wände sind dadurch gekennzeichnet, dass über die gesamte Länge der Wand eine "reaktive" Zone ausgebildet ist. In Abhängigkeit der Breite der Schadstofffahne und der notwendigen Länge der entsprechenden Filterwand, muss beachtet werden, dass ein Erneuerung der Filterzone (Austausch der Filter/-materialien) oft nicht möglich ist oder auch starken Einschränkungen unterliegen kann.

Funnel-and-Gate-Systeme sind dadurch gekennzeichnet, dass nur ein kleiner Teil der In-situ-Wand als permeabler Filter verwendet wird, während der überwiegende Teil als geringdurchlässige Strömungsleitwand ausgebaut wird. Bei Funnel-and-Gate-Systemen, ist bei entsprechender konstruktiver Ausbildung der "Gates" eine Erneuerung des Filters möglich.

Drain-and-Gate-Systeme funktionieren ähnlich wie Funnel-and-Gate-Systeme, allerdings wird das kontaminierte Grundwasser hier nicht vor einer undurchlässigen Strömungsleitwand sondern in einer hochdurchlässigen Drainage zum Gate geleitet. Voraussetzung für ein Funktionieren dieses Systems ist, dass das Gate an ein hydraulisch ausreichend tiefes Potential, z.B. die Vorflut, angeschlossen werden kann. Auch die Drainage selbst kann bei dieser Ausführung Teil der Reaktionszone sein.

Die Füllung der Wände und Gates besteht aus Material, an dem die im Grundwasser gelösten Schadstoffe abgebaut, gefällt oder adsorbiert werden. Als reaktive Füllung (**Reaktive Wände**) finden diverse Materialien wie nullwertiges Eisen, synthetische Ionenaustauscherharze, metallaktivierte Aktivkohlekatalysatoren, Kalkstein bzw. Kalkmilch oder Natronlauge Anwendung. Aber auch organische Kohlenstoffquellen werden eingesetzt, um über sulfatreduzierende Bakterien Schwefelwasserstoff zu produzieren (**Biogates**). Steht der adsorptive Rückhalt von Schadstoffen im Vordergrund (**Adsorptive Wände**) werden als Füllmaterialien u.a. Aktivkohle, Braunkohle, Huminsande, Steinkohle, Torf oder Schiefertone eingesetzt.

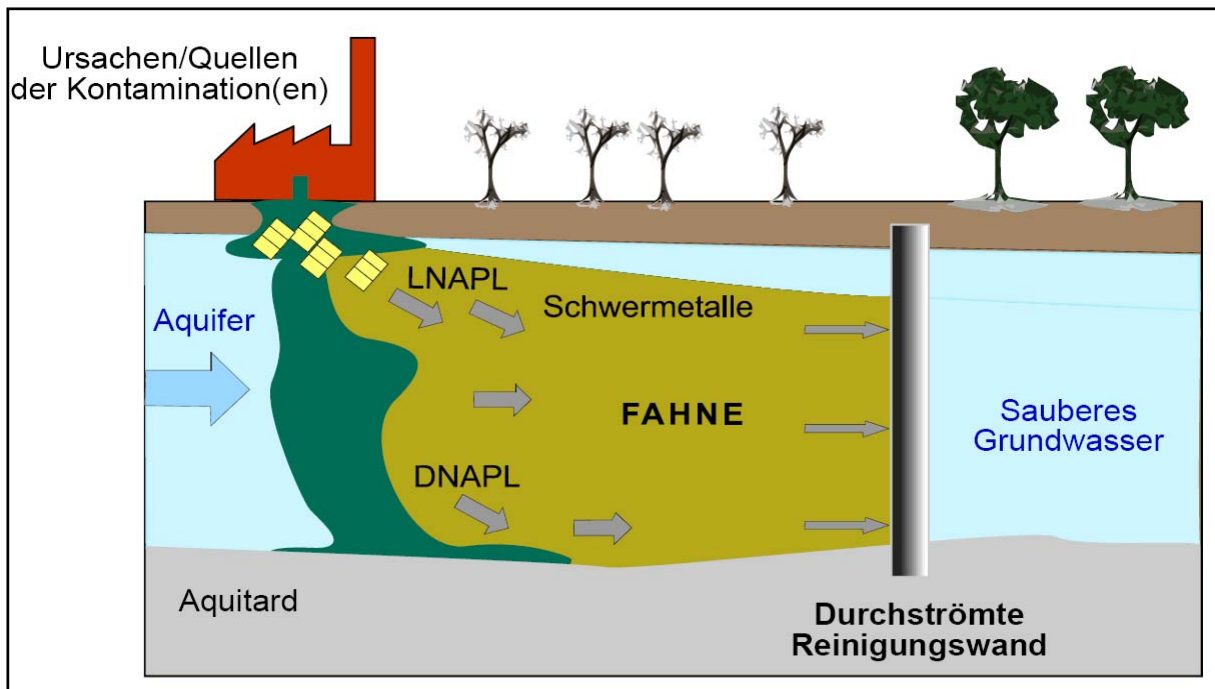


Abbildung 15: Prinzipskizze einer Reaktiven Wand (Quelle: RUBIN 2006)

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Langjährige Erfahrungen liegen für die Verwendung adsorptionsstarker Füllmaterialien, insbesondere **Aktivkohle** (AK) aufgrund der großen spezifischen Oberfläche, vor. Eingesetzt wird AK für gut sorbierende organische Substanzen wie Chlorphenole, PAK, PCB, BTEX, LCKW, MKW aber auch stark sorbierende anorganische Stoffe. Das Füllmaterial der Wand muss auf die vorhandenen Schadstoffe abgestimmt werden.

Auch für **nullwertiges Eisen** zur Reduktion und Fällung von Metallen wie z.B. Cr(VI) sowie insbesondere zur reduktiven Dechlorierung von LCKW (vgl. auch ISCR 4.2) liegen inzwischen zahlreiche Erfahrungen vor.

