

Anhang A1: Faktenblätter zu den In-situ-Verfahren

1. Hydraulische Verfahren	3
1.1 Phasentrennung	3
1.1.1 Selektive Förderung (LNAPL)	3
1.1.2 Selektive Förderung (DNAPL).....	6
1.1.3 Slurping.....	9
1.2 Hydraulische Verfahren mit Wasser	12
1.2.1 Pump and Treat	12
1.2.2 Vertikale Infiltration/Grundwasserinfiltration	15
1.2.3 Grundwasserzirkulation (GZB).....	18
1.3. Passive Verfahren der Grundwassersanierung	22
1.3.1 Vollflächig durchströmte Reinigungswände	22
1.3.2 Reinigungswände mit gelenktem Grundwasserstrom	25
1.3.3 Bioscreen	29
2. Pneumatische Verfahren	32
2.1 Bodenluftabsaugung	32
2.2 Slurping	35
2.3 In situ-Strippen	36
3. Mobilisierungsverfahren	39
3.1 Physikalische Mobilisierungsverfahren	39
3.1.1 Heissluft-/Dampfinjektion	39
3.1.2 Feste Wärmequellen.....	42
3.1.3 Sonstige physikalische Mobilisierung.....	45
3.1.4 Fracturing.....	48
3.1.5 Elektrokinese	50
3.2 Chemische Mobilisierung	52
3.2.1 Alkoholspülung.....	52
3.2.2 Tensidspülung.....	54
4. Biologische Verfahren	56
4.1 Vertikale Infiltration von Nährstoffen	56
4.2 Aerobisierung von Altablagerungen.....	58
4.3 Bioventing.....	61
4.4 Oxidative Verfahren im Grundwasser	63
4.5 Biosparging.....	65
4.6 Methan-Biostimulation	68
4.7 Reduktion mit organischen Substanzen	70
4.8 Enhanced Natural Attenuation.....	72

5. Chemische Verfahren	74
5.1 ISCO.....	74
5.2 ISCR.....	77
5.3 Nanoeisen	79
6. Immobilisierungsverfahren	82
6.1 Immobilisierung in situ	82
6.2 In-situ-Verglasung.....	85

1. Hydraulische Verfahren

1.1 Phasentnahme

1.1.1 Selektive Förderung (LNAPL)

Andere Bezeichnungen
<p>Phasenabschöpfung</p> <p>Engl. Bezeichnung: Liquid Phase Extraction, Oil Skimming. Nicht zu verwechseln mit Dual Phase oder Multi Phase Extraction (DPE, MPE), bei der Grundwasser zusammen mit Porenluft aber auch mit freier Phase pneumatisch gefördert wird (siehe auch Kap. 1.1.3 Slurping).</p>
Prinzip
<p>Mittels geeigneter Vorrichtungen wird eine flüssige Schadstoffphase abgesaugt, die entweder auf dem Grundwasser aufschwimmt (Dichte kleiner als Wasser) oder auf den Grundwasserstauer abgesunken ist. Aufschwimmende Phase wird auch als LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquids) bezeichnet, schwere Phase als DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquids).</p>
Wirkungsweise
<p>Aufschwimmende Phase im Brunnen oder auf einer Wasseroberfläche kann mittels Pumpen gefördert oder mit Materialien (Stahl, Textilien, Kunststoff) an denen die freie Phase bevorzugt anhaftet aufgesogen werden. Freie Phase, die unterhalb des Grundwassers ansteht, muss mit speziellen Techniken gefördert werden, die in Kap. 1.1.2 beschreiben sind.</p> <p>Die Wirkungsweise beruht auf einer Förderung der freien Phase getrennt vom Grundwasser. Die Trennung kann sich entweder physikalisch durch den Dichteunterschied auf natürliche Weise einstellen oder sie wird durch die Passage eines Filters sichergestellt, der beispielsweise nur Mineralöl (oliophil) durchlässt, aber kein Wasser. Die Adhäsion spielt bei denjenigen Verfahren eine Rolle, bei denen das Mineralöl durch das Anhaften an Stahlbändern oder textilähnlichen Stoffen entfernt wird (Skimmer).</p> <p>Eine gemeinsame Förderung von Grundwasser und Öl mit einer einzigen Pumpe ist nicht ratsam, da durch die Pumpenlaufräder relativ stabile Emulsionen entstehen, die nicht wieder oder nur mit hohem Aufwand getrennt werden können.</p>
Technische Beschreibung
<p>Die Phasenabschöpfung erfolgt durch das alleinige Abpumpen von aufschwimmender Phase, die sich in einem Brunnen ansammelt. Das Grundwasser kann hierzu abgesenkt worden sein, so dass die Phase dem Brunnen zufließt (Dual Phase Extraction), oder auch ohne Grundwasserabsenkung erfolgen, wenn die freie Phase entsprechend mächtig ist (Single Phase Extraction).</p> <p>Oliophile Filter befinden sich in schwimmenden Bojen oder an Pumpen installiert, um die alleinige Pumpförderung von Öl zu ermöglichen. Es gibt Unterwasser-Pumpen, die über zwei voneinander getrennte Pumpsysteme verfügen, deren Einlass mit oliophilen und hydrophilen Filtern ausgestattet sind (Scavenger Pumps).</p>

<p>Bandskimmer sind eine Variante von unterschiedlichsten Ölskimmern. Bei Tauchadsorptions-Bandskimmer erfolgt der Öl-Austrag über ein öl-adhäsives Endlosband aus Stahl, Kunststoff oder Textilgewebe. Das Öl bleibt daran haften, wasserbasierte Flüssigkeiten hingegen nicht. Das Skimmerband taucht in die Flüssigkeit ein, nimmt das Öl auf, zieht es über die untere Umlenkrolle nach oben. Dort wird das Öl durch einen Abstreifer mechanisch vom Skimmerband getrennt und läuft in einen Sammelbehälter.</p>	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Freie Phase, LNAPL.
Schadstoffe	Alle Flüssigkeiten von Schadstoffen in freier Phase die schlecht wasserlöslich sind und aufgrund ihrer Dichte aufschwimmen, also vorwiegend organische Schadstoffe (Öl, Benzin, Diesel, nicht chlorierte Lösungsmittel wie BTEX u. a.).
Geologie/Hydrogeologie	Gut durchlässige Grundwasserleiter (i. d. R. Porengrundwasserleiter); gute Kenntnis der hydrogeologischen und der hydraulischen Eigenschaften sind erforderlich
Einsatzgrenzen	
Nur für aufschwimmende freie Phase geeignet.	
Erforderliche Infrastruktur	
Die wesentlichen technischen Installationen befinden sich im Brunnen. Oberhalb des Brunnens wird eine Aufstellungsfläche für Sammel tanks und die erforderliche Bereitstellung von Strom benötigt. Bei Skimmersystemen muss noch eine Trennvorrichtung installiert werden. Wird parallel kontaminiertes Wasser abgesaugt, ist dafür eine Wasseraufbereitungsanlage mit den entsprechenden Anforderungen an die Infrastruktur erforderlich.	
Überwachung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Überwachung der Niveaus von freier Phase und Grundwasser; ▪ Registrierung der Fördermengen; ▪ Überwachung des Wassergehaltes in der geförderten freien Phase. 	
Verfahrensvarianten	
<p>Verfahrensvarianten ergeben sich vor allem durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Art der Trennung von freier Phase und Grundwasser vor der Förderung; ▪ Die Art der Zuführung von freier Phase in den Förderbrunnen; ▪ Die Art der Adhäsionsmaterialien. <p>Eine Unterstützung der Abschöpfung ist durch Vakuumsysteme bis zu einer Tiefe von weniger als 8-9 m möglich (siehe auch Slurping, Kap. 1.1.3). Auch eine Erwärmung der freien Phase zur Verbesserung der Zuströmung in den Brunnen ist möglich.</p>	

Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen

Folgende Verfahrenskombinationen sind üblich:

- Extraktion von Grundwasser (Pump and Treat) und Extraktion von freier Phase in einem gemeinsamen Brunnen;
- Kombination mit Grundwasserzirkulationsbrunnen;
- Kombinierbar mit allen anderen in-situ Verfahren – aber vorteilhafterweise bevor diese zum Einsatz kommen.

Anwendungserfahrung

Bewährtes und vielfach angewendetes Verfahren zur Entfernung von aufschwimmender freier Phase. Relativ unproblematische Installation und einfacher Betrieb. Sehr wirkungsvoll, da Schadstoffe in konzentrierter Form und in grosser Menge erfasst werden können.

Entwicklungsstand und Marktsituation

Die Abschöpfverfahren sind Stand der Technik. Planung und Installation werden von schweizerischen Firmen angeboten.

1.1.2 Selektive Förderung (DNAPL)

Andere Bezeichnungen	
Absaugung von Schwerphase (DNAPL), Entnahme schwerer Phase Engl. Bezeichnung: Removal of DNAPL (from DNAPL pools).	
Prinzip	
Die Schwerphase befindet sich unterhalb des Grundwasserkörpers und akkumuliert oberhalb von weitgehend undurchlässigen Schichten. Diese befinden sich meist so tief, dass sie nicht mehr pneumatisch im Unterdruck von oben abgesaugt werden können. Es kommen daher Unterwasserpumpen in tiefen Brunnen oder spezielle Hebetekniken zum Einsatz.	
Wirkungsweise	
Die Entfernung des DNAPLs kann beispielsweise an der Basis der Filterstrecke mit Brunnenpumpen (bei ausreichend mächtigen Schichten freier Schwerphase) oder nach dem Prinzip der Wasserstrahlpumpe (Tiefsaugertechnologie) gefördert werden. Es kommen auch Drucksysteme zum Einsatz, die nach Eintritt der Schwerphase durch einen Filter in einen Behälter den Behälterinhalt mittels Luftdruckrohre an die Erdoberfläche befördern.	
Technische Beschreibung	
<p>Unterwasserpumpen, elektrisch angetrieben, Förderhöhe nahezu unbegrenzt, geeignet für das Abpumpen reiner Schwerphase, da die Kreiselpumpe Emulsionen erzeugt, die nur schwer wieder separiert werden können.</p> <p>Pneumatisch betriebene Förderpumpen können zur Förderung von Grundwasser, von Gemischen aus Grundwasser und Leicht- sowie Schwerphase eingesetzt werden. Die Funktionsweise der Pumpe basiert auf einem Schwimmer, der in den jeweiligen Endlagen Signale zur Steuerung auslöst. Je nach Version kann Flüssigkeit von oben oder von unten in die Pumpe eintreten und die Pumpe füllen. Nach Aktivierung entsprechender Ventile wird die Flüssigkeit dann aus der gefüllten Pumpe gefördert. Die Aktivierung erfolgt dabei mittels Druckluft.</p> <p>Kolbenpumpensysteme bestehen aus einer druckluftbetriebenen Antriebseinheit, dem Kolbengestänge, dem Pumpenkolben sowie einem Durchflussregelventil. In der Antriebseinheit befinden sich der Druckluftzylinder sowie ein Reversierkolben. Über das Kolbengestänge ist der Reversierkolben mit dem Pumpenkolben im Pumpengehäuse verbunden. Der Durchfluss der Schwerphase wird durch selbsttätige Rückschlagventile im Pumpengehäuse gesteuert.</p> <p>Wasserstrahlpumpe, die durch einen Wasserstrahl einen Unterdruck erzeugt, mit dem die Schwerphase in den Wasserstrahl hineingezogen wird. Förderung der Schwerphase im Wasserstrahl nach oben.</p>	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Schwerphase mit oder ohne Grundwasser.
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alle Schadstoffe in flüssiger Phase, die schwerer als Wasser sind (DNAPL), z. B. Teeröle (PAK), Holzschutzmittel (Kreosot), PCB-haltige Öle und halogenierte Kohlenwasserstoffe.

Geologie/Hydrogeologie	Gut durchlässige Grundwasserleiter (i. d. R. Porengrundwasserleiter); gute Kenntnis der hydrogeologischen und der hydraulischen Eigenschaften erforderlich. Die Lage und die Ausdehnung der Schwerphase sind oft schwierig zu orten. Problematisch im Kluftsystem von Festgesteinen.
Einsatzgrenzen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sehr dünne Schichten von DNAPL sind schwierig zu orten, zu akkumulieren und zu fördern; ▪ DNAPL in den Klüften von Festgestein sind kaum zu orten bzw. zu mobilisieren; ▪ Je nach Lage und Mächtigkeiten der Schichten freier Phase sind die Pumpen und Hebesysteme auszuwählen. <p>Diverse Hersteller haben eigene Pump- bzw. Fördersysteme mit hydraulischer oder pneumatischer Funktionsweise entwickelt. Am ehesten sind noch sogenannte Pools zu sanieren, in denen sich grössere Mengen an Schwerphase angesammelt haben.</p>	
Erforderliche Infrastruktur	
Aufstellungsfläche und Zugang für die oberirdischen Anlagenteile, Medienanschlüsse Strom und Wasser, Tankanlagen, eventuelle Explosionsschutz erforderlich, Ableitung des gereinigten Grundwassers, falls mitgefördert. Abluftreinigung bei pneumatischer Förderung. Trennanlagen Schwerphase/Wasser. Brandschutz, wenn die geförderten Flüssigkeiten leicht entzündlich und brennbar sind.	
Überwachung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Überwachung der Druckverhältnisse im Hebesystem; ▪ Überwachung der Schichtdicke der Schwerphase; ▪ Überwachung der Trenn- und Aufbereitungsanlagen; ▪ Eventuell Messung explosiver Atmosphären. 	
Verfahrensvarianten	
<p>Verfahrensvarianten ergeben sich vor allem durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Durch die Tiefe und die Ausbreitung der Schwerphase; ▪ Durch die unterschiedlichen Hebetechniken. <p>Liegt die Schwerphase in weniger als 8 m Tiefe kommen auch direkte Absaugsysteme durch Unterdruck zur Auswahl.</p>	
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen	
Die Entnahme der Schwerphase kann mit einer Pump + Treat-Massnahme kombiniert werden. Auch die Kombination mit anderen In-situ-Sanierungsverfahren ist möglich.	
Anwendungserfahrung	
Die Absaugung von Schwerphase ist technisch sehr komplex und problematisch im Betrieb. Die meisten Erfahrungen dürften mit der Absaugung von Teerölphase verbunden sein, da dieser Schadensfall relativ häufig auftritt.	

Entwicklungsstand und Marktsituation

Obwohl einzelne Aggregate die zum Einsatz kommen, dem Stand der Technik zugeordnet werden können, sollte die Planung und die Installation Fachleuten und ausführenden Firmen überlassen werden, die bereits über einschlägige Erfahrungen im Umgang mit Schwerphase verfügen. Solche sind in einigen europäischen Ländern bereit, diese Verfahren anzubieten.

1.1.3 Slurping

Andere Bezeichnungen
<p>Phasenabsaugung</p> <p>Engl. Bezeichnungen: Slurping, Bioslurping, Multi Phase Extraction</p>
Prinzip
<p>Aufschwimmende freie Schadstoffphase wird pneumatisch, d. h. mit Unterdruck gefördert und danach wieder von der Förder(Poren-)luft getrennt. Dabei wird in der Regel auch Grundwasser und Porenwasser sowie Porenluft mit angesaugt. Die Porenluft und das Porenwasser können dabei bereits im Untergrund in-situ biologisch gereinigt werden (Bio-Slurping). Das mitgeführte Grundwasser kann ebenfalls oberirdisch aufbereitet werden.</p>
Wirkungsweise
<p>Die aufschwimmende freie Phase wird zusammen mit der (kontaminierten) Porenluft abgesaugt. Porenluft und freie Phase werden ausserhalb der Extraktionsbrunnen wieder getrennt und in eine gasförmige Phase und eine Flüssigkeitsphase separiert. Die gasförmige Phase muss gereinigt werden, bevor sie in die Atmosphäre entlassen werden kann. Dabei wird oft auch Grundwasser mit angesaugt, welches ebenfalls separiert und gereinigt werden muss.</p> <p>Von Bio-Slurping spricht man, wenn durch die Absaugung der geförderten Porenluft eine biologische In-situ-Reinigung der ungesättigten Zone und eventuell des darin enthaltenen Porenwassers initiiert wird.</p>
Technische Beschreibung
<p>Die Slurping-Brunnen sind in einem Bereich von oberhalb der Phase bis in das Grundwasser verfiltert. Innerhalb des Brunnenrohres befindet sich ein an der Basis offenes Saugrohr. Das Saugrohr kann manuell oder automatisch in der Höhe verstellt werden, um das optimale Verhältnis zwischen den geförderten Phasen Wasser, Porenluft und freie Phase einstellen zu können.</p> <p>Ein Vakuumpaggregat erzeugt einen hohen Unterdruck, so dass eine Mischung aus Grundwasser, Porenluft und aufschwimmender Leichtphase schlüpfend abgesogen wird. In der oberirdischen Anlage werden die Fluide und die Gasphase wieder voneinander getrennt. Die Porenluft und die Flüssigkeiten werden in einer ersten Trennstufe (Unterdruckbehälter) separiert. Die Abluft wird über einen Aktivkohlefilter gereinigt. Die flüssigen Phasen werden in einem Öl-Wasser-Separator getrennt. Das aufschwimmende Öl wird in einem Tank gesammelt und abgefahren. Das Grundwasser wird gereinigt und wieder versickert oder abgeleitet.</p> <p>Durch die Zufuhr von Umgebungsluft in den abgesaugten Untergrund wird Sauerstoff zugeführt, der die biologischen Abbauprozesse begünstigen kann. Zusätzlich können Nährstoffe injiziert werden.</p>

Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Freie Phase und kontaminierte Porenluft
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alle aufschwimmenden flüssigen Schadstoffe, die sich nicht oder schlecht mit Wasser vermischen (Öl, Benzin, Diesel, Kerosin, nicht halogenierte Lösungsmittel); ▪ Leichtflüchtige und im Porenwasser gelöste organische Schadstoffe (LCKW, FCKW, PAK, Phenole, BTEX, sonstige, insbesondere chlororganische Verbindungen).
Geologie/Hydrogeologie	Gut durchlässige Grundwasserleiter (i. d. R. Porengrundwasserleiter); gute Kenntnis der hydrogeologischen und der hydraulischen Eigenschaften ist erforderlich.
Einsatzgrenzen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flurabstand des Grundwassers >8 m; ▪ Aber auch ein geringer Flurabstand des Grundwassers ist problematisch, da pneumatische Kurzschlüsse möglich sind; ▪ Bio-Slurping ist nicht für biologisch schwer abbaubare Schadstoffe geeignet. 	
Erforderliche Infrastruktur	
Geringe Anforderungen: Aufstellungsfläche für die oberirdischen Anlagenteile und Sammel tanks, Zufahrt, Medienversorgung mit Strom und Wasser.	
Überwachung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Überwachung der Unterdruckverhältnisse; ▪ Überwachung der Pegel von Grundwasser und freier Phase; ▪ Überwachung der Luftmengen; ▪ Eventuell Erfassung von Parametern, die den biologischen Abbau charakterisieren, z. B. CO₂-Konzentrationen in der Porenluft; ▪ Überwachung der Trenn- und Reinigungsanlagen. 	
Verfahrensvarianten	
Verfahrensvarianten ergeben sich vor allem durch: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Art der Luftförderung; ▪ Durch die Art der Beeinflussung der biologischen Abbauvorgänge; ▪ Durch die Flüchtigkeit der abgesaugten freien Flüssigkeitsphase. 	
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen	
<p>Bio-Slurping: Kombination mit Bodenluftabsaugung und Förderung der biologischen (Vor-)reinigung der Porenluft oder des Porenwassers;</p> <p>Kombination mit Pump-and-Treat.</p>	

Anwendungserfahrung

Dual Phase Extraction und Multi Phase Extraction sind bekannte und bewährte Verfahren um gemeinsam Porenluft und Grundwasser zu fördern. Sie eignen sich hervorragend um gleichzeitig (auch dünne) aufschwimmende Phasenschichten mit zu erfassen.

Entwicklungsstand und Marktsituation

Stand der Technik. Planung und Installation in der Schweiz etabliert.

