

> In-situ-Sanierung

Ein Modul der Vollzugshilfe «Sanierung von Altlasten»



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

> In-situ-Sanierung

Ein Modul der Vollzugshilfe «Sanierung von Altlasten»

2. aktualisierte Ausgabe, Dezember 2016; Erstausgabe 2008

Rechtlicher Stellenwert

Diese Publikation ist ein Modul der Vollzugshilfe «Sanierung von Altlasten» des BAFU als Aufsichtsbehörde und richtet sich primär an die Vollzugsbehörden. Sie konkretisiert unbestimmte Rechtsbegriffe von Gesetzen und Verordnungen und soll eine einheitliche Vollzugspraxis fördern. Berücksichtigen die Vollzugsbehörden diese Vollzugshilfen, so können sie davon ausgehen, dass sie das Bundesrecht rechtskonform vollziehen; andere Lösungen sind aber auch zulässig, sofern sie rechtskonform sind. Das BAFU veröffentlicht solche Vollzugshilfen (bisher oft auch als Richtlinien, Wegleitungen, Empfehlungen, Handbücher, Praxishilfen u.ä. bezeichnet) in seiner Reihe «Umwelt-Vollzug».

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Autoren

Harald Burmeier, Prof. Burmeier Ingenieurgesellschaft mbH,
D-Gehrden

Christian Poggendorf, Prof. Burmeier Ingenieurgesellschaft mbH,
D-Gehrden

Eberhard Beitinger, D-Ladenburg

Begleitung BAFU

Reto Tietz, Abteilung Boden und Biotechnologie

Sibylle Dillon, Abteilung Recht

Christiane Wermeille, Abteilung Boden und Biotechnologie

Zitierung

BAFU (Hrsg.) 2016: In-situ-Sanierung. Ein Modul der Vollzugshilfe «Sanierung von Altlasten». 2. aktualisierte Ausgabe, Dezember 2016; Erstausgabe 2008. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 0834: 70 S.

Gestaltung

Stefanie Studer, 5444 Künten

Titelbild

Sanierung der Deponie Pont Rouge, Cimo Compagnie industrielle de Monthey SA

PDF-Download

www.bafu.admin.ch/uv-0834-d

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Diese Publikation ist auch in französischer und italienischer Sprache verfügbar.

© BAFU 2016

> Inhalt

Abstracts	5		
Vorwort	7		
<hr/>			
1 Einleitung	8		
1.1 Ziele des Vollzugshilfemoduls	8		
1.2 Zielgruppen	8		
1.3 Struktur des Vollzugshilfemoduls	9		
<hr/>			
2 Rechtliche Grundlagen	10		
2.1 Sanierungsziel und Dringlichkeit	10		
2.2 Sanierungsmassnahmen	10		
2.3 Variantenstudie	11		
2.4 Festlegung der geeigneten Sanierungsmassnahme	12		
<hr/>			
3 Allgemeines zu den In-situ-Sanierungsverfahren	13		
3.1 Abgrenzung zu anderen Sanierungsverfahren	13		
3.2 Wirkungsmechanismen der In-situ-Sanierung	14		
3.3 Auswahl der geeigneten Sanierungsverfahren	15		
3.4 Überblick über die einzelnen In-situ-Sanierungsverfahren	17		
3.5 Verfahrenswechsel	20		
3.6 Sanierungsdauer	21		
3.7 Kosten	21		
3.7.1 Kostenbeeinflussende Grössen	21		
3.7.2 Kostenstrukturen	22		
3.7.3 Beauftragung von Sanierungsverfahren	22		
<hr/>			
4 Beschreibung der In-situ-Sanierungsverfahren	24		
4.1 Systematik der Verfahren	24		
4.2 Hydraulische Verfahren	25		
4.2.1 Phasenentnahme	26		
4.2.2 Hydraulische Verfahren	28		
4.2.3 Passive Grundwassersanierung	32		
4.3 Pneumatische Verfahren	35		
4.3.1 Bodenluftabsaugung	36		
4.3.2 Slurping	37		
4.3.3 In-situ-Strippen	37		
4.4 Mobilisierungsverfahren	38		
4.4.1 Physikalische Mobilisierung	39		
4.4.2 Chemische Mobilisierung	43		
<hr/>			
4.5 Biologische Verfahren	45		
4.5.1 Allgemeines und Wirkungsweise	45		
4.5.2 Oxidative Verfahren	46		
4.5.3 Reduktive Verfahren	50		
4.5.4 Enhanced Natural Attenuation (ENA)	50		
4.5.5 Sonstige biologische Verfahren	51		
4.6 Chemische Verfahren	51		
4.6.1 In-situ-chemische Oxidation (ISCO)	52		
4.6.2 In-situ-Reduktion	53		
4.7 Immobilisierungsverfahren	53		
4.7.1 In-situ-Immobilisierung	54		
4.7.2 In-situ-Verglasung	54		
4.8 Aufbereitungsverfahren	55		
4.8.1 Wasseraufbereitung	55		
4.8.2 Luftaufbereitung	56		
4.8.3 Massenströme und Entsorgung bei der Abwasser- und Abluftaufbereitung	57		
<hr/>			
5 Erfolgskontrolle, Überwachung und Nachkontrolle	59		
5.1 Kontrollmassnahmen während der Sanierungsausführung	59		
5.2 Erfolgskontrolle	59		
5.3 Nachkontrolle	60		
5.3.1 Allgemeines	60		
5.3.2 Überwachung der Wirkungspfade	61		
<hr/>			
Literatur	62		
Glossar	64		
Verzeichnisse	68		
<hr/>			
Anhang	70		
A1 Faktenblätter zu den technischen In-situ-Verfahren	70		
A2 Faktenblätter zu den Wasser- und Abluftbehandlungs-Verfahren	70		

> Abstracts

The Environmental Protection Act stipulates that contaminated sites should be remediated if they result in harmful or disagreeable consequences or if there is a real risk that such consequences could arise. When contaminated sites are remediated, there are many decontamination and securing measures to choose from. Among them are a number of in situ remedial procedures which allow pollutants to be removed or immobilised locally, without the need to excavate the whole of the affected subsoil. This enforcement aid assists in the evaluation of such in situ measures in the context of the options review.

Gemäss Umweltschutzgesetz müssen belastete Standorte saniert werden, wenn sie zu schädlichen oder lästigen Einwirkungen führen oder die konkrete Gefahr besteht, dass solche Einwirkungen entstehen. Zur Sanierung der Altlasten stehen vielfältige Dekontaminations- und Sicherungsmassnahmen zur Auswahl. Darunter befinden sich auch eine Vielzahl von In-situ-Sanierungsverfahren, welche es erlauben, gleich vor Ort die Schadstoffe zu entfernen oder zu immobilisieren, ohne dass der gesamte belastete Untergrund ausgehoben werden muss. Die vorliegende Vollzugshilfe stellt eine Hilfestellung dar, zur Evaluation von In-situ-Sanierungsmassnahmen im Rahmen der Variantenstudie.

Conformément à la loi sur la protection de l'environnement, les sites pollués doivent être assainis s'ils engendrent des atteintes nuisibles ou incommodantes ou s'il existe un danger concret que de telles atteintes apparaissent. Il existe de multiples mesures de décontamination et de confinement pour assainir les sites contaminés. Parmi celles-ci, on compte de nombreux procédés d'assainissement in situ, qui permettent d'éliminer ou d'immobiliser les polluants sur place sans devoir excaver l'entier du sous-sol pollué. La présente aide à l'exécution facilite l'évaluation des mesures d'assainissement in situ dans le cadre de l'étude de variantes.

Secondo la legge sulla protezione dell'ambiente i siti inquinati devono essere risanati se sono all'origine di effetti nocivi o molesti oppure se esiste il pericolo concreto che tali effetti si producano. Per risanare i siti contaminati esistono diverse misure di decontaminazione e di messa in sicurezza, fra le quali figura anche un certo numero di procedure di risanamento *in situ* che consentono di eliminare o immobilizzare in loco gli inquinanti, senza che sia necessario rimuovere il sottosuolo. Il presente testo costituisce un aiuto per valutare le misure di risanamento *in situ* nel quadro dello studio delle varianti.

Keywords:

In situ measures,
Polluted sites,
Evaluation of options

Stichwörter:

In-situ-Sanierungen,
Altlasten,
Evaluation von Varianten

Mots-clés:

Assainissements in situ,
Sites contaminés,
Evaluation des variantes

Parole chiave:

Risanamenti in situ,
Siti contaminati,
Valutazione delle varianti

> Vorwort

Seit der Inkraftsetzung der Altlasten-Verordnung im Jahre 1998 wurden in der Schweiz bis dato rund 1000 Altlasten saniert. Entgegen den damaligen Erwartungen zeigt eine Auswertung der angewandten Sanierungsverfahren, dass die Altlasten fast ausschliesslich durch Aushubmassnahmen, das heisst durch die Entfernung und Entsorgung des belasteten Untergrunds saniert wurden.

Diese Praxis führt dazu, dass derzeit hierzulande jährlich ungefähr eine Million Tonnen belastetes Material von belasteten Standorten und Altlasten entsorgt wird. Da dieses Material mineralischen Ursprungs ist und es auch durch eine Behandlung häufig nicht vollkommen von den Schadstoffen befreit werden kann, muss der grösste Anteil davon schlussendlich deponiert werden. Der dafür notwendige Aufwand und die Umwelteinwirkungen sind gross und es stellt sich unweigerlich die Frage, ob der belastete Untergrund auch wirklich immer vom Standort entfernt werden muss.

Je nach Situation sind Dekontaminationsmassnahmen durch Aushub und externe Entsorgung des belasteten Untergrunds trotz gewissen Vorteilen gesamthaft betrachtet nicht immer die wirtschaftlichste und umweltverträglichste Sanierungsvariante. Das BAFU beabsichtigt mit der vorliegenden Vollzugshilfe darauf hinzuwirken, dass die im Ausland erprobten In-situ-Massnahmen auch in der Schweiz besser bekannt werden und daher künftig und insbesondere bei den vom Bund mitfinanzierten Sanierungen konsequent bei der Evaluation von Sanierungsvarianten mitberücksichtigt werden.

Franziska Schwarz
Vizedirektorin
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

1 > Einleitung

Zur Sanierung von sanierungsbedürftigen belasteten Standorten (Altlasten) steht eine grosse Anzahl von Verfahren zur Verfügung. Neben den bekannten und häufig angewendeten «off-site-Verfahren» existiert eine grosse Zahl von sogenannten «In-situ-Sanierungsverfahren», bei welchen die Dekontamination oder die Sicherung des sanierungsbedürftigen belasteten Standortes direkt im Untergrund erfolgt.

Die Erfahrung bei der In-situ-Sanierung von Untergrund- und Grundwasserverunreinigungen lehrt, dass einige der In-situ-Verfahren zwar als Stand der Technik anzusehen sind, sie aber oft nicht erfolgreich angewendet werden, da ihre Randbedingungen und Anwendungsgrenzen nicht ausreichend beachtet werden.

Grundsätzlich – aber insbesondere bei Inanspruchnahme von Bundessubventionen – sollen die Sanierungsmassnahmen umweltverträglich und wirtschaftlich sein, sowie dem Stand der Technik entsprechen.

1.1 Ziele des Vollzugshilfemoduls

Das vorliegende Vollzugshilfemodul gibt Hilfestellungen für die Beurteilung und Auswahl möglicher In-situ-Verfahren bei der Variantenstudie im Rahmen der Erarbeitung von Sanierungskonzepten und Sanierungsvarianten.

Hierfür sollen der Stand der Technik sowie die Grenzen und Möglichkeiten der In-situ-Verfahren aufgezeigt werden. Ziel ist weniger eine vollständige Darstellung der technischen Details, als vielmehr die Auflistung von Kriterien transparent zu machen, mit denen eine Auswahl der Verfahren und deren Optimierung erfolgt.

1.2 Zielgruppen

Das Vollzugshilfemodul «In-situ-Sanierung» richtet sich an:

- > die Ingenieure und Altlastenspezialisten, welche Sanierungsvarianten evaluieren,
- > die Vollzugsbehörden, welche technische Sanierungssysteme hinsichtlich der Eignung und Genehmigungsfähigkeit prüfen und
- > die Standorteigentümer, welche letztlich die Planung und Durchführung einer Sanierung beauftragen.

1.3 Struktur des Vollzugshilfemoduls

Das Vollzugshilfemodul «In-situ-Sanierung» gliedert sich in folgende Teile:

- > **Hauptteil:** Es wird gezeigt, wie sich ausgehend von den Stoffeigenschaften und den Standorteigenschaften sowie dem Vorkommen der Schadstoffe im Untergrund die Massnahmen für die In-situ-Sanierung wählen und entwickeln lassen und welche Bausteine im Zuge der Sanierung anzuwenden sind. Das wesentliche Ziel besteht darin, die Auswahl der In-situ-Sanierungsverfahren nachvollziehbar zu machen.
- > **Anhänge A1 und A2:** Enthalten sind Faktenblätter (detaillierte Beschreibungen, technische Angaben, Hinweise zur Anwendung und Anwendungserfahrungen) zu den eigentlichen In-situ-Sanierungsverfahren (Anhang A-1) sowie zu den Verfahren der Wasser- und Abluftbehandlung (Anhang A-2), die in vielen Fällen der eigentlichen In-situ-Sanierung nachgeschaltet werden.

2 > Rechtliche Grundlagen

Gemäss Artikel 32c Absatz 1 Umweltschutzgesetz (USG; SR 814.01) sind belastete Standorte zu sanieren, wenn sie zu schädlichen oder lästigen Einwirkungen führen oder die konkrete Gefahr besteht, dass solche Einwirkungen entstehen.

2.1 Sanierungsziel und Dringlichkeit

Das Ziel einer Sanierung wird in Artikel 15 Absatz 1 der Altlasten-Verordnung (AltV; SR 814.680) allgemein definiert:

«Beseitigung der Einwirkungen oder der konkreten Gefahr solcher Einwirkungen, die zur Sanierungsbedürftigkeit geführt haben.»

Die Einwirkungen oder die konkrete Gefahr sind langfristig und nachhaltig zu eliminieren: Die Altlastenbearbeitung soll vom Grundsatz her nicht den kommenden Generationen aufgebürdet werden. Dies erfordert, dass eine Altlast prinzipiell nach spätestens ein bis zwei Generationen saniert und ohne weitere Massnahmen der Nachwelt überlassen werden kann.

Vom Sanierungsziel muss entsprechend Artikel 15 Absatz 2 und 3 AltV abgewichen werden, wenn folgende Bedingungen kumulativ erfüllt sind:

- > dadurch die Umwelt gesamthaft weniger belastet wird;
- > sonst unverhältnismässige Kosten anfallen würden;
- > für das Schutzgut Grundwasser: die Nutzbarkeit von Grundwasser im Gewässerschutzbereich A_u gewährleistet ist, oder wenn oberirdische Gewässer, die mit Grundwasser ausserhalb des Gewässerschutzbereichs A_u in Verbindung stehen, den Anforderungen der Gewässerschutzgesetzgebung an die Wasserqualität erfüllen.
- > für das Schutzgut oberirdische Gewässer: das Gewässer den Anforderungen der Gewässerschutzgesetzgebung an die Wasserqualität erfüllt.

Besonders dringlich sind Sanierungen, wenn eine bestehende Nutzung beeinträchtigt oder unmittelbar gefährdet ist (Art. 15 Abs. 4 AltV).

2.2 Sanierungsmassnahmen

Die Altlasten-Verordnung schreibt unter Artikel 16 vor, dass das Sanierungsziel durch die folgenden Massnahmen zu erreichen ist:

- > **Dekontamination:** Umweltgefährdende Stoffe werden beseitigt; oder
- > **Sicherung:** Die Ausbreitung umweltgefährdender Stoffe wird langfristig verhindert und überwacht.

2.3 Variantenstudie

Altlasten sind in der Regel aufgrund des spezifischen Schadstoffspektrums und der lokal unterschiedlichen Untergrunds- und Schutzgutverhältnisse sehr verschieden. Aus diesem Grund bedarf es im Rahmen des Sanierungsprojekts entsprechend Artikel 17 AltIV zur Wahl der geeigneten Sanierungsmassnahme in der Regel einer Variantenstudie.

Entsprechend des Vollzugshilfemoduls «Evaluation von Sanierungsvarianten» sollen im Rahmen der Variantenstudie die verschiedenen grundsätzlich bei einer Altlast realisierbaren Sanierungsvarianten verglichen und bewertet werden. Die Evaluation von Sanierungsvarianten muss standortspezifisch durchgeführt werden, weil für jeden Standort in Abhängigkeit der jeweiligen Voraussetzungen eine eigene optimale Sanierungsvariante resultiert. Damit eine möglichst umweltverträgliche, dem Stand der Technik entsprechende und wirtschaftliche Sanierungsvariante ermittelt werden kann, müssen im Rahmen der Variantenstudie sämtliche möglichen Verfahren d.h. Dekontaminationsverfahren (off-site, on-site und in-situ), Sicherungsverfahren wie auch monitored natural attenuation (MNA) in Betrachtung gezogen werden.

In-situ-Sanierungsverfahren haben sich seit Jahrzehnten etabliert und sind aufgrund ihrer Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit valable Sanierungsverfahren. Bei der Variantenevaluation sollen deshalb In-situ-Verfahren immer mitberücksichtigt werden. Insbesondere bei überbauten Standorten und bei tiefgründigen Schadstoffherden sind diese Verfahren oft sogar die einzige Option. Die generelle Anwendbarkeit sowie die grundsätzlichen Vor- und Nachteile der verschiedenen In-situ-Verfahren werden in vorliegendem Vollzugshilfemodul aufgezeigt.

Gegenüber einer Sanierung durch Aushub der Schadstoffe ergeben sich bei In-situ-Sanierungen tendenziell ökologische Vorteile, weil die Deponieressourcen geschont werden, weil der Energieverbrauch gesamthaft geringer ist und weil im Vergleich zu einer Aushubsanierung weniger Luft-, Lärm-, Staub und Geruchsemissionen verursacht werden. Dies umso mehr als, dass bei den Beurteilungskriterien «Umweltverträglichkeit und ökologischer Nutzen» unbedingt zu beachten ist, dass nicht nur die Emissionen durch die Sanierung am Standort selbst, sondern bei Aushubmassnahmen auch diejenigen des Transports und der Entsorgung der Abfälle ins Gewicht fallen.

In-situ-Sanierungsmassnahmen können Monate bis Jahre dauern, aber deren Kosten sind generell geringer als bei Sanierungsmassnahmen mit Aushubarbeiten. Damit die Erfolgsaussichten, die Sanierungsdauer und auch die Kosten akzeptabel eingeschätzt werden können erfordern In-situ-Massnahmen eine gute Kenntnis der geologischen und hydrogeologischen sowie der geochemischen Bedingungen am Standort und eine verlässliche Voraussage der Prozesse, die im Untergrund ausgelöst werden.

Sofern beim Sanierungspflichtigen, beim Altlastengutachter oder auch bei den Behörden das entsprechende Wissen fehlt, empfiehlt sich der Beizug von Spezialisten.