Standortvoraussetzungen

Der Einsatz des Verfahrens ist weitgehend unabhängig von der Heterogenität und Durchlässigkeit des Untergrundes. Die Wahl zum Einsatz der Verfahren richtet sich in der Regel nach ökonomischen Gesichtspunkten, die durch Faktoren wie geologische Gegebenheiten (Vorhandensein und Tiefe des ersten Grundwasserstauers, da die Wand i.d.R. in diesen einzubinden ist), Art der Schadstoffe, Ausbreitung der Schadstofffahne und Bebauungssituation bestimmt werden.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Maßgeblich ist, dass geeignete Filtermaterialien für die angetroffenen Schadstoffe bzw. Schadstoffgemische existieren. Bei ungleichförmiger Durchströmung des Grundwasserleiters und stark wechselnden Strömungsverhältnissen können sich Einschränkungen für die Anwendung ergeben oder umfangreiche Maßnahmen zur

Kontrolle oder auch unterstützenden Steuerung der Fließverhältnisse notwendig werden. Trotz des möglicherweise hohen Aufwandes ist die Sicherung des Abstroms mittels einer permeablen Wand aber oft die einzige Möglichkeit eine Schadstoffausbreitung zu unterbinden, insbesondere dann, wenn eine Quellsanierung nicht möglich ist.

Die technische und ökonomische Verhältnismäßigkeit ist bei kleinflächigen Kontaminationen sowie bei sehr tiefliegenden Stauern meist eingeschränkt. Die Anwendungsbereiche von Reaktiven Wänden, insbesondere für die Varianten mit reduktiven/oxidativen Abbau oder mit mikrobiologischem Abbau, sind noch nicht vollständig erprobt.

Zur Auslegung und um ein Um- und Unterströmen der Wand zu vermeiden, ist als wichtige Voraussetzung für den Einsatz einer Reaktiven Wand die Erstellung eines hydraulischen Grundwassermodells anzusehen.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Die notwendige gerätetechnische Ausstattung sowie die Verfahren zur Herstellung Permeabler Wände sind im Spezialtiefbau weit verbreitet und in der Praxis gut erprobt. Es handelt sich um ein passives Sicherungsverfahren das ohne aktive Pumpmaßnahmen und damit ohne ständigen Energieeinsatz arbeitet. In der Regel ist keine Grundwasserentnahme notwendig und es verbleiben weitgehend ungestörte Grundwasserströmungsverhältnisse. Im Fall der Nutzung reaktiver Materialien sind kaum schadstoffbeladene Reaktionsmittel oder Schadstoffkonzentrate zu entsorgen. Der Standort kann meist ohne wesentliche Einschränkungen genutzt werden.

Nachteile

Wie bei allen Sicherungsverfahren verbleibt die Schadstoffquelle im Untergrund, so dass meist ein langfristiger Betrieb der Maßnahmen notwendig ist. Die Kapazität der Füllmaterialien ist limitiert, zudem kann es zu biologisch oder chemisch bedingten Veränderungen der Durchlässigkeit des Filters kommen. Beim Einsatz von Eisenwänden treten zum Teil erheblich Probleme durch Gasclogging, d.h. mit der hydraulischen Zusetzung der reaktiven Zonen mit sich bildenden Gasen auf. Beim primären Einsatz von Adsorbermaterial ist im Einzelfall zu klären, ob nach Abschluss der Maßnahme dieses im Untergrund verbleiben kann oder als Abfall einer Wiederverwertung bzw. Entsorgung zugeführt werden muss. Wie bei anderen Sicherungsverfahren (z.B. vollständige Umschließung) können beim Abschluss der Maßnahmen Rückbaumaßnahmen notwendig werden.

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

In den USA sind diverse Projekte mit Permeablen Wänden bekannt. In Deutschland existieren ebenfalls mehr als 10 Permeable Wände (zum Teil Pilotmaßstab). Im Full-Scale-Bereich wurde Aktivkohle mindestens 5-mal und Eisen 3-mal als Füllmaterial eingesetzt.

Im Rahmen von aus ALSAG-Mitteln geförderten Sanierungsprojekten hat es in Österreich bisher vereinzelte Anwendungsfälle (4 x Aktivkohle) gegeben. Auf Grund der Auswertung der Fragebogenaktion ergibt sich, dass auch bereits einzelne Anwendungen von nullwertigem Eisen in Österreich zur Ausführung gekommen sind.

Mögliche Verfahrenskombinationen

In der Praxis haben sich gelenkte Verfahren mit Eingriffsmöglichkeit in den Reaktorbereich (z.B. Rückspülen) durchgesetzt. Grundsätzlich ist die Kombination mit allen Verfahren zur Schadstoffreduktion oder Mobilisierung im Anstrom der Wand sinnvoll möglich.

7. In-situ-Immobilisierung

Verfahrensbeschreibung

Ziel der Immobilisierung ist es die Mobilität und Mobilisierbarkeit von Schadstoffen im Untergrund deutlich herabzusetzen. Durch Einbringen von Zuschlagstoffen in den Untergrund wird ein in der Regel undurchlässiger Bereich hergestellt (physikalische Einkapselung) und damit eine Auswaschung von Schadstoffen verhindert. Zusätzlich können Schadstoffe auch chemisch in der Untergrundmatrix fixiert werden (durch Einbau von Schadstoffen in das Kristallgitter). Vor allem Schwermetalle können durch Zugabe geeigneter Bindemittel entweder durch Fällungsprozesse (Bildung schwerlöslicher Hydroxide bei Zugabe von Zement oder anderen basischen Bindemittel) oder Sorptionsprozesse (Anlagerung an chemisch geladene Oberflächen der Bindemittel) immobilisiert werden. Die In-situ-Immobilisierung wird in der Regel zur Quellensanierung angewandt. Es sind grundsätzlich zwei Verfahren möglich, die Einbringung von Bindemitteln mit hohem Druck (Düsenstrahlverfahren) und das drucklose Einmischen von Bindemitteln (Bodenmischverfahren, Mixed-in-Place(MIP)).