1.2 Hydraulische Verfahren mit Wasser

1.2.1 Pump and Treat

Andere Bezeichnungen	
<p>Grundwasserentnahme und Reinigung.</p> <p>Engl. Bezeichnungen: Pump+Treat, Groundwater Extraction and Treatment</p>	
Prinzip	
<p>Hydraulische Massnahmen zur Förderung und Reinigung von Grundwasser werden als Schutz vor Schadstoff-Emissionen (Verhinderung der Ausbreitung einer Grundwasserkontamination) und zur Beseitigen von Verunreinigungen im Grundwasser (Dekontamination des Grundwasserkörpers bzw. -leiters) angewendet.</p>	
Wirkungsweise	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die hydraulische Massnahme selbst besteht aus der Fassung, Förderung und gegebenenfalls Re-Infiltration von Grundwasser. Die Reinigung des belasteten Grundwassers erfolgt in der Regel anschliessend onsite durch die Abtrennung, den Abbau oder die Umwandlung der darin enthaltenen Schadstoffe (vgl. Anhang A2). ▪ Durch die Grundwasserentnahme wird entsprechend der vorgesehenen Fördermenge und den gegebenen Grundwasserverhältnissen eine Absenkung des Grundwasserspiegels bewirkt. Damit ist ein kurz-, mittel- oder langfristiger Eingriff in den weiträumigen Wasserhaushalt verbunden, der sich nicht nachteilig auswirken sollte. 	
Technische Beschreibung	
<p>Die Brunnen zur Grundwasserentnahme werden in der Regel in vertikaler Bauweise hergestellt. Bei diesen Vertikalbrunnen (z. B. Schwerkraft- oder Vakuumbrunnen) wird durch die Grundwasserentnahme ein Absenktrichter erzeugt und durch das dabei entstehende Druckgefälle ein Zufluss in den Brunnen erreicht. Der Brunnen sollte nur im Bereich des Aquifers, aus dem das Wasser entnommen werden soll, verfiltert sein. Unter Umständen kommen Multi-Level-Brunnen zum Einsatz, die an einer Stelle, aber in unterschiedlichen Tiefen eine Grundwasserentnahme bewirken.</p> <p>Zur Verbesserung des Zuflusses, vor allem bei feinkörnigen Böden, kann zusätzlich ein Unterdruck im Brunnenrohr angelegt werden.</p>	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Grundwasser und freie (flüssige) Phase.
Schadstoffe	Wasserlösliche organische und anorganische Schadstoffe sowie flüssige, nicht wasserlösliche organische Schadstoffe (freie Phase).
Geologie/Hydrogeologie	Gesättigte Zone, gut durchlässige Böden

Einsatzgrenzen
<ul style="list-style-type: none">▪ Das Verfahren eignet sich für Grundwasserleiter mit mittlerer bis grosser Durchlässigkeit. Bei stark inhomogenem oder einem anisotropem Aufbau des Untergrunds mit grossen Durchlässigkeitsunterschieden zwischen einzelnen Schichten oder Bereichen können die Verfahren in der Regel nicht angewendet werden. Dies gilt ebenfalls bei unklaren Strömungsverhältnissen. So ist auch der Einsatz in Festgesteinsgrundwasserleitern wegen der häufig bestehenden Informationsdefizite als kritisch anzusehen. Die oft nicht vollständig bekannte Struktur der Untergrundverhältnisse und der damit verbundenen Strömungsverhältnissen können zu einer deutlichen Minderung der Kontrollierbarkeit der Sanierungsmassnahme führen.▪ Das Verfahren ist nicht oder nur schlecht für Schadstoffe mit geringer Löslichkeit und grosser Sorptionsneigung geeignet.▪ Die Wahl des Pumpensystems ist in einem Entnahmebrunnen davon abhängig, ob die Schadstoffe im Grundwasser gelöst oder in Phase vorliegen. Bei gelösten Schadstoffen wird lediglich eine Pumpe zur Förderung des Grundwassers benötigt. Treten die Schadstoffe jedoch ungelöst, d. h. als aufschwimmende oder abgesunkene Phase auf, kann das Grundwasser entweder zusammen mit der Schadstoffphase (Ein-Pumpensystem) oder getrennt von der Schadstoffphase (Mehr-Pumpensystem) entnommen werden. Beim Ein-Pumpensystem muss beachtet werden, dass Kreiselpumpen starke Emulsionen von Wasser und freier Phase erzeugen können, die sich nur schwerlich wieder auflösen lassen.
Erforderliche Infrastruktur
<ul style="list-style-type: none">▪ Zur Entnahme des belasteten Grundwassers sind Brunnen und Pumpen zur Förderung des Grundwassers sowie eine nachgeschaltete Wasseraufbereitungsanlage notwendig. Für diese wird eine entsprechende Aufstellungsfläche mit Zugang benötigt. Weiterhin ist die Versorgung mit Strom und Frischwasser erforderlich. Eventuell sind Tanks zu installieren (freie Phase) und Brandschutzmassnahmen einzurichten.
Überwachung
<ul style="list-style-type: none">▪ Erfassung der Schadstoffreduktion im Grundwasser durch Probenentnahme in Überwachungspegeln, die meist abstromig angeordnet werden;▪ Lage der Grundwasserspiegel;▪ Setzungsmessungen in überbauten Gebieten;▪ Wasserqualität bei Abgabe (Kanalisation, Vorfluter oder Reinfiltration).
Verfahrensvarianten
<ul style="list-style-type: none">▪ Horizontalbrunnen: Horizontalbrunnen bestehen aus einem oder mehreren horizontalen Filterrohren und einem zentralen Schacht, aus dem das gefasste Grundwasser abgepumpt wird. Durch die Wasserentnahme aus dem zentralen Schacht wird der Wasserspiegel unter das Niveau der freien Grundwasseroberfläche abgesenkt. Infolge des dadurch erzielten Druckgefälles fliesst das Grundwasser über die horizontalen Filterrohre dem zentralen Schacht zu. Die Entnahme von Grundwasser kann auch mittels Drainagen erfolgen. Die Drainage wirkt je nach Tiefenlage entweder als partielle oder als vollständige hydraulische Sperre.▪ Drainagegraben: Der mit Kies verfilterte Drainagegraben ist in der Regel quer zur Grundwasserflussrichtung im Untergrund angeordnet und weist eine grössere hydraulische Durchlässigkeit als der Grundwasserleiter auf. Dadurch werden eine Grundwasserabsenkung im Bereich des Grabens und ein Zustrom des Grundwassers erzielt. Der Graben kann mit und

ohne Drainagerohre ausgestattet sein. Das in der Drainage gesammelte Wasser wird über Brunnen entnommen, mit einer Pumpe abgepumpt und zur Aufbereitung gefördert.

- **Horizontaldrainage:** Ein Drainagerohr wird unterhalb des Grundwasserspiegels und quer zur Grundwasserflussrichtung angeordnet. Es ist mit einem Kiesfilter ummantelt. Das Drainagerohr ist mit Pumpschächten verbunden, in denen das Wasser gesammelt und mit Pumpen zur Aufbereitung gefördert wird.

Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen

- Neben Einzelbrunnen können Brunnengruppen, Brunnenreihen, Drainagesysteme oder eine Kombination daraus die Wirksamkeit der Massnahme erhöhen. Der Einsatz baulicher Massnahmen im An- oder Abstrombereich (z. B. Spundwand, Dichtwand als vertikale Barriere) oder weiterer speziell platzierter Entnahmebrunnen ermöglichen eine Reduktion der Menge des anfallenden kontaminierten Wassers.

Anwendungserfahrung

Sehr häufig und erfolgreich eingesetztes Sanierungsverfahren. Das Verfahren wird von den Umweltbehörden in allen Stufen anerkannt.

Entwicklungsstand und Marktsituation

Pump-and-Treat-Massnahmen sind dem Stand der Technik zuzuordnen. Sie gehören zu den am häufigsten angewendeten Verfahren zur Grundwassersanierung. Sie werden auch in der Schweiz vielfach erfolgreich eingesetzt. Planungsbüros und Anwender verfügen über eine reichhaltige Erfahrung.

1.2.2 Vertikale Infiltration/Grundwasserinfiltration

Andere Bezeichnungen
<p>Spülung, Untergrundspülung, Infiltrationsbrunnen, Infiltrationsgraben, Horizontalbrunnen, Infiltrationsanlage, Sickergraben</p> <p>Engl. Bezeichnungen: Soil Flushing, Infiltration Well, Infiltration Trench, Horizontal Well, Infiltration System.</p>
Prinzip
<p>Hydraulische In-situ-Verfahren zur Reinigung von kontaminierten Bereichen in der ungesättigten Zone erfolgen in der Regel als «Soil Flushing» in Verbindung mit «Pump and Treat». Sie dienen der:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Spülung der ungesättigten Zone (Infiltration); ▪ Rückführung des gepumpten und gereinigten Grundwassers (Entnahme und Reinfiltration). <p>Weiterhin können hydraulische In-situ-Verfahren als unterstützende Massnahmen in Verbindung mit biologischen In-situ-Massnahmen zur Nährstoffversorgung und Milieuregulierung dienen.</p>
Wirkungsweise
<p>Die in der ungesättigten Zone oder im Kapillarsaum gelösten oder löslichen Schadstoffe werden durch gezielte Massnahmen ausgewaschen. Hierzu wird Wasser zur Durchspülung des kontaminierten Bereichs dem Untergrund zugegeben. Dies kann durch verschiedene technische Varianten realisiert werden. Nach dem Ausspülen der Schadstoffe ins Grundwasser wird dieses gefasst, abgepumpt und anschliessend gereinigt (siehe «Pump and Treat»; Kap. 1.2.1).</p>
Technische Beschreibung
<p>Der konstruktive Aufbau von hydraulischen Massnahmen zur Spülung der ungesättigten Zone kann in verschiedenen Varianten erfolgen. Nachfolgend sind die gebräuchlichsten aufgeführt. In der Regel kann abgepumptes und gereinigtes Wasser zum Reinfiltrieren genutzt werden.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Infiltrationsbrunnen: Siehe «Pump and Treat», Kap. 1.2.1 ▪ Infiltrationsgraben: Statt eines Infiltrationsbrunnens kann das Spülwasser bei einer oberflächennahen Kontamination und einem gut durchlässigem Untergrund auch direkt von der Geländeoberfläche aus durch einen Infiltrationsgraben oder flächig durch ein Becken eingebracht und verteilt werden. Die Gräben werden mit gut durchlässigem Material (k_f-Wert $>10^{-3}$m/s) und Sickerleitungen versehen und bei Bedarf wieder abgedeckt. Das belastete Grundwasser wird mit Entnahmebrunnen gefasst, abgepumpt und gereinigt. ▪ Horizontalbrunnen und Infiltrationsanlage: Innerhalb der ungesättigten Zone wird oberhalb des kontaminierten Bereichs eine Infiltrationsanlage für die Zugabe und horizontale Verteilung des Spülwassers installiert. In den unterhalb des Kontaminationsbereichs horizontal verlegten Drainagerohren wird das belastete Wasser in einen Sammelschacht geleitet, gefasst und zur weiteren Behandlung abgepumpt.

Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Porenwasser, Untergrund, Porenluft.
Schadstoffe	Gut wasserlösliche Schadstoffe, mobilisierbare Kohlenwasserstoffe.
Geologie/Hydrogeologie	Ungesättigte Zone, gute Durchlässigkeit, sandig-kiesige Böden.
Sonstige Bedingungen	Bei «Infiltrationsgraben» freier Zugang zur Sickerfläche (keine Bodenplatten oder Verkehrswege).
Einsatzgrenzen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ «Soil Flushing» ist zur Sanierung von kleineren Verunreinigungen des Untergrunds geeignet. Der Untergrund sollte mittel- bis gutdurchlässig sein ($k_f > 10^{-4}$ m/s). Bei stark inhomogenem bzw. anisotropem Aufbau des Untergrunds mit grossen Durchlässigkeitsschwankungen in oder zwischen den einzelnen Schichten oder Bereichen können die Verfahren in der Regel nicht angewendet werden, da sonst mit unklaren Strömungsverhältnissen zu rechnen ist. ▪ Bei geringer Mobilität der Schadstoffe (geringe Löslichkeit, grosse Adsorptionsneigung) in der ungesättigten Zone ist das Verfahren nicht effektiv anwendbar. ▪ Es besteht die Gefahr, dass Bereiche mit geringer Durchlässigkeit von der Spülflüssigkeit umströmt und die Schadstoffe aus diesen Bereichen nicht ausgewaschen werden. ▪ Eine genaue Kenntnis der Untergrundverhältnisse ist erforderlich, um die gewünschten Sanierungsziele mit wirtschaftlich und zeitlich vertretbarem Aufwand zu realisieren. ▪ Bei allen Varianten ist darauf zu achten, dass infiltriertes Wasser nach dem Spülen nicht in den Einzugsbereich des Entnahmebrunnens gelangt und dadurch Kontaminationen unerkannt verschleppt werden können. ▪ Im Einzugsbereich von Trinkwasserfassungen werden solche Massnahmen meistens nicht zugelassen. 	
Überwachung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Qualität und Quantität des Spülwassers bei Zugabe und Entnahme; ▪ Lage des Grundwasserspiegels; ▪ Setzungsmessungen in überbauten Gebieten; ▪ Schluckleistung der Anlage, um eine Kolmatierung der Infiltrationseinrichtungen frühzeitig zu erkennen. 	
Verfahrensvarianten	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ableitung des behandelten Wassers in einen Vorfluter oder den Kanal und stattdessen Reinfiltration von Frischwasser; ▪ Die Förderung von biologischen Prozessen kann durch die zusätzliche Zugabe von Nährstoffen (z. B. Tenside, Alkohol) oder durch eine geeignete Milieuregulierung (z. B. Temperatur, Sauerstoffanreicherung) angeregt bzw. unterstützt werden. 	

Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen

Die Anwendung ist nur in Kombination mit einer «Pump and Treat»-Massnahme möglich. Das Verfahren kann aber auch mit einer biologischen In-situ-Sanierung (siehe oben) kombiniert werden.

Anwendungserfahrung

Es handelt sich um ein vielseitig und erfolgreich eingesetztes Sanierungsverfahren zur Reinigung der ungesättigten Zone.

Entwicklungsstand und Marktsituation

Das Verfahren ist auch in der Schweiz erprobt und wird hier von diversen Ingenieurbüros und Sanierungsunternehmen angeboten.

1.2.3 Grundwasserzirkulation (GZB)

<p>Andere Bezeichnungen</p>
<p>In-situ-Grundwasserkreislauf, Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB). Sonderform Unterdruckverdampferbrunnen.</p> <p>Engl. Bezeichnung: Groundwater Circulation Well.</p>
<p>Prinzip</p>
<p>Hydraulische In-situ-Sanierungseinrichtung zur Reinigung der gesättigten bzw. teilgesättigten Zone. Das im Wirkungsbereich des Grundwasser-Zirkulationsbrunnens vorhandene Grundwasser wird als Prozesswasser im Kreislauf geführt und transportiert die gelösten bzw. mobilen Schadstoffe zum Brunnen. In den Wasserkreislauf können oberirdisch alle Arten von Reinigungsverfahren integriert werden. (Stripper, Aktivkohle, Biofilter, Ionenaustauscher usw.) Das Kreislaufwasser kann auch als Trägermedium für den Transport von Nährstoffen, kolloidaler Aktivkohle und Sauerstoff zur Optimierung der biologischen Aktivität verwendet werden, ebenso für den Transport von oxidativen oder reduktiven Chemikalien (z. B. Nanoeisen). Die auf den Brunnen zugerichteten Zirkulationsströmungen unterstützen je nach Strömungsrichtung die Ansammlung und Entnahme von LNAPL und DNAPL im Brunnen.</p> <p>Eine Sonderform stellt der Unterdruckverdampferbrunnen dar. Die Wirkungsweise entspricht der des Grundwasserzirkulationsbrunnens, wobei der Antrieb der Zirkulation nicht ausschliesslich durch Pumpen sondern pneumatisch erzeugt wird. Der im Brunnenkopf erzeugte Unterdruck und der damit einhergehende Auftrieb der Luft haben ein Mitreissen des Wassers und damit dessen Transport nach oben zur Folge. Dadurch findet auch eine ausgeprägte Entgasung von leichtflüchtigen Stoffanteilen aus dem Wasser statt.</p>
<p>Wirkungsweise</p>
<p>In den zu reinigenden Grundwasserleiter werden ein oder mehrere vertikale Brunnen mit min. 2 Filterstrecken niedergebracht. Eine Trennplatte (Packer) teilt die Brunnen in einen oberen und einen unteren Abschnitt. Mit Hilfe einer Pumpe, die z. B. unter dem Packer installiert ist, wird das kontaminierte Grundwasser von dem unteren in den oberen Brunnenabschnitt gefördert. Infolge der dadurch erzeugten Potentialunterschiede wird um den Brunnen eine horizontale und vertikale Aussenzirkulationsströmung vom Zugabe- zum Entnahmefilter induziert. Im Bereich dieser Zirkulationsströmung werden alle Schichten des Aquifers horizontal und vertikal durchspült und gereinigt. Die Drehrichtung der Zirkulationsströmung kann durch die Anordnung der Pumpe unter bzw. über dem Packer und einer Umkehrung der Saug- und Druckrichtung der Pumpe festgelegt bzw. umgekehrt werden. Die Reichweite der Zirkulationsströmung und die Umlaufzeiten können auf der Basis von Standortparametern berechnet werden. Die Anordnung der Reinigungsanlagen kann sowohl im Brunnenschacht als auch oberirdisch erfolgen. Die Zirkulationsströmung kann dazu benutzt werden um Nährstoffe bzw. Elektronenakzeptoren in die wassergesättigte Zone nachzuliefern. In diesem Fall wird der Grundwasserleiter selbst zum Reaktor.</p>
<p>Technische Beschreibung</p>
<p>Auf der Basis der erkundeten Standortparameter (Geologie, Hydraulik, Schadstoffspektrum, Schadstoffausdehnung usw.) wird ein Sanierungskonzept ausgearbeitet. Darin werden die Anzahl und der Ausbau der Sanierungsbrunnen sowie das Reinigungsverfahren festgelegt. Die Pumpmenge und Drehrichtung der Zirkulationsströmung kann der Schadstoffverteilung im</p>

Untergrund und dem Sanierungsfortschritt angepasst werden. Falls der Sanierungsbrunnen mit mehr als zwei Filterstrecken ausgebaut wird, kann der Zirkulationsbrunnen mit Mehrfachkreisläufen zur gezielten Durchspülung bestimmter Horizonte betrieben werden. In die Zirkulationsströmung wird die geeignete Reinigungsanlage integriert. Die Anordnung der Reinigungsanlage kann unterirdisch in einer Brunnenstube oder oberirdisch erfolgen.

Einsatzmöglichkeiten

Medium	Grundwasser, LNAPL, DNAPL.
Schadstoffe	Wasserlösliche organische und anorganische Schadstoffe; flüssige, nicht wasserlösliche Schadstoffe.
Geologie/Hydrogeologie	Gesättigte bzw. teilgesättigte Zone, homogene und heterogene Grundwasserleiter, eingeschränkt auch geklüftete Grundwasserleiter.

- Nur das im Schadensgebiet vorhandene Grundwasser wird als Prozesswasser im Kreislauf geführt;
- Der Untergrund (inkl. schlechter durchlässiger Schichten) wird horizontal und vertikal durchspült;
- Gleichzeitige Reinigung von Untergrund, Grundwasser und Kapillarzone in einer Anlage;
- Es findet keine Grundwasserabsenkung statt;
- Die Richtung der Kreislaufströmung kann dem Schadstoffspektrum und dem Sanierungsfortschritt angepasst werden;
- In den Wasserkreislauf können alle verfügbaren Reinigungsverfahren, in-situ oder on-site, integriert werden;
- Das Kreislaufwasser kann als Trägermedium zum Eintrag von Sauerstoff, Nährstoffen, Chemikalien, Nanopartikel, Energie usw. verwendet werden;
- Über die Pumpenleistung können die Umlaufzeiten vorbestimmt werden;
- Sämtliche Anlagenteile können in einer unterirdischen Brunnenstube installiert werden;
- Bei unterirdischer Installation können die Vereisungsgefahr und die Lärmemission reduziert werden;
- Geringe Betriebs- und Wartungskosten.

Einsatzgrenzen

- Bei einem Grundwasserleiter mit mehreren Stockwerken muss für jedes Stockwerk ein eigener Sanierungsbrunnen errichtet werden.
- Um eine vernünftige Reichweite der Zirkulationsströmung zu erreichen, sollte das Verfahren erst ab einer Grundwassermächtigkeit von ca. 4 m eingesetzt werden.
- Inhomogenitäten in der geologischen Struktur könne die Ausbildung der Zirkulationswalze verändern bzw. behindern.

Erforderliche Infrastruktur
<p>Zur Entnahme des belasteten Grundwassers sind die oben beschriebenen Brunnen, Pumpen zur Förderung des Grundwassers sowie eine nachgeschaltete Aufbereitungsanlage notwendig. Diese erfordern Stellflächen und eine entsprechende Zugänglichkeit; Strom und Wasseranschlüsse sind einzurichten. Für die Injektion von Hilfsstoffen sind Tanks und Dosieranlagen einzurichten und mit den erforderlichen Sicherheitseinrichtungen auszustatten.</p>
Überwachung
<ul style="list-style-type: none">▪ Kontrolle der Zirkulationswassermenge;▪ Kontrolle der Schadstoffgehalte im Roh- bzw. Reinwasser;▪ Kontrolle der Schadstoffentwicklung im Sanierungsbereich;▪ Überwachung der Zirkulationswalze, Ausdehnung etc. in entsprechenden Überwachungspegeln.
Verfahrensvarianten
<ul style="list-style-type: none">▪ Unterdruckverdampferbrunnen (UVB) sind eine spezielle Ausbildung der Grundwasserzirkulationsverfahren, bei der die Walze mit Druckluft, anstatt mit Pumpen oder in Kombination mit Pumpen erzeugt wird;▪ Aus der Zirkulationswassermenge kann ein Teilstrom entnommen werden um ein künstliches Gefälle zum Sanierungsbrunnen zu erzeugen;▪ Entnahme von LNAPL und DNAPL aus dem Zirkulationsbrunnen▪ Spül-Zirkulationsbrunnen: Infiltration von Grundwasser über Horizontaldrainagen, oder vertikale Filterstrecken in der ungesättigten Zone;▪ Reaktiver Zirkulationsbrunnen: Injektion von ZVI (Nanoeisen) etc. im Umfeld des Brunnens, das Zirkulationswasser bewirkt eine Erniedrigung des Redoxpotentials im Strömungsfeld des GZB.
Bewertung, Anwendungserfahrung
<ul style="list-style-type: none">▪ Wissenschaftlich nachvollziehbares Berechnungsverfahren für die hydraulische Wirksamkeit eines GZB;▪ Objektive Bewertung im Rahmen von grossräumigen Modellversuchen in VEGAS und Knielingen durch die UNI Stuttgart und Karlsruhe;▪ Es wurden zahlreiche hydraulische Tests, Tracerversuche, etc durchgeführt;▪ Der Grundwasserzirkulationsbrunnen wird in zahlreichen Sanierungsfällen international eingesetzt.

Entwicklungsstand und Marktsituation

Grundwasserzirkulationsbrunnen werden zwar schon eingesetzt und sind hinreichend erprobt, aber haben noch nicht die breite Anwendung von Pump-and-Treat-Massnahmen gefunden. Ihre Anwendung erfordert eine sehr gute Kenntnis der Untergrundbedingungen, so dass die Planung nur erfahrenen Ingenieurbüros übergeben werden sollte. Das Verfahren ist mit einigen Patenten belastet, so dass sich die Anzahl der Anbieter in Grenzen hält.

Unterdruckverdampferbrunnen sind als besondere Art der Grundwasserzirkulationsbrunnen zwar schon eingesetzt und hinreichend erprobt worden, aber haben noch nicht die breite Anwendung von Pump-and-Treat-Massnahmen gefunden. Ihre Anwendung erfordert eine sehr gute Kenntnis der Untergrundbedingungen, so dass die Planung nur erfahrenen Ingenieurbüros übergeben werden sollte. Das Verfahren ist mit einigen Patenten belastet, so dass sich die Anzahl der Anbieter in Grenzen hält. Die Anbieter haben in der Regel spezifische Modifikationen entwickelt und damit ihre eigenen Erfahrungen gemacht.