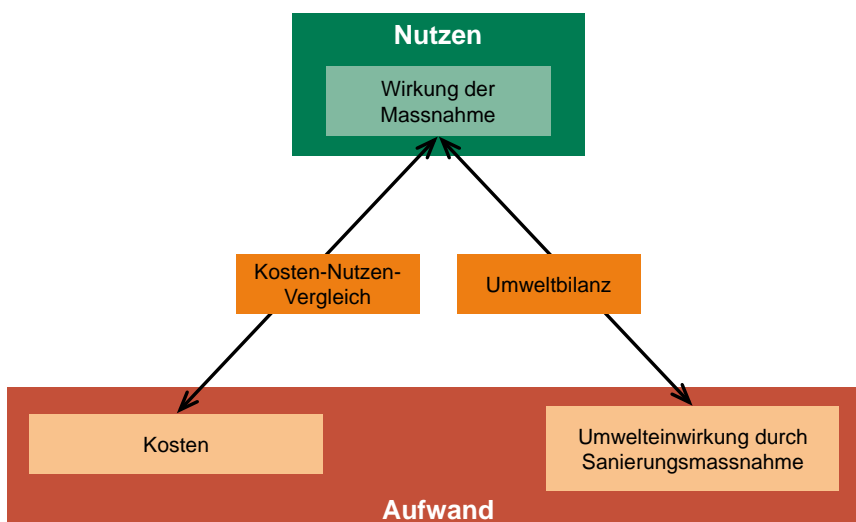
2.4 Festlegung der geeigneten Sanierungsmassnahme

Entsprechend Artikel 18 der Altlasten-Verordnung hat die Behörde unter anderem folgende wichtige Elemente bei der Festlegung der erforderlichen Sanierungsmassnahmen bzw. bei der Festlegung der definitiven Sanierungsziele (Artikel 15 AltIV) zu prüfen:

- > die durch die Massnahmen verursachten Umweltauswirkungen (Art. 18 Abs. 1 Bst. a),
- > die Wirksamkeit der Massnahme hinsichtlich der Reduktion der Umweltgefährdung (Art. 18 Abs. 1 Bst. c),
- > die langfristige Wirksamkeit der Massnahme (Art. 18 Abs. 1 Bst. b),
- > die Kontrollierbarkeit der Massnahme (Art. 18 Abs. 1 Bst. d), und
- > die Kosten (Art. 18 Abs. 1 Bst. e).

Zur Festlegung der erforderlichen Massnahmen und zur gegebenenfalls notwendigen Anpassung des Sanierungsziels hat die Behörde demnach primär die Wirksamkeit der Massnahme zur Behebung des Sanierungsbedarfs, d. h. den Umweltnutzen der Massnahme den Kosten einerseits und andererseits den Umwelteinwirkungen der Massnahme gegenüberzustellen (vgl. Abb. 1).

Abb. 1 > Verhältnis von Aufwand zu Nutzen von Sanierungsmassnahmen



Werden im Rahmen der Variantenstudie Sanierungsverfahren in Betracht gezogen, die voraussichtlich grosse Umwelteinwirkungen verursachen, empfiehlt sich zur Beurteilung von Artikel 18 Absatz 1 Buchstabe a AltIV die Erstellung einer vergleichenden Umweltbilanz.

3 > Allgemeines zu den In-situ-Sanierungsverfahren

3.1 Abgrenzung zu anderen Sanierungsverfahren

Die Sicherung erfolgt durch Fixierung der Schadstoffe «In-situ» in Form einer Immobilisierung. Die Dekontamination kann entweder «In-situ», «on site» oder «off site» erfolgen.

Bei den Dekontaminationsverfahren wird generell unterschieden, ob

- > der Untergrund in seiner ursprünglichen Lagerung verbleibt und die Schadstoffe ohne Materialbewegung entfernt werden («In-situ-Verfahren») oder
- > die Dekontamination des Untergrundes durch Entnahme des Untergrundes zusammen mit der Kontamination erfolgt und die Dekontamination entweder auf dem Standort («on site-Verfahren») oder ausserhalb des Standortes («off site-Verfahren») stattfindet.

Während bei den on site-/off site-Techniken der kontaminierte Untergrund ausgehoben, das heisst gelöst und geladen, transportiert und behandelt oder als Abfälle entsorgt werden muss, zielen In-situ-Verfahren darauf ab, den Untergrund in seiner ursprünglichen Lage zu belassen und nur das Entfernen, Zerstören oder Immobilisieren der Schadstoffe im Untergrund und Grundwasser zu bewirken.

Die Entscheidung, ob eine Sanierung mit In-situ- oder mit on site-/off site-Sanierungsverfahren durchgeführt werden soll, ist nicht nur von der Art der Schadstoffe abhängig, sondern mehr noch von der Untergrundstruktur oder der Lage der Kontamination im Untergrund. Letztendlich kann die Entscheidung häufig an Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen festgemacht werden. Obschon grundsätzlich jeder Fall individuell zu bewerten ist, sprechen folgende wesentliche Gründe jeweils für eine In-situ- beziehungsweise eine on site-/off site-Sanierung:

Tab. 1 > Entscheidungsgründe für die In-situ-Sanierung

	Spricht eher für In-situ-Sanierung	on site-/off site-Sanierung
Struktur des Untergrunds	Nichtbindiger Untergrund	Bindiger Untergrund
Lage der Kontamination	Tiefer im Untergrund	oberflächennah
	Gesättigte Zone	Ungesättigte Zone
Art der Kontamination	Schadstoffe flüchtig, gut wasserlöslich, leicht mobilisierbar, biologisch gut abbaubar, chemisch zersetzbar	Schadstoffe nicht flüchtig, schlecht wasserlöslich, schlecht mobilisierbar, schlecht oder nicht biologisch abbaubar, persistent
	LCKW, BTEX, MKW, Phenol, Ammonium, wasserlösliche Schwermetalle und Cyanide	PAK, Cyanide, Pestizide, PCB, PCDD/F, Schwermetalle
Aktuelle Nutzung	Genutztes und bebautes Gelände	Ungenutztes Gelände
Zeitdauer	Sanierungsdauer nicht relevant	Kurzfristige Sanierung erforderlich
Folgenutzung	Wenig sensible Folgenutzung	Sensible Folgenutzung

Vermerk: Jeder Fall ist jedoch individuell zu beurteilen. Gegenstand des vorliegenden Vollzugshilfemoduls sind ausschliesslich die In-situ-Sanierungstechniken.

3.2 Wirkungsmechanismen der In-situ-Sanierung

Ziel ist es, Verfahren zu implementieren, die geeignet sind, die Schadstoffe in ihrer aktuellen Form des Vorkommens im Untergrund zu erreichen und mit geeigneten Wirkungsmechanismen eine Dekontamination oder Sicherung zu erzielen ohne den belasteten Untergrund selber zu bewegen.

Die In-situ-Sanierung setzt an bei

- > den physikalischen, chemischen oder biologischen Eigenschaften der Schadstoffe und
- > dem Vorkommen der Schadstoffe im Untergrund.

Die Verfahren der In-situ-Sanierung beruhen im Wesentlichen auf den folgenden Wirkungsmechanismen (Ausnahmen vgl. »Immobilisierungsverfahren«; Kap. 4.7):

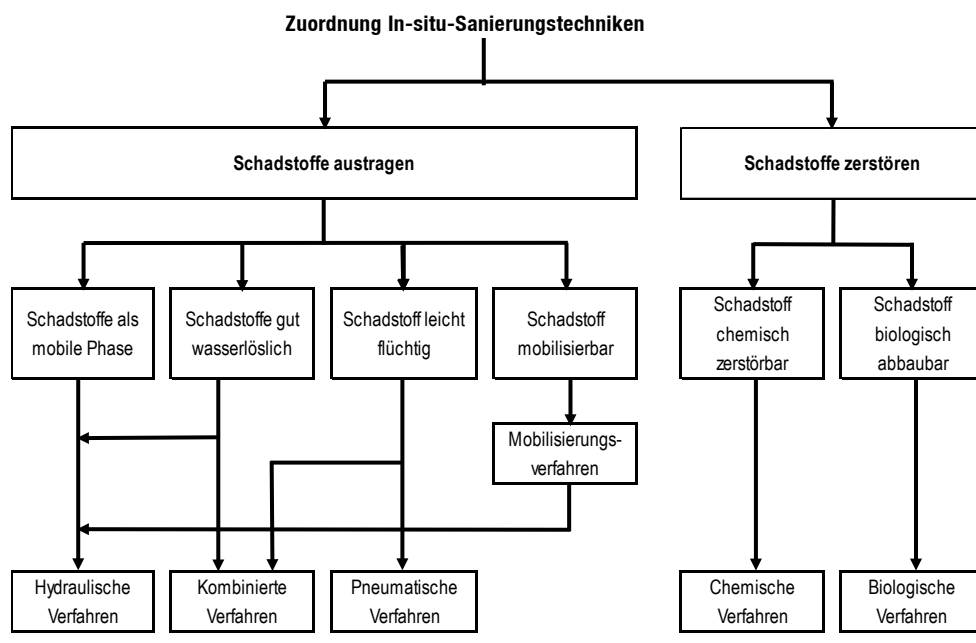
- > Fliessfähigkeit mobiler Phasen bei organischen Schadstoffen;
- > Löslichkeit der Schadstoffe in Wasser und anderen flüssigen Medien;
- > Löslichkeit (Flüchtigkeit) von Schadstoffen in Luft;
- > Mobilisierbarkeit mit chemischen oder physikalischen Verfahren;
- > Biologische Abbaubarkeit von Schadstoffen;
- > Chemische Zerstörbarkeit.

Die Mehrzahl der in der Praxis angewendeten Verfahren der In-situ-Sanierung, aber auch die der teilweise erforderlichen Abreinigung der anfallenden kontaminierten Wasser- oder Abluftströme beruht auf Stoffübergängen zwischen verschiedenen Medien und verwendet dabei die Löslichkeit oder Flüchtigkeit der Schadstoffe.

3.3 Auswahl der geeigneten Sanierungsverfahren

Bezogen auf die Schadstoffeigenschaften eignen sich folgende In-situ-Sanierungsverfahren:

Abb. 2 > Zuordnung der Sanierungsverfahren zu den wesentlichen Stoffeigenschaften



Im Folgenden sollen erste Hinweise zur Auswahl geeigneter Sanierungsoptionen gegeben werden. Ziel ist, es die wesentlichen Überlegungen zur Auswahl von Sanierungsvarianten in Form von Entscheidungsbäumen nachvollziehbar darzustellen. Die dargestellten Entscheidungen führen dabei immer zu In-situ-Sanierungsverfahren. Selbstverständlich stehen neben den In-situ-Sanierungsmaßnahmen auch Verfahren zur Verfügung, die einen Aushub erfordern.

Wesentlich für einen gezielten Einsatz der In-situ-Sanierungsverfahren sind folgende Kenntnisse:

- > Art der Schadstoffe;
- > Kontaminationsquelle im Untergrund;
- > aktuelle Form des Vorkommens der Schadstoffe im Untergrund und
- > physiko-chemische Eigenschaften der Schadstoffe.

Ausgangspunkt der Überlegungen zur Entscheidung über die Anwendbarkeit der Sanierungsverfahren sind grundsätzlich die chemisch-physikalischen Eigenschaften sowie das biologische Abbauverhalten des Schadstoffes im Untergrund, wie sie auch bei der Darstellung der Sanierungsverfahren verwendet werden. Es sind insbesondere die folgenden Eigenschaften:

- > Vorkommen als mobile Phase;
- > Wasserlöslichkeit;
- > Flüchtigkeit;
- > chemische oder physikalische Mobilisierbarkeit;
- > biologische Abbaubarkeit;
- > chemische Zerstörbarkeit (Umwandlung durch Reaktion).

Die häufig bei der Altlastensanierung anzutreffenden Stoffgruppen können hinsichtlich ihres Verhaltens wie folgt charakterisiert werden:

Tab. 2 > Stoffeigenschaften typischer Altlastenschadstoffe

Verhalten Schadstoffgruppe	Vorkommen als mobile Phase	Wasser- löslichkeit	Flüchtigkeit	Mobilisier- barkeit	Biologische Abbaubarkeit	Chemische Zerstörbarkeit
MKW • kurzkettig • langkettig	ja (LNAPL) ja ⁵ (LNAPL)	gut bedingt – schlecht	gut bedingt – schlecht	gut ^{1, 2, 4} bedingt – schlecht ^{1, 2, 4}	sehr gut bedingt – schlecht	sehr gut bedingt – schlecht
BTEX	ja (LNAPL)	sehr gut	gut	gut ^{1, 4}	sehr gut	sehr gut
LHKW	ja (DNAPL)	gut	gut	gut ^{1, 4}	gut – bedingt	sehr gut
PAK • 2- bis 4-Ring • >4-Ring	ja ⁶ ja ⁶	bedingt ⁷ schlecht	gering nein	gut ^{1, 2} bedingt ^{1, 2}	bedingt nein	sehr gut bedingt
Schwermetalle	nein	begrenzt ⁸	nein	gut ³	nein ⁹	nein

¹ in organischen Lösemitteln

² in Tensiden

³ in Säuren

⁴ thermisch

⁵ Mobilität bei langkettigen Molekülen begrenzt

⁶ in der Regel als gemischte Phasen mit MKW («Teerölphasen»)

⁷ nur Naphthalin

⁸ abhängig vom pH-Wert

⁹ aber Bioakkumulierbarkeit

Ergänzend spielen bei der Auswahl der geeigneten Sanierungstechnik weitere Bedingungen eine Rolle, wie die Standorteigenschaften (unter anderem auch die Geologie/Hydrogeologie), die Kosten, die Dauer der Sanierung usw.

Ein weiteres Auswahlkriterium ist der Bereich des Untergrunds, in der sich die Schadstoffe befinden. Neben der ungesättigten und der gesättigten Zone spielt in vielen Sanierungsfällen der Bereich der Grundwasseroberfläche und der Kapillarsaum eine wichtige Rolle.

Weitere Entscheidungskriterien können sich auf Begleitkontaminationen, den Einsatz anderer Sanierungsverfahren, auf den Standort und sonstige Bedingungen beziehen.

Es ergeben sich anhand der dargestellten Entscheidungsbäume keine eindeutigen Hinweise auf die zu wählende Sanierungsverfahren, wenn

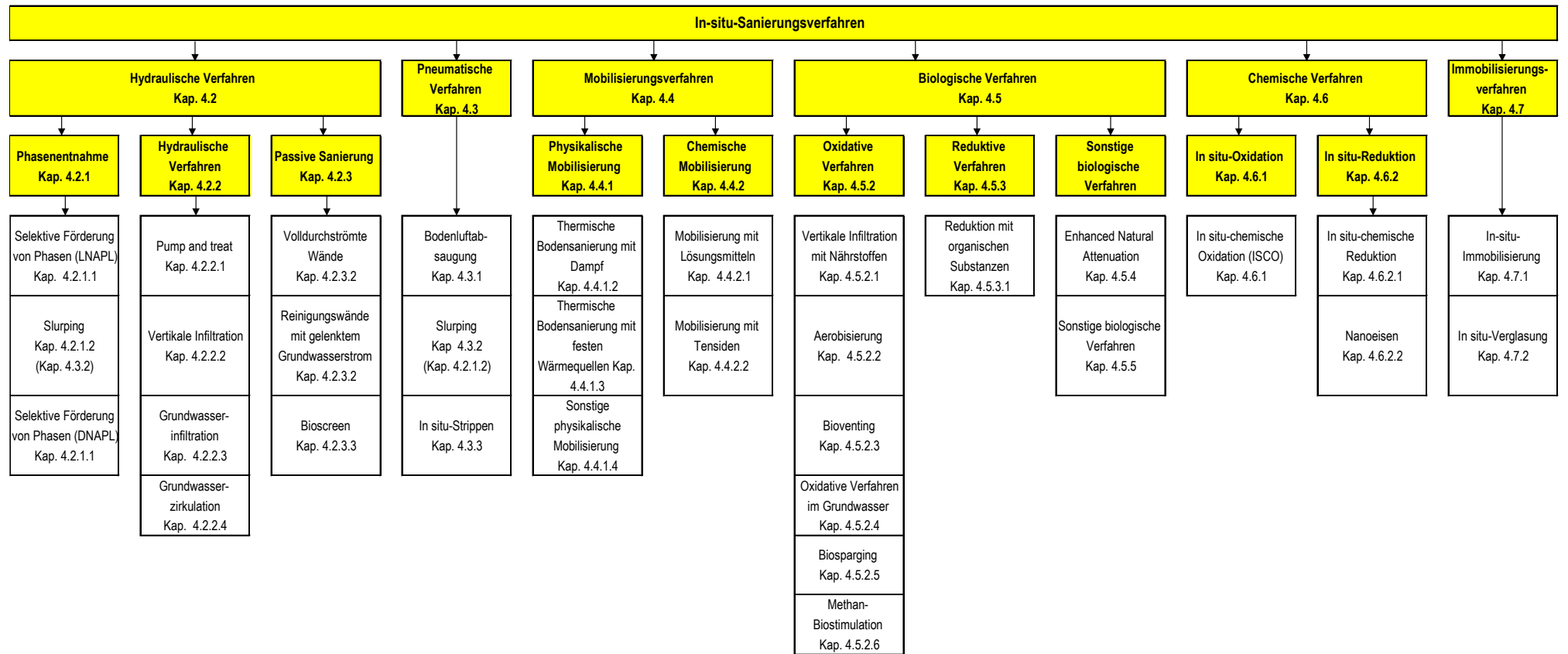
- > die an einem Standort vorkommenden Schadstoffe über mehr als eine der dargestellten Eigenschaften verfügen (zum Beispiel sind BTEX-Aromaten flüchtig, wasserlöslich und biologisch abbaubar);
- > die Stoffeigenschaften die genannten Eigenschaften nur bedingt erfüllen (zum Beispiel sind die PAK nur teilweise gut wasserlöslich) oder
- > mehrere Schadstoffe mit unterschiedlichen Stoffeigenschaften am Standort vorhanden sind.

In derartigen Fällen sind mehrere Optionen möglich, über die dann im Rahmen weiterer Kriterien entschieden werden muss.

3.4 **Überblick über die einzelnen In-situ-Sanierungsverfahren**

Entsprechend der unter Kapitel 3.3 dargestellten Einteilung können im Rahmen dieses Vollzugshilfemoduls wie folgt detailliert gegliedert werden:

Abb. 3 > Übersicht über die Verfahren der In-situ-Sanierung



Zu einer ersten Einschätzung der Eignung dieser Verfahren zur Sanierung häufiger Altlastenschadstoffe kann die folgende Übersicht dienen:

Tab. 3 > Eignung der In-situ-Verfahren für ausgewählte Schadstoffe

Verfahren	Schadstoff	MKW		BTEX	LHKW	PAK		Schwermetalle
		kurzkettig	langkettig			2- bis 4-Ring	>4-Ring	
+ gut geeignet, 0 bedingt geeignet, - nicht geeignet								
Phasenentnahme	Selektive Förderung (LNAPL)	+	+	+	-	+	0	-
	Selektive Förderung (DNAPL)	-	-	-	+	+	+	-
	Slurping	+	0	+	0	0	-	-
Hydraulische Verfahren	Pump and treat	+	0	+	+	+	0	0
	Vertikale Infiltration	+	0	+	+	+	0	0
	Grundwasserinfiltration	+	0	+	+	+	0	0
	Grundwasserzirkulation	+	0	+	+	+	0	0
Passive hydraulische Verfahren	Permeable reaktive Wände	+	-	+	+	+	-	0
	Sonstige Verfahren (Bioscreen)	+	0	+	0	0	-	-
Pneumatische Verfahren	Bodenluftabsaugung	+	0	+	+	+	-	-
	Slurping	+	0	+	0	0	-	-
	In-situ-Strippen	+	0	+	+	+	-	-
Mobilisierungsverfahren	Thermische Sanierung des Untergrunds mit Dampf	+	+	+	+	+	+	-
	Thermische Sanierung des Untergrunds mit festen Wärmequellen	+	+	+	+	+	+	-
	Sonstige physikalische Mobilisierung	+	0	+	+	+	0	-
	Alkoholspülung	+	+	+	+	+	0	+
	Tensidspülung	+	+	+	+	+	0	-
Biologische Verfahren	Vertikale Infiltration mit Nährstoffen	+	0	+	+	+	0	-
	Aerobisierung	+	0	+	0	0	-	-
	Bioventing	+	0	+	0	0	-	-
	Sonstige biologische Verfahren	-	-	-	-	-	-	0
	Oxidative Verfahren im Grundwasser	+	0	+	0	0	-	-
	Biosparging	+	0	+	0	0	-	-
	Methan-Biostimulation	+	0	+	+	+	0	-
	Reduktion mit organischen Substanzen	-	-	-	+	-	-	+
ENA	+	0	+	+	+	0	-	

Verfahren	Schadstoff	MKW		BTEX	LHKW	PAK		Schwermetalle
		kurzkettig	langkettig			2- bis 4-Ring	>4-Ring	
Chemische Verfahren	ISCO	+	+	+	+	+	0	-
	ISCR	-	-	-	+	-	-	-
	Nanoeisen	-	-	-	+	-	-	-
Immobilisierungsverfahren	In-situ-Immobilisierung	0	0	0	0	+	+	+
	In-situ-Verglasung	+	+	+	+	+	+	+

3.5 Verfahrenswechsel

Die Erfahrung aus der In-situ-Sanierung lehrt, dass die Sanierungsziele nicht immer mit einem einzigen Verfahrensschritt erreicht werden können. Dieses trifft vor allem dann zu, wenn z. B. wegen der Nutzung des Grundwassers Sanierungsziele mit sehr niedrigen Schadstoffkonzentrationen vorgegeben sind.