Beim **Düsenstrahlverfahren** (in Österreich meist als Hochdruck-Bodenvermörtelung, HDBV, bezeichnet) wird ein Bohrgestänge mit kleinem Durchmesser (meist DN 100 bis 150) abgeteuft und bei anschließenden Ziehen des Gestänges über eine Düse eine Flüssigkeit (meist Zement-Bentonit Suspension) mit hohem Druck (100 bis 600 bar) in den Untergrund gepresst (vgl. Abbildung 16). Dabei entsteht ein sehr energiereicher Schneidstrahl, der den Untergrund aus seinem natürlichen Gefüge löst und mit dem Bindemittel versetzt. Durch zusätzlich eingepresste Luft sowie gegebenenfalls zusätzliches Wasser kann in Abhängigkeit der Bodenart und -lagerung die Reichweite des Verfahrens erhöht werden. Durch Drehen des Gestänges während des Ziehens entsteht ein kreisförmiger verfestigter Bereich. Der erzielbare Durchmesser der Säulen beträgt bis rund 2,5 m in Kies und weniger als 2 m in bindigen Böden. Zur vollständigen Immobilisierung von größerem Untergrundbereichen werden überschnittene Säulen hergestellt.

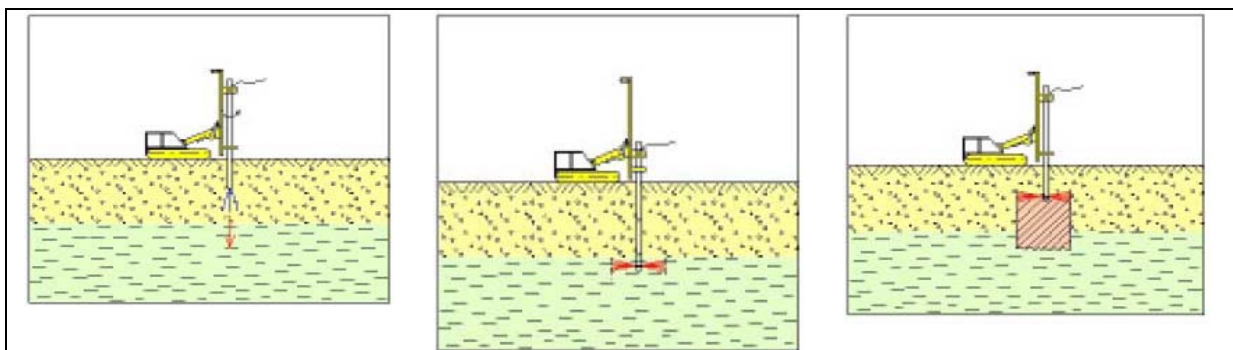


Abbildung 16: schematischen Funktionsprinzip "Düsenstrahlverfahren" (Quelle: Quelle: ÖVA, in Vorbereitung, 2009)

Beim **Bodenmischverfahren** wird der Untergrund mittels Spezialtiefbaumaschinen mit gegenläufig drehenden Schnecken und Rädern gelockert und durch gleichzeitiges Einmischen des Bindemittels verfestigt. Als Bindemittel wird meist eine Zement-Bentonit Suspension eingesetzt. Es können auch weniger fließfähige Stoffe (z.B. Tonschlämme) zugegeben werden, dazu sind aber derzeit noch kaum Anwendungen bekannt. In der Regel werden, vergleichbar mit der Herstellung einer Schlitzwand, überschnittene Lamellen hergestellt.

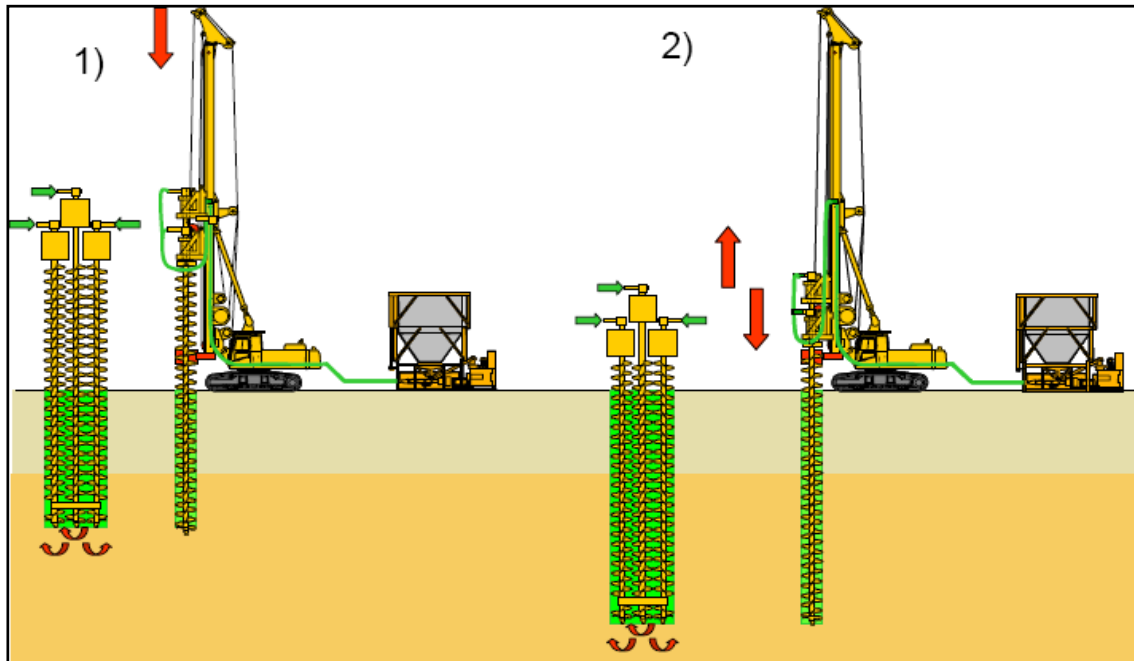


Abbildung 17: schematischen Funktionsprinzip "Mixed in Place"
(Quelle: ÖVA, in Vorbereitung, 2009)