1.3. Passive Verfahren der Grundwassersanierung

1.3.1 Vollflächig durchströmte Reinigungswände

Andere Bezeichnungen
<p>Reaktive Wände, Reinigungswände, Adsorptionswand.</p> <p>Engl. Bezeichnungen: CRB («Continuous Reactive Barrier»); PRB («Permeable Reactive Barrier»)</p>
Prinzip
<p>Passive, d. h. ohne Energieeintrag von ausserhalb, erfolgende Reinigung von kontaminiertem Grundwasser im Abstrom einer Altlast beim Durchströmen reaktiver oder adsorptiver Materialien, die in Form einer durchlässigen Barriere () quer zum Grundwasserstrom in den Untergrund eingebracht werden.</p>
Wirkungsweise
<p>Die hydraulische Wirkung der vollflächig durchströmten Reinigungswand beruht darauf, dass die im Grundwasser gelösten oder an Partikel gebundenen Schadstoffe mit dem Grundwasserabstrom den Bereich der reaktiven Wand durchströmen. Dafür müssen die Durchlässigkeiten des Untergrundes und des reaktiven Materials aufeinander abgestimmt sein, um eine Durchströmung der Reinigungswand sicher zulassen. Dies ist immer dann der Fall, wenn die hydraulische Durchlässigkeit der reaktiven Wand grösser ist, als die Durchlässigkeit des Untergrundes.</p> <p>Die reaktive Wirkung kann in Form eines Schadstoffabbaus (z. B. durch Dechlorierung), einer Schadstoffumwandlung (Absorption oder Fällung) oder durch Rückhalt der Schadstoffe in der Reinigungswand (z. B. durch Adsorption) erzielt werden. Die Wirkung ist abhängig von der Wahl des reaktiven Materials, welches wiederum in Abhängigkeit der im Grundwasser vorhandenen Schadstoffe ausgewählt wird.</p>
Technische Beschreibung
<p>Die vollflächig durchströmte Reinigungswand besteht aus durchlässigem reaktivem Material (d. h. es sind keine Vorrichtungen zur passiven Lenkung des Grundwassers vorgesehen). Erweiterte Kontrollmöglichkeiten (ausser den üblichen Grundwasserüberwachungsbrunnen) oder gar Eingriffsmöglichkeiten für den Fall von Störungen sind nicht eingeplant.</p> <p>Die Reinigungswand entsteht durch das bautechnische Einbringen von reaktivem Material in den Grundwasserleiter. Für die Herstellung steht eine Anzahl von Bautechniken zur Verfügung, die im Tiefbau üblich und eingeführt sind.</p> <p>Das reaktive Material wird hinsichtlich einer möglichst weitgehenden Schadstoffreduzierung unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Kriterien ausgewählt. Zur Verfügung stehen folgende in der Praxis erprobte Materialien:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Elementares («Nullwertiges») Eisen zur reduktiven Dehalogenierung von halogenierten Kohlenwasserstoffen (LCKW, FCKW) oder zur Fällung von Chrom VI als reduziertes Cr III; ▪ Aktivkohle oder Zeolithe zur Adsorption organischer Verbindungen (PAK, Phenole, BTEX, LCKW und sonstiger adsorbierbarer Verbindungen); ▪ Kalkstein zur Beeinflussung des pH-Wertes und zur Ausfällung einzelner Schwermetalle und anderer anorganischer Verbindungen;

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Biologisch wirksame oder Nährstoffe freisetzende Materialien (z. B. Kompost) zur Unterstützung eines biotischen Abbaus von Schadstoffen im Grundwasser. <p>Die Durchlässigkeit des reaktiven Materials muss deutlich höher sein, als die des umgebenden Untergrundes, um eine Um- oder Unterströmung der Reinigungswand zu verhindern und eine vollständige Erfassung des kontaminierten Grundwasserstroms zu ermöglichen.</p>	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Grundwasser
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Organische Schadstoffe (LCKW, FCKW, PAK, Phenole, BTEX, sonstige, insbesondere chlororganische Verbindungen); ▪ Anorganische Schadstoffe (Chrom (VI) und andere Schwermetalle).
Geologie/Hydrogeologie	Gut durchlässige Grundwasserleiter (i. d. R. Porengrundwasserleiter); gute Kenntnis der hydrogeologischen und der hydraulischen Eigenschaften sind erforderlich.
Einsatzgrenzen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geeignetes reaktives Material für die Schadstoffreduzierung steht nicht zur Verfügung. ▪ Das reaktive Material wird zu schnell verzehrt oder verblockt und es bestehen keine Möglichkeiten des Austauschs. ▪ Mit den üblichen Bautechniken kann die Basis des Grundwasserleiters nicht erreicht werden, oder die Kosten hierfür sind zu hoch. ▪ Die Art oder Konzentration der Schadstoffe oder das Vorhandensein von sonstigen Grundwasserinhaltsstoffen (die z. B. zu Ausfällungen bei sehr harten Grundwässern führen können) machen einen häufigeren Wechsel des reaktiven Materials oder den Bau neuer Wände erforderlich. 	
Erforderliche Infrastruktur	
<p>Die Wand sollte in der Regel auf der gesamten Länge von oben zugänglich sein, da ansonsten eine Probenahme aus den reaktiven Medien bzw. ein Austausch derselben nicht möglich ist. Im Zustrom und im Abstrom werden Überwachungsbrunnen installiert, die zugänglich sein müssen. Wasser und Stromanschluss ist für den Betrieb der Wand nicht erforderlich</p>	
Überwachung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Überwachung der hydraulischen Wirkungsweise und der Reinigungswirkung durch ein geeignetes Grundwassermonitoring im An- und Abstrom, sowie seitlich und ggf. innerhalb der Reinigungswand. ▪ Ggf. direkte Untersuchungen des reaktiven Materials hinsichtlich seiner hydraulischen Eigenschaften sowie der Reaktivität des Materials im Reaktor (erfordert spezielle Probeentnahmeeinrichtungen). 	

Verfahrensvarianten
<p>Verfahrensvarianten ergeben sich vor allem durch:</p> <ul style="list-style-type: none">▪ die Lenkung des Grundwasserstromes, Kombinationen mit Dichtwänden (vgl. Kap. 1.3.2);▪ den Einbau von festen und mit reaktivem Material gefüllten Schachtsystemen oder Behältern, die ein Auswechseln des reaktiven Materials erlauben <p>Verfahrensvarianten ergeben sich auch durch eine veränderte Geometrie des eingebauten reaktiven Materials im Vergleich zur über die Breite und Tiefe des kontaminierten Grundwasserleiters vollständigen reaktiven Wand:</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Hängende Wände ohne Einbindung der Wand in einen grundwasserstauenden Horizont;▪ Aufgelöste Wände mit z. B. versetzt angeordneten Reihen von säulenartigen Reaktionsbereichen, die im Bohrverfahren erstellt werden können (Reaktionspfähle). <p>Zukünftig können sich auch Varianten durch den Einsatz neuartiger reaktiver Materialien wie z. B. katalytisch wirkende Substanzen ergeben, die derzeit noch in der Entwicklung sind.</p>
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen
<p>Es können Wände, die mit unterschiedlichen reaktiven Materialien befüllt sind, in Grundwasserflussrichtung hintereinander angeordnet werden, um unterschiedlich reaktive Schadstoffe in den einzelnen Wänden zu behandeln.</p>
Anwendungserfahrung
<p>Reaktive Wände sind in vielen Anwendungen vor allem in den USA, in Deutschland und Österreich realisiert worden. Zur Anwendung kommen vor allem Eisenwände (bei LCKW-Schadensfällen) und Aktivkohlewände. Eine Anwendung ist auch in der Schweiz bekannt.</p>
Entwicklungsstand und Marktsituation
<p>Der Einsatz von Eisen und Aktivkohle in reaktiven Wänden kann bereits als Stand der Technik angesehen werden. Trotzdem sollten nur mit dieser Technik erfahrene Ingenieurbüros und Hersteller beauftragt werden, da es sich um eine relativ komplexe Sanierungsmassnahme handelt, bei der viele Einflussparameter zu berücksichtigen sind.</p>

1.3.2 Reinigungswände mit gelenktem Grundwasserstrom

Andere Bezeichnungen
<p>Funnel and Gate (F & G-System), Drain-and-gate-System.</p> <p>Engl. Bezeichnungen: Permeable Reactive Barrier (PRB).</p>
Prinzip
<p>Die Aufgabe entspricht derjenigen einer vollflächig durchströmten Reinigungswand (siehe Kap. 1.3.1): Reinigung von kontaminiertem Grundwasser im Abstrom einer Altlast durch reaktive Materialien, die in durchlässige Bereiche einer ansonsten undurchlässigen Wand-Barriere quer zum Grundwasserstrom in den Untergrund eingebracht werden.</p>
Wirkungsweise
<p>Die hydraulische Wirkung der Reinigungswände mit gelenktem Grundwasserstrom beruht darauf, dass die im Grundwasser gelösten Schadstoffe mit dem Grundwasserabstrom in den Bereich der durchlässigen reaktiven Wandabschnitte eingetragen werden. Das Wandsystem besteht dabei entweder aus Dichtwänden als undurchlässigen Leitwänden («Funnel») oder aber aus hochdurchlässigen Drainagesystemen («Drain»), die den kontaminierten Grundwasserstrom lenken bzw. fassen und einem in situ-Reaktor («Gate») zuleiten, der zumeist als perforierte Kammer ausgeführt und mit reaktivem Material in einer losen, ebenfalls hydraulisch durchlässigen Schüttung befüllt wird.</p> <p>Die reaktiven Medien können wie bei den vollflächig durchströmten Reinigungswänden einen Schadstoffabbau (z. B. durch Dechlorierung) bewirken oder einen Rückhalt der Schadstoffe im in situ-Reaktor verursachen. Die Wirkung ist damit abhängig von der Wahl des reaktiven Materials.</p> <p>Die Reinigungswand mit gelenktem Grundwasserstrom und reaktiven Gates bietet sich vor allem an, wenn ein Austausch des reaktiven Materials wegen der Höhe der Konzentrationen oder der Art der Schad- und sonstigen Grundwasserinhaltsstoffe in der vorgesehenen Betriebszeit des reaktiven Systems erforderlich wird.</p>
Technische Beschreibung
<p>Reinigungswände mit gelenktem Grundwasserstrom bestehen wie dargestellt aus der Leitwand oder einer Drainage und dem eigentlichen Reaktionsbereich. Für die Herstellung der undurchlässigen Leitwand kommen alle üblichen bautechnischen Lösungen zur Herstellung von Dichtwänden in Frage (vgl. u. a. BAFU Vollzugshilfe «Sicherung von Deponie-Altlasten»):</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schlitzwände; ▪ Schmalwände; ▪ Stahl-Spundwände; ▪ Bohrpfahlwände; ▪ Injektionswände; ▪ MIP-Wände («Mixed in place»). <p>Auch für die Herstellung der Drainagen (Drain-Systeme) können die üblichen Tiefbautechniken angewendet werden.</p>

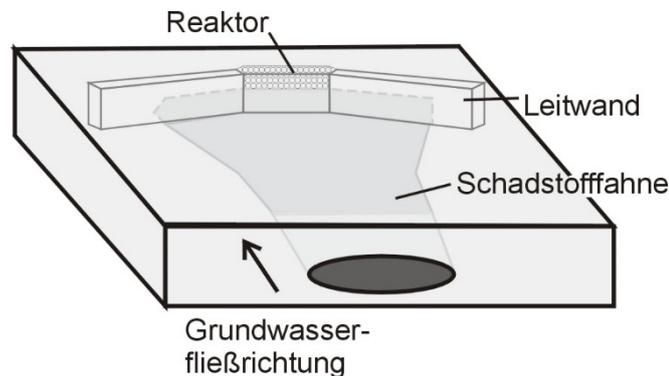
Der Reaktionsbereich wird im Gegensatz zu den vollflächig durchströmten Reinigungswänden häufig in Form eines Schachtbauwerkes ausgeführt, in welches das reaktive Material eingebracht wird und welches je nach Konstruktion auch einen Austausch des reaktiven Materials ermöglicht.

Das reaktive Material wird hinsichtlich einer möglichst weitgehenden Schadstoffreduzierung unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Kriterien ausgewählt. Zur Verfügung stehen folgende in der Praxis erprobte Materialien:

- Elementares («Nullwertiges») Eisen zur reduktiven Dehalogenierung von halogenierten Kohlenwasserstoffen (LCKW, FCKW) oder Fällung bei Chrom VI und anderen Schwermetallen;
- Aktivkohle oder Zeolithe zur Adsorption organischer Verbindungen (PAK, Phenole, BTEX, LCKW, sonstige, insbesondere chlororganische Verbindungen);
- Kalkstein zur Fällung und Immobilisierung von Schwermetallen und anorganischen Verbindungen;
- Biologisch wirksame oder Nährstoffe freisetzende Materialien (z. B. Kompost) zur Unterstützung eines biotischen Abbaus von Schadstoffen im Grundwasser oder zur Unterstützung reduktiver Fällungsverfahren.

Erweiterte Kontrollmöglichkeiten sind auf Grund der verschiedenen Konstruktionsarten der Schachtbauwerke in der Regel möglich.

Verfahrensschema



Einsatzmöglichkeiten

Medium	Grundwasser
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Organische Schadstoffe (LCKW, FCKW, PAK, Phenole, BTEX, sonstige, insbesondere chlororganische Verbindungen). ▪ Anorganische Schadstoffe (Chrom (VI) und andere Schwermetalle).
Geologie/Hydrogeologie	Gut durchlässige Grundwasserleiter (i. d. R. Porengrundwasserleiter); gute Kenntnis der hydrogeologischen und der hydraulischen Eigenschaften sind erforderlich

Einsatzgrenzen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geeignetes reaktives Material für die Schadstoffreduzierung steht nicht zur Verfügung. ▪ Mit den üblichen Bautechniken kann die Basis des Grundwasserleiters nicht erreicht werden, oder die Kosten hierfür sind zu hoch. ▪ Die Art oder Konzentration der Schadstoffe oder das Vorhandensein von sonstigen Grundwasserinhaltsstoffen (die z. B. zu Ausfällungen bei sehr harten Grundwässern führen können) machen einen häufigeren Wechsel des reaktiven Materials erforderlich.
Erforderliche Infrastruktur
Für die Überwachung und den Austausch des reaktiven Materials ist eine Wegeverbindung zum Schachtbauwerk erforderlich. Das Schachtbauwerk soll freizugänglich bleiben. Strom und Wasseranschlüsse sind für den Betrieb der Wand nicht erforderlich
Überwachung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Überwachung der hydraulischen Wirkungsweise und der Reinigungswirkung durch ein geeignetes Grundwassermonitoring im An- und Abstrom, sowie seitlich der Leitwände und ggf. im Reaktionsbereich. ▪ Ggf. direkte Untersuchungen des reaktiven Materials hinsichtlich seiner hydraulischen Eigenschaften sowie der Reaktivität des Materials im Reaktor (erfordert spezielle Probenahmeinrichtungen).
Verfahrensvarianten
<p>Verfahrensvarianten ergeben sich vor allem durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ die Erstellung mehrerer Reaktoren in der Trasse der Reinigungswand; ▪ Ausbildung mehrstufiger reaktiver Systeme für Schadstoffgemische; ▪ Ausbildung unterschiedlicher Typen von Schachtbauwerken. <p>Im Übrigen stellen die vollflächig durchströmten Reinigungswände (vgl. Kap. 1.3.1) eine Verfahrensvariante dar.</p> <p>Zukünftig können sich weitere Varianten durch den Einsatz neuartiger reaktiver Materialien wie z. B. katalytisch wirkenden Substanzen ergeben, die derzeit noch in der Entwicklung sind.</p>
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen
Es können Wände, die mit unterschiedlichen reaktiven Materialien befüllt sind, in Grundwasserflussrichtung hintereinander angeordnet werden, um unterschiedlich reaktive Schadstoffe in den einzelnen Wänden zu behandeln.
Anwendungserfahrung
<p>Reinigungswände mit gelenktem Grundwasserstrom nach dem Funnel-and-Gate-Prinzip sind in mehreren Anwendungen in den USA, in Deutschland und Österreich realisiert worden. Drain-and-Gate Systeme sind in Österreich realisiert worden.</p> <p>Anwendungserfahrungen in der Schweiz liegen noch nicht vor. Da es sich aber um die Kombination üblicher bautechnischer Verfahren und die Anwendung der aus der Wasseraufbereitung bekannten reaktiven Materialien handelt, sind die Erfahrungen auch länderübergreifend übertragbar.</p>

Entwicklungsstand und Marktsituation

Der Einsatz von Eisen und Aktivkohle sowie die bautechnischen Verfahren der Leitwand- und Schachtbauwerkserstellung können als Stand der Technik angesehen werden.

Trotzdem sollten nur mit dieser Technik erfahrene Ingenieurbüros und Hersteller beauftragt werden, da es sich um eine relativ komplexe Sanierungsmassnahme handelt, bei der viele Einflussparameter zu berücksichtigen sind.

Das Funnel-and-Gate-System und einige spezielle Ausbildungsformen des Reaktors sind patentrechtlich geschützt.

1.3.3 Bioscreen

Andere Bezeichnungen
<p>Bio-Barriere.</p> <p>Engl. Bezeichnungen: Bio Screen, Bio Barrier, Multi Barrier.</p>
Prinzip
<p>Beim Durchströmen einer wandartigen reaktiven Zone im Grundwasserbereich wird der biologische Abbau gefördert. Die reaktive Zone kann auf unterschiedliche Art und Weise hergestellt werden. Es ist entweder bereits in der reaktiven Zone ein durchlässiges Material eingebracht, welches beispielsweise als Kohlenstoffquelle dient und/oder die Ansiedelung von Mikroorganismen fördert oder die reaktive Zone wird durch die Zudosierung von bestimmten Substraten, die den mikrobiellen Abbau von Schadstoffen anregen und fördern.</p>
Wirkungsweise
<p>Das Bioscreen-verfahren zählt sowohl zu den passiven als auch den biologischen Sanierungsverfahren. Dabei werden den biologischen Abbau fördernde Substanzen quer zum Grundwasserstrom in den Untergrund eingebracht. Diese sogenannte aktivierte Zone kann aus einer Reihe engstehender Brunnen bestehen und den gesamten Querschnitt oder nur einen Teil der Schadstofffahne überspannen. Die Wirkung ist abhängig von der Wahl des reaktiven Materials. Das reaktive Material kann beispielsweise aus organischem Material bestehen, welches Kohlenstoff abgibt und die Besiedelung von Bakterien fördert oder es wird durch die Zugabe von Sauerstoff der aerobe Abbau, bzw. durch die Zugabe reduktiver Stoffe (z. B. Wasserstoff, Melasse etc.) der anaerobe Abbau gefördert.</p>
Technische Beschreibung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eine vollflächige oder nur abschnittsweise erstellte durchströmbare Wand wird errichtet und mit einem Material gefüllt, welches den biologischen Abbau fördert; ▪ Eine Reihe engstehender Brunnen wird senkrecht zur Grundwasserfließrichtung und innerhalb der Schadstofffahne in den Aquifer eingebracht. In die Brunnen werden bestimmte Stoffbehälter eingehängt, welche kontinuierlich Sauerstoff, Nährstoffe oder Elektronendonatoren an den Aquifer abgeben. Diese müssen nach bestimmten Zeitabschnitten durch neue Behälter ersetzt werden. ▪ In die reaktiven Zonen werden zusätzlich Nährstoffe und den biologischen Abbau fördernde Elektronendonatoren injiziert.

Verfahrensschema	
<p> Schadstoff-Fahne NS Nährsalze Anaerobe methanogene Zone Aquitard Aerobe methanotrophe Zone </p>	
<p>Abbildung Dr. Held, arcadis</p>	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Grundwasser, gesättigte Zone.
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Organische, biologisch abbaubare Schadstoffe wie aliphatische, aromatische KW, MKW (Diesel, Schmieröle), PAK (<4 Ringe), Phenole und Alkohole; ▪ Phosphate, Sulfate, Nitrat; ▪ Fluoride, Leichtflüchtige KW (BTEX), LHKW.
Geologie/Hydrogeologie	Es ist eine gute Kenntnis der hydrogeologischen und der hydraulischen Eigenschaften erforderlich.
Einsatzgrenzen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Reaktionsstrecken beim Durchfluss durch die reaktiven Zone sind zu kurz, um einen vollständigen Abbau zu erlauben; ▪ Der Grundwasserbereich ist bereits mit stark zehrenden Stoffen belastet, welche so grosse Mengen an reaktiven Materialien erfordern, dass das Verfahren unwirtschaftlich wird; 	
Erforderliche Infrastruktur	
<p>Die Wandabschnitte und die Brunnen müssen gut zugänglich sein. Unter Umständen werden Aufstellungsflächen und Versorgungsleitungen für Injektionsanlagen erforderlich.</p>	

Überwachung
<ul style="list-style-type: none">▪ Langzeitüberwachung der Reinigungswirkung durch ein geeignetes Grundwassermonitoring im An- und Abstrom, sowie seitlich der Brunnen;▪ Überwachung der biologischen Aktivitäten im Grundwasser oder in der Porenluft.▪ Überwachung der reaktiven Medien (Zehrung).
Verfahrensvarianten
Verfahrensvarianten ergeben sich vor allem durch: <ul style="list-style-type: none">▪ Anordnung der Bio- Wände oder Brunnen (lateral und vertikal)▪ Anzahl und Art der Reaktionsbereiche
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen
<p>Verfahrenskombinationen mit unterschiedlichen reaktiven Materialien, die in Grundwasserfließrichtung hintereinander angeordnet werden, sind möglich. Es sind auch bereits sogenannte Multi-Barrieren gebaut worden, die in einer Schicht oder in einem Brunnen die Biologie fördern und in einer zweiten oder dritten Schicht dem Rückhalt anderer Schadstoffe dienen (Dehalogenierung, Fällung, Adsorption).</p> <p>Zudem kann das Verfahren mit hydraulischen oder anderen passiven Verfahren kombiniert werden.</p>
Anwendungserfahrung
<p>Zwar sind verschiedene Arten von Bioscreens im technischen Massstab erprobt worden. Aufgrund der langen Sanierungsdauer der behandelten Flächen liegen jedoch noch keine ausreichend gesicherten Erkenntnisse über Langzeitwirkung und Sanierungserfolge vor. Zudem muss die behandelbare Schadstofffracht relativ gering sein und das Verfahren ist in der Regel mit einem langen und kostenintensiven Monitoring verbunden.</p> <p>Anwendungserfahrungen in der Schweiz sind nicht bekannt.</p>
Entwicklungsstand und Marktsituation
<p>Die Bioscreen-Verfahren sind noch nicht dem Stand der Technik zuzuordnen. Sie sollten auch nur von entsprechend erfahrenen Sanierungsunternehmen durchgeführt werden oder wissenschaftlich begleitet werden.</p>

2. Pneumatische Verfahren

2.1 Bodenluftabsaugung

Andere Bezeichnungen
Porenluftabsaugung, Porenluftextraktion; Engl. Bezeichnungen: Soil Vapor Extraction (SVE).
Prinzip
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entfernung von leichtflüchtigen und/oder biologisch abbaubaren Schadstoffen im Untergrund; ▪ die damit einhergehende Sauerstoffversorgung der ungesättigten Zone führt zusätzlich zu einer Beschleunigung des biologischen Abbaus.
Wirkungsweise
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die kontrollierte, gesteuerte Extraktion der Bodenluft (Porenluft) führt zur Entfernung von leichtflüchtigen Schadstoffen aus der ungesättigten Zone; ▪ Durch die Absaugung strömt sauerstoffhaltige Luft in die ungesättigte Zone. Diese wirkt zusätzlich als Bioreaktor für den Abbau von schwer flüchtigen Schadstoffen (vgl. Kap. 4.5.2.3 und Anhang A1, Kap. 4.3 «Bioventing»).
Technische Beschreibung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Absaugung der Porenluft erfolgt über spezielle der Geologie und der Schadstoffverteilung angepasste Extraktionsbrunnen, gegebenenfalls sind Multilevelbrunnen erforderlich. ▪ Die Absaugung wird über eine steuerbare Anlagentechnik kontrolliert und geregelt (z. B. pulsierend dynamische Absaugung). Die Auslegung des Absauggebläses wird auf die Durchlässigkeiten des Untergrundes abgestimmt. Zum Einsatz kommen Seitenkanalverdichter, Radialverdichter und Vakuumpumpen. ▪ Die abgesaugte belastete Porenluft wird über eine Abluftaufbereitungsanlage (siehe Anhang A2) gereinigt. ▪ Bei der Absaugung von brennbaren Gasen (z. B. BTEX, Benzin, Methan, etc.) muss die Anlage sicherheitstechnisch bezüglich Brand- und Explosionsschutz ausgerüstet werden. Die einschlägigen Sicherheitsrichtlinien (z. B. der SUVA, etc.) sind einzuhalten. ▪ Um elektrostatische Aufladungen und damit mögliche Zündfunken zu verhindern, müssen die Absaugleitungen elektrisch leitend (z. B. Stahl) und geerdet sein. Gleiches gilt für die Anlagentechnik. ▪ Eine unregelmäßige, unkontrollierte Porenluftabsaugung kann unter Umständen zu einer nachteiligen Verlagerung der Schadstoffe im Untergrund und/oder in das Grundwasser führen.

Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Porenluft, ungesättigte Zone, oberhalb des Grundwassers.
Schadstoffe	Leichtflüchtige und schwerer flüchtige, aber biologisch abbaubare Schadstoffe (z. B. LCKW, BTEX, Benzin, Diesel, z.T. PAK, etc.)
Geologie/Hydrogeologie	Ungesättigte Zone, sandig-kiesiger oder siltig-sandiger Untergrund
Sonstige Bedingungen	Freier Zugang
Einsatzgrenzen	
<p>Der k_f-Wert sollte $>10^{-6}$ [m/s] sein. Bei stark inhomogenem Aufbau des Untergrunds mit grossen Durchlässigkeitsschwankungen in den einzelnen Schichten oder Bereichen sollte die Einsatzmöglichkeit des Verfahrens respektive deren Grenzen in einem Pilotversuch getestet werden.</p> <p>Erfolgt die Porenluftabsaugung zu nahe an der Erdoberfläche, wird vorwiegend Umgebungsluft statt Porenluft angesaugt. Vorteilhaft ist eine relativ dichte Schicht oder eine künstliche Abdichtung (asphaltierte Verkehrsfläche, Kunststoffdichtungsbahn).</p>	
Erforderliche Infrastruktur	
<p>Strom, eventuell Telefonanschluss, Steuerung, Absaugaggregat, Absaugbrunnen, Verbindungsleitungen, Abluftaufbereitung, gegebenenfalls Kontrollbrunnen in der ungesättigten Zone und ggf. Oberflächenabdichtung mittels Kunststoffdichtungsbahn.</p> <p>Eventuell zusätzliche Brand- und Explosioinsschutzeinrichtungen.</p>	
Überwachung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schadstoffkonzentrationen/-reduzierung; ▪ Respirationstests; ▪ Einflussbereich (radius of influence = ROI); ▪ Porenluftmonitoring; ▪ Absaugmenge; ▪ Unterdruck; ▪ Emissionen am Austritt der Abluftreinigungsanlage. 	
Verfahrensvarianten	
<p>Kontinuierliche Absaugung der Porenluft, jedoch bei geringeren Konzentrationen meist uneffektiver als pulsierend dynamische Absaugung.</p>	
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abluftaufbereitung erforderlich; ▪ In situ Strippen (Kap. 4.3.3 und Anhang A1 Nr. 2.3); ▪ Pump and Treat (Kap. 4.2.2.1 und Anhang A1 Nr. 1.2.1). 	

Anwendungserfahrung

Die Sanierungsmethode hat sich im grosstechnischen Massstab seit Jahren bestens bewährt und ist von allen Umweltbehörden anerkannt.

Entwicklungsstand und Marktsituation

Die Bodenluftabsaugung ist Stand der Technik. Seit einigen Jahren wird diese Methode auch erfolgreich in der Schweiz zur Sanierung eingesetzt. Die Planer und die ausführenden Firmen sollten über einschlägige Erfahrungen verfügen.

2.2 Slurping

Andere Bezeichnungen
Siehe Anhang A1: Kap. 1.1.3 Slurping

2.3 In situ-Strippen

Andere Bezeichnungen
<p>Grundwasserbelüftung; Engl. Bezeichnungen: Air-Sparging, In situ Air-Sparging (IAS).</p>
Prinzip
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Injektion von Umgebungsluft in das Grundwasser mit meist gleichzeitiger Absaugung der Porenluft aus der ungesättigten Zone; ▪ Entfernung von leichtflüchtigen Schadstoffen im Untergrund und Grundwasser durch den Strippeffekt; ▪ Die damit einhergehende Sauerstoffversorgung der gesättigten und ungesättigten Zone führt zusätzlich zur Beschleunigung des biologischen Abbaus.
Wirkungsweise
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kontrollierte, gesteuerte Injektion von ölfreier Druckluft in den Grundwasserleiter führt zur Strippping der leichtflüchtigen Komponenten in die ungesättigte Zone. Diese werden dort durch die Bodenluft-Extraktion entfernt. ▪ Die nicht stripbaren schwerflüchtigen Komponenten können, soweit biologisch abbaubar, in der gesättigten Zone und insbesondere im Kapillarsaum durch die Sauerstoffzugabe biologisch abgebaut werden. Die gesättigte Zone wirkt dabei als Bioreaktor. ▪ Kontrollierte, gesteuerte Extraktion der Bodenluft (Porenluft) führt zur Entfernung von leichtflüchtigen Schadstoffen aus der ungesättigten Zone. ▪ Durch die Absaugung strömt sauerstoffhaltige Luft in die ungesättigte Zone. Diese wirkt zusätzlich als Bioreaktor für den Abbau von schwerer flüchtigen Schadstoffen.
Technische Beschreibung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die ölfreie Druckluft wird über spezielle, der Geologie und der Schadstoffverteilung angepasste Injektionsbrunnen eingeblasen, gegebenenfalls sind Multilevelbrunnen notwendig. ▪ Die Luftverteilung (Menge, Druck und Dauer) wird am effizientesten über eine steuerbare Anlagentechnik kontrolliert und geregelt. ▪ Die Absaugung der Porenluft erfolgt über spezielle, der Geologie und der Schadstoffverteilung angepasste, Extraktionsbrunnen, gegebenenfalls sind Multilevelbrunnen notwendig. ▪ Die Absaugung wird über eine steuerbare Anlagentechnik kontrolliert und geregelt (pulsierend dynamische Absaugung). Die Auslegung des Absauggebläses wird auf die Durchlässigkeit des Untergrundes abgestimmt. ▪ Die abgesaugte belastete Porenluft wird über eine Abluftaufbereitungsanlage (siehe Anhang A2) gereinigt. ▪ Eine unregelmäßige, unkontrollierte Bodenluftabsaugung beziehungsweise Luftinjektion kann unter Umständen zu einer nachteiligen Verlagerung der Schadstoffe im Grundwasser und/oder zu einer Verlagerung der Schadstoffe in die Atmosphäre führen.

Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Grundwasser, Schichtwasserhorizonte und ungesättigte Zone oberhalb der Luftinjektionsstellen.
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Leichtflüchtige und schwerer flüchtige, aber biologisch abbaubare Schadstoffe (z. B. LCKW, BTEX, Benzin, Diesel, Heizöl, z. T. PAK); ▪ Ammonium, Nitrit, Eisen, etc.
Geologie/Hydrogeologie	Gut bis mittelmässig durchlässige Grundwasserleiter und ungesättigte Zonen.
Sonstige Bedingungen	Freier Zugang
Einsatzgrenzen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Der k_f-Wert sollte $>10^{-6}$ [m/s] sein. Bei stark inhomogenem Aufbau des Untergrunds mit grossen Durchlässigkeitsschwankungen in den einzelnen Schichten oder Bereichen sollte die Einsatzmöglichkeit des Verfahrens respektive deren Grenzen in einem Pilotversuch getestet werden. Dies gilt ebenfalls bei unklaren Strömungsverhältnissen und teilweise bei gespannten Grundwasservorkommen. ▪ Im unmittelbaren Einzugsbereich von Trinkwasserfassungen werden diese Sanierungsmassnahmen in der Regel nur nach eingehender Prüfung zugelassen. 	
Erforderliche Infrastruktur	
Strom, eventuell Telefonanschluss, Steuerung, Kompressor, Absaugaggregat, Absaug- und Injektionsbrunnen, Verbindungsleitungen, Abluftaufbereitung, Kontrollbrunnen in der gesättigten und ungesättigten Zone und ggf. Oberflächenabdichtung mittels Kunststoffdichtungsbahn.	
Überwachung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schadstoffkonzentrationen/-reduzierung; ▪ Respirationstests; ▪ Einflussbereich (radius of influence = ROI); ▪ Grundwasserspiegel; ▪ Grundwassermonitoring; ▪ Porenluftmonitoring; ▪ Absaugmenge; ▪ Unterdruck; ▪ Emissionen am Austritt der Abluftreinigungsanlage. 	
Verfahrensvarianten	
Zugabe von reinem, technischem Sauerstoff in die Injektionsluft. Dabei ist je nach Schadstoffgehalt mit einer erhöhten Explosionsgefahr zu rechnen.	

Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen

- Porenluftabsaugung und Abluftaufbereitung (immer) erforderlich;
- Es können ergänzend Pump-and-Treat-Massnahmen durchgeführt werden.

Anwendungserfahrung

Die Sanierungsmethode hat sich im grosstechnischen Einsatz seit Jahren bestens bewährt und wird von allen Umweltbehörden anerkannt.

Entwicklungsstand und Marktsituation

Das Air-Sparging in Verbindung mit einer Porenluftabsaugung ist Stand der Technik. Seit einigen Jahren wird diese Methode auch erfolgreich in der Schweiz zur Sanierung eingesetzt. Die Planer und die ausführenden Firmen sollten über einschlägige Erfahrungen verfügen.

3. Mobilisierungsverfahren

3.1 Physikalische Mobilisierungsverfahren

3.1.1 Dampf-Luft-Injektion

Andere Bezeichnungen
<p>TUBA (Thermisch Unterstützte Boden-Luft-Absaugung), Dampf-Luft-Injektion in der gesättigten Zone (DLI).</p> <p>Engl. Bezeichnungen: Steam Enhanced Extraction (SEE), In-situ Thermal Treatment (ISTT), In-situ Thermal Remediation (ISTR).</p>
Prinzip
<p>Mobilisierung der Schadstoffe durch Wärmeeintrag. Die verdampften gasförmigen Schadstoffe werden über eine Bodenluftabsaugung abgesaugt. Der Wärmeeintrag erfolgt über die Injektion von Dampf, meist in die Porenluft, aber auch in das Grundwasser.</p>
Wirkungsweise
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erwärmung des Untergrunds erfolgt über den fortlaufenden Kondensationsprozess des injizierten Dampfes (50 °C–100 °C) an der kalten Untergrundmatrix (~10 °C), indem der Dampf seine Energie (Verdampfungsenthalpie) an die Untergrundmatrix abgibt (Konvektiver Wärmeeintrag). ▪ Erwärmung des Untergrundes auf den erforderlichen Gemischsiedepunkt, um Schadstoffe zu verdampfen. ▪ Ausbreitung des Dampf-Luft-Gemisches erfolgt horizontal und radial, bis der Untergrund die Dampftemperatur erreicht hat. Mittels des Luftanteils werden die verdampften Schadstoffe zu den Extraktionsbrunnen transportiert. ▪ Absaugung der gasförmigen Schadstoffe mit der Porenluft und Reinigung der Porenluft über konventionelle Anlagen (s. Bodenluftabsaugung). ▪ Das Verfahren beschleunigt die Mobilisierung der Schadstoffe und das Verfahren der Bodenluftabsaugung. ▪ Das Verfahren kann auch zur Erwärmung des Grundwassers eingesetzt werden, um dort die Ausgasung der gelösten und leicht flüchtigen Schadstoffe zu verbessern.
Technische Beschreibung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zur Erzeugung des Dampfes ist ein Dampferzeuger erforderlich. Zur Injektion des Luftgemisches in den Dampfstrom ist ein Kompressor erforderlich. ▪ Die Anlage zur Bodenluftabsaugung (s. Kap. 2.1) beinhaltet einen Wärmetauscher mit Kondensatabscheider, einen Verdichter sowie die Abluftbehandlung über Aktivkohle, TNV oder KatOx. ▪ Zur Reinigung des anfallenden Kondensats ist ein Kondensator sowie bei Ölphasenförderung zusätzlich ein Phasenabscheider erforderlich. ▪ Zur Bereitstellung von Kühlwasser kann das geförderte Grundwasser der Abstomsicherung genutzt werden, sofern dieses nicht zu stark erwärmt ist. Das geförderte Grundwasser muss aufbereitet werden. (z. B. Aktivkohle oder Stripper).

Einsatzmöglichkeiten	
Medium	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ungesättigte Zone, Porenluft ▪ gesättigte Zone, Grundwasser
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flüchtige, organische Schadstoffe; ▪ Eingeschränkt auch freie Phase (LNAPL)
Geologie/Hydrogeologie	Locker- und Festgesteine (klüftig) mit guter bis mässiger Durchlässigkeit (Feinsand bis Silt)
Einsatzgrenzen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gering durchlässige Schichten großer Mächtigkeit; ▪ Mittel bis schwerflüchtige Schadstoffe. 	
Erforderliche Infrastruktur	
Strom, eventuell Telefonanschluss, Steuerung, Dampferzeuger (mit Energieversorgung und Wasser), Kompressor, Absaugaggregat, Absaugbrunnen, Verbindungsleitungen, Abluftaufbereitung, gegebenenfalls Kontrollbrunnen in der ungesättigten und gesättigten Zone und ggf. Oberflächenabdichtung mittels Kunststoffdichtungsbahn.	
Überwachung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schadstoffkonzentrationen/-reduzierung durch Porenluft und Grundwasserpegel; ▪ Einflussbereich (radius of influence = ROI); ▪ Porenluftmonitoring; ▪ Absaugmenge; ▪ Unterdruck; ▪ Emissionen; ▪ Prüfung des Abstands zu erdverlegten Leitungen; ▪ Temperaturmessungen im Untergrund und im Grundwasser. 	
Verfahrensvarianten	
Die Sanierungsunternehmen bieten technische Varianten an. Verfahrenstechnische Varianten der Dampfinjektion sind nicht bekannt. Der Wärmeeintrag kann allerdings auch mit festen Wärmequellen (THERIS, siehe auch Kap. 3.1.2) oder mit einer elektrischen Widerstandsheizung (Electrical Resistance Heating [ERH]) erfolgen.	
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Das Verfahren sollte nur in Kombination mit einer Bodenluftabsaugung durchgeführt werden; ▪ für die Bodenluftabsaugung ist eine Abluftaufbereitung erforderlich; ▪ Kombination mit THERIS-Verfahren (bei großen Mächtigkeiten); ▪ Kombination mit hydraulischen Verfahren (bei Einsatz im Grundwasser). 	

Anwendungserfahrung

Die Heissluft-/Dampfinjektion ist ein schnelles und gut kontrollierbares Verfahren. Es gibt einige Anwendungsbeispiele in Deutschland, Österreich, Großbritannien, Italien und auch in der Schweiz, in welchen das Verfahren zur Sanierung eingesetzt wurde. Großer Vorteil ist der mögliche Einsatz des Verfahrens in direkter Umgebung oder unter Gebäuden bei gleichzeitigem Erhalt der Nutzung. Eine erfolgreiche Anwendung in Kombination mit festen Heizquellen ist in der Schweiz im Kanton Wallis erfolgt. Dabei wurde der ungesättigte Bereich mit festen Heizkörpern und der Grundwasserbereich mit Dampfinjektion aufgeheizt.

Entwicklungsstand und Marktsituation

Der Einsatz von TUBA® kann als praxisreif aber noch nicht in allen Anwendungsfällen als Stand der Technik angesehen werden. Ein Leitfaden zu den thermischen in situ-Sanierungsverfahren wurde für das Terra-, Aqua- und Sanierungskompetenzzentrum - TASK erstellt. Anbieter sind in einigen europäischen Ländern vorhanden. Teilweise greifen diese auch auf amerikanische Experten zurück.

3.1.2 Feste Wärmequellen

Andere Bezeichnungen
<p>THERIS (Thermische In-situ-Sanierung mit Festen Wärmequellen);</p> <p>Engl. Bezeichnungen: Thermal Conducting Heating (TCH)), In-situ Thermal Treatment (ISTT), In-situ Thermal Remediation (ISTR).</p>
Prinzip
<p>Mobilisierung der leichtflüchtigen Schadstoffe durch Wärmeeintrag. Die verdampften gasförmigen Schadstoffe werden über eine Bodenluftabsaugung abgesaugt. Der Wärmeeintrag erfolgt über feste Wärmequellen, meist vertikale Stahlrohre, die von Innen beheizt sind. Sie werden meist in der ungesättigten Zone eingesetzt, können aber auch in der gesättigten Zone eingesetzt werden.</p>
Wirkungsweise
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Feste Heizelemente in Form von elektrisch oder mit Gas betriebenen Heizlanzen werden vertikal in den Untergrund eingebracht, um diesen über Wärmeleitung und wärmeinduzierte Zirkulationsströmungen zu erwärmen (konduktiver Wärmeeintrag). ▪ Erwärmung des Untergrundes auf den erforderlichen Gemischsiedepunkt, um leicht- und mittelflüchtige Schadstoffe zu verdampfen. ▪ Porenwasser und Schadstoffe in Umgebung der Heizelemente werden verdampft und breiten sich mit der Porenluft entlang des sich ausbildenden Temperaturgradienten von der Wärmequelle zur kälteren Umgebung aus. Die verdampften Schadstoffe werden zu den Extraktionsbrunnen transportiert. Bei hohen Temperaturen der festen Wärmequellen können Schadstoffe auch thermisch zerstört werden. ▪ Absaugung der gasförmigen Schadstoffe mit der Porenluft und Reinigung der Porenluft über konventionelle Anlagen (s. Bodenluftabsaugung). ▪ Das Verfahren beschleunigt die Mobilisierung der Schadstoffe und das Verfahren der Bodenluftabsaugung.
Technische Beschreibung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zur Erwärmung des Untergrundes sind elektrische Heizelemente erforderlich. Die Heizelemente bestehen aus Stahlrohren, die von innen elektrisch oder mit einer Gasflamme erhitzt werden – dabei können Wandtemperaturen bis über 400 °C erreicht werden. ▪ Die Anlage zur Bodenluftabsaugung (s. Bodenluftabsaugung) kann einen Wärmetauscher mit Kondensatabscheider, einen Verdichter sowie eine Abluftbehandlung über Aktivkohle, TNV oder KatOx enthalten.

Einsatzmöglichkeiten	
Medium	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ungesättigte Zone; ▪ Gesättigte Zone (bei geringer Durchlässigkeit und deshalb geringem Wasseraustausch).
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Organische leicht- bis mittelflüchtige Schadstoffe; ▪ Auch für freie aufschwimmende Phase geeignet (LNAPL).
Geologie/Hydrogeologie	Feinsand, Silt, Lehm, Ton, Porenluftabsaugung muss möglich sein.
Einsatzgrenzen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Im Grundwasser wird bei zu hohen Durchflussraten zu viel Wärme aus dem eigentlichen Sanierungsgebiet ausgetragen; ▪ Bei Böden in der ungesättigten Zone kann es im Bereich der Heizelemente zu Schrumpfungen infolge der Austrocknung kommen (Ton und Silt), die zu Kurzschlüssen in der Luftabsaugung führen können; ▪ Durchlässigkeit in der ungesättigten Zone $>10^{-9}$ m/s; ▪ Abstand der Heizelemente ist abhängig von (Hydro-)Geologie, Schadstoffart, Energieverlusten, Sanierungsziel und –zeit. 	
Erforderliche Infrastruktur	
<p>Der gesamte Sanierungsbereich wird oberirdisch mit Leitungen, Heizelementen und Absaugvorrichtungen belegt – deshalb sollte er frei zugänglich sein und bleiben. Im Einzelfall ist auch die kostspieligere Unterflurinstallation nötig.</p> <p>Strom, eventuell Telefonanschluss, Steuerung, Heizelemente, eventuell Gasversorgung, Absaugaggregat, Absaugbrunnen, Verbindungsleitungen, Abluftaufbereitung, gegebenenfalls Kontrollbrunnen in der ungesättigten Zone und ggf. Oberflächenabdichtung mittels Kunststoffdichtungsbahn.</p>	
Überwachung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schadstoffkonzentrationen/-reduzierung werden mit Pegeln überwacht; ▪ Einflussbereich (radius of influence = ROI); ▪ Porenluftmonitoring; ▪ Absaugmenge; ▪ Unterdruck; ▪ Emissionen; ▪ Prüfung des Abstands zu erdverlegten Leitungen; ▪ Temperaturmessungen. 	
Verfahrensvarianten	
<p>Die Varianten bestehen hauptsächlich in technischen Detailausführungen der Anbieter. Der Wärmeeintrag kann allerdings auch mit Dampf (TUBA, siehe auch Kap. 3.1.1) oder mit einer elektrischen Widerstandsheizung (Electrical Resistance Heating [ERH]) erfolgen.</p>	

Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen

- Das Verfahren sollte nur in Kombination mit einer Bodenluftabsaugung durchgeführt werden;
- für die Bodenluftabsaugung ist eine Abluftaufbereitung erforderlich;
- Kombination mit TUBA-Verfahren;
- Kombination mit hydraulischen Verfahren (bei Einsatz im Grundwasser).