Insoweit ist besonders bei Altlasten mit hohen Ausgangsbelastungen und niedrigen Sanierungszielwerten ein Wechsel des Sanierungsverfahrens häufig nicht zu umgehen. Soweit voraussehbar sollte bereits im Rahmen der Variantenstudie diesem Umstand betreffend Sanierungsdauer, Sanierungskosten und Erfolgsaussichten Rechnung getragen werden. Ein solcher Verfahrenswechsel muss dabei nicht als Fehler bei der Verfahrensauswahl oder Versagen des zuerst eingesetzten Sanierungsverfahrens angesehen werden, sondern bedeutet eher eine Optimierung des Sanierungskonzeptes im laufenden Sanierungsbetrieb.

Hintergrund des bei einer Reihe von Standorten erforderlichen Verfahrenswechsels sind die unterschiedlichen Arten des Schadstoffvorkommens im Untergrund. Bei den organischen Lösemitteln z. B. kann der Schadstoff im Untergrund in Phasenform (mobile oder residuale Phase im Porenraum), in gelöster Form in der Porenluft oder im Grundwasser oder am Korngerüst adsorbiert vorkommen. Der Verfahrenswechsel reagiert im laufenden Sanierungsverfahren darauf, dass sich die Anteile der Schadstoffe in den genannten Quellbereichen verändern (nach Abschluss der Entnahme von Phasen im Porenraum können z. B. noch gelöste oder adsorbierte Schadstoffe vorhanden sein).

Oft ist es sinnvoll, in einem ersten Verfahrensschritt die Sanierungsbemühungen auf die Reduzierung der Schadstoffmasse zu legen. Dabei stehen z. B. einfache und schnell zu realisierende Verfahren wie die Phasenentnahme im Vordergrund. In diesem Zusammenhang haben sich auch oft gerade die klassischen Sanierungsverfahren wie das Pump and Treat oder die Porenluftsanierung bewährt, die besonders dann auch wirtschaftlich vorteilhaft sind, wenn hohe Frachten aus dem Untergrund entnommen werden können. Sobald diese Verfahren aber nicht mehr effizient sind, die Sanierungsziele aber noch nicht erreicht wurden, sollte über den Wechsel auf ein anderes Sanierungsverfahren nachgedacht werden.

3.6 Sanierungsdauer

Die Sanierungsdauer bei In-situ-Massnahmen kann meist nur approximativ bestimmt werden. Sie ist abhängig vom jeweiligen Verfahren, vor allem aber auch von den geochemischen, physikalischen oder biologischen Randbedingungen.

Eine der wesentlichen Einflussgrössen ist die Menge der Schadstoffe im Untergrund und der Grad ihrer Verfügbarkeit für das gewählte Sanierungsverfahren. Da die Sanierungsverfahren meistens über die Stoffübergänge von einem Medium (Untergrund, Porenluft, Grundwasser) in ein anderes wirken, ist die Sanierungsdauer bei solchen Verfahren einerseits abhängig von der Rate dieses Stoffübergangs und andererseits von der im Ausgangsmedium vorhandenen Schadstoffmenge.

Da die Austragsraten sich mit sinkenden Konzentrationen verringern, ist die Sanierungsdauer auch in Abhängigkeit zu den zu erreichenden Sanierungszielwerten zu sehen. Je niedriger diese Werte angesetzt werden, umso länger dauert die Sanierung.

Eine realistische Einschätzung des Sanierungszeitraums erfordert eine umfassende Kenntnis über Menge und Verteilung der Schadstoffe auf dem zu sanierenden Standort, die nur durch eine sorgfältige Vorerkundung des Standortes zu gewinnen ist. Dabei ist es nicht ausreichend die Konzentration der Schadstoffe in den Medien Grundwasser und Porenluft zu bestimmen, sondern es ist die Schadstoffmenge in der jeweiligen Art des Vorkommens (adsorbiert oder in residualer oder funikulärer Phase) zu definieren. Liegt eine zusammenhängende Ölphase (funikuläre Verteilung) vor, ist ein Fließen des Öls möglich. Sind die Öltropfen vereinzelt (residuale Verteilung), kann sich das Öl als Phase nicht mehr bewegen.

3.7 Kosten

3.7.1 Kostenbeeinflussende Grössen

Bei In-situ-Sanierungen beeinflussen folgende Grössen die Kosten:

- > **Art der Kontamination:** In Abhängigkeit der zu sanierenden Einzelstoffe oder Stoffgemische ergeben sich unterschiedliche Sanierungsverfahren.
- > **Schadstoffkonzentration:** Hohe Konzentrationen erfordern ggf. mehrstufige Aufbereitungsverfahren.
- > **Volumenstrom des zu sanierenden Mediums:** Für grosse zu behandelnde Medienmengen (Luft, Wasser) sind grösser dimensionierte Anlagen erforderlich.
- > **Zu sanierende Schadstoffmenge im Untergrund** (Grösse der Schadstoffquelle): Hierdurch ändert sich vor allem die Zeitdauer der Sanierung.
- > **Zielwert der Sanierung:** Wegen des asymptotischen Abklingens der Konzentration bei der Sanierung ist die Sanierungsdauer erheblich vom zu erreichenden Sanierungszielwert abhängig.

- > **Umfang der erforderlichen Infrastruktur:** Hierzu gehört z. B. der Aufwand für die Versorgung und die Fundation der Sanierungsanlagen, der Aufwand an Sicherungs- und Nachbarschaftsschutzmassnahmen (Zaun, ggf. Bewachung) usw.

3.7.2 Kostenstrukturen

Allgemeingültige Kostenangaben für In-situ-Sanierungsmassnahmen sind generell schwierig, da sie von einer sehr grossen Anzahl von Einflussgrössen abhängig sind.

Generell wird zwischen Investitions- und Betriebskosten unterschieden. Die **Investitionskosten** ergeben sich aus den Aufwendungen für:

- > Herrichten des Geländes;
- > Errichten von Brunnen und Messpegeln;
- > Verlegen von Rohrleitungen;
- > Errichten der Sanierungsanlagen selbst.

Die **Betriebskosten** ergeben sich aus dem Aufwand für:

- > Personal für den Anlagebetrieb;
- > Energieverbrauch der Anlagen;
- > Hilfsstoffverbrauch der Anlagen;
- > Entsorgung der Rückstände;
- > Wartung und Reparatur der Anlagen;
- > Miete/Leasing für die Sanierungsanlagen;
- > gutachterliche Überwachung des ordnungsgemässen Anlagenbetriebes.

3.7.3 Beauftragung von Sanierungsverfahren

Die Sanierungsanlagen werden häufig durch die Sanierungspflichtigen nicht gekauft, sondern gemietet, beziehungsweise geleast oder die vollständige Sanierungsdurchführung wird pauschal als Dienstleistung vergeben.

Damit können sich unterschiedliche Kostenstrukturen ergeben (4 Varianten):

1. Kauf der Anlagen: Betrieb durch den Auftraggeber (hohe Investitionskosten, geringe Betriebskosten);
2. Anmietung der Anlage; Betrieb durch den Auftragnehmer (geringe Investitionskosten, hohe Miet- und Betriebskosten);
3. Dienstleistung «Erreichen des Sanierungszieles»: Abrechnung zum Festpreis (hohe Investitionssicherheit);
4. Wie bei 3., aber Abrechnung nach Kubikmetern gereinigten Untergrunds (geringe Investitionssicherheit).

Von den oben genannten Varianten, die nur grundsätzliche Typen darstellen und in der Praxis eine Reihe von Abwandlungen erfahren können, wird die 2. Variante in der Praxis am häufigsten angewendet. Die 1. Variante bietet sich bei sehr grossen und langlaufenden Sanierungsmassnahmen an. Die 3. Variante überträgt die Risiken der Unge-

naigkeiten bei der Beschreibung der Kontaminationssituation auf den Auftragnehmer und sollte nur bei kleinen und überschaubaren Sanierungsfällen angewandt werden.

Sicherheit bei der Variantenauswahl ergibt sich aus einer Kostenvergleichsrechnung zum Beispiel nach der Barwertmethode, bei der die Kosten unterschiedlicher Sanierungsvarianten für vergleichbare Betrachtungszeiträume finanzmathematisch in Barwerte umgerechnet und damit direkt vergleichbar werden.

4 > Beschreibung der In-situ-Sanierungsverfahren

4.1 Systematik der Verfahren

In diesem Vollzugshilfemodul wird bei der Darstellung der Verfahren unterschieden zwischen eigentlichen **In-situ-Verfahren**, die ihre Wirkung am Ort des Schadstoffes entfalten und den dazu ggf. notwendigen **Aufbereitungsverfahren** für Wasser und Luft. Die In-situ-Sanierungsverfahren lassen sich grundsätzlich nach den unterschiedlichen Wirkungsweisen der Verfahren in sechs Hauptgruppen unterscheiden.

Hydraulische Verfahren (vgl. Kap. 4.2)

> beruhen auf der Löslichkeit der Schadstoffe in verschiedenen Medien und auf ihren Fließfähigkeiten.

Pneumatische Verfahren (vgl. Kap. 4.3)

> beruhen auf der Flüchtigkeit der Schadstoffe.

Mobilisierungsverfahren (vgl. Kap. 4.4)

> nutzen chemische Substanzen oder physikalische Verfahren um die Löslichkeit von Schadstoffen zu verbessern.

Biologische Verfahren (vgl. Kap. 4.5)

> beruhen auf der biologischen Abbaubarkeit der Stoffe.

Chemische Verfahren (vgl. Kap. 4.6)

> zerstören Schadstoffe durch Oxidation oder Reduktion oder verändern ihre Bindungsformen.

Immobilisierungsverfahren (vgl. Kap. 4.7)

> fixieren die Schadstoffe durch z. B. Fällung oder Verglasung

Vor allem bei den hydraulischen Verfahren wird zusätzlich zwischen aktiven und passiven Sanierungsverfahren unterschieden:

Aktive Sanierungsverfahren: Verfahren, bei denen durch fortwährenden oder intermittierenden Eintrag von Energie die Schadstoffe behandelt werden (z. B. durch den Betrieb von Pumpen für die Förderung von Porenluft oder Grundwasser).

Passive Sanierungsverfahren: Verfahren, bei denen die zu reinigenden Medien (vor allem Grundwasser) nur durch das natürliche Strömungssystem und ohne Zugabe von Fremdenergie der Dekontamination zugeführt werden.

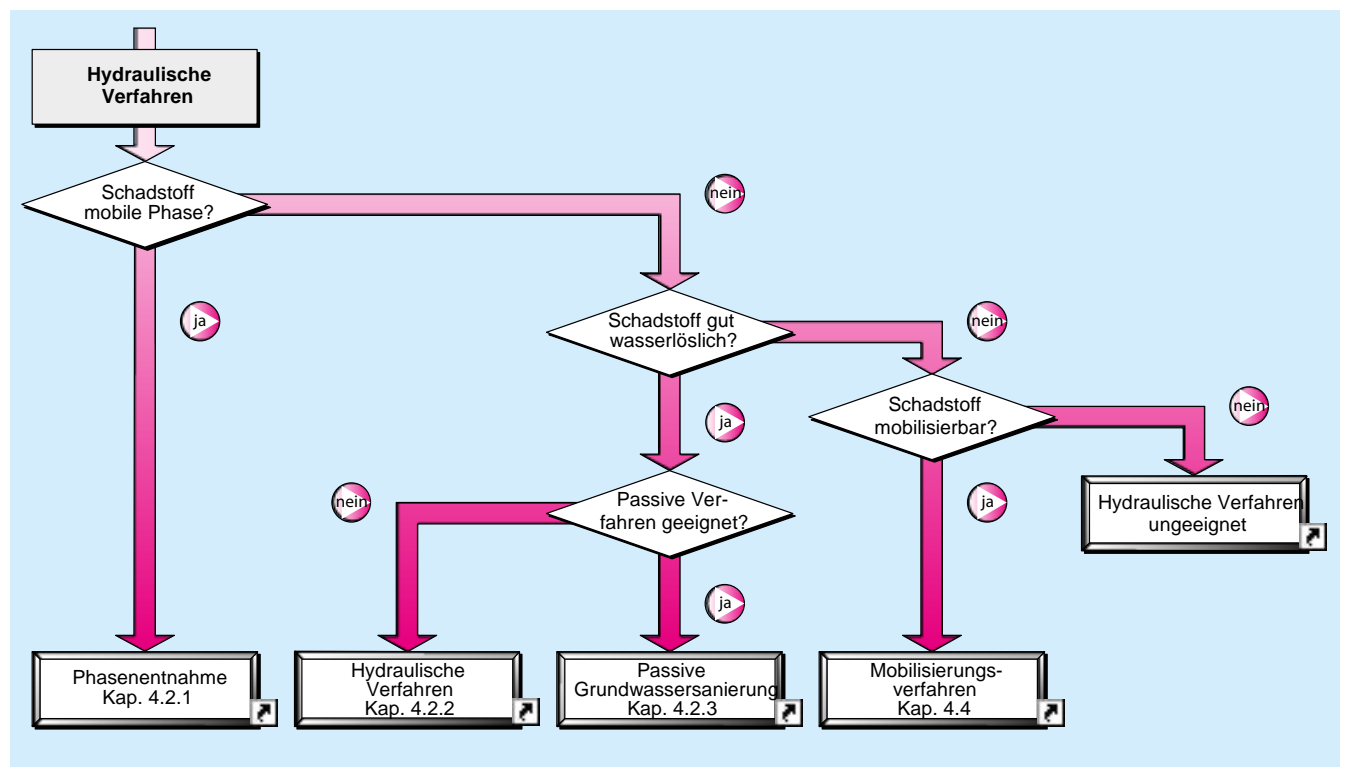
Zusätzlich gilt es auch die im Rahmen der In-situ-Sanierungen die ggf. notwendigen **Aufbereitungsverfahren** für Wasser und Luft zu berücksichtigen.

Aufbereitungsverfahren (vgl. Kap. 4.8)

4.2 Hydraulische Verfahren

Bei den hydraulischen Verfahren werden die Eigenschaften der im Untergrund vorkommenden oder in den Untergrund eingebrachten fluiden Phasen genutzt. Die einzelnen Verfahren können entsprechend dieser Eigenschaften in der folgenden Art zugeordnet werden:

Abb. 4 > Strukturierung der hydraulischen Verfahren

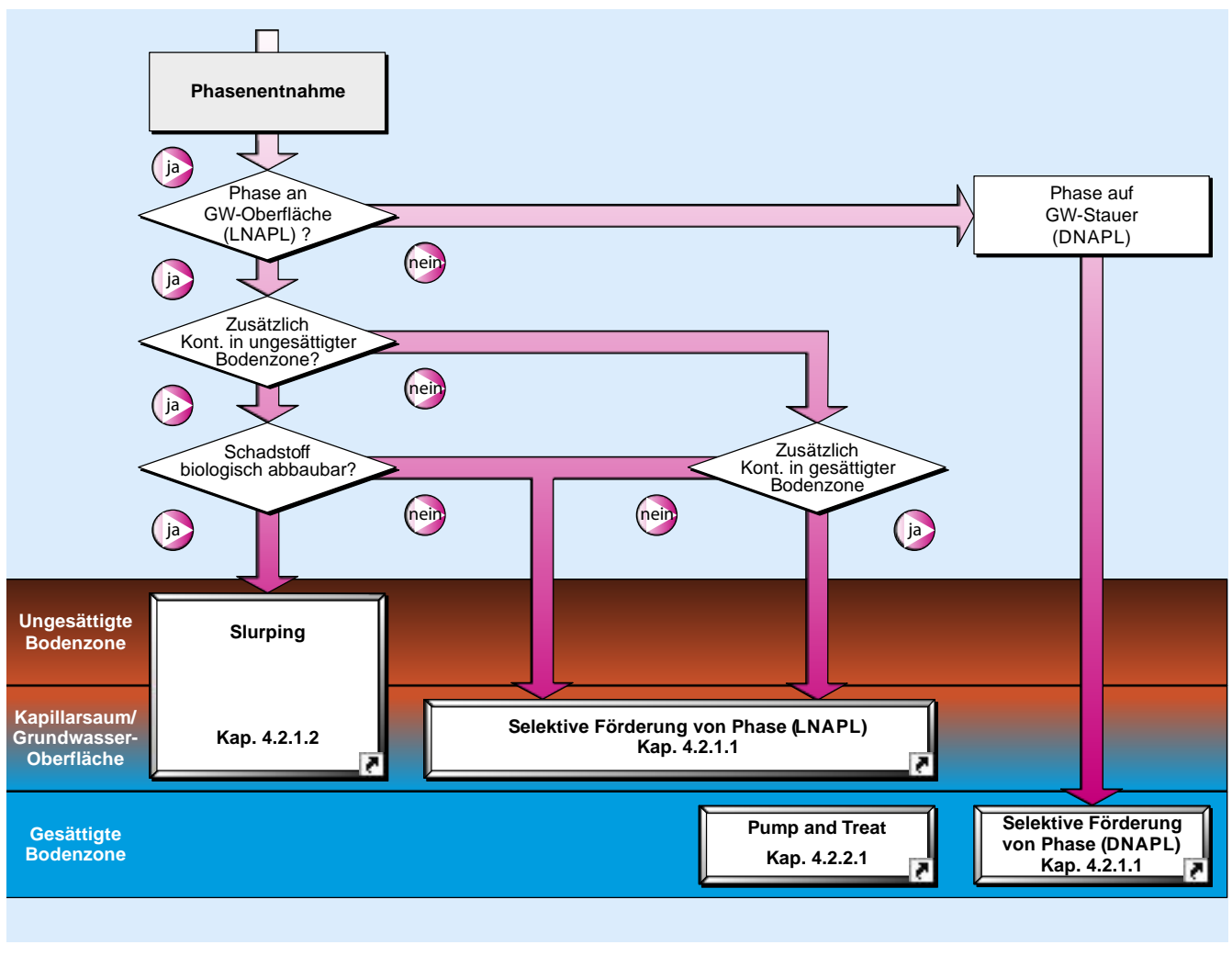


Ziel ist es, Schadstoffe aus dem Untergrund aufzunehmen und diese mit dem Fluidstrom aus dem Untergrund zum Beispiel durch Abpumpen zu entfernen. Voraussetzung der Sanierbarkeit sind die Stoffeigenschaften des zu sanierenden Schadstoffs (hier: Löslichkeit, Pumpbarkeit, Mobilisierbarkeit) und die Eigenschaften des Untergrundes (hier: gute Durchlässigkeit für Fluide).