Anwendungsmöglichkeiten

Schadstoffe

Die In-situ-Immobilisierungsverfahren sind grundsätzlich für alle, ausgenommen leichtflüchtige, Schadstoffe sowohl in der ungesättigten als auch in der wassergesättigten Zone geeignet. Besonders geeignet ist die In-situ-Immobilisierung bei anorganischen Schadstoffen.

Standortvoraussetzungen

Das Verfahren ist grundsätzlich in allen Lockergesteinen anwendbar. Vor einer Immobilisierung ist jedenfalls ein Feldversuch mit Errichtung von Probesäulen durchzuführen. Stark inhomogener Untergrund kann beim Düsenstrahlverfahren zu unregelmäßig immobilisierten Bereichen führen.

Einschränkungen/Ausschlussgründe

Bei Vorhandensein von leichtflüchtigen Schadstoffen ist die In-situ-Immobilisierung nicht geeignet. Bei tief liegenden Kontaminationen (> 15 m) sind die

Bodenmischverfahren meist nicht anwendbar. Aufgrund der notwendigen Großgeräte sind Bodenmischverfahren nur in gut zugänglichen Bereichen anwendbar. In Bereichen mit flüssigen Schadstoffphasen ist das Verfahren nur bedingt geeignet, es besteht die Gefahr einer Verlagerung von Schadstoffen und Kontamination in bisher nicht verunreinigte Untergrundbereiche.

Vor-/Nachteile

Vorteile

Die notwendige gerätetechnische Ausstattung sowie die Verfahren sind im Spezialtiefbau weit verbreitet und in der Praxis gut erprobt. Schwermetallkontaminationen können durch Zugabe geeigneter Zuschlagstoffe (z.B. Bentonit, Ton-schlämme) langfristig sorptiv gebunden werden. Bei geeigneten Randbedingungen kann die In-situ-Immobilisierung ein effektives Verfahren zur Sicherung von kleinräumigen Kontaminationen darstellen. Das Bodenmischverfahren ist auch bei sehr heterogenen Untergrundverhältnissen uneingeschränkt anwendbar. Das Düsenstrahlverfahren wird häufig für die Immobilisierung von Kontaminationen unter Gebäudeteilen eingesetzt.

Nachteile

Bei organischen Schadstoffen kann es in Abhängigkeit der Schadstoffart und -verteilung zu einer Verdrängung und damit Ausbreitung von Schadstoffen kommen. Bei Vorhandensein von nicht erkannten Phasenbereichen kann es zu einer nicht kontrollierbaren Ausbreitung von Schadstoffen kommen. Durch Anfall von kontaminiertem Suspensionsrücklauf beim Düsenstrahlverfahren entstehen oft hohe Entsorgungskosten. Die Langzeitstabilität immobilisierter Bereiche ist noch nicht ausreichend erforscht, insbesondere bei organischen Schadstoffen.

Stand der Entwicklung / Stand der Anwendung

Im nordamerikanischen Raum ist die In-situ-Immobilisierung mehrfach angewandt worden, im europäischen Raum gibt es ebenfalls mehrere praktische Erfahrungen.

Im Rahmen von aus ALSAG-Mitteln geförderten Sanierungsprojekten hat es in Österreich bisher zwei Anwendungsfälle gegeben. Auch die Auswertung der Fragebogenaktion hat ergeben, dass darüber hinaus auch vereinzelt das Düsenstrahlverfahren in Österreich angewandt wurde.

Mögliche Verfahrenskombinationen

In der Regel wird die In-situ-Immobilisierung in kleinräumigen Bereichen als Ergänzung zu konventionellen bzw. anderen Sanierungsverfahren angewandt.

8. Stand der Entwicklung und Anwendungspotential

8.1 Stand der Entwicklung

Der Untergrund bzw. Boden und das Grundwasser bei kontaminierten Standorten stellen grundsätzlich einen komplexen Prozess- und Reaktionsraum dar, der darüber hinaus auch räumlich oft stark differenziert und von Heterogenitäten geprägt ist (s. Kapitel 2). Bei der Entwicklung und Anwendung von In-situ-Sanierungstechnologien muss darüber hinaus im Allgemeinen auch Fachwissen aus unterschiedlichsten Disziplinen (z.B. Physik, Mikrobiologie, Chemie, Geologie, Bautechnik und Verfahrenstechnik) kombiniert werden. Diese Herausforderungen führen dazu, dass Innovation und die Entwicklung von Technologien von einer Idee bis zur praxisreifen Anwendung meist einen abgestuften Prozess (s. beispielhaft Abbildung 18) darstellen, der je nach Problemstellung unterschiedlich ausgeprägt sein kann. Im Entwicklungsprozess können dabei auch Detailfragen auftreten, die keine lineare Fortsetzung der Entwicklung zulassen sondern eine zyklische Vertiefung einer Entwicklungsstufe notwendig machen können.