Anwendungserfahrung

Feste Wärmequellen sind schnelle und gut kontrollierbare Verfahren. Es gibt einige Anwendungsbeispiele u. a. in Deutschland und auch in der Schweiz, in welchen das Verfahren zur Sanierung eingesetzt wurde. Großer Vorteil ist der mögliche Einsatz des Verfahrens in direkter Umgebung oder unter Gebäuden bei gleichzeitigem Erhalt der Nutzung. Eine erfolgreiche Anwendung in Kombination mit einer Heissluft-/Dampfinjektion ist in der Schweiz im Kanton Wallis erfolgt. Dabei wurde der ungesättigte Bereich mit festen Heizkörpern und der Grundwasserbereich mit Dampfinjektion aufgeheizt.

Entwicklungsstand und Marktsituation

Der Einsatz von THERIS® kann als praxisreif, aber noch nicht als Stand der Technik, angesehen werden. Ein Leitfaden zu den thermischen in situ-Sanierungsverfahren wurde für das Terra-, Aqua- und Sanierungskompetenzzentrum – TASK erstellt. Anbieter gibt es in einigen europäischen Ländern, teilweise greifen diese auch auf amerikanische Experten zurück.

3.1.3 Sonstige physikalische Mobilisierung

Andere Bezeichnungen
<p>Elektrowiderstandsheizung, Radiofrequenzenergie (RF)-Verfahren, Geoschock und Hydroschockverfahren.</p> <p>Engl. Bezeichnungen: Electrical Resistance Heating (ERH), Radio Frequency/Electromagnetic Heating (RFH).</p>
Prinzip
<p>Die sonstigen physikalischen Verfahren setzen auf unterschiedliche Wirkungsweisen – entweder wird der Untergrund oder das Grundwasser elektrisch erhitzt oder die Durchlässigkeit von ungesättigter bzw. gesättigter Zone wird mechanisch, hydraulisch oder pneumatisch erhöht.</p> <p>Widerstandsheizung: Zwischen zwei Elektroden wird ein Stromfluss erzeugt, der den Untergrund erhitzt und die Schadstoffe austreibt.</p> <p>RF-Verfahren: Mobilisierung der Schadstoffe durch Wärmeeintrag. Der Untergrund wird durch elektromagnetische Wellen, ähnlich dem Prinzip eines Mikrowellengerätes, erwärmt.</p> <p>Geo-/ Hydroschock-Verfahren: Mobilisierung der Schadstoffe durch das Einbringen von mechanischer Energie. Mittels Schwingkörper wird der Untergrund bzw. das Grundwasser in Schwingung versetzt, um die Durchlüftung bzw. den Stofftransport zu verbessern.</p>
Wirkungsweise
<p>Untergrund kann durch seinen elektrischen Widerstand aufgeheizt werden, wenn eine Spannung zwischen zwei Elektroden angelegt wird und ein ausreichend hoher Strom fließt.</p> <p>Ein weiteres wärmetechnisches Verfahren zur Mobilisierung von Schadstoffen ist die Mobilisierung durch Radiofrequenzenergie. Das Verfahren gleicht der Heissluft-/Dampfinjektion (TUBA) und den Festen Wärmequellen (THERIS) mit dem Unterschied, dass die Erwärmung auf einem dielektrischen Wärmeeintrag beruht.</p> <p>Die Einbringung von mechanischer Energie wird beim Geo- und Hydroschock-Verfahren zur Mobilisierung von Schadstoffen genutzt. Beim Geoschock-Verfahren werden dazu im Untergrund elastische Wellen induziert. Dies soll zur besseren Durchlüftung des Untergrunds führen. Beim Hydroschockverfahren wird das Grundwasser in Schwingung versetzt, um so den Stofftransport zu erhöhen. Nebenwirkungen der Verfahren, bei denen Energie in den Untergrund eingebracht wird, sind Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Untergrunds wie Setzungen. Diese können zu Schäden an umliegender Bebauung oder zur Verdichtung des Untergrunds mit einer einhergehenden Verringerung der Porosität führen.</p>

Technische Beschreibung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bei ERH werden Elektroden in den Untergrundkörper eingebracht und mit einer Stromquelle versorgt. ▪ Bei der RF-Methode wird der Untergrund durch elektromagnetische Wellen, ähnlich dem Prinzip eines Mikrowellengerätes, erwärmt. Die Frequenzen liegen üblicherweise im Bereich von wenigen MHz (3 bis 50 MHz). ▪ Beim Geoschock-Verfahren werden mittels eines Schwingkörpers im Untergrund elastische Wellen induziert. ▪ Beim Hydroschockverfahren werden in einer Bohrung Wellen erzeugt, die entweder von einem Rüttler oder durch Druckluftimpulse ausgelöst werden. 	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ungesättigte Zone; ▪ Gesättigte Zone (Hydroschockverfahren).
Schadstoffe	Im Wasser lösliche, über die Porenluft austragbare oder gut flüchtige Schadstoffe, letztere bei der thermischen Unterstützung der Mobilität.
Geologie/Hydrogeologie	Gut durchlässige, aber auch schlecht durchlässige Böden, deren Durchlässigkeit mit den Schockverfahren verbessert werden kann.
Einsatzgrenzen	
<p>Je nach Art der Verfahren haben diese relativ enge Einsatzgrenzen, wie z. B.:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bei Setzungsgefahr nicht anwendbar; ▪ Zu hoher Energieverbrauch, insbesondere bei den elektrischen Verfahren; ▪ Das Sanierungsgebiet ist bebaut; ▪ Die Zugänglichkeit ist nicht gewährleistet; ▪ Die Verfahren sind im konkreten Anwendungsfall nicht wirtschaftlich. 	
Erforderliche Infrastruktur	
Die Verfahren benötigen entsprechende Aufstellungsflächen und eine gute Zugänglichkeit sowie über Stromanschlüsse bzw. Stromgeneratoren, Stromwandler, Wasseranschluss etc.	
Überwachung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beim Einbringen von mechanischer Energie sollte der Untergrund und umstehende Bebauung, falls vorhanden, auf schädliche Setzungen beobachtet werden, ▪ Die Reinigungsleistung im Untergrund muss überwacht werden. ▪ Die Steuerungsparameter für die Verfahrensvarianten müssen sorgfältig überwacht werden. 	
Verfahrensvarianten	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Es gibt eine Vielzahl herstellenspezifischer Varianten. 	

Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen
<ul style="list-style-type: none">▪ Kombination von RF oder ERA mit TUBA oder THERIS;▪ Kombination mit Pump-and-Treat- Verfahren oder mit einer Bodenluftabsaugung.
Anwendungserfahrung
Die Verfahren befinden sich noch in der Erprobung. Besonders Verfahren mit mechanischer Energie können zu Schäden führen und sind noch sehr wenig erprobt. Eine Anwendung in der Schweiz ist nicht bekannt.
Entwicklungsstand und Marktsituation
Die erwähnten Verfahren sind alle nicht dem Stand der Technik zuzuordnen. Eine Anwendung ist im Einzelfall sehr kritisch zu prüfen und nur durch einschlägig erfahrene Sanierungsunternehmen zu planen bzw. zu installieren und zu betreiben.

3.1.4 Fracturing

Andere Bezeichnungen	
Frac-Technik. Engl. Bezeichnungen: Fracking, Pneumatic-Fracturing, Hydrofracturing.	
Prinzip	
Mit Hilfe von Luft oder von Wasser, welche mit grossem Druck in den Untergrund eingepresst werden, wird eine Vergrösserung des Porenraums zur Verbesserung der Durchlässigkeit für Wasser und Luft erzeugt. Dadurch wird die Mobilität der im Grundwasser gelösten oder am Korngerüst adsorbierten Schadstoffe erhöht.	
Wirkungsweise	
Fracturing hat die Vergrösserung des Porenraumes in gering durchlässigen Böden oder der Klüfte bei Festgestein zum Ziel. Kohäsive Bindungen in der geologischen Matrix sollen gebrochen und eine Rissbildung erzeugt werden. Dadurch wird die Wegsamkeit des wenig durchlässigen Untergrundes für Luft oder Wasser, gegebenenfalls auch die Mobilität mobiler Phasen verbessert, um damit die geringdurchlässigen Bereiche des Untergrundes für In-situ-Sanierungen verfügbar machen zu können.	
Technische Beschreibung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Vergrösserung der Poren oder Klüfte erfolgt in der Regel durch kurzzeitiges Einbringen von Luft mit hohem Druck (Pneumatic Fracturing) oder Wasser (Hydrofracturing) in den Untergrund oder den Aquifer (Hydraulisches Fracturing). Bei Festgesteinen wird teilweise Sand mit eingebracht, der die Klüfte nach dem Druckstoss offen halten soll. Dazu ist lediglich ein Bohrloch erforderlich, in welches ein PVC-Rohr zur Injektion eingeführt wird. ▪ In der Regel werden beim Hydraulischen Fracturing Flüssigkeiten verwendet, die zu 95 % aus Wasser, aus Stützkörnern (Sand) und aus Chemikalien bestehen, die dazu beitragen, die geöffneten Wege freizuhalten und zu stabilisieren. ▪ Schliesslich können auch Sprengungen zur Vergrösserung der Klüfte verwendet werden. 	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Gesättigte und ungesättigte Zone.
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alle Arten von Schadstoffen, die im Wasser gelöst oder ausgegast werden können, auch freie schadstoffphase kann mobilisiert werden.
Geologie/Hydrogeologie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ bindige Böden, Festgestein; <p>In Böden mit kf-Werten zwischen 10^{-6} und 10^{-4} m/s soll im Umkreis von 6 - 12 m um den Injektionspunkt eine gute Durchlässigkeit erreicht werden.</p>

Einsatzgrenzen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beim Fracking können Hebungen des Untergrundes zu Bauschäden führen – deshalb nicht in bebauten Gebieten anwendbar; ▪ Die in den eingedrückten Flüssigkeiten enthaltenen Chemikalien dürfen nicht toxisch und sollen biologisch abbaubar sein.
Erforderliche Infrastruktur
Die üblichen Medienanschlüsse (Strom, Wasser, ggf. Anschluss an Abwasserkanal) und die Aufstellungsflächen für die Druckapparate und die Injektionsmittelbevorratung. Überschüssige Druckmedien müssen fachgerecht entsorgt werden.
Überwachung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Überwachung des Sanierungserfolges; ▪ Setzungs- bzw. Hebungspegel; ▪ Erfassung der verfahrenstechnischen Parameter: Luftverbrauch, Drücke, Wasserverbrauch, Ausdehnung des Einwirkungsbereichs, etc.
Verfahrensvarianten
Die Varianten ergeben sich aus der Wahl der Druckmedien (Pneumatisch, hydraulisch oder sprengtechnisch (Gasdruck)).
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eine Kombination mit einem oder mehreren anderen In-situ-Verfahren ist sinnvoll und wird angestrebt.
Anwendungserfahrung
Bei großen Schadensfällen wird eine hohe Anzahl an Injektionspunkten benötigt. Dies ist mit hohen Kosten verbunden. Zudem kann Fracturing nicht nur zu gleichförmig Rissen, sondern zur Ausbildung von bevorzugten Fließrichtungen führen. Die Auswirkungen sind teilweise nicht vorhersehbar, insbesondere wenn die Gesteinsart oder der feinkörnige Untergrund nicht für Fracking geeignet sind. Es gibt nicht sehr viele Projekte im Bereich der Altlastensanierung, bei den Fracking angewendet wurde oder wird.
Entwicklungsstand und Marktsituation
Fracking zur Verbesserung der Anwendbarkeit von In-situ-Sanierungsverfahren ist nicht weit verbreitet. Der Entwicklungsstand ist noch nicht so weit fortgeschritten, dass Fracking im Altlastenbereich zum Stand der Technik gezählt werden kann.

3.1.5 Elektrokinese

Andere Bezeichnungen	
Elektrokinetik. Engl. Bezeichnungen: Electrokinetic Remediation.	
Prinzip	
Bei der Elektrokinese werden elektrische Potentiale über Elektroden in den kontaminierten Böden angelegt. Wasser und gelöste Ionen wandern unter dem Einfluss der Gleichspannung entsprechend ihrer Ladung zu den Elektroden.	
Wirkungsweise	
Dieses Verfahren wurde lange zur Entwässerung feinkörniger Böden verwendet. Die Schadstoffe werden dabei nicht zerstört, sondern nur mobilisiert. Im Untergrund wird ein elektrisches Feld erzeugt. Mittels Elektroosmose wird das Porenwasser und damit die im Porenwasser gelösten Schadstoffe transportiert. Bei der Elektrophorese wandern elektrisch geladene kolloidale Teilchen wie Tonpartikel im elektrischen Feld. Die Schadstoffe werden an den Elektroden aus dem Untergrund entfernt oder dort in situ behandelt. Dafür stehen im Prinzip die üblichen Verfahren der In-situ-Dekontamination zur Verfügung.	
Technische Beschreibung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Sanierungsanlage besteht im Wesentlichen aus einem oder mehreren Elektrodenpaaren, einer Anode und einer Kathode, zwischen denen eine Gleichstromquelle angeschlossen wird; ▪ die Elektroden erzeugen ein System im Schadensbereich, in welchem Wasser und gelöste Schadstoffe zirkulieren; ▪ die Schadstoffe werden im Bereich der Elektroden in Reservoirs angereichert, dort entnommen und einer Abwasserreinigungsanlage oder der Entsorgung zugeführt. 	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Grundwasser, gesättigte Zone, teils auch in der ungesättigten Zone (Porenwasser).
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schwermetalle, ▪ polare Verbindungen.
Geologie/Hydrogeologie	Erkundung des Schadensherds mit einem Raster im Meterbereich; Feinsand, siltiger Sand, Ton.
Einsatzgrenzen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Der maximale Elektrodenabstand darf 10 m betragen; ▪ die maximale Spannung sollte aus Sicherheitsgründen 500 V nicht überschreiten; ▪ ein erfolgreicher Einsatz in der ungesättigten Zone ist nur in tonigem und siltigem Untergrund mit einer Wassersättigung von mind. 80 % möglich. 	

Erforderliche Infrastruktur
Die üblichen Medienanschlüsse (Strom, Wasser, ggf. Anschluss an Abwasserkanal), Aufstellungsflächen für die Stromaggregate, Sicherheitsvorkehrungen, gute Zugänglichkeit.
Überwachung
<ul style="list-style-type: none">▪ Überwachung der Grundwasserqualität und damit des Sanierungserfolges;▪ Überwachung von Spannung und Stromstärke;▪ Ermittlung der ausgetragenen Schadstoffmengen.
Verfahrensvarianten
Varianten ergeben sich durch die Wahl der Anzahl von Elektrodenpaaren, deren Abstand untereinander und durch die Wahl von Spannung und Stromstärke.
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen
Das Verfahren lässt sich mit anderen In-situ-Technologien kombinieren, insbesondere mit solchen, die parallel die ungesättigte Zone sanieren.
Anwendungserfahrung
Für das Verfahren ist ein hoher Energieeinsatz erforderlich. Es gibt Anwendungserfahrungen, allerdings nur in begrenztem Rahmen.
Entwicklungsstand und Marktsituation
Das Verfahren kann noch nicht dem Stand der Technik zugeordnet werden. Es gibt reaktiv wenige Sanierungsunternehmen in Europa, die das Know-How und die erforderlichen Erfahrungen haben.

3.2 Chemische Mobilisierung

3.2.1 Alkoholspülung

Andere Bezeichnungen	
In-situ-Bodenspülung. Engl. Bezeichnung: Cosolvent Flushing, In situ Soil Flushing.	
Prinzip	
Mobilisierung der Schadstoffe durch Erhöhung der Wasserlöslichkeit.	
Wirkungsweise	
Die Grenzflächenspannung zwischen Wasser und dem ungelösten Schadstoff wird durch den Alkohol herabgesetzt. Erforderlich sind für die Alkoholmischung je ein hydrophiler und ein lipophiler Alkohol. Der lipophile Alkohol (schwellender Alkohol) dringt in den Schadstoff ein und verringert seine Dichte durch Erhöhung seines Volumens. Der hydrophile Alkohol ist für die Wasserlöslichkeit des lipophilen Alkohols erforderlich und um den Alkoholcocktail hydraulisch kontrollierbar zu machen. Durch die Erhöhung der Wasserlöslichkeit entsteht ein Gemisch aus Alkohol, Schadstoff und Wasser. Dieses kann kontrolliert abgepumpt werden.	
Technische Beschreibung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Alkohole werden in Abhängigkeit von den spezifischen Schadstoffeigenschaften ausgewählt. ▪ Das Einbringen der Alkoholmischung in die kontaminierte Zone erfolgt durch Brunnen oder Lanzen. ▪ Kontaminierter Bereich wird durchspült und das Alkohol-Schadstoff-Wasser-Gemisch abgepumpt. Das Abwasser wird aufbereitet und der Alkohol zu grossen Teilen wiedergewonnen und für weitere Spülvorgänge eingesetzt. 	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Gesättigte und ungesättigte Zone.
Schadstoffe	Organische ungelöste Schadstoffe im Porenraum und im Grundwasser.
Geologie/Hydrogeologie	Lockergesteine, mittlere bis gute Durchlässigkeit.
Sonstige Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kenntnis über die Lage des Schadensherd; ▪ Kenntnis über die Zusammensetzung der Schadstoffe zur Auswahl der Alkohole; ▪ Hydraulische Sicherung des Sanierungsbereiches.

Einsatzgrenzen
<ul style="list-style-type: none">▪ Bindige Böden können nicht gereinigt werden;▪ die Rückgewinnung des Alkohols ist aus wirtschaftlichen Gründen erforderlich;▪ es besteht die Gefahr der unkontrollierten Schadstoffverlagerung in tiefere Bereiche im Aquifer.
Überwachung
<ul style="list-style-type: none">▪ Die Reinigungsleistung sollte durch entsprechende Überwachungspegel kontrolliert werden;▪ Die Ausbreitung des Alkohols (Cosolvent) im Untergrund sollte überwacht werden;▪ Für die verwendeten Cosolvents sollte eine Massenbilanz erstellt werden, um die Rückgewinnung nachzuweisen.
Verfahrensvarianten
<ul style="list-style-type: none">▪ Vertikale Versickerung des Alkoholes in die ungesättigte Zone (vgl. «Vertikale Infiltration»)▪ Versickerung des Alkoholes in die gesättigte Zone (vgl. «Grundwasserinfiltration»)
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen
Eine Kombination mit hydraulischen Verfahren ist üblich. Das Verfahren kann aber auch mit einer Bodenluftabsaugung oder biologischen Massnahmen kombiniert werden.
Anwendungserfahrung
Das Verfahren ist praxiserprobt und -tauglich. Anwendungen in der Schweiz sind nicht bekannt.
Entwicklungsstand und Marktsituation
In den USA ist die Alkoholspülung ein weit entwickeltes Verfahren. Auch in Deutschland gibt es umfangreiche Untersuchungen dazu. Die Alkoholspülung ist in Europa noch nicht dem Stand der Technik zuzuordnen.

3.2.2 Tensidspülung

Andere Bezeichnungen	
In-situ-Bodenspülung; Engl. Bezeichnungen: In situ Soil Flushing with surfactants.	
Prinzip	
Die Mobilisierung der Schadstoffe erfolgt durch eine Erhöhung der Wasserlöslichkeit mittels oberflächenaktiver Stoffe (Surfactants, Tenside).	
Wirkungsweise	
Die Grenzflächenspannung zwischen Untergrundmatrix und dem ungelösten Schadstoff (NAPL) wird durch die Tenside herabgesetzt. Damit einhergehend verringert sich die kapillare Adhäsion. Es gibt zwei Wirkungsweisen des Tensids. Bei einer Tensidkonzentration unterhalb der kritischen Mizellenkonzentration (CMC) setzen der hydrophile Kopf und der hydrophobe Rest der Tensidteilchen die Grenzflächenspannung zwischen NAPL und wässriger Phase herab. Dadurch werden die Schadstoffe fließfähig und können hydraulisch gefördert werden. Wird die kritische Mizellenkonzentration überschritten, lagern sich die Tensidmoleküle zu Mizellen zusammen und schließen im Inneren hydrophobe Schadstoffe ein und werden so in Lösung gebracht. Üblich sind Tensidkonzentrationen kleiner der kritischen Mizellenkonzentration.	
Technische Beschreibung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tenside in Abhängigkeit von Schadstoffeigenschaften wählen; ▪ Einbringen der Tenside in die kontaminierte Zone durch Injektionsbrunnen; ▪ Kontaminierter Bereich wird durchspült und das Tensid-Schadstoff-Wasser-Gemisch abgepumpt. Aufbereitung und Trennung der Phasen on-site. 	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Gesättigte Zone, aber auch ungesättigte Zone.
Schadstoffe	Organische, ungelöste Schadstoffe, die sich fein verteilt im Grundwasser oder im Porenraum befinden (NAPL)
Geologie/Hydrogeologie	Lockergestein, gute bis mittlere Durchlässigkeit des Aquifers
Sonstige Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hydraulische Sicherung des Sanierungsgebietes; ▪ Gefahr der Schadstoffverlagerung in tiefere Bereiche verhindern; ▪ Verblockung des Aquifers möglich; ▪ Tenside sind aggressiv und können in der Anlagentechnik Dichtigkeitsprobleme bewirken.