4.2.1 Phasentnahme

Sofern die Schadstoffe als mobile Phasen vorliegen, ergeben sich folgende Handlungsoptionen:

Abb. 5 > Entscheidungsbaum für die Verfahren zur Phasentnahme



Selektive Förderung von Phasen: Sanierungsverfahren für Phasen, die leichter (LNAPL) bzw. schwerer sind als Wasser (DNAPL).

Slurping: Absaugung von Leichtphasen mit Unterstützung durch Unterdruck.

Die direkte Entnahme von Schadstoffphasen als nicht wässrige Fluidsysteme, wie sie bei Schadensfällen mit organischen Schadstoffen vorkommen, ist ein äusserst effizientes Sanierungsverfahren, das sich im Vergleich zu den sonstigen hydraulischen, pneumatischen oder biologischen Sanierungsverfahren immer als wirtschaftlicher erweist, da der Schadstoff konzentriert und in kurzer Zeit aus dem Untergrund entfernt wird.

4.2.1.1 Selektive Förderung von Phasen (LNAPL und DNAPL)

Zu unterscheiden sind dabei Sanierungsverfahren für Phasen, die leichter sind als Wasser (LNAPL), wie zum Beispiel Mineralöle, und solchen die schwerer sind als Wasser (DNAPL), wie zum Beispiel LCKW-Phasen.

Die **Extraktion von leichten Phasen** (LNAPL = Light Non-Aqueous Phase Liquids) kann entweder durch Pumpensysteme erfolgen, die sehr genau auf die unterschiedlichen Grundwasserspiegel oder Phasenoberflächen reagieren müssen (zum Beispiel schwimmende Entnahmesysteme), durch den Einsatz oliophiler Filter, die nur die Phase in das Pumpensystem eintreten lassen, oder aber durch Skimmer. Diese sind Einrichtungen, die in das Grundwasser und die aufschwimmende Phase eintauchen und beim Herausziehen das anhaftende Öl mit sich nehmen. Durch umlaufende Schläuche, Stahlbänder oder textile Kordeln, die on site entölt werden, wird ein kontinuierlicher Sanierungsprozess initiiert.

Eine Variante kann in der Unterstützung der Phasentnahme durch Grundwasserentnahme in der Nähe der Grundwasseroberfläche und der gleichzeitigen Absaugung von leichten, auf dem Grundwasserspiegel aufschwimmenden Schadstoffphasen (LNAPL) liegen. Dabei erfolgt parallel in einem Brunnen die Förderung von kontaminiertem Wasser («Pump and Treat»-Verfahren) und die Entnahme von Phasen.

Die **Schwerphasentnahme** (DNAPL = Dense Non-Aqueous Phase Liquids) erfolgt z. B. durch langsamlaufende, in die Phase eintauchende Pumpen, die auf die häufig sehr aggressiven Phasenbestandteile ausgelegt sein müssen.

Phasentnahmen können grundsätzlich durch die parallele Entnahme von Grundwasser unterstützt werden, womit auf Grund der Veränderung der Druckverhältnisse der Zufluss der Phase zum Sanierungsbrunnen erhöht wird.

4.2.1.2 Slurping

Bei der Absaugung von Leichtphasen (LNAPL) ist die Unterstützung durch Unterdruck möglich, wie dieses beim Slurping angewendet wird.

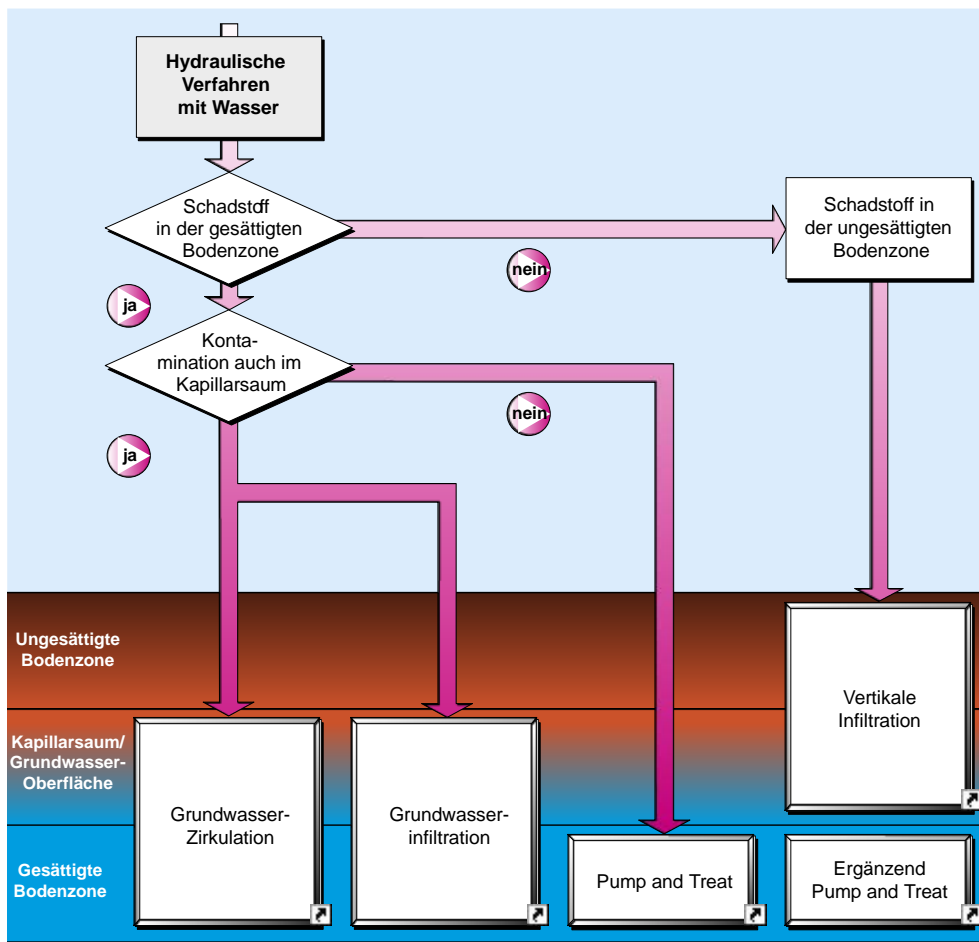
Slurping kombiniert das Absaugen von Leichtphasen mit einem Bioventing (vgl. Kap. 4.5.2.3), bei dem parallel eine Belüftung der ungesättigten Zone zur Stimulierung der biologischen Abbauprozesse stattfindet. Es kann wegen der gleichzeitigen Behandlung von Leichtphasen und Porenluft auch als Verfahren der Mehrphasen-Extraktion angesprochen werden.

4.2.2 **Hydraulische Verfahren**

Diese Grundwassersanierungsverfahren verwenden Wasser als Spül- bzw. als Transportmedium.

Die Verfahren der aktiven Grundwassersanierung und die zugehörigen Verfahren mit Einsatz von Wasser als Spülmedium unterscheiden sich vor allem durch die Lage des zu sanierenden Horizontes in Bezug auf den Grundwasserspiegel. Eine besondere Bedeutung hat dabei die Berücksichtigung von Schadstoffen im Bereich des Kapillarsaums.

Abb. 6 > Entscheidungsbaum für die hydraulischen Sanierungsverfahren mit Wasser



Pump and Treat

Das am häufigsten eingesetzte hydraulische Verfahren. Grundwassersanierung mittels der Förderung und Behandlung des kontaminierten Wassers.

Vertikale Infiltration

Verfahren für die ungesättigte Zone bei dem das Wasser als Spülmedium in die ungesättigte Zone eingebracht und das kontaminierte Sickerwasser über eine Pump and Treat-Massnahme erfasst und gereinigt wird.

Grundwasserinfiltration

Eine Variante der «Pump and Treat»-Verfahren, die technisch ähnlich wie bei der Vorgehensweise in der ungesättigten Zone ausgeführt wird.

Grundwasserzirkulation

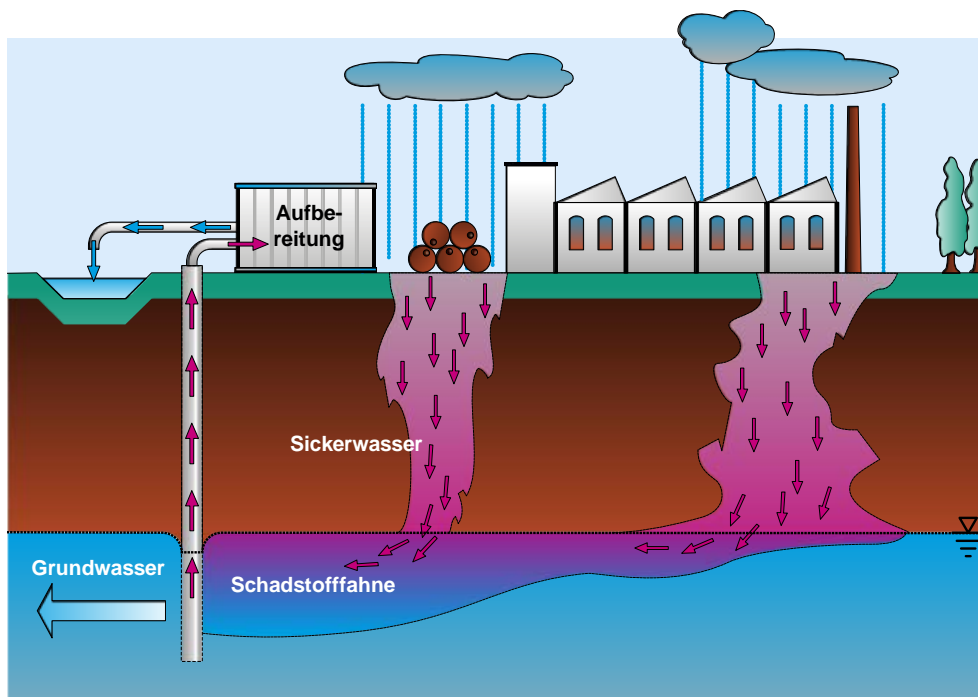
Verfahren, bei dem Grundwasserentnahmen und Infiltration innerhalb eines Brunnens realisiert werden.

4.2.2.1 Pump and Treat

Das am häufigsten eingesetzte hydraulische Verfahren ist die Grundwassersanierung mittels der Förderung und Behandlung des kontaminierten Wassers, in der Praxis auch mit dem englischen Begriff «Pump and Treat» bezeichnet.

Dabei wird ähnlich wie bei den pneumatischen Massnahmen der Schadstoffaustrag durch Entnahme des kontaminierten Wassers aus dem Aquifer erwirkt. Dabei ist Voraussetzung, dass die Schadstoffe in Wasser löslich sind.

Abb. 7 > Prinzip der Grundwassersanierung durch «Pump and Treat»



Zur Grundwassersanierung durch «Pump and Treat» gehört, wie es schon der Name wiedergibt, eine Aufbereitung des abgepumpten belasteten Wassers on site. Hierfür werden die unter «Wasseraufbereitung» dargestellten Verfahren (Kap. 4.8.1) verwendet.

Die «Pump- and Treat»-Verfahren sind bedeutungsvoll, weil sich mit ihnen häufig ohne allzu grossen technischen Aufwand eine Dekontamination der gesättigten Zone realisieren und wegen der häufig guten Wasserdurchlässigkeit der Böden gute Reinigungserfolge erzielen lassen. Im Bereich des Kapillarsaumes bestehen diesbezüglich jedoch Vorbehalte. Für eine ausreichende Schadstoffreduktion bis zum Erreichen der Sanierungszielwerte sind häufig sehr lange Zeiträume der Behandlung erforderlich, die im Laufe der Sanierung öfters einen Verfahrenswechsel zu einem anderen In-situ-Sanierungsverfahren sinnvoll erscheinen lassen.

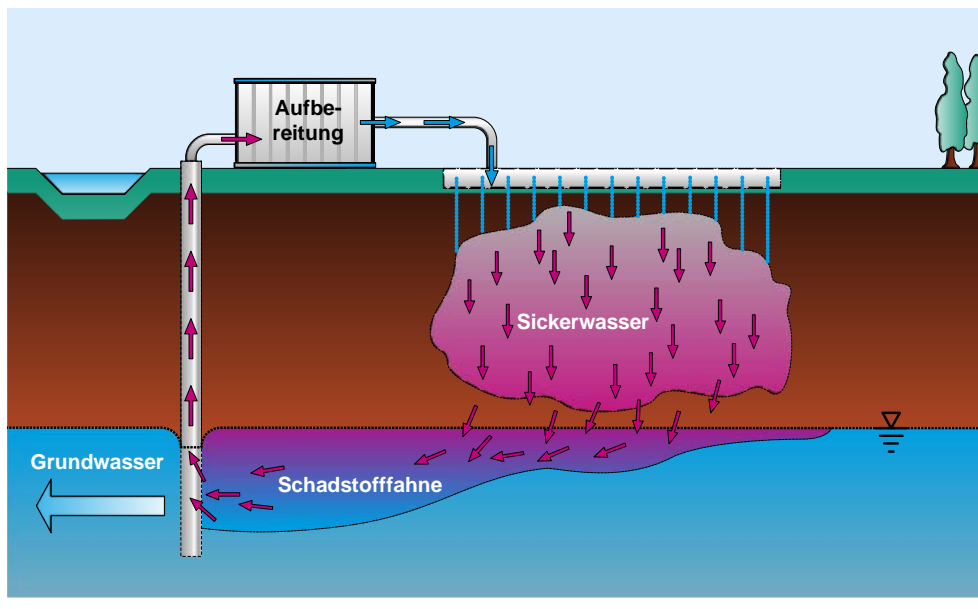
4.2.2.2 Vertikale Infiltration

Hydraulische Verfahren für die ungesättigte Zone können in der Form eingesetzt werden, dass Wasser als Spülmedium in die ungesättigte Zone eingebracht wird (durch Brunnen, Versickerungsgräben oder Verrieselung).

Bei diesem als Vertikale Infiltration bezeichneten Verfahren werden die Schadstoffe der ungesättigten Zone im versickernden Wasser gelöst und mit diesem in den Aquifer transportiert. Dort müssen sie durch eine begleitende Grundwasserentnahme abgepumpt werden. Das belastete Wasser muss anschliessend on site aufbereitet werden (vgl. Wasseraufbereitung; Kap. 4.8.1). Die vertikale Infiltration wirkt sowohl auf die ungesättigte Zone als auch auf den Kapillarsaum.

Die vertikale Infiltration dient parallel unter anderem auch dazu, in der ungesättigten Zone die erforderliche Feuchtigkeit sowie Nährstoffe einzubringen und die Milieubedingungen so zu beeinflussen, dass ein mikrobiologischer In-situ-Abbau stattfindet (vgl. Kap. 4.5.2.1).

Abb. 8 > Prinzip der vertikalen Infiltration



4.2.2.3 Grundwasserinfiltration

Eine Variante der «Pump and Treat»-Verfahren ist die Grundwasserinfiltration, die technisch ähnlich wie bei der Vorgehensweise in der ungesättigten Zone ausgeführt wird (vgl. «Vertikale Infiltration»).

Sie hat eine besondere Bedeutung durch die Anhebung des Grundwasserspiegels, mit der gerade Kontaminationen im Bereich der Grundwasseroberfläche bzw. des Kapillarsaumes, wie sie häufig bei Mineralölkontaminationen auftreten, durch die Grundwasserströmung erreicht und damit sanierbar gemacht werden.

4.2.2.4 Grundwasserzirkulation

Die Grundwasserzirkulation ist ein Verfahren, bei dem Grundwasserentnahmen und Infiltration innerhalb eines Brunnens (Grundwasserzirkulationsbrunnen, GZB) realisiert werden.

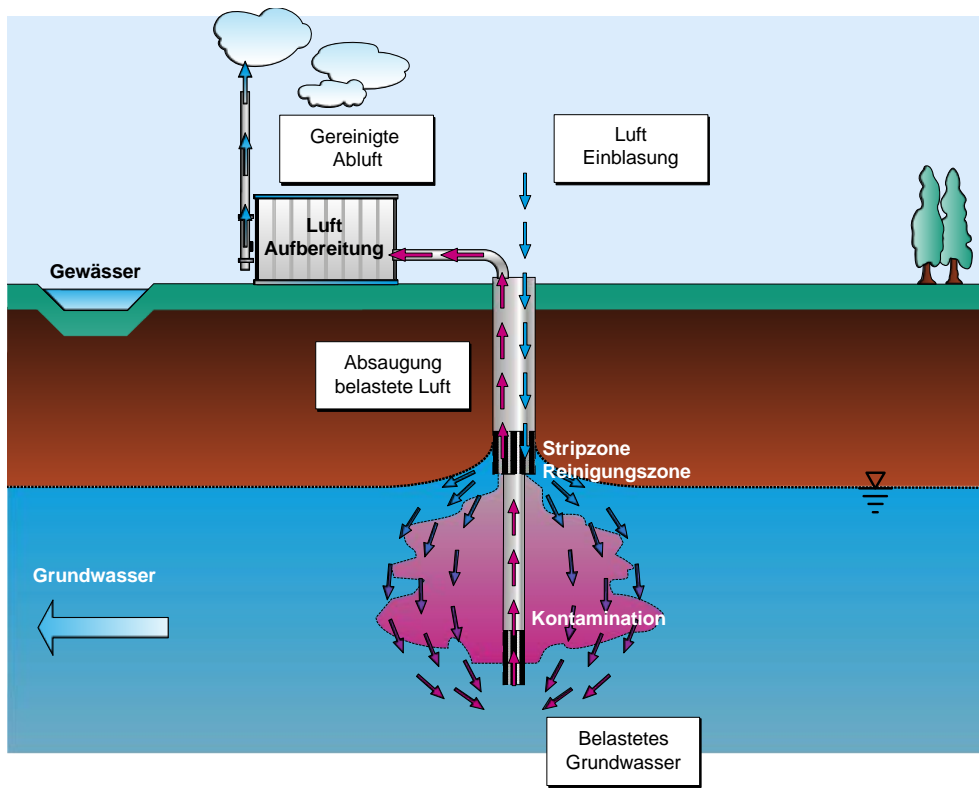
Es entsteht eine überwiegend vertikale Strömung zwischen der in der Regel unten angeordneten Entnahme des Grundwassers und der oben angeordneten Grundwasser- versickerung, die konzentrisch um den Brunnen herum zu einer intensiven vertikalen Durchströmung des brunnennahen Bereiches führt.

Bei den verschiedenen Varianten der Grundwasserzirkulation werden einzelne Verfahrensvorteile standortbezogen kombiniert, wie etwa die Abreinigung des Kapillarsaumes durch die Grundwasserspiegelanhebung in Folge der Versickerung. Die hydraulische Massnahme kann auch mit dem Einblasen von Luft innerhalb des Brunnens kombiniert werden, mit dem einerseits die Energie für die Zirkulation eingebracht wird und andererseits flüchtige Schadstoffe simultan aus dem Grundwasser ausgetragen werden

(Unterdruck-Verdampferbrunnen, UVB). Zur Massnahme gehören auch das Absaugen der belasteten Luft und deren on site-Aufbereitung.