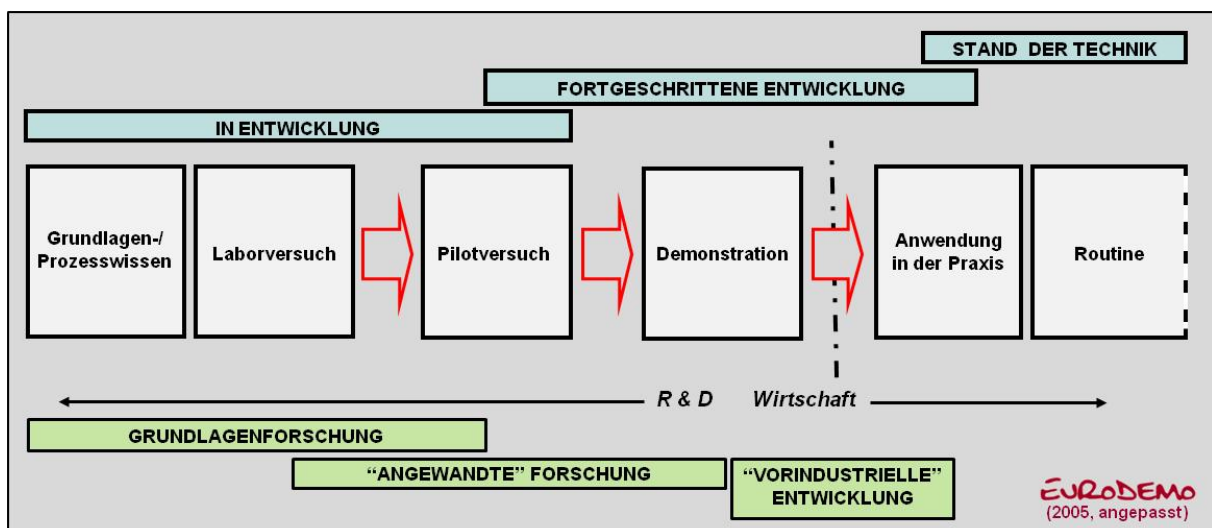


Abbildung 18: Entwicklungs- und Anwendungsstufen von In-situ-Sanierungstechnologien von der Forschung bis zur praktischen Anwendung im Kontext zu begleitender Forschung

Auf Basis der ausgewerteten Literatur und der in den Kapiteln 3 bis 7 dargestellten Angaben zum Stand der Entwicklung und Anwendung der beschriebenen In-situ-Sanierungstechnologien wird eine stark verallgemeinerte Klassifizierung getroffen, die als zusammenfassender Überblick in der folgenden Abbildung 19 dargestellt ist. Dabei stellt die Einstufung den Stand der Entwicklung und Anwendung der Technologien in einem europäischen Kontext dar. Im Vergleich dazu wird auch ein Status in Österreich dargestellt, der sich aus dem Ergebnis einer 2009 unter österreichischen Firmen, Ingenieurbüros und Behörden durchgeführten Umfrage zum Einsatz der aufgeführten Technologien ergeben hat.

	IN ENTWICKLUNG	FORTGESCHRITTENE ENTWICKLUNG	STAND DER TECHNIK	STATUS ÖSTERREICH ³⁾
Biologische Verfahren				
<i>Mikrobiologische Verfahren</i>				
<i>Aerobe Verfahren</i>				
Bioventing				+
Biosparging				+
Aerobe Verf. + Sauerstoffträger ¹⁾				O
Aerobe Verf. + Methan				-
<i>Anaerobe Verfahren</i>				
Anaerobe Verf. + Substrat ¹⁾				-
Anaerobe Verf. + Nitrat ¹⁾				O
<i>In-situ-Aerobisierung von Deponie</i>				O
<i>Phytoremediation</i>				-
Chemische Verfahren				
<i>In-situ-chemische-Oxidation (ISCO)¹⁾</i>				
Permanganat				-
Wasserstoffperoxid				+
Ozon				O
Persulfat				O
<i>In-situ-chemische-Reduktion (ISCR)¹⁾</i>				-
Physikalische Verfahren				
<i>Thermische In-situ-Verfahren</i>				
Dampf-Luft-Injektion				O bis +
Feste Wärmequellen				O
Radiofrequenzbodenerwärmung				-
Elektrische Widerst. Erwärmung				-
<i>Elektrokinetische Separation</i>				
<i>Hydraulische und pneumatische Verfahren</i>				
Air Sparging				O
Spülungen ^{1), 2)}				O
Grundwasserzirkulationsbrunnen				O
Permeable Wände				
Adsorptive Wände				O bis +
Reaktive Wände				- bis O
In-situ-Immobilisierungen				
In-situ-Immobilisierung				O
1) Insbesondere bei der Einbringung von grundwasserbelastenden bzw. -gefährdenden Stoffen sind für Österreich besondere rechtliche Aspekte zu beachten				
2) Die Einstufung in den Stand der Entwicklung ist maßgeblich vom eingebrachten Medium (Wasser, Warmwasser, Alkohol, Tenside, ...) abhängig				
3) Die Einstufung des Status in Österreich erfolgte auf Basis einer im Rahmen des ÖVA-Quicksans "In-situ-Sanierungstechnologien" erhobenen Umfrage				

Abbildung 19: Einschätzung des Entwicklungs- und Anwendungsstands von innovativen Sanierungstechnologien in Europa, sowie deren praktische Anwendung in Österreich (+ = mehrfach, O = vereinzelt, - = nicht angewandt)

Es ist dabei zu betonen, dass die dargestellte Klassifizierung eine Verallgemeinerung darstellt, die einen Überblick ermöglichen soll. Darüber hinaus ist zu beachten, dass sich auch bei den einzelnen In-situ-Sanierungstechnologien der Entwicklungsstand bezogen auf einzelne Komponenten (z.B. eingesetzte Stoffe, oberirdische Anlagentechnik, Installationen, Sondier-/Bohrtechnik und Pegelausbau oder auch Betriebsweisen) deutlich unterscheiden kann. Dementsprechend werden auch Übergänge innerhalb der getroffenen Klassifizierung dargestellt.