Einsatzgrenzen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grundwassergering-/nichtleiter, Kluftgrundwasserleiter; ▪ Wenn keine hydraulische Sicherung durchgeführt werden kann, so dass Tenside mit dem Grundwasserabstrom ausgetragen werden; ▪ In wasserwirtschaftlich sensiblen Grundwasserleitern nicht bewilligungsfähig.
Überwachung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Reinigungsleistung sollte durch entsprechende Überwachungspegel kontrolliert werden; ▪ Die Ausbreitung der Tenside im Untergrund sollte überwacht werden; ▪ Für die verwendeten Tenside sollte eine Massenbilanz erstellt werden, um die Rückgewinnung nachzuweisen.
Verfahrensvarianten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vertikale Versickerung der Tenside in die ungesättigte Zone (vgl. «Vertikale Infiltration») ▪ Versickerung der Tenside in die gesättigte Zone (vgl. «Grundwasserinfiltration»)
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen
<p>Eine Kombination mit hydraulischen Verfahren ist üblich. Das Verfahren kann aber auch mit einer Bodenluftabsaugung oder biologischen Massnahmen kombiniert werden.</p>
Anwendungserfahrung
<p>Das Verfahren ist praxiserprobt und -tauglich, wird aber bisher in Europa nur wenig eingesetzt. Anwendungen in der Schweiz sind nicht bekannt.</p>
Entwicklungsstand und Marktsituation
<p>In den USA ist die Tensidspülung ein weit entwickeltes Verfahren. Auch in Deutschland gibt es umfangreiche Untersuchungen dazu. Die Tensidspülung ist dennoch in Europa noch nicht dem Stand der Technik zuzuordnen.</p>

4. Biologische Verfahren

4.1 Vertikale Infiltration von Nährstoffen

Andere Bezeichnungen	
In-situ biologische Spülung, Bodenspülung, Infiltrationsbrunnen, Infiltrationsgraben, Horizontalbrunnen, Infiltrationsanlage, Sickergraben Engl. Bezeichnung: In situ Biological Treatment.	
Prinzip	
<p>Mikrobiologische In-situ-Verfahren zur Reinigung von kontaminierten Bereichen in der ungesättigten Zone können durch die Infiltration von Mikroorganismen und Nährstoffen in einem Spülkreislauf in Kombination mit einer Pump-and-Treat Massnahme erfolgen. Sie dienen der:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nährstoffversorgung und Milieuregulierung der ungesättigten Zone; ▪ und der Rückführung des gepumpten und gereinigten Grundwassers. 	
Wirkungsweise	
<p>Die Förderung der biologischen Prozesse in der ungesättigten Zone erfolgt durch die Zugabe von Nährstoffen (z. B. Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphate) oder durch eine optimierende Milieuregulierung (z. B. Temperatur, Sauerstoffanreicherung, Reduktion), die je nach gewünschter Abbauart (aerob oder anaerob) eingestellt werden kann.</p> <p>Die Zugabe der Additive erfolgt über eine oberflächliche Verrieselung, oder Lanzen, Pegel und Brunnen. Es ist darauf zu achten, dass ein vertikaler Schadstoffaustrag in die gesättigte Zone vermieden oder mit einer Grundwassersanierungsmassnahme kombiniert wird. Ausgespülte Schadstoffe können durch horizontal verlegte Drainagerohre gefasst abgepumpt und anschließend gereinigt werden.</p>	
Technische Beschreibung	
<p>In der Regel kann abgepumptes und gereinigtes Wasser zur Einleitung der Nährstoffe und der milieuregulierenden Stoffe über einen Infiltrationsbrunnen genutzt werden.</p> <p>Statt eines Infiltrationsbrunnens können die Nährstoffe bei gut durchlässigem Untergrund direkt von der Geländeoberfläche aus durch einen Infiltrationsgraben oder flächig durch ein Becken eingebracht und verteilt werden. Die Gräben werden mit gut durchlässigem Material (kf-Wert $>10^{-3}\text{m/s}$) und Sickerleitungen versehen und bei Bedarf wieder abgedeckt. Innerhalb der ungesättigten Zone kann alternativ eine Infiltrationsanlage für die Zugabe und die horizontale Verteilung der Nährstoffe installiert werden. In den unterhalb des Kontaminationsbereichs horizontal verlegten Drainagerohren (Horizontalbrunnen) wird das belastete Wasser in einen Sammelschacht geleitet, gefasst, und zur weiteren Behandlung abgepumpt.</p>	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Ungesättigte Zone.
Schadstoffe	Aerob bzw. anaerob biologisch abbaubare Schadstoffe, wie z. B. Mineralölkohlenwasserstoffe und VC (aerob) und chlorierte Lösungsmittel (vorwiegend anaerob).

Geologie/Hydrogeologie	Gute Durchlässigkeit der ungesättigten Zone, sandig-kiesige Böden.
Sonstige Bedingungen	Beim «Infiltrationsgraben» ist ein freier Zugang zur Sickerfläche (keine Bodenplatten oder Verkehrswege) erforderlich.
Einsatzgrenzen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mikrobiologische in situ-Verfahren sind zur Sanierung von kleinräumigen Verunreinigungen geeignet. Der Untergrund sollte mittel- bis gutdurchlässig sein ($k > 10^{-4}$ m/s). Bei stark inhomogenem oder anisotropem Aufbau des Untergrunds mit grossen Durchlässigkeitsunterschieden in beziehungsweise zwischen den einzelnen Schichten oder Bereichen können die Verfahren in der Regel nicht angewendet werden, da sonst mit unklaren Strömungsverhältnissen zu rechnen ist. ▪ Die Wirkung des Verfahrens ist stark abhängig von der Abbaubarkeit der Schadstoffe. Sehr gute Kenntnisse über die mikrobiologischen Milieuverhältnisse sind erforderlich zur Optimierung der Nährstoffzugaben. ▪ Eine genaue Kenntnis der Untergrundverhältnisse ist erforderlich, um die gewünschten Sanierungsziele mit wirtschaftlich und zeitlich vertretbarem Aufwand zu realisieren. ▪ Im Einzugsbereich von Trinkwasserfassungen werden solche Massnahmen meistens nicht zugelassen. 	
Überwachung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nährstoffzufuhr in die ungesättigte Zone; ▪ Qualität und Quantität bei Zugabe und Entnahme; ▪ Grundwasserspiegel; ▪ Setzungsmessungen in überbauten Gebieten; ▪ Schluckleistung der Infiltrations-Anlage, um Kolmatierungen frühzeitig zu erkennen. 	
Verfahrensvarianten	
Ableitung des behandelten Wassers und Reinfiltration von Frischwasser.	
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen	
Die Anwendung erfolgt üblicherweise in Kombination mit dem Pump-and-Treat-Verfahren.	
Bewertung und Anwendungserfahrung	
Die vertikale Infiltration von Nährstoffen ist vielfach angewendet und hat sich bewährt. Dem entsprechend sind Planungsbüros und erfahrene Sanierungsunternehmen in der Schweiz tätig.	
Entwicklungsstand und Marktsituation	
Die vertikale Infiltration von Nährstoffen ist Stand der Technik und wird in der Schweiz in vielen Projekten durchgeführt.	

4.2 Aerobisierung von Deponiealtlasten

Andere Bezeichnungen
<p>Saug- oder Druckbelüftung.</p> <p>Engl. Bezeichnungen: Landfill Aeration</p>
Prinzip
<p>Abbauvorgänge in organischen Ablagerungen sind meist anaerob. Durch die Aerobisierung können Schadstoffemissionen aus Deponien und Altablagerungen verringert oder unterbunden werden. Das biologisch abbaubare Schadstoffpotential wird aerob schneller verringert und die Bildung von geruchsintensiven Gasen (wie H₂S und Mercaptane) verhindert. Mehrheitlich kommt das Verfahren bei Deponiealtlasten zum Einsatz – in der ungesättigten Zone wird es als Bioventing (siehe Kap. 4.3) bezeichnet.</p>
Wirkungsweise
<p>Mit Aerobisierung wird das definierte Einleiten von Luft in den Deponiekörper und die gezielte Umsetzung biogener Organik mit dem dadurch eingetragenen Luftsauerstoff beschrieben. Der Lufteintrag erfolgt durch eine Saugbelüftung mittels spezieller, in Basisnähe verfilterter Brunnen oder durch das Eindrücken von Luft. Durch das Anlegen eines gleichmässigen Unterdruckes wird die eingetragene Luft «gezwungen», das gesamte Deponat zu durchströmen. Im Deponiekörper wird die biogene Organik von aussen nach innen fortschreitend und weitestgehend abgebaut. Die Aerobisierung erreicht die folgenden Effekte:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorbereitung von Rückbaubereichen, um Geruchsbelastungen beim Aushub zu vermeiden; ▪ Beschleunigter In-situ-Abbau des Schadstoffpotentials innerhalb der Deponien; ▪ Verkürzen der Nachsorgedauer für stillgelegte Deponien und Altablagerungen; ▪ Verminderung des Schadstoffpotentials innerhalb der Deponien; ▪ Beseitigung von Methanemissionen und geruchsintensiven Gasen; ▪ Verminderung der Sickerwasserverunreinigung.
Technische Beschreibung
<p>Durch speziell ausgebaute Saugbrunnen wird auf den Deponiekörper ein Unterdruck angesetzt. Die Brunnen sind zumindest im unteren Drittel des Deponiekörpers für eine basisnahe Absaugung verfiltert. Die Saugtiefe kann verschoben werden, um verschiedene Horizonte zu erfassen. Über Multilevelbrunnen kann die Gaszusammensetzung in verschiedenen Tiefenstufen (Aufteilung in 2 m Stufen) ermittelt werden. Eine Vermischung der Gaskonzentrationen in den verschiedenen Horizonten ist ausgeschlossen.</p> <p>Alternativ wird Druckluft über Lanzen in den Deponiekörper injiziert. Die Druckluft kann kontinuierlich oder diskontinuierlich als Impuls eingetragen werden.</p>

Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Porenluft.
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Organische Müllanteile (Hausmüll, Gewerbemüll, Sonderabfälle); ▪ Methan; ▪ Ammonium; ▪ CSB; ▪ BTEX; ▪ CKW.
Einsatzgrenzen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Luftbahnen bzw. Zonen von hoher Durchlässigkeit im Deponiekörper (Kurzschlussituation); ▪ Zu viel Wasser, eingestaute Deponie; ▪ Persistente Schadstoffe. 	
Erforderliche Infrastruktur	
<p>Übliche Anschlüsse wie Strom und Wasser sollten vorhanden sein. Die Saug- bzw. Druckpegel müssen zugänglich sein, Es werden Zu- und Ableitungen für die Luft benötigt.</p>	
Überwachung	
<p>Zur Bestimmung der Wirksamkeit der Aerobisierung wird an Messstellen die Methan-, die Kohlendioxid- und die Sauerstoffkonzentration bestimmt. Bei max. Saugleistung ist die Sauerstoffkonzentration möglichst gering zu halten (<3 Vol.-%), während eine max. Konzentration an Kohlendioxid (>20 %) zu erreichen ist. Anhand der gemessenen Gaskonzentrationen in den Einzelbrunnen oder im Abgas der Absauganlage kann bestimmt werden, zu welchem Zeitpunkt die Aerobisierung abgeschlossen ist (z. B. <1 Vol.-% CH₄, CO₂ <ca. 5 Vol.-%, hohe O₂-Konzentration ca. 10–15 Vol.-%, relative Feuchtigkeit >96 %).</p>	
Verfahrensvarianten	
<p>Je nach Problemstellung wird ein entsprechendes Netz an Saugbrunnen beziehungsweise Multilevelbrunnen und Monitoringmesspunkten miteinander verbunden. Zusätzliche Überwachungspegel können am äusseren Perimeter des Deponiekörpers installiert werden.</p> <p>Als Verfahrensvariante kann eine Druckbelüftung erfolgen.</p>	
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen	
<p>Allfällige Ex-Schutz-Massnahmen sind zu berücksichtigen.</p>	

Anwendungserfahrung

- Bewährte Sanierungsmassnahme zur Sicherung ehemaliger Kehrrechtdeponien bzw. zur Vorbereitung des Rückbaus derselben;
- Geringer Reparatur- und Unterhaltsaufwand;
- Energieaufwand entsprechend der Auslegung;
- Unter Umständen Behandlungsdauer von mehreren Jahren, je nach Ausdehnung des Müllkörpers.

Entwicklungsstand und Marktsituation

Ist Stand der Technik. Verfahren wurde in Österreich mehrfach aber auch in Deutschland durchgeführt. Verfahren wird in der Schweiz zu in situ-Sanierung einer Siedlungsabfalldeponie erstmals angewendet.

4.3 Bioventing

Andere Bezeichnungen	
<p>Porenluftkreislaufführung. Engl. Bezeichnung: Bioventing.</p>	
Prinzip	
<p>Bioventing-Verfahren sollen einen geringen Luftstrom im kontaminierten, ungesättigten Bereich erzeugen und dort durch eine verbesserte Sauerstoffversorgung den mikrobiellen Abbau von organischen Schadstoffen anregen.</p>	
Wirkungsweise	
<p>Die Bioventing-Verfahren sind eng mit den pneumatischen in situ-Behandlungsverfahren verwandt. Beim Bioventing-Verfahren wird Druckluft in den Untergrund injiziert, um die mikrobiellen Schadstoffumsetzungsprozesse in der ungesättigten Zone zu optimieren. Die eingedrückte Luft wird an anderer Stelle wieder abgesaugt, so dass eine Durchströmung des Schadensbereiches stattfinden kann.</p> <p>Die Verfahren werden angewandt, um Sanierungen zu beschleunigen und die Porenluftströmung gezielter zu beeinflussen, als es durch eine alleinige Bodenluftabsaugung möglich ist. Dabei erhöht sich der durchschnittliche Luftdruck im Sanierungsbereich, was zu einer Verringerung des Wassergehalts und zu einer erhöhten Luftdurchlässigkeit führt.</p>	
Technische Beschreibung	
<p>Man unterscheidet zwei unterschiedliche Bioventing-Verfahren. Zum einen das Bioventing-Extraktionsverfahren und zum anderen das verbesserte Bioventing-Injektionsverfahren. Beim Extraktionsverfahren wird im Kontaminationsherd ein Unterdruck erzeugt, um die eingedrückte Luft abzusaugen. Beim verbesserten Injektionsverfahren wird ausserhalb des Kontaminationsherdes ein Unterdruck zur Absaugung der eingedrückten Luft erzeugt. Obwohl hier auch flüchtige Schadstoffe gestrippt werden, wird der grössere Prozentsatz der organischen Inhaltsstoffe biologisch umgesetzt. Grundsätzlich ist bei diesem Verfahren eine Ablufffassung und -behandlung vorzusehen (siehe Anhang A2). Die Luftzufuhr kann kontinuierlich oder intermittierend betrieben werden. Neben der Sauerstoffversorgung können über Infiltrationslanzen Nährstoffe zur Versorgung der vorhandenen Mikroorganismen in den Untergrund gegeben werden.</p>	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Porenluft, Porenwasser und Schadstoffe, die am Korngerüst adsorbiert sind.
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Biologisch abbaubare Schadstoffe, ▪ Benzin, ▪ Kerosin, ▪ Phenole, ▪ Mineralölkohlenwasserstoffe, ▪ BTEX, ▪ LHKW.

Geologie/Hydrogeologie	Ungesättigte Zone, sandig-kiesige Böden; bei bindigen Böden oder unterschiedlich durchlässigen Böden nur bedingt geeignet.
Einsatzgrenzen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Es darf kein zu hoher Überdruck erzeugt werden damit die kontaminierte Luft gezielt und vollständig abgesaugt werden kann; ▪ Schlecht durchlässige Bereiche des Untergrunds; ▪ Nicht flüchtige bzw. nicht biologisch abbaubare Schadstoffe. 	
Erforderliche Infrastruktur	
Die übliche Anschlüsse wie Strom und Wasser sollten vorhanden sein. Es werden Aufstellungsflächen für die Be- und Entlüftungsapparate und für die Abluftreinigung benötigt sowie Zu- und Ableitungen für die Druckluft und die Porenluft.	
Überwachung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusätzlich zu Be- und Entlüftungsbrunnen werden Kontrollstellen installiert, mit denen die Sauerstoff- und CO₂-Gehalte der Porenluft überprüft werden. ▪ Der Sanierungsfortschritt wird einerseits über die Austragsraten in der Abluft, andererseits über die Bestimmung der Restbelastungen im ungesättigten Bereich mittels Abteufen von Kernbohrungen zur Gewinnung von repräsentativem Probenmaterial überprüft. 	
Verfahrensvarianten	
Je nach Problemstellung können Mehrbrunnenanlagen installiert werden, die günstige Anordnungen ermöglichen, so dass strömungsarme Zonen zwischen den einzelnen Absaugbrunnen vermieden werden können. Die Verfahren werden oft in Kombination mit hydraulischen Massnahmen angewendet.	
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen	
Beim verbesserten Bioventing-Injektionsverfahren ist grundsätzlich eine Abluffassung und -behandlung (siehe Anhang A2) vorzusehen. Allfällige Ex-Schutz-Massnahmen sind zu berücksichtigen.	
Anwendungserfahrung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewährte Sanierungsmassnahme zur Entfernung bzw. Reduktion biologisch abbaubarer Schadstoffe in der ungesättigten Zone; ▪ Mittlere Behandlungsdauer bei mittlerem technischen Aufwand; ▪ Geringer Reparatur- und Unterhaltsaufwand; ▪ Das Verfahren liefert einen Zeitgewinn, wenn rasch viel Energie eingebracht wird. 	
Entwicklungsstand und Marktsituation	
Das Verfahren ist Stand der Technik und wird weit verbreitet zur Verbesserung der Bodenluftabsaugung eingesetzt (Enhanced Soil Vapor Extraction). Das Verfahren wird in der Schweiz eher selten angewendet.	

4.4 Oxidative Verfahren im Grundwasser

Andere Bezeichnungen	
<p>Sauerstoffanreicherung im Grundwasser.</p> <p>Engl. Bezeichnungen: Enhanced Aerobic Biodegradation, Oxygen Releasing Compounds (ORC), Enhanced Natural Attenuation.</p>	
Prinzip	
<p>Durch eine Sauerstoffanreicherung im Grundwasser soll die Wirksamkeit der biologischen Abbauvorgänge in der gesättigten Zone erhöht werden. Es wird im Unterschied zur chemischen Oxidation (siehe Kap. 5.1 ISCO) nur so viel Sauerstoff zugegeben, wie die Bakterien für eine optimale aerobe Abbautätigkeit benötigen. Die Sauerstoffanreicherung des Grundwassers ist auch eine häufig angewendete Methode, den natürlichen Abbau zu verbessern (siehe auch Kap. 4.8 Enhanced Natural Attenuation)</p>	
Wirkungsweise	
<p>Die Sauerstoffanreicherung kann auf unterschiedlichen Wegen erreicht werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Eindüsen von Luft oder Sauerstoff in das Grundwasser (ähnlich Bio-Sparging), allerdings nicht mit dem Ziel Schadstoffe auszustrippen sondern den Sauerstoffgehalt zu erhöhen; ▪ Injektion von stark mit Sauerstoff angereicherten Flüssigkeiten; ▪ Einbringen von Stoffen in den Grundwasserbereich, die langsam aber stetig Sauerstoff an das Grundwasser abgeben (ORC). 	
Technische Beschreibung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zugabe des Oxidationsmittels zum Infiltrationswasser oder direkt in den Aquifer; ▪ Oxidationsmittel sind in der Regel Sauerstoff bzw. Wasserstoffperoxid (H₂O₂); ▪ Kombination mit Pump-and-Treat, um die Grundwasserhydraulik zu kontrollieren. 	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Grundwasser
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • BTEX • Benzin (C6-C10-12) • Diesel (C8-12-C24-26) • Mineralöl (C22-32) • Kreosote (Teeröl) • MTBE • cis-1,2 Dichloroethen (DCE) • Vinylchlorid (VC)
Geologie/Hydrogeologie	gut durchlässiger und homogener Porengrundwasserleiter

Einsatzgrenzen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nur für aerob abbaubare Schadstoffe geeignet; ▪ Hohe Eisengehalte im Grundwasser können zu Ausfällungen (Verstopfen der Poren) führen; ▪ Grundwasserleiter sollten gut durchlässig sein.
Erforderliche Infrastruktur
<p>Bis auf die üblichen Medienanschlüsse (Strom, Wasser, ggf. Anschluss an Abwasserkanal) gibt es keine speziellen Anforderungen an die Infrastruktur. Die Injektionsstellen (Brunnen) sollten gut zugänglich sein. Für die Injektionsherstellung werden Aufstellungsflächen für die Misch- und Dosieranlagen benötigt.</p>
Überwachung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Überwachung der Grundwasserqualität in Überwachungspegel, abstromig und zustromig; ▪ Messung des Sauerstoffgehaltes im Grundwasser; ▪ Erfassung der Bioaktivität (soweit erforderlich oder möglich);
Verfahrensvarianten
<p>Es sind nur herstellerbedingte Verfahrensvarianten bekannt. Eine starke Belüftung des Grundwassers mit Luft, um auch einen Strippeffekt zu erzielen ist als Biosparging (siehe Kap. 4.5) bekannt.</p>
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eine Kombination der Grundwasser-Sauerstoffanreicherung mit dem Pump-and-Treat-Verfahren ist sinnvoll; ▪ Weitere Kombinationen mit Sanierungsmassnahmen in der ungesättigten Zone oder für die Entfernung der aufschwimmenden freien Phase (LNAPL) sind machbar.
Anwendungserfahrung
<p>Das Verfahren ist praxiserprobt und wird international angewendet.</p>
Entwicklungsstand und Marktsituation
<p>Das Verfahren ist Stand der Technik. Planung und Ausführung sollten nur durch erfahrene Anbieter erfolgen.</p>

4.5 Biosparging

Andere Bezeichnungen
<p>Airsparging</p> <p>Engl. Bezeichnung: Air Sparging.</p>
Prinzip
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entfernung von biologisch abbaubaren Schadstoffen im Grundwasser und in der ungesättigten Zone; ▪ Sauerstoffversorgung der gesättigten und ungesättigten Zone zur Beschleunigung des aeroben biologischen Abbaus; ▪ Gleichzeitig findet eine In-situ-Strippung flüchtiger Schadstoffe in beiden Zonen statt.
Wirkungsweise
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beim Biosparging führt die kontrollierte Injektion von ölfreier Druckluft in den Grundwasserleiter zum mikrobiellen Schadstoffabbau und zur in situ-Strippung der im Grundwasser gelösten leichtflüchtigen Komponenten. ▪ Die nicht-strippbaren schwerflüchtigen Komponenten werden in der gesättigten Zone und im Kapillarsaum sowie im Porenwasser bzw. im Untergrund durch die Sauerstoffzugabe biologisch abgebaut. ▪ Die gestrippten leichtflüchtigen Komponenten können in der ungesättigten Zone biologisch abgebaut. ▪ Da der Sauerstoff aus der injizierten Luft im Grundwasser nicht vollständig in Lösung geht, kommt es ebenfalls in der ungesättigten Zone zu einer Sauerstoffanreicherung, was dort zur Förderung des mikrobiologischen Abbaus führt (siehe Bioventing; Kap. 4.3). ▪ Durch die empfehlenswerte Kombination mit einer Bodenluftabsauganlage kann die Sanierungsleistung in der Regel erhöht bzw. beschleunigt werden (bei leichtflüchtigen Schadstoffen) und ein unkontrolliertes Entweichen von gasförmigen Schadstoffen vermieden werden.
Technische Beschreibung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die ölfreie Druckluft wird über spezielle, der Geologie und der Schadstoffverteilung angepasste Injektionsbrunnen in das Grundwasser unterhalb der Kontamination eingeblasen. Die Luftverteilung (Menge und Druck) muss über eine steuerbare Anlagentechnik kontrolliert und geregelt werden. ▪ Die kontaminierte Strippluft sollte mit einer Bodenluftabsaugung gezielt erfasst und behandelt werden. ▪ Eine unregelmäßige, unkontrollierte Luftinjektion kann zu einer Verlagerung der Schadstoffe im Grundwasser und/oder zu einer Verlagerung der Schadstoffe in die Atmosphäre führen. Dabei können Emissions-, Richt- beziehungsweise Grenzwerte überschritten werden.

Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Grundwasser und ungesättigte Zone.
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Leicht- und schwerflüchtige biologisch abbaubare Schadstoffe (z. B. BTEX, Ammonium, Nitrit, Benzin, Diesel, z.T. niederringige PAK); ▪ Ausfällung von Eisen.
Geologie/Hydrogeologie	Gesättigte und ungesättigte Zone, sandig-kiesige Böden, siltige Böden, homogener Aquifer.
Einsatzgrenzen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bei stark inhomogenem oder anisotropem Aufbau des Untergrunds mit grossen Durchlässigkeitsunterschieden in beziehungsweise zwischen den einzelnen Schichten oder Bereichen setzt das Verfahren eine intensive Vorprüfung voraus. Der k_f-Wert sollte $>10^{-4}$ bis 10^{-6} [m/s] sein. Dies gilt ebenfalls bei unklaren Strömungsverhältnissen und teilweise bei gespannten Grundwasservorkommen. Diese Voraussetzungen können dazu führen, dass gewisse Zonen nicht erreicht werden. ▪ Bei Schadensfällen mit leichtflüchtigen brennbaren Schadstoffen in überbauten Bereichen besteht die Gefahr von Grenzwertüberschreitungen und Explosionen. Deshalb ist eine Technologie mit entsprechenden Sicherheitseinrichtungen unumgänglich. ▪ Der Lufteintrag (Spargingpunkt) muss unterhalb der kontaminierten Grundwasserzone liegen. ▪ Eine unregelmässige, unkontrollierte Luftinjektion kann zu einer Verlagerung der Schadstoffe in die Atmosphäre führen. Dabei können Emissions-, Richt- und Grenzwerte überschritten werden. ▪ Nicht für Schadstoffe geeignet, die entweder unlöslich und schwerflüchtig bzw. nicht biologisch abbaubar sind. 	
Erforderliche Infrastruktur	
Stromanschluss, Kompressor, Injektionsbrunnen, Verbindungsleitungen, Steuerung beziehungsweise Anlagentechnik, eventuell Telefonanschluss, Kontrollbrunnen in der gesättigten und ungesättigten Zone.	
Überwachung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Injektionsmenge (zugegebene Druckluftmenge, Überdruck); ▪ Porenluftmonitoring (Schadstoffkonzentrationen/-reduzierung leichtflüchtiger Schadstoffe in der Porenluft, Emissionen); ▪ Grundwassermonitoring (Grundwasserspiegel, Anstieg O_2-Konzentration im Grundwasser); ▪ Respirationstests zum Nachweis des biologischen Abbaus; ▪ Einflussbereich (Radius of Influence = ROI). 	

Verfahrensvarianten
<ul style="list-style-type: none">▪ Zugabe von mit Sauerstoff angereicherter Luft zur Aktivierung und Forcierung des mikrobiellen Abbaus;▪ Injektion von Nährstoffen und pH-Wert regulierenden Chemikalien in flüssiger Form;▪ In situ-Strippen als Variante mit erhöhtem Anteil von Schadstoffaustrag über die Desorption (vgl. Kap. 2.3);▪ Bioventing bei Schwerpunkt der Sanierung durch Mikrobiologie in der ungesättigten Zone (vgl. Kap. 4.3).
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen
<ul style="list-style-type: none">▪ Biosparging sollte mit einer Bodenluftabsaugung kombiniert werden;▪ Begleitendes Pump-and-Treat kann förderlich sein, ist aber nicht zwingend erforderlich.
Anwendungserfahrung
Die Sanierungsmethode hat sich im grosstechnischen Einsatz seit Jahren bestens bewährt und wird von allen Umwelt-Behörden als zielführende Sanierungsmassnahme anerkannt. Beispiel: Sanierung Tanklager Birsfelden.
Entwicklungsstand und Marktsituation
Seit einigen Jahren wird diese Methode erfolgreich in der Schweiz zur Sanierung eingesetzt. Es sollten nur erfahrene Planer und Sanierungsunternehmen beauftragt werden.

4.6 Methan-Biostimulation

Andere Bezeichnungen	
Methan- Biostimulationsverfahren (MBSV). Engl. Bezeichnung: Biostimulation.	
Prinzip	
Bei der Methan-Biostimulation werden methylorophe Mikroorganismen vermehrt, um den aeroben Abbau durch Oxidation von CKW zu fördern.	
Wirkungsweise	
Methylorophe Mikroorganismen werden durch die Zugabe eines methanhaltigen Luftgemisches mit Methan versorgt und vermehrt. Um Methan zu verwerten, wird das Enzym Methanmonoxygenase gebildet. Dieses Enzym katalysiert die Oxidation und damit den Abbau von z. B. LCKW.	
Technische Beschreibung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einblasung Methan-Luft-Gemisch in die gesättigte Zone unterhalb der Kontamination; ▪ Das Verhältnis Luft zu Methan sollte etwa 20 : 1 betragen, um die untere Explosionsgrenze von Methan zu unterschreiten; ▪ Hydraulische Sicherung des Abstroms, um das Risiko eines Schadstofftransportes nach ausserhalb des Sanierungsbereiches zu minimieren; ▪ Zusätzliche Bodenluftabsaugung in ungesättigter Zone aufgrund von Strippeffekten. 	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Grundwasser, gesättigte Zone.
Schadstoffe	Von methanotrophen Mikroorganismen abbaubare Schadstoffe (bspw. PAK, BTEX , CKW, MTBE).
Geologie/Hydrogeologie	Durchlässige ungesättigte Zone (für Bodenluftabsaugung), hinreichende Mächtigkeit der gesättigten Zone (Reichweite Luftinjektion), $k_f > 10^{-6}$ m/s, Wechsellagerungen in gesättigter Zone können vorteilhaft sein.
Sonstiges	Kenntnisse über Hydrochemie, Verteilung der CKW-Abbauprodukte, Untersuchung auf methanotrophe Mikroorganismen im Grundwasser.
Einsatzgrenzen	
<p>Nicht geeignet für:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ gering durchlässige Grundwasserleiter; ▪ Kluftgrundwasserleiter; ▪ Schadstoffe in freier Phase; ▪ höher chlorierte CKW. 	

Erforderliche Infrastruktur
Die üblichen Medienanschlüsse (Strom, Wasser, ggf. Anschluss an Abwasserkanal)
Überwachung
<ul style="list-style-type: none">▪ Überwachung des Sanierungserfolges durch Überwachungsbrunnen bzw. -pegel;▪ Überwachung des methangehaltes in der Porenluft;▪ Überwachung der verfahrenstechnischen Parameter: Drücke, Durchfluss, Mengen etc.
Verfahrensvarianten
Keine Varianten bekannt.
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen
Das Methan Biostimulationsverfahren kann bzw. sollte mit folgenden Verfahren kombiniert werden: <ul style="list-style-type: none">▪ Bodenluftabsaugung;▪ Pneumatische Verfahren;▪ Hydraulische Verfahren.
Anwendungserfahrung
Das Verfahren wurde in der USA entwickelt und dort mehrfach eingesetzt, aber sonst nicht weit verbreitet. Es nur wenige Fälle, in welchen das Verfahren in Europa eingesetzt wurde.
Entwicklungsstand und Marktsituation
Das Verfahren ist nicht Stand der Technik. In Deutschland gibt es ein paar wenige lizenzierte Sanierungsunternehmen, die das Verfahren anbieten. In der Schweiz sind keine Anwendungen bekannt.

4.7 Reduktion mit organischen Substanzen

Andere Bezeichnungen	
Reduktive Dechlorierung, Anaerober LCKW-Abbau, Halorespiration, Dehalogenierung. Engl. Bezeichnungen: Reductive Dechlorination	
Prinzip	
Die Zugabe von Cosubstraten wirkt sauerstoffzehrend und fördert damit den anaeroben Abbau bzw. die Mineralisierung von hochchlorierten Kohlenwasserstoffen und anderen Schadstoffen, die bevorzugt im reduktiven Milieu biologisch abgebaut werden	
Wirkungsweise	
Hochchlorierte Kohlenwasserstoffe werden im Grundwasser nur unter anaeroben Bedingungen abgebaut, gering chlorierte eher unter aeroben Bedingungen. Durch die Zugabe und den Abbau von gut abbaubaren organischen Substanzen wird Wasserstoff gebildet. Die Wasserstoffatome ersetzen stufenweise die Chloratome der LCKW und reduzieren diese. Der Prozess wird als cometabolische Reduktion bezeichnet. Die geringer chlorierten CKW können unter aeroben Bedingungen abgebaut werden.	
Technische Beschreibung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zugabe der Cosubstrate durch Beimischung zum Infiltrationswasser oder direkter Beigabe in die Infiltrationsbrunnen. ▪ Cosubstrate können sein: <ul style="list-style-type: none"> ○ Melasse, ○ organische Säuren, ○ Alkohole, ○ HRC® (Hydrogen Release Compound = Milchsäurepolymer). 	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Grundwasser.
Schadstoffe	CKW und andere halogenierte Schadstoffe.
Geologie/Hydrogeologie	homogener und durchlässiger Porengrundwasserleiter.
Sonstiges	Kenntnisse über Hydrochemie, Verteilung der CKW-Abbauprodukte, Untersuchung auf Mikroorganismen der Gruppe Dehalococcoides ethenogenes.
Einsatzgrenzen	
Nicht geeignet für: <ul style="list-style-type: none"> ▪ gering durchlässige Grundwasserleiter; ▪ Kluftgrundwasserleiter, soweit das Kluftsystem unbekannt ist; ▪ Schadstoff in freier Phase. 	

Erforderliche Infrastruktur
Die üblichen Medienanschlüsse (Strom, Wasser, ggf. Anschluss an Abwasserkanal). Aufstellungsflächen für die Injektionsanlagen, Zugänglichkeit der Injektionsstellen.
Überwachung
<ul style="list-style-type: none">▪ Überwachungsbrunnen zum Nachweis des Sanierungserfolgs;▪ Analytik des Grundwassers auf Ethen und Ethan zum Nachweis des Abbaus;▪ evtl. hydraulische Sicherung des Abstroms.
Verfahrensvarianten
Die Varianten bestehen hauptsächlich in der Art der Stoffe, die zum Zweck der Reduktion injiziert werden.
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen
<ul style="list-style-type: none">▪ Grundwasserzirkulationsbrunnen (bei heterogenem Aufbau des Untergrunds);▪ Hydraulische Verfahren, wie Pump-and-Treat u. a.
Anwendungserfahrung
Das Verfahren ist technisch ausgereift und wurde in zahlreichen internationalen Sanierungsprojekten eingesetzt. Das Verfahren mit HRC [®] wird hauptsächlich in den USA eingesetzt.
Entwicklungsstand und Marktsituation
Das Verfahren kann als Stand der Technik angesehen werden. Planer und Sanierungsunternehmen sollten entsprechende Erfahrungen nachweisen können, bevor sie beauftragt werden.

4.8 Enhanced Natural Attenuation

Andere Bezeichnungen
<p>Es wird fast ausschliesslich die engl. Bezeichnung verwendet.</p> <p>Engl. Bezeichnung: Enhanced Natural Attenuation (ENA).</p>
Prinzip
<p>Unter dem Begriff Enhanced Natural Attenuation werden alle Verfahren zusammengefasst, die eine verbesserte Reduktion der Schadstoffe durch natürliche Vorgänge (Natural Attenuation) bewirken.</p>
Wirkungsweise
<p>Bei «Enhanced Natural Attenuation» (ENA) wird mit Hilfe von biologischen, chemischen und physikalischen technischen Verfahren aktiv in das Prozessgeschehen eingegriffen und die natürlichen Prozesse zur Schadstoffminderung aktiv unterstützt. Entsprechende Massnahmen werden oft auch verkürzt als In-situ-Sanierung z. B. mit dem Schwerpunkt auf der Initiierung oder der Stimulation des aeroben Abbaus durch Einbringen von Sauerstoff und/oder Nährstoffen bezeichnet.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aerob: Durch den Einsatz von Wasserstoffperoxid, ORC, iSOC® oder Oxytec (siehe auch Kap. 4.4) wird der aerobe Abbau in Form von Oxidation von Schadstoffen im Wasser ausgelöst bzw. beschleunigt. Dabei oxidieren organische Stoffe zu Kohlendioxid CO₂ und Wasser H₂O. Anorganische Stoffe bilden Oxide, welche aus dem Wasser entfernt werden können. ▪ Anaerob: Die Zugabe von Nitrat fördert den anaeroben Abbau organischer Schadstoffe (Denitrifikation). ▪ Reaktionszonen: Die Einrichtung von permeablen durchströmten Reinigungswänden kann auch als ENA-Verfahren interpretiert werden. ▪ Phytoremediation: kann auch zur Unterstützung natürlicher Schadstoffreduktionen eingesetzt werden.
Technische Beschreibung
<p>ENA zur Förderung des aeroben bzw. anaeroben Abbaus:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zugabe der Substanz zum Infiltrationswasser oder direkt in den Aquifer ▪ Förderung des aeroben oder anaeroben Abbaus je nach Substanzzugabe ▪ Substanzen können sein: <ul style="list-style-type: none"> ○ Wasserstoffperoxid (aerober Abbau durch Sauerstoff); ○ Nitrat (anaerober Abbau); ○ ORC® (aerober Abbau durch Sauerstoff in Form von Kalium-/Magnesiumperoxyden); ○ iSOC® (aerober Abbau durch blasenfreien Sauerstoff mittels Hohlfaserbündeln); ○ Oxytec (aerober Abbau durch Sauerstoff mittels gasdurchlässiger Membranen); ○ HRC (anaerober Abbau). ▪ Permeable Reinigungswände siehe Kap. 1.3.

<ul style="list-style-type: none"> Phytoremediation: Akkumulation von Schadstoffen in Pflanzen (auch zur Reduktion von Schwermetallen geeignet). 	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Hauptsächlich Grundwasser.
Schadstoffe	Alle Schadstoffe, die bereits auf natürlichem Weg abgebaut werden, bzw. reduziert werden, z. B. BTEX, MKW, niedermolekulare PAK, NSO-Heterozyklen, MTBE, niedrig chlorierte Kohlenwasserstoffe, Schwermetalle (Phytoremediation).
Geologie/Hydrogeologie	homogener und durchlässiger Porengrundwasserleiter.
Sonstiges	Gute Kenntnisse der NA-Prozesse.
Einsatzgrenzen	
Je nach Verfahren gibt es Einsatzgrenzen, die beachtet werden müssen. Prinzipiell gibt es aber keine Einschränkungen, die natürliche Schadstoffreduktion zu unterstützen.	
Erforderliche Infrastruktur	
Verfahrensabhängig (siehe die jeweiligen Erläuterungen zu den Verfahren).	
Überwachung	
Überwachung der Grundwasserqualität; Überwachung der verfahrensabhängigen Parameter.	
Verfahrensvarianten	
Fast alle Sanierungsverfahren können auch unterstützend eingesetzt werden.	
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen	
Fast alle Kombinationen sind denkbar, soweit sie der Unterstützung der natürlichen Schadstoffreduzierung dienen. ENA-Verfahren können auch eingesetzt werden, wenn es sich im Laufe des Sanierungsprozesses herausstellt, dass mit NA alleine kein zufriedenstellender Abbau erzielt wird und die Sanierungsziele nicht in einer zumutbaren Zeitspanne erreicht werden können (Back-up).	
Anwendungserfahrung	
Die unterstützenden Verfahren sind weitgehend praxiserprobt. Die Anwendungserfahrungen sind von der Art des Verfahrens abhängig und bei der Verfahrensbeschreibung zu eruieren.	
Entwicklungsstand und Marktsituation	
Einige der unterstützenden Verfahren sind dem Stand der Technik zuzuordnen. Geeignete Anbieter sollten über Erfahrungen mit dem gewählten Unterstützungsverfahren verfügen.	

5. Chemische Verfahren

5.1 ISCO

Andere Bezeichnungen
In-situ Chemische Oxidation. Engl. Bezeichnung: In situ Chemical Oxidation (ISCO)
Prinzip
Die chemische Oxidation hat zum Ziel, die organischen oder anorganischen Schadstoffe zu zerstören bzw. in Teilprodukte zu verwandeln, die nicht mehr schädlich sind, oder so umzuwandeln, dass sich das Mobilitätsverhalten verändert (z. B. Ausfällung)
Wirkungsweise
Mit der Oxidation wird eine chemische Reaktion bezeichnet, bei welcher ein Oxidationsmittel (meist Sauerstoff) einem anderen Element oder Verbindung Elektronen entzieht. Durch den Einsatz von Ozon, Wasserstoffperoxid, Permanganat, mit oder ohne die Unterstützung von Katalysatoren, wird diese chemische Reaktion zwischen Sauerstoff und den Schadstoffen im Wasser ausgelöst. Dabei werden die schädlichen Verbindungen zerstört und zu unschädlichen Molekülen umgewandelt. Anorganische Stoffe bilden u. U. Oxide, welche aus dem Wasser entfernt werden können.
Technische Beschreibung
<p>Bei diesem Verfahren wird ein chemisch stark reaktives Oxidationsmittel in den Grundwasserleiter eingebracht, um dort mit den gelösten Schadstoffen zu reagieren. Sobald ein wirksamer Kontakt zwischen dem Oxidationsmittel und den Schadstoffen hergestellt ist, beginnt die Oxidations-Reaktion. Die Geschwindigkeit des Oxidationsprozesses wird vor allem durch den Transport des Oxidationsmittels zum Schadstoff begrenzt. Zudem kann es nach einigen Tagen bis Monaten nach der Sanierung zu einem Wiederanstieg des Schadstoffgehaltes kommen, da Schadstoffe aus gering durchlässigen Bereichen außerhalb der Reichweite des Oxidationsmittels in Bereiche besserer Durchlässigkeit diffundieren. Folgende bewährten Oxidationsmittel stehen zur Verfügung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kalium- und Natriumpermanganat; • Fentons Reagenz (Zugabe von Wasserstoffperoxidlösung und Eisen(II)-Salzlösung); • Ozon (nicht für längere Schadstofffahren geeignet, da geringe Transportreichweite); • Persulfat. <p>Prinzipiell werden mehrere Infiltrationsbrunnen sowie ein oder mehrere Beobachtungspegel eingerichtet. Mittels des errichteten Pegelnetzes wird das Oxidationsmittel in verdünnter Lösung in den Aquifer eingebracht. Das Verfahren benötigt dabei eine gute und homogene Durchlässigkeitsverteilung. In einem gesättigten Bereich mit einer heterogenen Durchlässigkeitsverteilung erfolgt der Transport nur diffusiv und nicht alle Schadstoffe können erreicht werden. Diese diffundieren nach Tagen, Wochen oder Monaten wieder in den Grundwasserleiter.</p> <p>Beim Einsatz von Ozon wird zusätzlich zu den Infiltrationsbrunnen und den Beobachtungspegeln in der Regel eine Bodenluftabsaugung errichtet. Neben dem Einsatz in der gesättigten Zone ist Ozon durch seinen gasförmigen Aggregatzustand zudem in der ungesättigten Zone einsetzbar.</p>

<p>Aufgrund der geringen Stabilität und Reichweite von Ozon ist das Pegelnetz sehr eng zu halten. Daher ist dieses Verfahren nur für begrenzte Quellbereiche geeignet.</p> <p>Oft sind im Vorfeld Labor- und/oder Feldversuche zur Ermittlung des Oxidationsmittelbedarfes und der Bestimmung der Reichweite, der Infiltrationsparameter, des Stoffumsatzes im Feld, der Rekontaminationseffekte, der möglichen Freisetzung von Metaboliten oder von anderen Stoffen nötig.</p>	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Grundwasser, eingeschränkt auch die ungesättigte Zone.
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ abhängig vom gewählten Oxidationsmittel; ▪ Kalium- und Natriumpermanganat: CKW (Halogen-)Alkene, BTEX ohne Benzol, niedermolekulare PAK; ▪ Fentons Reagenz: kurzkettige Aliphaten, CKW, BTEX, niedermolekulare PAK, freie Cyanide, Chlorbenzole, -phenole; ▪ Ozon: (Halogen-)Alkene, BTEX, niedermolekulare PAK; ▪ Persulfat: (Halogen-)Alkene und Halogen-Alkane, BTEX, niedermolekulare PAK, kurzkettige MKW u. a.
Geologie/Hydrogeologie	Sehr gute Kenntnisse über Geologie/Hydrogeologie, Hydrochemie; gute bis sehr gute Durchlässigkeit; homogener Untergrund; Kenntnis des Schadensbildes; evtl. Labor- und Feldversuche.
Einsatzgrenzen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Untergrundbedingungen mit geringer und ungleichförmiger Durchlässigkeit; ▪ Ein hoher Anteil an organischer Substanz (z. B. Torf) bzw. reduzierter anorganischer Verbindungen erhöhen den Bedarf an Oxidationsmitteln und machen das Verfahren unwirtschaftlich. 	
Erforderliche Infrastruktur	
<p>Die üblichen Medienanschlüsse (Strom, Wasser, ggf. Anschluss an Abwasserkanal) und die erforderlichen Aufstellungsflächen für die Zubereitung und Injektion der Oxidationsmittel. Für die Versorgung mit Ozon ist u.U. aus wirtschaftlichen Erwägungen ein Ozongenerator erforderlich, welcher entweder auf Basis von Umgebungsluft oder von technischem Sauerstoff arbeitet. Für die Lagerung und Handhabung der stark oxidierenden Chemikalien sind umfangreiche Sicherheitsvorkehrungen erforderlich.</p>	
Überwachung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Überwachung der Grundwasserqualität in Beobachtungsbrunnen; ▪ Überwachung der Injektionsdrücke und -mengen; ▪ Überwachung der Oxidationsprodukte (Art und Mobilität). 	