Kombiniert werden kann das Verfahren auch mit biologisch wirksame Reaktoren im Brunnen und durch die parallele Absaugung der Porenluft über den Brunnen.

Abb. 9 > Prinzip der Grundwasserzirkulation



Kritisch wird häufig gesehen, dass eine Charakterisierung der sich aus der natürlichen Grundwasserströmung und der überlagernden vertikalen Strömung ergebenden resultierenden kreisförmigen Strömung in der Praxis nicht möglich ist und damit eine Überwachung der Wirkungsweise der Grundwasserzirkulation erschwert wird. Zu beachten sind auch die Änderungen der Redoxverhältnisse im Aquifer und die damit verbundenen Gefahren des Ausfällens von Stoffen.

4.2.3 Passive Grundwassersanierung

4.2.3.1 Kriterien für die Anwendung passiver Verfahren

Bei der Anwendbarkeit der Verfahren zur Grundwassersanierung ist zwischen den aktiven und den passiven Techniken, zum Beispiel den durchströmten Reinigungswänden, zu unterscheiden.

Im Gegensatz zu den aktiven Sanierungsverfahren wird bei den passiven Sanierungsverfahren keine externe Energie zur Sanierung eingesetzt. Bekannt sind passive Sanierungsverfahren für den Grundwasserbereich, wobei die natürlichen Strömungsverhältnisse des Grundwassers verwendet werden, um eine Kontamination in einen künstlich hergestellten Reaktionsraum im Untergrund zu transportieren und dort Abbau- oder Rückhalteprozesse zu initiieren.

Die Frage nach der Eignung passiver Verfahren ist äusserst komplex und erfordert ein hohes Mass an technischem Sachverstand und genaueste Kenntnisse zum Ausbreitungsverhalten der Schadstoffe in der gesättigten Zone. Hier können nur Kriterien angegeben werden, die in erster Näherung für oder gegen die Anwendung der aktiven oder passiven Verfahrensweisen sprechen.

Tab. 4 > Kriterien für die Eignung und Machbarkeit passiver Grundwassersanierungsverfahren

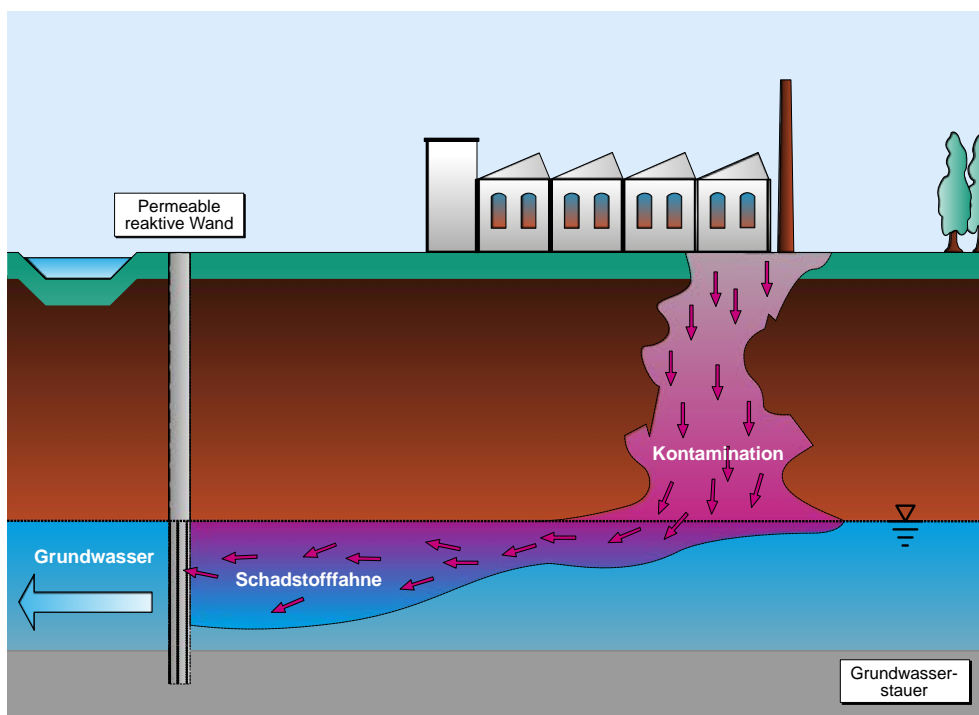
	Spricht eher für Passive Grundwassersanierung	Andere Sanierungstechniken (u.a. aktive Grundwassersanierung)
Aquifer	Homogener Aquifer; Porengrundwasserleiter	Heterogener oder anisotroper Aquifer
	Flacher Aquifer	Tiefer Aquifer
	Homogener und flächenhafter Grundwasserstauer vorhanden	Homogener und flächenhafter Grundwasserstauer nicht vorhanden
Grundwasserhydraulik	Konstante Grundwasserfliessrichtung	Wechselnde Grundwasserfliessrichtungen
	Geringe Fliessgeschwindigkeiten	Hohe Fliessgeschwindigkeiten
Kontaminationsart	Monoschaden oder alle Kontaminationen sind einem Typ von reaktivem Material zugänglich	Komplexe Mischkontamination; Einsatz verschiedener reaktiver Materialien erforderlich
Quelle der Kontamination	Geringe oder endende Schadstofffreisetzung; Quelle saniert	Grosse und fortdauernde Schadstofffreisetzung; Quelle nicht saniert
Kontaminationsfahne	Gut bestimmt; hydraulisch abgegrenzt	Breite und tiefe Fahne; nicht abgegrenzte Fahne
Schadstofffracht/ -konzentration	Geringe Fracht/Konzentration	Hohe Fracht/Konzentration
Behandelbarkeit der Schadstoffe	Positive Erfahrungen mit reaktiven Materialien liegen vor	Positive Erfahrungen mit reaktiven Materialien liegen nicht vor
Gefahrenpotenzial durch Neben- und Abbauprodukte	Gefahrenpotential niedriger als bei Ausgangsstoffen	Gefahrenpotential gleich hoch oder höher als bei Ausgangsstoffen
Bautechnik	Platz und Zugänglichkeit für reaktives Wandbauwerk vorhanden	Beengte Platzverhältnisse, Bebauung
Zeitbedarf	Erforderlicher Zeitraum ist akzeptabel	Erforderlicher Zeitraum ist nicht akzeptabel
Kosten	Vorteilhaft bei Langzeitbetrieb	Nicht vorteilhaft bei Langzeitbetrieb

4.2.3.2 Permeable Reaktive Wände

Bekannt geworden sind die passiven Sanierungsverfahren durch die Techniken der permeablen reaktiven Wände. Dabei werden im Grundwasserabstrom eines Schadensbereiches reaktive Materialien in Form von hydraulisch gut durchlässigen Wänden oder Reaktoren in den Aquifer eingebracht und vom kontaminierten Grundwasser durchströmt.

Die bekanntesten Anwendungen sind die vollflächig durchströmten Reinigungswände und die Reinigungswände mit gelenktem Grundwasserstrom, zum Beispiel die «Funnel+Gate»-Systeme.

Abb. 10 > Prinzip der permeablen reaktiven Wand



4.2.3.3 Bioscreen

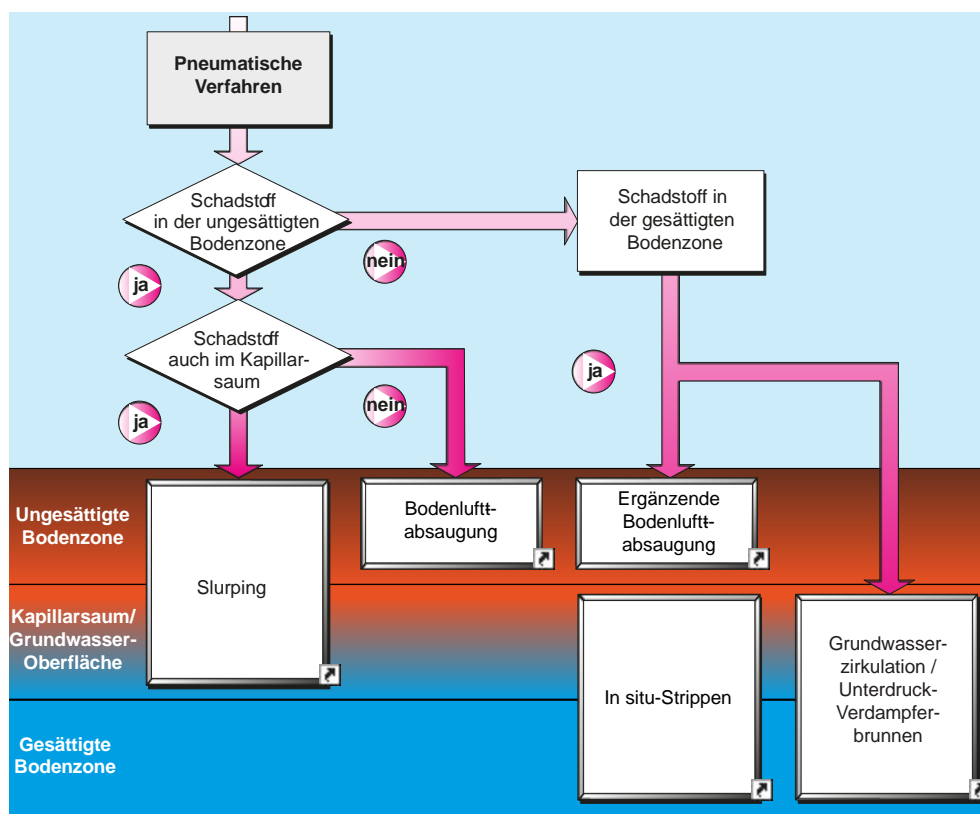
Zu den Varianten der passiven Sanierungsverfahren zählt auch das **Bioscreen-Verfahren**, bei dem den biologischen Abbau fördernde Substanzen in den Aquifer eingebracht werden und damit biologisch aktive Sanierungszonen entstehen. Bioscreen-Verfahren sind auch als biologische In-situ-Verfahren für die gesättigte Zone zu verstehen.

4.3 Pneumatische Verfahren

In vielen Anwendungsfällen spielt die Flüchtigkeit der Schadstoffe, also die Verdampfbarkeit in die Luft eine wichtige Rolle.

Bei solchen Stoffeigenschaften ergeben sich die folgenden Optionen für eine Sanierung:

Abb. 11 > Entscheidungsbaum für die Sanierung leicht flüchtiger Schadstoffe



Pneumatische Sanierungsverfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass sie zur Dekontamination das Trägermedium Luft verwenden. Ziel ist es, leichtflüchtige Schadstoffe aus dem Untergrund aufzunehmen und diese mit dem Luftstrom aus dem Untergrund zum Beispiel durch Absaugung zu entfernen. Voraussetzung der Sanierbarkeit sind die Stoffeigenschaften des zu sanierenden Schadstoffs (hier: Flüchtigkeit) und die Eigenschaften des Untergrundes (hier: gute Durchlässigkeit für Luft). Die oftmals langen Sanierungszeiten können im Einzelfall stark reduziert werden, wenn der Untergrund zusätzlich beheizt wird (vgl. Kap. 4.4.1 Physikalische Mobilisierung).

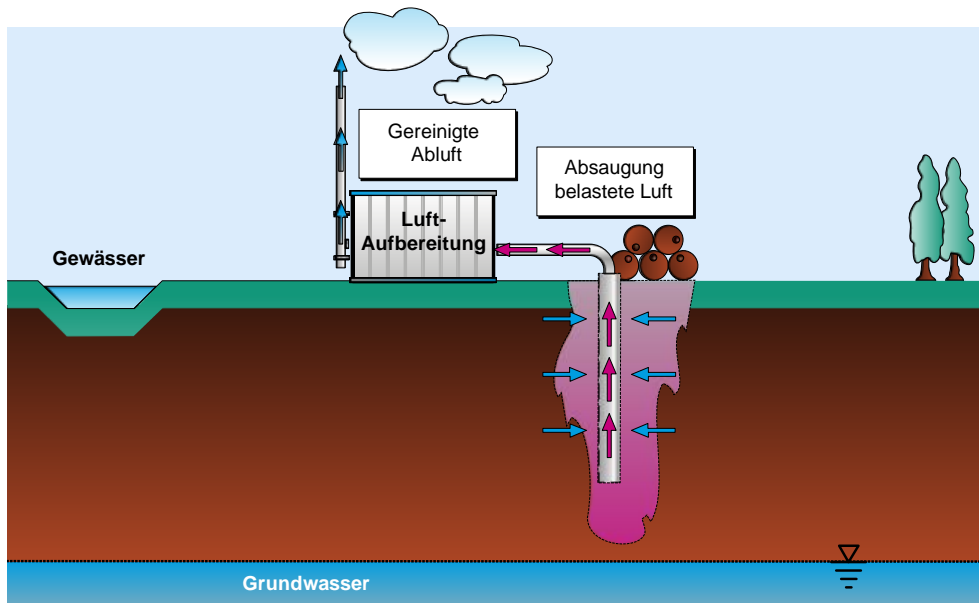
4.3.1 Bodenluftabsaugung

Als Verfahren zur pneumatischen Sanierung der ungesättigten Zone steht die Bodenluftabsaugung zur Verfügung. Bei diesem sehr weit verbreiteten Verfahren werden gasförmige Schadstoffe aus dem Untergrund mit geeigneten Aggregaten abgesaugt und on site behandelt.

Die im Untergrund zum Beispiel in Form residualer Phasen, adsorbiert oder gelöst im Porenwasser vorkommenden leichtflüchtigen organischen Verbindungen (zum Beispiel LCKW, Mineralölkohlenwasserstoffe, BTEX usw.) verflüchtigen sich in die Bodenluft (Porenluft), bis sich Gleichgewichtsbedingungen eingestellt haben. Saugt man die Bodenluft ab, zum Beispiel durch Absaugbrunnen und fördert sie über Tage, wird dieses Gleichgewicht durch das Nachströmen unbelasteter Luft gestört und es treten weitere Schadstoffe in die Gasphase über.

Zur Bodenluftabsaugung gehört eine Aufbereitung der abgesaugten belasteten Luft. Hierfür werden die unter «Luftaufbereitung» (Kap. 4.8.2) dargestellten Verfahren verwendet:

Abb. 12 > Sanierung der ungesättigten Zone durch Bodenluftabsaugung



Die Bodenluftabsaugung hat ihre besondere Bedeutung, da sich mit ihr häufig ohne allzu grossen technischen Aufwand Dekontaminationsverfahren realisieren und bei einer geeigneten Durchlässigkeit der Böden für Luft gute Reinigungserfolge erzielen lassen. Allerdings sind bis zum Erreichen der Sanierungszielwerte häufig lange Zeiträume der Behandlung erforderlich. Insoweit kann nach einiger Zeit bei sinkender Effektivität der Sanierung ein Wechsel des In-situ-Sanierungsverfahrens sinnvoll sein.

Im Rahmen von Bauprojekten können allerdings die notwendigen Installationen (Piezometer, Verbindungsleitung usw.) während der Bauphase verlegt und anschliessend problemlos über die benötigte Zeit genutzt werden.

Zu beachten ist, dass mit der abgesaugten Luft nicht nur die Schadstoffe aus dem Untergrund ausgetragen werden, sondern auch das im Porenraum vorhandene Wasser (Böden trocknen aus). Dieser Effekt lässt sich durch eine wohl dosierte Luftfördermenge reduzieren.

4.3.2 Slurping

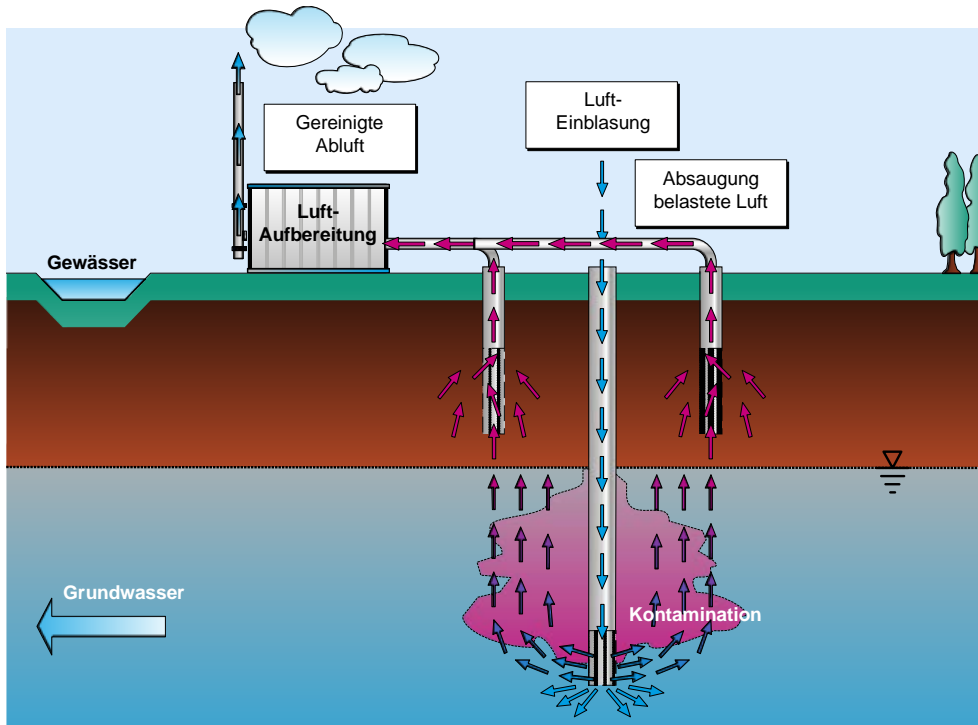
Eine Variante der Bodenluftabsaugung vor allem für den Übergangsbereich zur gesättigten Zone ist das Slurping, bei dem eine Entnahme von auf dem Grundwasser aufschwimmender Phase (zum Beispiel Mineralöle) in Verbindung mit einer Bodenluftsanierung erfolgt. Da durch den Unterdruck der Absaugung Sauerstoff in den Untergrund eingetragen wird, kann das Verfahren im Sinne einer biologischen Sanierung der ungesättigten Zone angewendet werden (Bioslurping) und ähnelt damit auch dem Bioventing (Kap. 4.5.2.3).

4.3.3 In-situ-Strippen

Auch in der gesättigten Zone ist der Einsatz pneumatischer Verfahren durchführbar. Dabei wird durch kontrolliertes Einblasen von Luft in den Grundwasserbereich ein intensiver Kontakt zwischen einerseits dem kontaminierten Grundwasser und andererseits dem belasteten Untergrund und der Luft hergestellt.

Über die Verteilungsgleichgewichte der Schadstoffe zwischen dem Grundwasser und der Luft sowie dem Untergrund und der Luft erfolgt die Dekontamination. Dieses Verfahren wird in Analogie zu dem on site angewendeten Verfahren der Wasseraufbereitung «In-situ-Strippen» genannt.

Abb. 13 > Sanierung der gesättigten Zone durch In-situ-Strippen



Das In-situ Strippen muss begleitet werden durch eine Absaugung der Bodenluft aus der ungesättigten Zone und eine entsprechende on site Aufbereitung der geförderten Luft, um ein unkontrolliertes Entweichen von Schadstoffen in die Umgebung zu verhindern.

Ein positiver Effekt des In-situ-Strippens ist die Versorgung des Grundwassers mit Sauerstoff, wodurch In-situ ablaufende mikrobiologische Abbauvorgänge unterstützt werden (vgl. «Biosparging», Kap. 4.5.2.5). Problematisch ist das In-situ-Strippen sofern eine Fassung der kontaminierten Luft nicht erfolgen kann.