8.2 Zukünftiger Sanierungsbedarf in Österreich

In der Studie "Altlastensanierung in Österreich – Effekte und Ausblick" (BMLFUW, 2007) wurde vom Umweltbundesamt abgeschätzt, dass unter Anwendung des Vorsorgeprinzips noch für rund 4.200 Altstandorten und 900 Altablagerungen Sanierungsmaßnahmen erforderlich sein werden. Unter verstärkter Berücksichtigung und Abwägung von Aufwand und Nutzen sowie der Umsetzung einer standort- und nutzungsbezogenen Vorgangsweise sind noch an rund 1.800 Altstandorten und 150 Altablagerungen Sanierungsmaßnahmen notwendig.

Auf Basis der bis 2007 ausgewiesenen Altlasten wurden folgende sechs Hauptschadensarten für österreichische Altlasten kategorisiert:

- Mineralölschäden
- Lösungsmittelschäden
- Teerölschäden
- Schwermetallschäden
- Schäden aus Abfalldeponierung
- Sonstige Schäden (Phenol, BTX, Sprengstoffe und andere)

Die Verteilung der Schadensarten für die prognostizierten Flächen mit erheblicher Untergrundverunreinigung (Altlasten) ist in Abbildung 20 dargestellt. Deutlich erkennbar aus der Abbildung ist, dass im Gegensatz zur Vergangenheit künftig Lösungsmittelschäden und Mineralölschäden als die maßgeblichen Schadstoffe für erheblichen Untergrundverunreinigungen ("Altlasten") erwartet werden. Für die künftige Altlastensanierung kann daher heute davon ausgegangen werden, dass sich jeweils rund ein Drittel aller erheblich kontaminierten Flächen auf Lösungsmittel- sowie auf Mineralölschäden verteilt. Mit rund 20 % sollten kommunale Altablagerungen die dritte häufige Schadensart darstellen. Schwermetall- und Teerölschäden liegen jeweils bei unter 10 %.

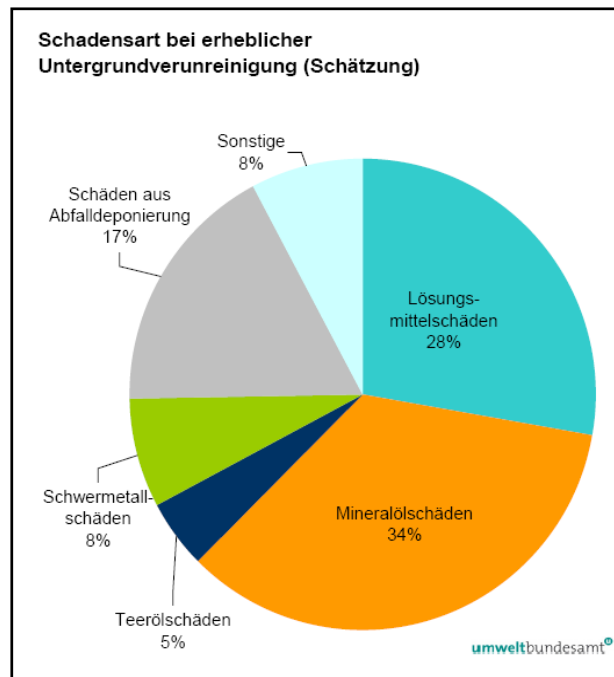


Abbildung 20: Prognose potenzieller Schadensarten für Flächen mit erheblicher Untergrundverunreinigung (Umweltbundesamt 2007)

8.3 Anwendungsreife Technologien mit erhöhtem Marktpotential

Auf Basis der dargestellten zu erwartenden Altlastensituation in Österreich, der Wirkung der in den Kapiteln 3 bis 7 dargestellten In-situ-Sanierungstechnologien, ihrer möglichen Einsatzbereiche sowie dem Stand der Technik in der europäischen Altlastensanierungspraxis (Abbildung 19), können folgende In-situ-Sanierungsverfahren generell als "anwendungsreif" eingestuft werden. Diese Technologien wurden bisher in Österreich noch kaum eingesetzt, haben aber in Zusammenhang mit dem zu erwartenden zukünftigen Sanierungsbedarf ein erhöhtes Marktpotential:

- Bioventing
(Quellensanierung; ungesättigte Zone: BTEX, leichte bis schwere MKW)
- Air-Sparging
(Quellen- und Fahnsanierung; wassergesättigte Zone: LCKW, BTEX, MKW bis C₁₀)
- Dampf-Luft-Injektion
(Quellensanierung; ungesättigte Zone: LCKW, BTEX, leichte bis schwere MKW)
- Adsorptive Wände
(Fahnsanierung: LCKW)

Mineralöl- und Lösungsmittelschäden befinden sich meist in bebauten Gebieten, so dass oft Einschränkungen für Ex-situ-Maßnahmen bestehen. Dementsprechend würde die Verfügbarkeit und Anwendung weiterer In-situ-Technologien (Air Sparging, Bioventing, feste Wärmequellen, Dampf/Luft-Injektion) eine entscheidende Voraussetzung für effiziente Sanierungsprojekte bei diesen Schadenstypen darstellen. Dabei sollten in bebauten Gebieten in Österreich, die sich überwiegend auch im Bereich stark durchlässiger quartärer Tal- und Beckenfüllungen befinden, auch oft geeignete hydrogeologische Standortverhältnisse für die Anwendung von In-situ-Verfahren gegeben sein. Die Wirkung der angeführten Verfahren und mögliche unerwünschte sekundäre Effekte können als gut beschreibbar qualifiziert werden und sind unter der Voraussetzung entsprechender Standortverhältnisse auch gut kontrollierbar, so dass unter Voraussetzung der aktuellen rechtlichen Situation in Österreich, einer geeigneten standortspezifischen Planung und Überwachung sowie mit entsprechenden Auflagen im Behördenverfahren keine wesentlichen genehmigungsrechtlichen Schwierigkeiten bestehen sollten.