Verfahrensvarianten
Eventuell muss der Sanierungsbereich durch hydraulische Massnahmen oder Dichtwände gesichert werden.
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen
<ul style="list-style-type: none">▪ Pump & Treat-Verfahren.
Anwendungserfahrung
Das Verfahren erbringt in der Regel gute Sanierungsergebnisse und ist weit verbreitet. Der Erfolg hängt allerdings von vielen Einflussgrössen ab, so dass die Anwendung relativ komplex ist und es bei Nichtbeachtung aller entscheidenden Parametern auch zu ungewünschten Nebeneffekten kommen kann. t. Eine Anwendung ist auch in der Schweiz bekannt.
Entwicklungsstand und Marktsituation
Das Verfahren kann dem Stand der Technik zugeordnet werden. Erfahrene Planer und Sanierungsunternehmen sind in der Schweiz tätig.

5.2 ISCR

Andere Bezeichnungen	
<p>In-situ-chemische Reduktion (ISCR).</p> <p>Engl. Bezeichnung: In situ Chemical Reduction.</p>	
Prinzip	
<p>Durch die Injektion von flüssigen chemischen Reduktionsmitteln in den Untergrund bzw. in das Grundwasser erfolgt eine In-situ-chemische-Reduktion (ISCR). Typische Reduktionsmittel sind Eisen(II)sulfat, Natriumdithionit oder Kaliumdisulfit. Im Gegensatz zur Anwendung von HRC (hydrogen releasing compounds) für die Unterstützung des biologischen Abbaus von LHKW dient die Injektion der obig aufgeführten Reduktionsmittel im Wesentlichen zur Ausfällung von Schwermetallen, insbesondere von Cr VI. Generell ist aber auch eine Immobilisierung weiterer Schwermetalle wie Quecksilber, Nickel, Cadmium oder Blei möglich.</p>	
Wirkungsweise	
<p>Chrom VI wird durch die Zugabe des Reduktionsmittels zu Cr III reduziert. Das reduzierte Chrom wird als unlösliches Chrom(III)hydroxid ($\text{Cr}(\text{OH})_3$) oder Chromit ausgefällt und damit in der Matrix des Untergrunds abgelagert.</p>	
Technische Beschreibung	
<p>Bei der Injektion des Reduktionsmittels ist dessen gleichmäßige und flächendeckende Verteilung im Untergrund entscheidend, womit dieser gut durchlässig und möglichst homogen sein sollte. Die Reduktionsmittel werden üblicherweise mit Wasser vermischt und in Injektionsbrunnen eingegeben. Anzahl und Lage der Injektionsbrunnen zueinander werden von der Durchlässigkeit des Untergrundes und der Schadstoffverteilung bestimmt.</p> <p>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 Fällungsprodukten aus Eisenoxiden und -hydroxiden sowie Chrom(III)hydroxid zu Ablagerungen kommen kann, die insbesondere bei geringer effektiver Porosität des Aquifers zu Verblockungen führen können.</p>	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Grundwasser, Porenwasser.
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorwiegend anorganische Schadstoffe (Chrom (VI) und andere Schwermetalle; ▪ In Ausnahmefällen auch zur Unterstützung anaerober biologischer Abbauvorgänge.
Geologie/Hydrogeologie	Gut durchlässige Grundwasserleiter (i. d. R. Porengrundwasserleiter); gute Kenntnis der hydrogeologischen und der hydraulischen Eigenschaften sind erforderlich.

Einsatzgrenzen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Für stark inhomogene oder gering durchlässige Böden ist das Verfahren ungeeignet; ▪ Nicht einsetzbar bei einer Kontamination mit unterschiedlichen Schadstoffen, von denen einer oder mehrere im reduzierenden Bereich mobilisiert, d. h. gelöst werden können. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn neben Chromat Belastungen durch Arsen vorliegen. ▪ Die Fällung von Oxiden, Karbonaten und Sulfiden in Untergrund und Grundwasser erhöht den Verbrauch der Reduktionsmittel erheblich.
Erforderliche Infrastruktur
<p>Installation von Injektionsbrunnen fast überall möglich, Zufuhrleitungen sowie Strom und Wasseranschluss erforderlich. Injektionsmittel können auch bereits vorgemischt bezogen werden, so dass eine Zubereitung vor Ort entfallen kann. Die Reduktionsmittel müssen sicher gelagert werden. Der Umgang mit den Reduktionsmitteln erfordert klare Sicherheitsanweisungen und Vorkehrungen.</p>
Überwachung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Überwachung des Reduktionsmittelverbrauchs; ▪ Überwachung der Reinigungsleistung in Überwachungsbrunnen; ▪ Überwachung des Sauerstoffgehalts im Grundwasser (und in der Porenluft).
Verfahrensvarianten
<p>In sauerstoffhaltigen Grundwässern und bei höheren Redoxpotentialen sind die Reduktionsmittel nicht ausreichend stabil. In diesem Fall eine zusätzliche Injektion von organischen Kohlenstoffquellen (zum Beispiel Melasse oder Ethanol) als Elektronendonatoren sinnvoll. Durch die Sauerstoffzehrung und die Absenkung des Redoxpotentials wird die Injektion der anorganischen Reduktionsmittel erleichtert und es lassen sich größere Reichweiten der Injektion erzielen.</p>
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen
<p>Die chemische Reduktion kann insbesondere in der Anfangsphase standortspezifisch mit Pump+Treat-Verfahren kombiniert werden. Hier kann das mit Reduktionsmittel angereicherte geförderte Grundwasser oberstromig wieder versickert und damit gleichzeitig der Andrang sauerstoffreichen Grundwassers unterbunden werden.</p> <p>Eine Kombination z. B. mit biologischen Verfahren zur Sanierung gering kontaminierter Bereiche ist in besonderen Fällen möglich.</p>
Anwendungserfahrung
<p>Es gibt Erfahrungen aus den USA und einige Anwendungsfälle in Europa. Die Anwendung ist aber nicht häufig verbreitet und noch nicht in allen europäischen Ländern durchgeführt worden. Mit der Fällung von Cr VI dürften zwischenzeitlich die meisten Erfahrungen vorliegen.</p>
Entwicklungsstand und Marktsituation
<p>ISCR ist den innovativen Verfahren zuzuordnen. Es gibt einige wenige Planer und Sanierungsunternehmer in Europa, die das Verfahren anbieten und auch Erfahrungen vorweisen können.</p>

5.3 Nanoeisen

Andere Bezeichnungen
<p>Chemische Reduktion mit Nanoeisen. Nanopartikel, bei denen nullwertiges Eisen als Elektronendonator für den Dekontaminationsprozess fungiert, werden im Weiteren zusammenfassend als Nanoeisen bezeichnet.</p> <p>Engl. Bezeichnung: chemical reduction by using nano iron particles.</p>
Prinzip
<p>Es werden sehr feinkörnige Eisenpartikel im Nanometerbereich (1–100 nm) meist in einer flüssigen Matrix in den Untergrund bzw. das Grundwasser injiziert, um dort eine chemische Reduktion durch das nullwertige Eisen zu initiieren. Unter Reduktion wird eine chemische Reaktion verstanden, bei der Elektronen von einem Element, Ion oder Molekül aufgenommen werden. Die Oxidationszahl erniedrigt sich dadurch (Redoxreaktion).</p>
Wirkungsweise
<p>Elementares Eisen ist ein effektives Reduktionsmittel, das bei Reduktion des Reaktionspartners zu Fe(II) oxidiert. Aufgrund seiner geringen Größe und großen spezifischen Oberfläche ist Nanoeisen 10- bis 1000-fach reaktiver als granulares Eisen. Um den Transport des Nanoeisens zu den Schadstoffen im Untergrund zu ermöglichen und die Sanierungs-effektivität zu verbessern, muss es modifiziert werden. Das kann z. B. durch eine Oberflächenbehandlung oder Beschichtung der Partikel, durch eine Belegung kolloidaler (Mikro-)Aktivkohle mit Nanoeisenpartikeln, durch Emulgierung, durch Hydrophobierung des Nanoeisens mittels Einmischung in ein Öl-Tensid-Gemisch oder durch Herstellung stabilisierter wässriger Suspensionen erzielt werden.</p> <p>Bei der Sanierung kontaminierter Altlastenstandorte mit nFe(0)-Technologien ist es auch möglich, den reduktiven Abbau durch biologische Prozesse zu initiieren. Damit bewirkt die Reduktion mit Nanoeisen nicht nur abiotische sondern auch biotische Prozesse zum Abbau von beispielsweise chlorierten Kohlenwasserstoffverbindungen.</p>
Technische Beschreibung
<p>Die Anwendung von speziell behandeltem, hochreaktivem Nanoeisen bietet in Form einer wässrigen Suspension die Möglichkeit einer gezielten Injektion in den Untergrund. Die Suspension sollte so in den Grundwasserleiter eingebracht werden, dass sich das Nanoeisen im kontaminierten Grundwasser gut verteilt, so dass es mit den Schadstoffen reagieren kann. Die Abstände zwischen den Injektionspegeln betragen zumeist einen bis wenige Meter.</p> <p>Wenn behandeltes Nanoeisen mit dem Grundwasser, den Schadstoffen und weiteren Inhaltsstoffen reagiert, verliert es nach einigen Wochen seine Reaktivität. Es wird oxidiert und fällt als Eisenhydroxid (Rost) und Eisenoxid aus. Dies kann unter Umständen zu Verstopfungen der Porenräume führen.</p>

Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Ungesättigte und gesättigte Zone, Grundwasser, Porenwasser, Porenluft, Untergrund
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Organische Schadstoffe, die sich reduzierend biologisch abbauen lassen, z. B. chlorierte Kohlenwasserstoffe, insbesondere Tetrachlorethen, Trichlorethen und Dichlorethene; ▪ Anorganische Schadstoffe (Chrom VI) und andere Schwermetalle (Hg, Pb, Ag, Ni, Cu, Zn), die sich durch chemische Reduktion ausfällen lassen.
Geologie/Hydrogeologie	Gut durchlässige Grundwasserleiter (i. d. R. Porengrundwasserleiter); gute Kenntnis der hydrogeologischen und der hydraulischen Eigenschaften ist erforderlich
Einsatzgrenzen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nur eingeschränkt für die alleinige Unterstützung eines biologischen Abbaus geeignet, aber Synergieeffekte der abiotischen Reaktion mit einer Förderung des biologischen Abbaus sind bestätigt worden; ▪ Gleichmässige Verteilung im Untergrund ist schwierig; ▪ Reichweite ist sehr gering; ▪ Offizielle Umweltschutzinstitutionen erachten den Einsatz von Nanoeisen als relativ unproblematisch. Es soll aber bei der Sanierung darauf geachtet werden, dass sich das Nanoeisen und seine Folgeprodukte nicht über ihren räumlich begrenzten Einsatzort hinaus ausbreiten und insbesondere nicht in andere Aquifere gelangen können. 	
Erforderliche Infrastruktur	
Es werden lediglich Injektionsbrunnen mit den entsprechenden Zuleitungen bzw. Tanks für die Nanoeisensuspensionen sowie eine entsprechende Zugänglichkeit benötigt.	
Überwachung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Überwachung der Abbauleistung in Grundwasserpegeln; ▪ Überwachung der Injektionsmengen; ▪ Überwachung der Reichweiten. 	
Verfahrensvarianten	
Verfahrensvarianten ergeben sich vor allem durch die unterschiedlichen Modifikationen des Eisens und des Mediums mit dem das Nanoeisen in den Untergrund eingebracht wird. So gibt es Verbundmaterialien die Eisenstrukturen in der Größe von wenigen Nanometern enthalten, die fest in den Kohlenstoff eingebunden sind. Die Kombination beider Materialien gestattet eine chemische Reaktivität mit gleichzeitiger adsorptiver Schadstoffanreicherung.	

Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen
Verfahrenskombinationen mit biologischen Verfahren und mit einer Pump-and-Treat-Grundwasser-sanierung sind möglich. Nanoeisen kann auch in Grundwasserzirkulationsbrunnen eingesetzt werden. Bei einer linienhaften Einbringung des Nanoeisens in den Untergrund können reduktive durchströmte Zonen entstehen, die ähnlich einer passiv durchströmten Reaktionswand (PRB) wirken.
Anwendungserfahrung
Das Verfahren wird bisher vor allem bei Grundwasserschäden mit chlorierten Kohlenwasserstoffen (CKW) angewendet. Es handelt sich um ein innovatives Verfahren, zu dem noch relativ wenige Erfahrungen vorliegen. Für die Applikationsformen des Nanoeisens gibt es diverse Hersteller.
Entwicklungsstand und Marktsituation
<p>Der Einsatz von Nanoeisen im Untergrund ist ein innovatives Sanierungsverfahren, das sich in Europa in der Entwicklung befindet und bisher nur in Einzelfällen angewendet wurde, weshalb der Erfahrungsstand noch relativ gering ist.</p> <p>Für die Planung und Ausführung einer Grundwassersanierung mit Nanoeisen sollten nur Ingenieurbüros und Hersteller beauftragt werden, die über entsprechende Erfahrungen verfügen.</p>

6. Immobilisierungsverfahren

6.1 Immobilisierung in situ

Andere Bezeichnungen
Immobilisierung. Engl. Bezeichnung: Stabilisation, Fixation, Solidification.
Prinzip
Die Schadstoffe werden im Untergrund durch Zugabe von Dichtungsmitteln oder Reagenzien entweder eingekapselt oder in eine schwerlösliche Form überführt, so dass ihre Mobilität verhindert wird.
Wirkungsweise
Bei der In-Situ-Immobilisierung werden die Schadstoffe im Untergrund entweder durch die Injektion von Reagenzien in eine schwerlösliche Form überführt oder eingeschlossen. Als Reagenzien werden Fällungsmittel, Adsorptionsmittel oder/und Ionentauscher eingesetzt (s. auch Oxidation/Reduktion). Für die Verschliessung der Poren wird des Öfteren Wasserglas oder andere Dichtstoffe (wie Zement-Bentonit-Suspensionen) eingesetzt, mit denen eine weitere Wasserbewegung oder Ausgasung verhindert wird.
Technische Beschreibung
<p>Die Dichtstoffe bzw. Reagenzien werden in einer Wasserlösung oder in Suspension über Injektionslanzen in den Untergrund eingedrückt. Der Abstand der Injektionslanzen untereinander beträgt einen oder mehrere Meter, so dass ein relativ enges Raster an Injektionsstellen entsteht.</p> <p>Eingesetzte Dichtstoffe können sein:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wasserglas (Alkalisilikat, Reaktion mit mehrwertigen Metallionen führt zu einem wässrigen Kieselgel); ▪ Zement (Reaktion mit Porenwasser führt zu einer Verfestigung zu Zementstein, welcher die Schadstoffe bindet); ▪ Bentonit (mineralisches Dichtungsmittel; Adsorption von Schwermetallen, Quellfähigkeit) ▪ Gips, Kalk (nicht wasserbeständig); ▪ Thermoplaste (erwärmt sind diese fließfähig; bei der Abkühlung erstarren sie und schliessen die Schadstoffe ein) ▪ Organische Polymere (bilden eine feste, schwammartige Masse, welche die Schadstoffe einschliesst). <p>Die Dichtstoffe können auch kombiniert angewandt werden. So ist beispielsweise die Anwendung von Zement-Bentonit-Suspensionen sehr weit verbreitet.</p>

Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Gesättigte und ungesättigte Zone
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alle Arten von Schadstoffen; ▪ Schwermetalle, wie z. B. Chrom VI, die durch Fällung mit Eisensulfat oder ein andersartiges Fällungsmittel in eine unlösliche Verbindung (Cr III) ausgefällt werden; ▪ Adsorbierbare Schadstoffe; ▪ Schadstoffe, die durch Ionenaustausch fixiert werden können.
Geologie/Hydrogeologie	Ein homogener, mittel durchlässiger Untergrund ist von Vorteil.
Einsatzgrenzen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Injektionsmittel müssen sich gleichmässig im Untergrund verteilen lassen; ▪ Im Kluffgestein nur bei genauer Kenntnis der Klüfte anwendbar; ▪ Nicht anwendbar, wenn eine dauerhafte Schadstoffreduzierung gefordert wird; ▪ Die Immobilisierungsverfahren dienen mit Ausnahme der Fällungsverfahren im Wesentlichen der Sicherung nicht der Dekontamination. 	
Erforderliche Infrastruktur	
Die üblichen Medienanschlüsse (Strom, Wasser) sowie Aufstellungsflächen für die Anlagen und die Verbindungsleitungen. Gute Zugänglichkeit. Kann auch unterhalb von Gebäuden appliziert werden.)	
Überwachung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Überwachung des Sanierungserfolgs durch Überwachungspegel abstromig; ▪ Kontrolle der Ausdehnung der Injektionsmittel; ▪ Erfassung der verfahrenstechnischen Parameter, wie Drücke und Mengen etc. 	
Verfahrensvarianten	
Ergeben sich im Wesentlichen durch die Auswahl der Injektionsmittel.	
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen	
Lässt sich je nach Wahl des Injektionsmittels mit anderen In-situ-Verfahren kombinieren. Bei der Wahl von einem Dichtmittel zur Verstopfung der Poren sind die Kombinationsmöglichkeiten stark eingeschränkt.	
Anwendungserfahrung	
Die Wasserdurchlässigkeit wird durch die Verfestigung eingeschränkt. Die Immobilisierungsverfahren sind erprobt und werden oft eingesetzt. Anwendungserfahrungen sind ausreichend vorhanden.	

Entwicklungsstand und Marktsituation

Die Immobilisierungsverfahren können weitgehend dem Stand der Technik zugeordnet werden. Sie werden auch in der Schweiz eingesetzt. Es sollten nur mit diesen Techniken erfahrene Planer und Sanierungsunternehmen beauftragt werden.

6.2 In-situ-Verglasung

Andere Bezeichnungen	
ISV-Verfahren. Engl. Bezeichnung: In Situ Vitrification	
Prinzip	
Immobilisierung eines Schadensbereiches durch sehr hohe Temperaturen, die eine Gesteinsschmelzung bewirken. Durch das Einbringen von elektrischen Strömen wird die Temperatur auf über 1500 °C gebracht, wodurch die organischen Schadstoffe zerstört und die anorganischen Schadstoffe in einer glasartigen Matrix eingebunden werden.	
Wirkungsweise	
Der Untergrund wird bis zum Schmelzpunkt der festen Gesteinskörner aufgeheizt. Beim Abkühlen bilden sich glasartige Strukturen. Das im Untergrund befindliche Wasser wird verdampft, die flüchtigen Schadstoffe entweichen, soweit sie nicht durch den Temperaturanstieg zerstört werden. Der grösste Teil der anorganischen Schadstoffe wird in der Schmelze fixiert. Dabei ist zu beachten, dass bei den nicht vollständig kontrollierbaren Prozessen in situ eine Vorhersage und Überwachung der dabei entstehenden Produkte nicht möglich ist. Das Volumen der entstehenden Strukturen kann wesentlich kleiner sein als das des Ausgangsmaterials.	
Technische Beschreibung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erhöhung der Temperatur >1500 °C durch im Untergrund steckende Elektroden, an die ein Gleichstrom bei hoher Stromstärke angelegt ist; ▪ Ist der Siliziumgehalt im Untergrund nicht ausreichend für die Bildung einer Silikatmatrix, können eventuell Zusätze wie Sand oder Altglas hinzugegeben werden; ▪ Unkontrollierbare Emissionen sind unvermeidbar oder technisch sehr aufwändig zu realisieren. 	
Einsatzmöglichkeiten	
Medium	Untergrund, ungesättigte Zone.
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Immobilisierung anorganischer Schadstoffe; ▪ Zerstörung organischer Schadstoffe.
Geologie/Hydrogeologie	Silikatreiche Böden, geringer Wasseranteil.
Einsatzgrenzen	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nicht im Grundwasserbereich anwendbar; ▪ Nicht anwendbar, wenn bei der Aufheizung Schadstoffe entweichen können; ▪ Nicht in bebauten Gebieten anwendbar. 	

Erforderliche Infrastruktur
Die gesamte Oberfläche des Schadensbereiches muss frei gehalten werden. Es werden starke Stromanschlüsse oder gar Gleichstromgeneratoren benötigt.
Überwachung
<ul style="list-style-type: none">▪ Ermittlung des Sanierungserfolgs (Ausdehnung des Glaskörpers);▪ Überwachung der Temperaturen auch im Umfeld;▪ Emissions- und Immissionsüberwachung.
Verfahrensvarianten
Sinterung (ca. 1000 °C).
Mögliche oder erforderliche Verfahrenskombinationen
Keine bekannt
Anwendungserfahrung
Aufgrund der großen Energieaufwendung ist das Verfahren sehr teuer. Zudem ist es noch nicht weit entwickelt und erst in der Erprobung. Die Auswirkungen des Verfahrens sind neben dem Vorteil der Schadstoffimmobilisierung eher nachteilig und schädlich für den Untergrund, aber auch für die umgebende Atmosphäre.
Entwicklungsstand und Marktsituation
Das Verfahren wurde in den USA entwickelt und in einigen wenigen Fällen erprobt. Die Vorteile wiegen aber die Nachteile nicht auf. Deshalb wird dieses Verfahren in Europa sehr wahrscheinlich nicht zum Einsatz kommen.