Das In-situ-Strippen kann nicht nur im Aquifer, sondern auch innerhalb eines speziellen Brunnens erfolgen (vgl. Grundwasserzirkulation; vgl. Kap. 4.2.2.4).

4.4 Mobilisierungsverfahren

Sofern die Mobilität der Schadstoffe nicht ausreicht, um erfolgreich einen Schadstoffaustrag aus dem Untergrund zu realisieren, können Verfahren zur Erhöhung der Mobilität der Schadstoffe eingesetzt werden. Gründe für eine schlechte Mobilisierbarkeit können einerseits in den Stoffeigenschaften liegen (geringe Wasserlöslichkeit, geringer Dampfdruck usw.) oder andererseits in der Stoffkonzentration (niedrige Schadstoffkonzentrationen).

Mobilisierungsverfahren erfordern immer ein ergänzendes Verfahren der Schadstofffassung (hydraulische oder pneumatische Sanierung) oder der Schadstoffzerstörung (chemisch oder biologisch), da es ohne diese Sicherungsmassnahmen temporär und lokal eher zu einer Erhöhung der Gefährdung des Grundwassers führen würde (höhere Schadstoffkonzentration und -frachten). Die Mobilisierungsverfahren erhöhen die Wirksamkeit dieser Verfahren hinsichtlich des Schadstoffaustrags und verkürzen damit die Sanierungsdauer. Wegen der Erhöhung der Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser ist eine Überwachung der Schadstoffverteilung im Untergrund durch ein begleitendes Monitoring erforderlich.

Die Mobilisierung kann entweder durch physikalische Effekte (Temperaturerhöhung, mechanische Energie) oder aber durch chemische Substanzen erfolgen. Die Einsatzmöglichkeiten zeigt Tabelle 5.

Tab. 5 > Einsatzmöglichkeiten der Mobilisierungsverfahren

	Thermische Verfahren		Chemische Verfahren	
	Dampf/Heissluft	Feste Wärmequellen	Alkoholspülung	Tensidspülung
Ungesättigte Zone	ja ¹	ja ¹	ja ²	ja ²
Kapillarsaum/ Grundwasseroberfläche	ja ¹	nein	ja ²	ja ²
Gesättigte Zone	ja ¹	nein	ja ²	ja ²

¹ Ergänzend P+T- sowie Bodenluftsanierungsmassnahme erforderlich

² Ergänzend P+T-Massnahme erforderlich

4.4.1 Physikalische Mobilisierung

Die physikalischen Verfahren zur Schadstoffmobilisierung nutzen vor allem den Eintrag von Wärme. Daneben existieren weitere physikalische Verfahren, die mechanische Energie bzw. elektrische Felder verwenden.

4.4.1.1 Allgemeines zur Schadstoffmobilisierung mit Wärme

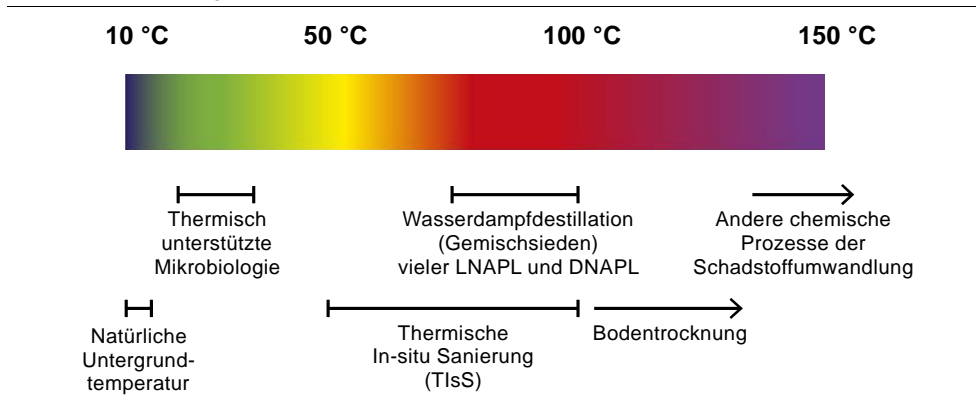
Die Verfahren, welche den Eintrag von Wärme nutzen, werden auch TISS-Verfahren (Thermische In-situ-Sanierung) genannt. TISS werden vornehmlich zur Sanierung von Schadensherden eingesetzt, also in Bereichen mit hoher bis sehr hoher Schadstoffbelastung. Der Einsatz neben und unter Gebäuden bei teilweisem oder vollständigem Erhalt der Gebäudenutzung während der Sanierung ist üblich. Den unterschiedlichen Verfahren und Anwendungsbereichen ist gemein, dass eine Sanierung in wenigen Wochen bis Monaten abgeschlossen ist. Durch die Temperaturerhöhung

- > erhöht sich häufig die Sättigungskonzentration von Stoffen in Wasser oder Luft,
- > verdampfen Stoffe (vor allem organische) und gehen in die Gasphase über oder
- > zersetzen sich die Stoffe in andere Verbindungen (Thermolyse).

Die bekannten thermischen Mobilisierungsverfahren setzen vor allem auf das Verdampfen der Verbindungen. Insoweit bestimmt der Dampfdruck der zu sanierenden Verbindung häufig die erforderliche Mobilisierungstemperatur und damit das einzuset-

zende Verfahren. In der Praxis ist wichtig, dass dabei nicht nur der Schadstoff, sondern ggf. auch das Wasser im Untergrund (ungesättigte und gesättigte Zone) in die Dampfphase übergeht, was einerseits den Energiebedarf des Verfahrens erhöht und andererseits bei der Aufbereitung der schadstoffangereicherten Porenluft den Umgang mit den wässrigen und ebenfalls schadstoffhaltigen Kondensaten erfordert. Die Siedetemperatur von Wasser stellt allerdings dabei keine Verfahrensbegrenzung dar, vor allem in der ungesättigten Zone sind nach der Austrocknung des Untergrunds auch höhere Temperaturen zur Mobilisierung möglich, so dass auch schwer flüchtige Schadstoffe saniert werden können. Der Effekt der thermolytischen Schadstoffreduktion ist gegenüber dem Mobilisierungseffekt eher kritisch zu bewerten, weil die entstehenden Verbindungen schwer vorherzusagen und zu bestimmen sind.

Abb. 14 > Anwendungsbereiche der TISS-Verfahren¹



Neben dem Eintrag von Wärme durch Dampf und festen Wärmequellen bestehen alternative Ansätze der physikalischen Schadstoffmobilisierung im Eintrag der Wärme durch elektromagnetische Wellen (RF-/Radiofrequenzenergie-Verfahren) oder durch direkt in den Untergrund eingeleiteten elektrischen Strom (Elektrowiderstandsheizung). Ein Einblasen von Heissluft darf prozesstechnisch und thermodynamisch nicht mit einer Dampfinjektion verwechselt werden. Ein Einblasen von Heissluft bewirkt aufgrund der geringen Wärmekapazität vornehmlich eine Stimulation mikrobiologischer Prozesse jedoch bei weitem nicht die Verdampfungsleistung von Schadstoffen wie bei einer Dampfinjektion oder dem Betrieb fester Wärmequellen.

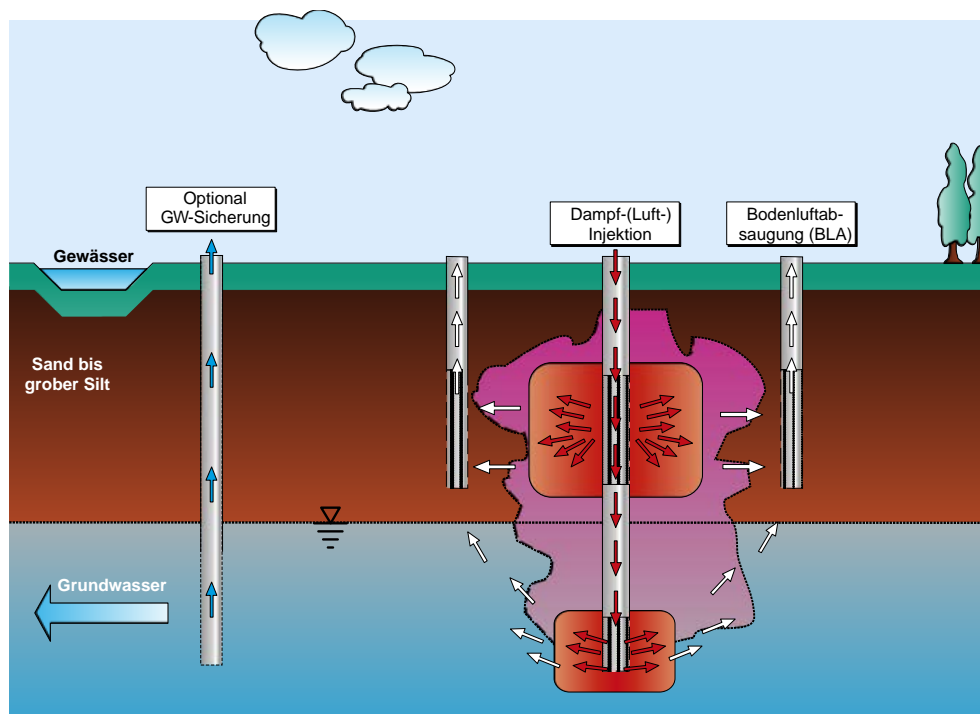
4.4.1.2 Thermische Mobilisierung mit Heissluft oder Dampf

Das Verfahren der thermischen Bodensanierung mit Dampf oder Heissluft beruht auf dem Eintrag von heissen Gasen in den Untergrund. Die Dampfausbreitung folgt präferenziellen Fließwegen mit höherer Durchlässigkeit. Eingelagerte geringer durchlässige Schichten werden über die Wärmeleitung zeitversetzt erwärmt. In der ungesättigten Bodenzone breitet sich der Dampf im gleichkörnigen Boden theoretisch radialsymmetrisch um die Injektionsstellen aus. Im Grundwasser bewirken zudem die Auftriebskräfte des Dampfens eine vertikale Dichteströmung nach oben. Ein Einblasen von Heissluft darf prozesstechnisch und thermodynamisch nicht mit einer Dampfinjektion verwechselt werden.

¹ Leitfaden Thermische In-situ-Sanierungsverfahren (TISS) zur Entfernung von Schadensherden aus Boden und Grundwasser (TASK)

selt werden. Heissluft hat eine geringe Wärmekapazität (Erwärmung des Untergrundes $\ll 50^\circ\text{C}$), während Dampf kondensiert und in Folge seiner höheren Wärmekapazität den Untergrund durch diese Kondensation erwärmt. Ein Einblasen von Heissluft sollte daher eher als Stimulation natürlicher mikrobiologischer Abbauprozesse gewertet werden. Der Boden wird dabei auf die zur Dekontamination der Zielkontaminante erforderliche Temperatur erwärmt. Die desorbierten Schadstoffe und das verdampfte Wasser werden durch eine begleitende Bodenluftsanierung erfasst und gereinigt. Sofern die Dampf- oder Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Bodenzone erfolgt, erfolgt eine Freisetzung der schadstoffhaltigen Gase in die ungesättigte Bodenzone ähnlich dem In-situ-Strippen. Gleichzeitig kann eine Mobilisierung der Schadstoffe in das Grundwasser erfolgen, so dass eine begleitende Pump and Treat-Massnahme zur Erfassung des Abstroms von kontaminiertem Grundwasser üblich ist (vgl. Abb. 15).

Abb. 15 > Dampf-Luft-Injektion in die ungesättigte und gesättigte Zone

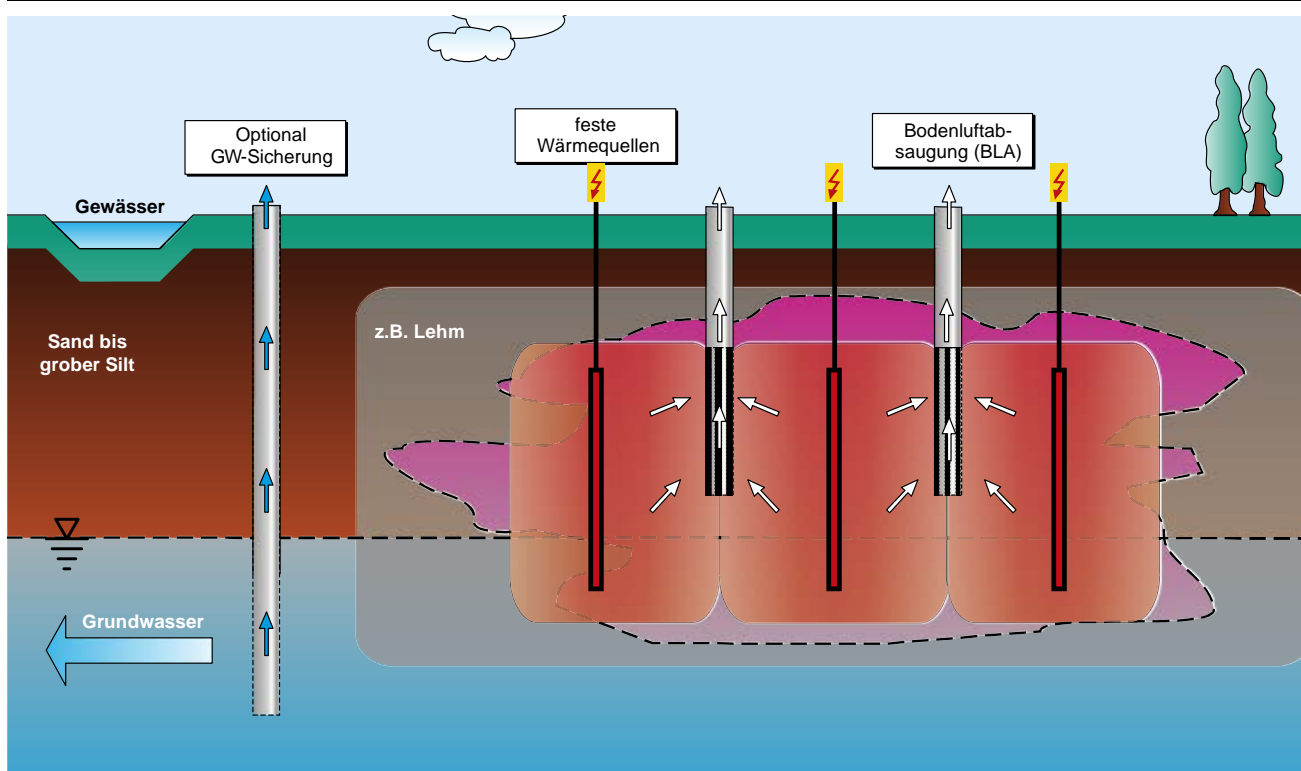


4.4.1.3 Thermische Mobilisierung mit festen Wärmequellen

Bei der thermischen Sanierung mit festen Wärmequellen werden elektrische Heizelemente in den Untergrund eingebracht und zumeist mit Temperaturen bis zu 600°C betrieben. Der energetische Aufwand zur Verdampfung des Wassers ist vor allem beim Einsatz in der gesättigten Zone erheblich. Solange das Wasser nicht vollständig verdunstet ist, sind Temperaturen oberhalb des Siedepunktes nicht erreichbar. Das Verfahren eignet sich also eher für schwerer flüchtige Schadstoffe in der ungesättigten Zone, vor allem dann, wenn diese geringere Durchlässigkeiten hat (Silt o.ä.). Durch die Austrocknung des Untergrunds entstehen Schwindrisse, die einen Austrag der desorbierten Schadstoffe über eine begleitende Porenluftabsaugung ermöglichen. Ggf. ist

auch hier eine hydraulische Sicherung mittels einer Pump- und Treat-Massnahme erforderlich.

Abb. 16 > Thermische Mobilisierung mit festen Wärmequellen in der ungesättigten Zone



4.4.1.4 Sonstige physikalische Mobilisierungsverfahren

Neben den thermischen Mobilisierungsverfahren bestehen auch weniger übliche physikalische Verfahren, welche mechanische Energie bzw. elektrische Felder zur Mobilisierung verwenden. Dazu zählen

- > Das Geo-/Hydroschockverfahren,
- > Die Elektrokinese,
- > Fracturing.

Das Geo- bzw. Hydroschockverfahren verwendet zur Mobilisierung mechanische Energie. Die Energie kann dabei auf das Korngerüst (**Geoschockverfahren**) oder das Grundwasser (**Hydroschockverfahren**) wirken.

Bei der **Elektrokinese** werden elektrische Potentiale über Elektroden an die kontaminierten Böden angelegt. Wasser und gelöste Ionen wandern unter dem Einfluss der Gleichspannung entsprechend ihrer Ladung zu den Elektroden.

Dieses Verfahren wurde lange zur Entwässerung feinkörniger Böden verwendet. Die Schadstoffe werden dabei nicht zerstört, sondern nur mobilisiert. Sie 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 (zum Beispiel Pump and Treat; Kap. 4.2.2.1).

Die Elektrokinese ist anwendbar vor allem für Schwermetalle und polare Verbindungen wie zum Beispiel Trichlorethen oder BTEX in feinkörnigen und gering wasserwegsamem Böden der gesättigten Zone. Das Verfahren hat bisher unter anderem wegen des hohen Energieeinsatzes keine wesentliche kommerzielle Anwendung gefunden.

Als **Fracturing** werden Verfahren verstanden, die die Vergrößerung des Porenraumes oder der Klüfte bei Festgestein oder in bindigen Böden zum Ziel haben.

Dadurch soll die Wegsamkeit des wenig durchlässigen Untergrundes für Luft oder Wasser, gegebenenfalls auch die Mobilität mobiler Phasen und damit die Sanierbarkeit der Böden verbessert werden.

Die Vergrößerung der Poren oder Klüfte erfolgt in der Regel durch kurzzeitiges Einbringen von Wasser mit hohem Druck in den Aquifer (Hydraulisches Fracturing). Bei Festgesteinen wird teilweise Sand mit eingebracht, der die Klüfte nach dem Druckstoss offen halten soll. Eine andere Art ist die Verwendung von Luftdruckstößen (Pneumatisches Fracturing). Schliesslich können auch Sprengungen zur Vergrößerung der Klüfte verwendet werden.

4.4.2 Chemische Mobilisierung

Die Mobilität von ansonsten im Wasser unlöslichen Schadstoffen kann durch den Einsatz von Lösungsmitteln oder Tensiden, verbessert werden. Damit sind auch wasserunlösliche Kontaminationen aus dem Untergrund zu entfernen.

Im Grundsatz handelt es sich um hydraulische Verfahren mit Zugabe von Wasser, welches allerdings durch Zusätze so eingestellt wurde, dass ein optimierter Schadstoffaustrag möglich wird. Als Zusätze sind Lösungsmittel oder Tenside geeignet. Im Falle von Schwermetallen wäre auch die Zugabe von Säuren oder Laugen zur Erhöhung des Schadstoffaustrags möglich (Laugung oder Leaching). Neben der Zugabe der Lösungsmittel oder -vermittlern sind die unter den hydraulischen Verfahren beschriebenen Techniken anzuwenden.