Als Voraussetzung für einen möglichen Markteintritt wären insbesondere weitere Maßnahmen zur Unterstützung von Wissenstransfer (z.B. Workshops) und Akzeptanz (z.B. Technologiebulletins) wesentlich.

8.4 Technologien für Demonstrationsprojekte

In Bezug auf den internationalen Stand der Entwicklung wären folgende Verfahren generell im Stadium einer "fortgeschrittenen Technologieentwicklung" (s. Kapitel 8.1) und auf Grund ihres möglichen Marktpotentiales (s. Kapitel 8.2) bevorzugt weiter zu entwickeln:

- Aerobe biologische Verfahren unter Zugabe von Sauerstoffträgern
(Fahnensanierung: MKW, BTEX)
- Anaerobe biologische Verfahren unter Zugabe von Substraten
(Fahnensanierung: LCKW)
- In-situ-chemische Oxidation (Permanganat, Wasserstoffperoxid)
(Quellensanierung; wassergesättigte Zone: div. organische Schadstoffe,)
- Feste Wärmequellen
(Quellensanierung; ungesättigte Zone: LCKW, BTEX, leichte bis schwere MKW)
- Aerobisierung von Deponien / kommunalen Altablagerungen
(Hausmülldeponien)

Die nächsten zweckmäßigen Schritte wären entsprechende Demonstrationsprojekte im Feld sowie eine entsprechende Veröffentlichung und Verbreitung von Informationen zur Umsetzung (z.B. Standortbulletins).

Da bei einigen der angeführten Verfahren Stoffe (insbesondere auch wassergefährdende Stoffe) unmittelbar in das Grundwasser eingebracht werden, sollten begleitend zu Demonstrationsprojekten Arbeitsgruppen eingerichtet werden, um Voraussetzungen für eine allfällige Anwendung in Österreich sowohl aus technischer als auch aus rechtlicher Sicht zu diskutieren und so weit möglich zu beschreiben.

8.5 Technologien mit Entwicklungsbedarf und -potential

Als dritte Gruppe wären folgende In-situ-Sanierungstechnologien auf Grund der allgemein bekannten Ergebnisse aus der Forschung (s. Kapitel 8.1) sowie des möglichen zukünftigen Marktes in Österreich (s. Kapitel 8.2) als "vielversprechend" für eine mögliche Anwendung einzustufen, wobei noch weiterführende Forschung, Feldstudien und Pilotprojekte notwendig erscheinen:

- **Radiofrequenz-Bodenerwärmung**
(Quellensanierung; un-/wassergesättigte Zone: LCKW, BTEX, leichte bis schwere MKW)
- **In-situ-chemische Oxidation (Persulfat, Kombination mit anderen Verfahren)**
(Quellensanierung; wassergesättigte Zone: div. organische Schadstoffe)
- **In-situ-chemische-Reduktion**
(Quellensanierung; wassergesättigte Zone: LCKW, Metalle)
- **Reaktive und katalytische Wände**
(Fahnensanierung: anorganische und organische Schadstoffe)

Bei diesen Technologien wäre eine weiterführende Forschung, die von der Absicherung von Grundlagenwissen bis zu Pilotanwendungen im Feld reichen kann, notwendig.

Literatur

Für den vorliegenden Technologie-Quicksan wurde zusammenfassende Literatur aus dem deutsch- und englischsprachigen Raum verwendet. Die verwendete Literatur wurde jeweils von Behörden bzw. im Rahmen internationaler Projekte herausgegeben.

Aus dem deutschsprachigen Raum

BAFU Bundesamt für Umwelt – VASA – Verordnung über die Abgabe zur Sanierung von Altlasten: VASA-9-Modul "In situ-Sanierung des BAFU (CH)":
http://www.bafu.admin.ch/in_situ_sanierung/

BMLFUW (2007): *Altlastensanierung in Österreich – Effekte und Ausblick*. Hrsg.: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung VI/3, Abfallbehandlung und Altlastensanierung, Wien, Oktober 2007:
<http://hilfe.lebensministerium.at/article/articleview/61109/1/7008/>

BMLFUW (2009): *Leitbild Altlastenmanagement – Sechs Leitsätze zur Neuausrichtung der Beurteilung und Sanierung von kontaminierten Standorten*. Hrsg.: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung VI/3, Abfallbehandlung und Altlastensanierung, Wien, Mai 2009: <http://www.lebensministerium.at/filemanager/download/46251>

Gerzabek, M.H., Reichenauer, T.G. (Hg.) (2006) *Innovative in-situ Methoden zur Sicherung und Sanierung von Altablagerungen und Altstandorten*, ISBN 13:978-3-85076-772-9, Facultas, Wien

INTERLAND (2006): *INnovative TEchnologies for Remediation of LANDfills and Contaminated Soils*. Endbericht + 9. Technische Leitfäden, Universität für Bodenkultur/Austrian Institute of Technology Wien/Seibersdorf, April 2006:
<http://interland.arcs.ac.at/extranet/interland/>

ITVA (2010): *Arbeitshilfe Innovative In-situ-Sanierungsverfahren*. ENTWURF 03-2010 der Arbeitshilfe–AH 1 – 13 Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. Berlin 2010

Lorenz, D., Gass, M., Stupp D. (2008): *Auswertung internationaler Fachliteratur zu in situ Anwendungen in der wassergesättigten Zone bei der Altlastenbearbeitung*. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg Vorpommern.

ÖVA (in Vorbereitung, 2009): *Immobilisierung*. Entwurf technischer Leitfaden.
ÖVA: <http://www.altlastenmanagement.at/>

RUBIN (2006): *Anwendung von durchströmten Reinigungswänden zur Sanierung von Altlasten*. bmbf Vorhaben 0271241, Hrsg.: Universität Lüneburg, Dresden, Juli 2006: <http://www.rubin-online.de/>

Schmidt, J., Sommer, J., Fahl, J. (2007): *Materialien zur Altlastenbehandlung, In situ - Sanierungsverfahren*. Hrsg.: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Referat Grundwasser und Altlasten.

UMWELTBUNDESAMT (2007): *Umweltsituation in Österreich – Achter Umweltkontrollbericht*. Umweltbundesamt, Wien.

Aus dem englischsprachigen europäischen Raum

Leuphana University (2005): *Status report on technological reliability for demonstrated soil and groundwater management technologies with special focus on the situation in Europe*. EURODEMO Deliverable reference no. D6.2 part 1 and part 2. Retrieved on 04.06.09 from: <http://www.eurodemo.info/de/project-information-2/>

TNO (2007): *In-Situ bioremediation technologies – experiences in the Netherlands and future European challenges*. Retrieved on 04.06.09 from: <http://www.eurodemo.info/de/project-information-2/>

Aus dem englischsprachigen nordamerikanischen Raum

Airforce Center for Engineering and the Environment, Remediation Technology: <http://www.afcee.af.mil/resources/technologytransfer/programsandinitiatives/index.asp>

US-EPA – CLU-IN: Clean up information – Online Remediation Technologies Reports. United States Environmental Protection Agency: <http://www.clu-in.org/remediation/>, <http://clu.in.org/databases/> und <http://www.clu-in.org/asr/>

Bildquellen soweit nicht aus obiger Literatur

Lehigh University – Department of Civil and Environmental Engineering: <http://www3.lehigh.edu/engineering/cee/>

TRS Group, Inc.: <http://www.thermalrs.com/>

UFZ – Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung – Department Technische Umweltchemie: <http://www.ufz.de/index.php?de=2529>

Universität Stuttgart – Institut für Wasserbau – VEGAS: www.iws.uni-stuttgart.de/Vegas/

Anhang I: Verfahrensübersicht Einsatzbereiche

Übersicht aller im Quicksan dargestellten In-situ-Verfahren nach ihrem Haupteinsatzbereich. **(Diese Übersicht ist weder für eine Verfahrensvorauswahl für Sanierungsprojekte geeignet, noch ist ein anderer empfehlender Charakter gegeben!)**

In-situ-Verfahren	Schadencharakteristik				Schadstoffe
	Ort		Art		
	ungesättigt	wassergesättigt	Quelle	Fahne	
Biologische Verfahren					
Mikrobiologische Verfahren					
Aerobe Verfahren					
Bioventing	x		(x)		BTEX, MKW, MTBE, (PAK)
Biosparging		x	(x)	x	
Aerobe Verf. + Sauerstoffträger	(x)	x	(x)	x	BTEX, MKW, MTBE, (TCE), cis-DCE, VC, (PAK)
Aerobe Verf. + Methan	x	x	(x)	x	LCKW
Anaerobe Verfahren					
Anaerobe Verf. + Substrat		x	(x)	x	LCKW
Anaerobe Verf. + Nitrat		x	(x)	x	BTEX, (PAK)
In-situ-Aerobisierung von Deponie	x		x		Abbau von C-Org., Hausmüll
Phytoremediation	x	(x)	x	x	organische und anorganische Schadstoffe
Chemische Verfahren					
In-situ-chemische-Oxidation (ISCO)					
Permanganat		x	x	(x)	u.a. LCKW, PAK
Wasserstoffperoxid		x	x		u.a. PCE, TCE, MKW, Teeröl, BTEX, PAK, MTBE, Pestizide
Ozon	x	(x)	x		u.a. BTEX, Pestizide, LCKW, TNT
Persulfat		x	x		u.a. BTEX, PCE, TCE
In-situ-chemische-Reduktion (ISCR)		x	x	(x)	LCKW, Schwermetalle
Physikalische Verfahren					
Thermische In-situ-Verfahren					
Dampf-Luft-Injektion	x	x	x		u.a. LCKW, BTEX, leichte bis schwere MKW
Feste Wärmequellen	x	(x)	x		
Radiofrequenzbodenerwärmung	x	x	x		
Elektrische Widerstands Erwärmung	x	x	x		
Elektrokinetische Separation	x	(x)	x		u.a. Schwermetalle, MKW, BTEX, PAK
Hydraulische und pneumatische Verfahren					
Air Sparging		x	x	x	LCKW, BTEX, MKW bis C ₁₀ , (PAK)
Spülungen	(x)	x	x		MKW, PAK, BTEX, LCKW, Phenole
Grundwasserzirkulationsbrunnen		x	x	x	LCKW, BTEX, MKW bis C ₁₀ , (PAK)
Permeable Wände					
Adsorptive Wände		x		x	organische und anorganische Schadstoffe

In-situ-Verfahren	Schadencharakteristik				Schadstoffe
	Ort		Art		
	ungesättigt	wassergesättigt	Quelle	Fahne	
Reaktive Wände		x		x	
In-situ-Immobilisierungen	x	x	x		primär anorganische Schadstoffe

(x) = in der Regel nur sehr eingeschränkt oder in Sonderfällen angewendet und/oder möglich

Anhang II: Definition der Durchlässigkeit

In den Unterkapiteln "Standortvoraussetzungen" der Verfahrensbeschreibungen verwendete Einstufung der Durchlässigkeitsbeiwerte und Bezeichnung der Durchlässigkeitsklassen gemäß ÖNorm 4422-1 (1992):

k [m/s]	Bezeichnung
$k \leq 10^{-8}$	sehr gering durchlässig
$10^{-8} < k \leq 10^{-6}$	gering durchlässig
$10^{-6} < k \leq 10^{-4}$	mitteldurchlässig
$10^{-4} < k \leq 10^{-2}$	stark durchlässig
$10^{-2} \leq k$	sehr stark durchlässig