4.4.2.1 Mobilisierung mit Lösungsmitteln

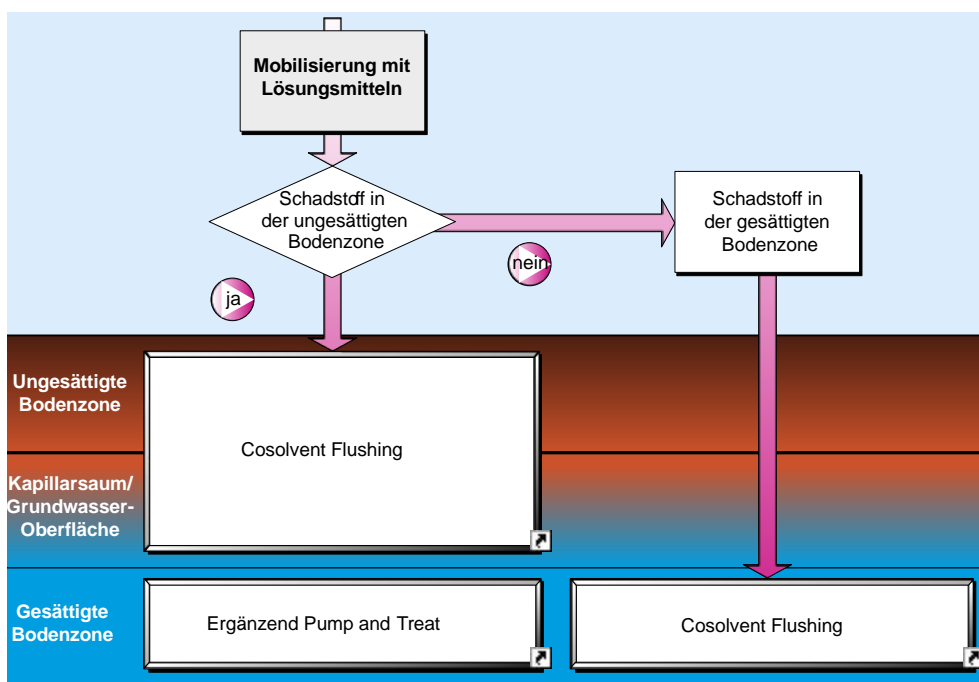
Eine Variante der chemischen Mobilisierung ist das auch als Cosolvent Flushing bezeichnete Einbringen von Lösungsmitteln. Als Lösungsmittel sind dabei vor allem Alkohole in der Praxis wichtig. Grundsätzlich wären auch andere Lösungsmittel denkbar, wenn diese allerdings eine höhere Toxizität haben und nicht biologisch abbaubar sind, verbietet sich ihr Einsatz in den meisten Fällen.

Verfahrensvarianten bei der Mobilisierung mit Lösungsmitteln können sein:

- > Vertikale Versickerung der Lösemittel in die ungesättigte Zone (vgl. Vertikale Infiltration, Kap. 4.2.2.2);
- > Versickerung der Lösemittel in die gesättigte Zone (vgl. Grundwasserinfiltration; Kap. 4.2.2.3).

Durch das kontrollierte Infiltrieren des Lösungsmittels werden die Schadstoffe von der Untergrundmatrix getrennt, in wässriger Phase gefördert und on site in einer Wasseraufbereitungsanlage (Kap. 4.8.1) behandelt. Hierbei ist die Gefahr der unerwünschten Kontamination des Grundwassers durch die eingesetzten Lösemittel selbst oder die gelösten Schadstoffe unbedingt zu minimieren! Hierdurch ergeben sich hohe Anforderungen an die begleitende hydraulische Massnahme sowie möglicherweise Schwierigkeiten hinsichtlich der Genehmigungsfähigkeit.

Abb. 17 > Entscheidungsbaum für die Sanierung lösungsmittellösender Schadstoffe



4.4.2.2 Mobilisierung mit Tensiden

Bei der Mobilisierung mit Tensiden wird die Schadstofffreisetzung durch Einwirken auf die Grenzflächenspannung zwischen dem ungelösten Schadstoff und der Untergrundmatrix erreicht. Hinsichtlich der Applikation des Lösungsvermittlers im Untergrund unterscheidet sich die Mobilisierung mit Tensiden nicht von der mit Lösungsmitteln.

4.5 Biologische Verfahren

4.5.1 Allgemeines und Wirkungsweise

Die Wirkung biologischer Verfahren beruht auf der Abbaubarkeit der Schadstoffe vor allem durch mikrobiologische Organismen.

Dabei werden die in der Regel organischen Verbindungen im Rahmen von Stoffwechselfvorgängen mit dem Ziel der Energiegewinnung für den abbauenden Organismus chemisch umgesetzt.

Die biologische Abbaubarkeit ist eine Funktion des Schadstoffes selber und gleichzeitig der den Stoffwechsel beeinflussenden Milieubedingungen (Nährstoffversorgung, Redoxverhältnisse, toxische Wirkungen) im Untergrund. Grundsätzlich erfordert das Verfahren die Anwesenheit von (Mikro-) Organismen, die die Stoffwechselfvorgänge durchführen können.

Die Grundlage bilden erfahrungsgemäss natürlich vorkommende Organismen im Untergrund, die ggf. an den Abbau der Schadstoffe adaptiert sein müssen. Dabei werden im Rahmen der biologischen In-situ-Sanierung nur die Transport-, Nährstoff- und Milieubedingungen optimiert. Es wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass die schadstoffmetabolisierenden Organismen ubiquitär und damit auf den Standorten grundsätzlich vorhanden sind. Denkbar, in der Praxis aber nicht häufig angewendet, ist das Animpfen des Untergrund mit speziellen, auf den Schadstoffabbau optimierten aber nicht standortbürtigen Organismen.

Die Frage der Abbaubarkeit der Schadstoffe und der erforderlichen Milieubedingungen ist Gegenstand laufender Forschungsvorhaben. Hinsichtlich des Kenntnisstandes der mikrobiologischen Abbaubarkeit für die üblichen Altlasten-Schadstoffe und der praktischen Umsetzung an konkreten Standorten können aktuell die in folgender Tabelle dargestellten Einschätzungen abgegeben werden.

Tab. 6 > Abbaubarkeit und Praxiserfahrung des Abbaus für die häufigsten Schadstoffe

	Prinzipiell gut abbaubar	Prinzipiell schwer abbaubar	Am Standort nachgewiesen	Im Labor nachgewiesen
Aliphatische KW, MKW und Derivate	+		+	+
Monocyclische aromatische (z. B. BTEX) und heterocyclische KW (z. B. Pyridin)	+		+	+
PAK	+ ¹⁾	+ ²⁾	-	+/-
LHKW	+		+/- ³⁾	+
PCB		+	-	-
PCDD bzw. PCDF		+	+/-	+/-
Pestizide und Derivate		+	?	+/-
Schwermetalle	Nicht abbaubar		-	-

¹⁾ bis 4-Ring-PAK, ²⁾ 5- und 6-Ring-PAK, ³⁾ Spezielle Anforderungen an die Milieubedingungen

Generell unterscheiden sich die biologischen Verfahren in

- > oxidativ wirkende Verfahren (Kap. 4.5.2) und in
- > reduktiv wirkende Verfahren (Kap. 4.5.3).

Eine Sonderform stellt für Schwermetalle das Verfahren der Phytoremediation dar, das nicht auf dem Abbau der Schadstoffe, sondern auf deren Bioakkumulation beruht (Kap. 4.5.5). Die in den Pflanzen akkumulierten Schadstoffe werden ggfs. zusammen mit diesen verbrannt oder anderweitig entsorgt.

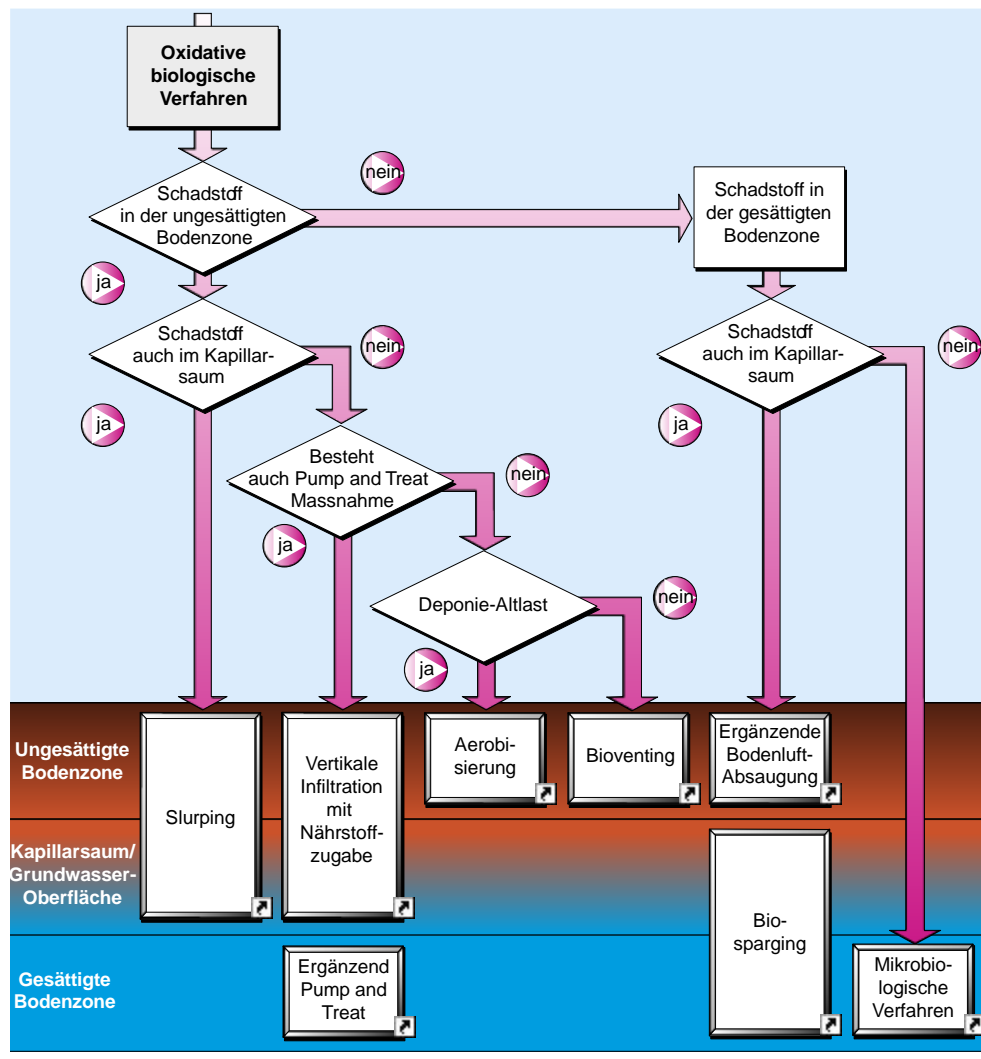
4.5.2 **Oxidative Verfahren**

Viele Schadstoffe können durch biologische Abbauvorgänge mit Sauerstoff bzw. im oxidierenden (aeroben) Milieu saniert werden. Vor allem die organischen Substanzen wie Mineralölkohlenwasserstoffe, aromatische Kohlenwasserstoffe, Phenole und die gering chlorierten LCKW (z. B. Vinylchlorid) lassen sich über die Oxidation der Verbindungen aus dem Untergrund oder dem Grundwasser entfernen.

Bei den oxidativen Verfahren ergeben sich in Abhängigkeit des Schadstoffvorkommens im Untergrund die in Abb. 18 dargestellten Optionen.

Eine Sonderform der oxidativen biologischen Verfahren ist das Methan-Biostimulationsverfahren, bei dem ein aerober Schadstoffabbau durch einen Stoffwechsel der beteiligten Mikrobiologie mit Methan indirekt aktiviert wird.

Abb. 18 > Entscheidungsbaum für die Sanierung mit oxidativen biologischen Verfahren



4.5.2.1 Vertikale Infiltration mit Nährstoffen

Das Verfahren der vertikalen Infiltration von Nährstoffen entspricht weitgehend der vertikalen Infiltration von Wasser (Kap. 4.2.2.2), wobei der Schwerpunkt nicht auf der Mobilisierung der Schadstoffe mit dem versickernden Wasser liegt, sondern auf dem biologischen Abbau der Schadstoffe. Dafür werden mit dem für den Abbau erforderlichen Wasser auch Nährstoffe und ggf. milieuregulierende Reagenzien in die ungesättigte Zone eingebracht.

Da mit dem vertikal versickernden Wasser auch Stoffe in den Untergrund eingetragen werden, die unter Umständen nachteilige Auswirkungen auf das Grundwasser haben können (Eintrag von Nährstoffen, auf das Redoxpotential wirkende Stoffe, Erhöhung der Löslichkeit etc.), ist die Massnahme durch eine begleitende hydraulische Massnahme (Pump and Treat) zu begleiten.

4.5.2.2 Aerobisierung

Die Aerobisierung der ungesättigten Zone spielt eine besondere Rolle bei der Sanierung von Deponie-Altlasten. Dabei wird durch den Eintrag von Sauerstoff in den Abfallkörper einerseits der anaerobe Abbau der Abfälle unterbunden und damit Explosionsrisiken bei Baumassnahmen sowie die Emission sehr geruchsintensiver Gase aus dem anaeroben Abbau unterbunden.

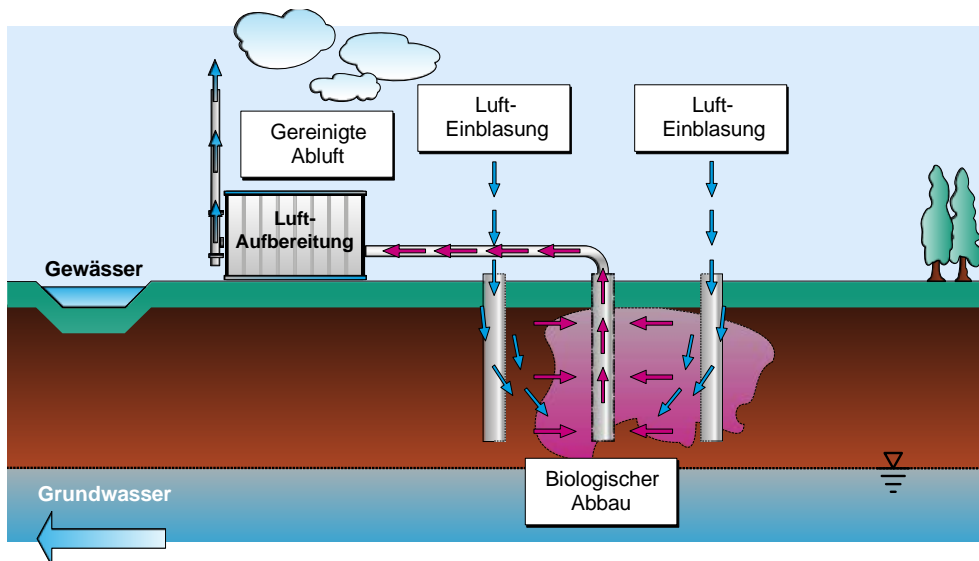
Andererseits wird durch den initiierten aeroben Abbau eine schnelle Mineralisierung des Abfalls hervorgerufen. Die verschiedenen Verfahrensvarianten unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der Technik des Einbringens des Sauerstoffs. Neben Druck- oder Stossbelüftungen, teilweise sogar mit technischem Sauerstoff, werden absaugende Verfahren eingesetzt.

4.5.2.3 Bioventing

Bei der biologischen In-situ-Sanierung in der ungesättigten Zone spielt vor allem die Versorgung der Mikroorganismen mit Sauerstoff für einen aeroben Abbau der Schadstoffe eine Rolle. So wirkt zum Beispiel das Verfahren des Bioventings durch einen Eintrag von Luftsauerstoff in den Untergrund.

Dazu werden einerseits Belüftungseinrichtungen (Injektionsbrunnen) und andererseits die technischen Einrichtungen der Bodenluftsanierung verwendet (Absaugpegel, Abluftaufbereitung). Der wesentliche Unterschied zur Bodenluftsanierung besteht also weniger in der technischen Gestaltung als im Ziel der Massnahme.

Abb. 19 > Anwendungsbeispiel für Bioventing



4.5.2.4 Oxidative Verfahren im Grundwasser

Bei der oxidativen mikrobiologischen In-situ-Sanierung der gesättigten Zone werden vor allem zusätzlicher Sauerstoff aber auch Nährstoffe sowie milieuregulierende Stoffe in gelöster Form in den kontaminierten Aquifer eingebracht.

Diese Verfahrenstechniken verwenden dabei die technischen Einrichtungen der Pump and Treat-Verfahren der Grundwassersanierung beziehungsweise der Grundwasserinfiltration. Das wesentliche Know-how liegt in der Erkundung der Stoffwechsel und den Schadstoffabbau stimulierenden Hilfsstoffe, der Auswahl geeigneter Nährstoffe sowie in der Form der Applikation dieser Stoffe in den Aquifer.

Durch eine Sauerstoffanreicherung im Grundwasser soll die Wirksamkeit der aeroben biologischen Abbauprozesse in der gesättigten Zone erhöht werden. Es wird im Unterschied zur chemischen Oxidation (siehe Kap. 4.6.1 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. 4.5.4 Enhanced Natural Attenuation)

Die Sauerstoffanreicherung kann auf unterschiedlichen Wegen erreicht werden:

- > Eindüsen von Luft oder Sauerstoff in das Grundwasser (ähnlich Bio-Sparging; Kap. 4.5.2.5), 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 (z. B. Oxygen Releasing Compounds ORC).

4.5.2.5 Biosparging

Beim Biosparging wird durch kontrolliertes Einblasen von Luft in den Aquifer die Sauerstoffversorgung des biologischen Abbaus im Grundwasser unterstützt, beziehungsweise optimiert.

Das Verfahren ist ähnlich wie das *In-situ-Strippen* (vgl. Kap. 4.3.3).

4.5.2.6 Methan-Biostimulation

Das Methan-Biostimulationsverfahren ist eine besondere Form des aeroben Abbaus von Schadstoffen in der gesättigten Zone. Dabei wird durch das Einblasen eines Methan-Luft-Gemisches unterhalb der Kontamination eine spezielle mikrobielle Flora, die der methylophilen Organismen, zu einem Stoffwechsel angeregt, der die Oxidation und damit den Abbau z. B. von LCKW katalysiert.

4.5.3 Reduktive Verfahren

Generell sind die Anwendungsmöglichkeiten von reduktiven Stoffwechselfvorgängen zur Dekontamination des Untergrundes sehr viel weniger ausgeprägt als die oxidativen. Es wird in der Praxis bisher nur die Verfahren der Reduktiven Dechlorierung mit organischen Substanzen sowie das sogenannte HRC-Verfahren eingesetzt.

4.5.3.1 Reduktion mit organischen Substanzen

Durch die Zugabe von leicht abbaubaren Verbindungen in das Grundwasser werden dort vorhandene Mikroorganismen zum Abbau angeregt. Dabei sinkt das Redoxpotential ab und durch den sich bildenden Wasserstoff werden die Schadstoffmoleküle reduktiv umgewandelt. Bekannt ist vor allem die reduktive Dechlorierung der LCKW, bei der diese teilweise vollständig bis zum reinen Kohlenwasserstoff von den Chloratomen befreit werden können.

Die Anwendung der reduktiven Dechlorierung erfolgt ähnlich wie die oxidative biologische Sanierung durch Zugabe von Substraten in den Untergrund (vor allem Melasse, organische Säuren, Alkohole usw.).

Ein Spezialverfahren besteht im geregelten Einbringen von Wasserstoff in das Grundwasser. Hierzu werden sogenannte Hydrogen Releasing Compounds (HRC) eingesetzt.

4.5.4 Enhanced Natural Attenuation (ENA)

Unter Natural Attenuation (NA) werden alle natürlich ablaufenden Prozesse im Untergrund verstanden, die zu einer Verringerung von Schadstoffkonzentrationen in Boden oder Untergrund (Reduzierung der Masse, der Konzentration oder der Toxizität) oder zur Reduzierung des Schadstoffaustrags (Reduzierung der Fracht) führen. Diese Prozesse können sein:

- > Mikrobiologischer Abbau;
- > chemische Transformation;
- > Sorption;
- > Dispersion;
- > Diffusion;
- > Verflüchtigung der Stoffe.

Unter dem Begriff des Enhanced Natural Attenuation (ENA) werden alle Massnahmen verstanden, die die Effektivität der natürlich bereits stattfindenden Prozesse unterstützen. Solche Unterstützungen können z. B. sein:

- > Verbesserung der Nährstoffversorgung oder
- > Einfluss auf die Redoxpotentiale.

Eine genaue Abgrenzung der ENA-Verfahren zu den aktiven biologischen oder chemischen In-situ-Sanierungsverfahren ist nicht möglich. In beiden Fällen liegen die gleichen naturwissenschaftlichen Vorgänge zu Grunde und werden vergleichbare techni-

sche Einrichtungen genutzt. Der Übergang zwischen den aktiven Verfahren und dem ENA ist entsprechend fließend. Das ENA setzt grundsätzlich die Existenz natürlicher schadstoffmindernder Prozesse im Untergrund voraus und verbessert nur deren Wirksamkeit. Der ENA-Ansatz erfordert deshalb ein umfangreiches Verständnis dieser NA-Prozesse durch entsprechende Untersuchungen.

Neben dem ENA wird häufig auch das Monitored Natural Attenuation (MNA) als Handlungsoption bei kontaminierten Standorten angewendet. Das MNA ist streng genommen kein Sanierungsverfahren, da es auf Eingriffe in den Untergrund (inkl. Boden oder Grundwasser) vollständig verzichtet.

4.5.5 Sonstige biologische Verfahren

Eine Sonderform der biologischen In-situ-Sanierung für die ungesättigte Zone ist die Phytoremediation. Dieses Verfahren wirkt nicht über den biologischen Stoffwechsel, sondern über das Vermögen spezieller Pflanzen Schadstoffe (vor allem Schwermetalle) im Wurzelraum durch austretende Stoffwechselprodukte in Lösung zu bringen, in die Pflanze aufzunehmen und anzureichern. Die geernteten, mit Schadstoff angereicherten Pflanzen müssen anschließend entsorgt werden.

Grundsätzlich möglich ist auch der Abbau organischer Schadstoffe durch die im Wurzelraum austretenden Stoffwechselprodukte (Exudate). Praktisch genutzt wurde dieser Effekt beim Abbau von PAK und anderen aromatischen Verbindungen durch Weissfäulepilze.

4.6 Chemische Verfahren

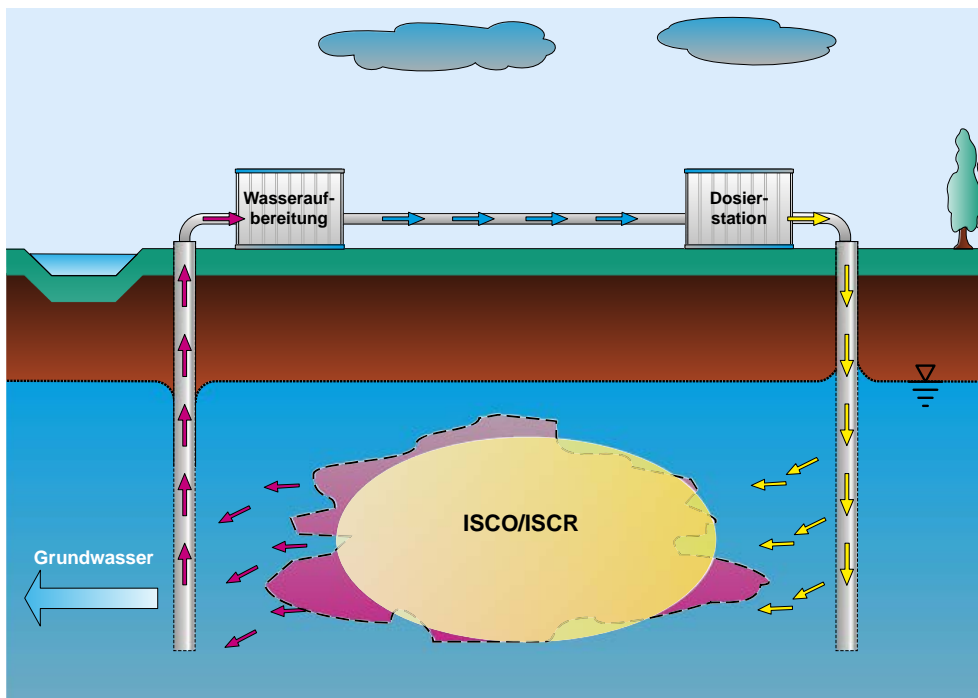
Bei den Verfahren zur chemischen Behandlung der Schadstoffe In-situ werden durch chemische Prozesse die Schadstoffmoleküle verändert, so dass die Schadstoffe in weniger gefährliche oder mobilere Verbindungen übergehen oder so verändert werden, dass sie zum Beispiel aus der wässrigen Phase ausfallen und im Untergrund möglichst irreversibel fixiert werden.

Solche chemischen Reaktionen sind z. B. die

- > Oxidation von organischen Schadstoffen mit vollständiger Zerstörung der Moleküle bis zum Kohlendioxid, die
- > Reduktion von organischen Schadstoffen z. B. zur Dechlorierung von LCKW, die
- > Bildung von komplexen chemischen Verbindungen von Metallen oder die
- > Reduktion von Schwermetallen zur Immobilisierung (z. B. Chromat).

Die chemischen Reagenzien für die Dekontamination müssen z. B. durch Injektionslanzen so in den Untergrund eingebracht werden, dass eine gute räumliche Verteilung der Reagenzien entsteht und eine stöchiometrisch vollständige Reaktion der Schadstoffmoleküle erfolgen kann. Die chemischen In-situ-Sanierungsverfahren setzen deswegen eine gute Durchlässigkeit sowie eine Homogenität des Aquifers voraus.

Abb. 20 > Verfahrensschema der chemischen In-situ-Sanierung



Der Einsatz von Reagenzien im Untergrund kann durch einfache kontinuierliche oder stossweise Infiltration über Grundwassermessstellen erfolgen. Im Grundwasserabstrom ist immer eine Überwachung des möglichen Abstroms von ggf. mobilisierten Schadstoffen und von unverbrauchten Reagenzien erforderlich. Häufig wird die gezielte Durchströmung des Schadensherdes durch eine Kreislaufführung des mit Reagenzien angereicherten Wassers unterstützt. Dabei kann auch die Beaufschlagungsrichtung modifiziert werden (Wechsel der Infiltrations- und Entnahmebrunnen).

Zu beachten ist, dass durch den Einsatz der Reagenzien nicht nur die Zielkontaminanten behandelt werden, sondern alle im Untergrund chemisch beeinflussbaren Verbindungen. Diese bedeutet z. B. bei der In-situ chemischen Oxidation, dass alle organischen Bestandteile des Untergrundes (Huminstoffe, Torf usw.) mit oxidiert werden müssen, wodurch sich ggf. ein hoher Chemikalieneinsatz ergeben kann.

4.6.1 In-situ-chemische Oxidation (ISCO)

Bei der In-situ-chemischen Oxidation werden starke Oxidationsmittel wie

- > Wasserstoffperoxid,
- > Kalium- oder Natriumpermanganat,
- > Persulfate,
- > Fenton's Reagenz (Mischung aus Wasserstoffperoxid und Eisen(II)-Salzen) und
- > Ozon

eingesetzt. Diese Oxidationsmittel sind teilweise sicherheitstechnisch anspruchsvoll (z. B. Ozon), da sie auch auf dem Sanierungsgelände z. B. in den Anlagen stark reaktiv sind. Dieses ist bei der Anlagenplanung und beim Arbeitsschutz zu berücksichtigen. Andere Reagenzien führen im Untergrund zu Ausfällungen (z. B. Braunsteinbildung aus Permanganaten), die zu Verblockungen im Untergrund führen können.

4.6.2 In-situ-Reduktion

Chemische Reduktionen können zur Dekontamination genutzt werden, wobei der Anwendungsbereich hinsichtlich der zu dekontaminierenden Parameter erheblich begrenzter ist, als bei der chemischen Oxidation. Reduktionsreaktionen werden eingesetzt zur

- > Reduktion von Schwermetallen (vor allem Chrom VI) mit dem Ziel der Ausfällung und zur
- > Reduktion von organischen Schadstoffen zur Dechlorierung.

4.6.2.1 In-situ-chemische Reduktion (ISCR)

Die In-situ-chemische Reduktion (ISCR) dient vor allem der Ausfällung von Chromat (Chrom VI) aus dem Grundwasser. Eingesetzt werden vor allem Eisensalze (z. B. Eisen(II)sulfat) oder andere Salze (Natriumdithionit, Kaliumdisulfit usw.).

In Ausnahmefällen und bei geringer Dosierung kann die ISCR auch zur Unterstützung anaerober biologischer Abbauvorgänge genutzt werden.

4.6.2.2 Nano-eisen

Derzeit in der Entwicklung ist das Einbringen von Eisen in feinstverteilter Form («**Nano-eisen**») in den Porenraum des Aquifers zum Beispiel zur Dehalogenierung von LHKW. Die nicht gelösten Eisenpartikel sollen sich im Porenraum ausbreiten und durch die sehr grosse Oberfläche gut mit dem Schadstoff reagieren können. Da die Verteilung des Nano-eisens im Porenraum nicht einfach ist und sich grosse reaktive Zonen nur mit einem hohen Aufwand realisieren lassen, dient der Einsatz von Nano-eisen dabei in erster Linie der Schadensherdsanierung.

4.7 Immobilisierungsverfahren

Neben den Verfahren der In-situ-Sanierung gibt es noch die Methode der In-situ-Sicherung durch Fixierung der Schadstoffe. Zu den Verfahren der Immobilisierung von Schadstoffen gehören die beiden Verfahren:

- > **In-situ-Immobilisierung** – Bei der In-situ-Immobilisierung werden die Schadstoffe im Untergrund durch Injektion von Reagenzien in eine schwerlösliche Form überführt oder es wird der Porenraum so verschlossen, dass ein Kontakt mit dem Wasser und damit ein Schadstoffaustrag unterbunden werden.

> **In-situ-Verglasungen** – Durch das Einbringen von elektrischen Strömen in den Untergrund wird das Gestein zum Schmelzen gebracht. Beim Abkühlen bilden sich glasartige Strukturen, in die nicht verdampfende Schadstoffe eingeschlossen werden.

4.7.1 **In-situ-Immobilisierung**

Bei der In-situ-Immobilisierung werden die Schadstoffe im Untergrund durch Injektion von Reagenzien in eine schwerlösliche Form überführt oder es wird der Porenraum so verschlossen, dass ein Kontakt mit dem Wasser und damit ein Schadstoffaustrag unterbunden werden.

Mögliche Reagenzien sind Fällungsmittel, Adsorptionsmittel und/oder Ionentauscher. Zum Teil erfolgt die Festsetzung der Schadstoffe im Untergrund durch Reduktion der Schadstoffe (z. B. bei Chromat) (vgl. Kap. 4.6.2).

Materialien, die die Immobilisierung durch Unterbrechung des Kontaktes mit dem Grundwasser herstellen, sind z. B. Zement, Bentonit oder Wasserglas.

Generell sind die In-situ-Sanierungsverfahren hinsichtlich der Langzeitbeständigkeit der Schadstofffixierung zu bewerten, um eine spätere erneute Freisetzung der Schadstoffe zu verhindern. Ggf. sind entsprechende Voruntersuchungen erforderlich. Der Erfolg der Immobilisierung ist über ein, in der Regel langfristiges Grundwassermonitoring zu überwachen.

4.7.2 **In-situ-Verglasung**

Bei der In-situ-Verglasung werden durch das Einbringen von elektrischen Strömen in den Untergrund Temperaturen erzeugt, die das Gestein zum Schmelzen bringen.

Beim Abkühlen bilden sich glasartige Strukturen, in die nicht verdampfende Schadstoffe, zum Beispiel Schwermetalle eingeschlossen werden und damit nicht mehr eluieren können. Organische Verunreinigungen werden bei den Temperaturen zerstört, wobei zu beachten ist, dass bei den nicht vollständig kontrollierbaren Prozessen In-situ eine Vorhersage und Überwachung der dabei entstehenden Produkte nicht möglich ist.

Das Verfahren hat auf Grund des sehr hohen Energieeintrages bisher in Europa keine grosstechnische Anwendung gefunden.

4.8 Aufbereitungsverfahren

Bei vielen Sanierungsverfahren wird kontaminiertes Wasser oder schadstoffbelastete Luft gefördert, mit denen die zu sanierenden Schadstoffe aus dem Untergrund, der Porenluft oder dem Grundwasser ausgetragen werden. In diesen Fällen müssen die kontaminierten Medien Wasser oder Luft aufbereitet werden.

In der Regel wird diese Aufbereitung mittels on site-Anlagen durchgeführt. In Ausnahmefällen besteht die Möglichkeit, eine kommunale Kläranlage zu nutzen oder das kontaminierte Medium extern zu entsorgen.

Als Techniken für die Wasser- und Luftaufbereitung stehen prinzipiell alle gängigen Verfahrenstechniken aus der industriellen oder kommunalen Abwasser- und Abluftreinigung zur Verfügung. Allerdings haben sich für die Praxis der Altlastensanierung wenige Techniken für die häufiger vorkommenden Schadstoffe als praktikabel herausgestellt. In vielen Fällen beruhen diese Verfahrenstechniken auf denselben oder ähnlichen Stoffeigenschaften, die auch bei der In-situ-Sanierung verwendet werden (Flüchtigkeit, biologische Abbaubarkeit usw.) oder deren Gegenteil (Adsorption anstelle der Desorption im Untergrund). Zusätzlich werden die Schadstoffe auch chemisch oder physikalisch zerstört.

4.8.1 Wasseraufbereitung

Zur Wasseraufbereitung kommen grundsätzlich sechs Verfahren in Frage, die hier näher vorgestellt werden.

Tab. 7 > Wirksamkeit von Aufbereitungstechniken für belastete Wässer

Verfahren	Metalle	anorganische Stoffe	MKW aliphatisch	BTEX	Phenole, Kresole	PAK	LHKW	HKW aromatisch
Strippen	(+)	(+++)	+	++	-	-	+++	(+++)
Oxidation	-	(+++)	++	++	++	++	++	++
Adsorption	+	-	++	+++	+++	+++	+++	+++
Fällung/Flockung	+++	(+)	+++	-	-	+	-	-
Biologische Aufbereitung	(+)	(+++)	++	+++	+++	-	(++)	-
Umkehrosmose	+	(++)	++	-	+	-	++	++

Nach: Leistungsbuch Altlastensanierung und Flächenentwicklung; LUA Nordrhein-Westfalen

+++ Verfahren ist für Stoffgruppe speziell einsetzbar und technisch erprobt

++ Verfahren ist für Stoffgruppe speziell einsetzbar

+ Verfahren mit anderer Zielsetzung, das auf Stoffgruppe Nebeneffekt hat

- Verfahren nicht geeignet

() Wirkung nur auf einzelne Stoffe der Stoffgruppe

Das **Strippen** der Schadstoffe aus dem geförderten Grundwasser ist ein häufig für leicht flüchtige Schadstoffe (LCKW, BTEX usw.) eingesetztes Aufbereitungsverfahren, bei dem die Schadstoffe durch Einblasen von Luft aus dem Wasser ausgetragen (desorbiert) und in den Luftstrom überführt werden. In der Regel muss in einem weite-

ren Aufbereitungsschritt die Reinigung der Schadstoffe aus dem Luftstrom erfolgen (vgl. Kap. 4.8.2).

Bei der **Oxidation** der Schadstoffe werden diese durch Einsatz von Reaktionschemikalien, die dem zu reinigenden Abwasser zugeführt werden, oder von UV-Licht chemisch-physikalisch zerstört oder so verändert, dass sie aus dem Wasser entfernt werden können.

Häufig wird bei organischen, teilweise auch bei anorganischen Schadstoffen das Verfahren der **Adsorption** gewählt. Dabei wird der Schadstoff aus dem Wasser auf die sorptive Oberfläche entsprechend ausgewählter Materialien überführt und das Wasser auf diesem Wege gereinigt. Das Adsorbens (i.d.R. Aktivkohle) muss anschliessend als kontaminiert entsorgt oder aufbereitet (regeneriert) werden.

Durch die **Fällung** werden in Wasser gelöste Stoffe durch Zusätze geeigneter Substanzen ganz oder teilweise in einen unlöslichen Zustand überführt. Die entstehenden Fällungsprodukte können in Form von Kristallen, Flocken oder Tröpfchen durch geeignete physikalische Verfahren (Sedimentation, Filtration, Flockung) abgeschieden werden. Die Fällung ist im Bereich der Abwasserreinigung eine übliche Methode z. B. zur Verminderung der im Wasser gelösten Phosphate (Eutrophierung).

Die **Flockung** ist ein Vorgang, bei dem in einer Flüssigkeit schwebende Stoffe, z. B. die Fällungsprodukte, zum Absetzen gebracht werden. Häufig verwendete Flockungsmittel sind Eisen- oder Aluminium-Salze und langkettige organische Verbindungen (Polymere).

Aus der kommunalen oder industriellen Abwassertechnik entlehnt ist die **biologische Reinigung** der schadstoffhaltigen Abwässer. Sie kann angewendet werden, wenn die Schadstoffe gut biologisch abbaubar sind (z. B. MKW, BTEX). Hierfür stehen die gesamten Verfahrenstechniken der Abwasserreinigung zur Verfügung (Belebtschlamm-, Tropfkörperanlagen usw.).

Ein neueres, aber praxiserprobtes Wasseraufbereitungsverfahren ist die **Umkehrosmose** (Hyperfiltration). Sie wird häufig zur Entsalzung verwendet. Es werden einseitig durchlässige («semipermeable») Membranen verwendet, die wie ein Filter im Molekularbereich arbeiten. Wird eine wässrige Lösung unter hohem Druck (grösser als der osmotische Druck) durch eine solche Membran gepresst, so bleibt der Hauptanteil der Salze, Bakterien u.a. Stoffe (Detergentien, Pflanzenschutzmittel) zurück. Gereinigtes Wasser («Permeat») tritt durch die Membran. Das entstandene Konzentrat muss getrennt aufbereitet oder extern entsorgt werden.

4.8.2 Luftaufbereitung

Bei der Luftaufbereitung kommen grundsätzlich vier Reinigungsverfahren zur Anwendung.

Die **Adsorption** vor allem organischer Schadstoffe kann nicht nur aus dem Abwasser, sondern auch aus kontaminierter Luft erfolgen (Anhang A-2, Kap. 2.1). Die Adsorptionsleistung ist dabei z. B. für Luft-Aktivkohle sogar höher als für Nass-Aktivkohle. Nach der Adsorption der Schadstoffe auf den inneren Oberflächen des Adsorbens muss dieses entweder extern entsorgt oder regeneriert werden.

Die **absorptive** Abluftreinigung wird zur Entfernung von Sulfaten, Stickstoff und HCl/HF eingesetzt. Hierzu wird eine Waschflüssigkeit (Wasser und Reagenz) verwendet, in der der Schadstoff eingebunden wird. So werden beispielsweise Schwefelverbindungen mit Kalkhydrat zu Gips gebunden und ausgeschieden.

Eine thermische Schadstoffzerstörung wird in vielen Fällen für organisch belastete Abluftströme erfolgreich durchgeführt. Die übliche **thermische Behandlung** ist die Hochtemperatur-Verbrennung der Abluftströme, wobei auf Grund der häufig relativ geringen Konzentrationen der Kontaminanten im Luftstrom eine Verbrennung zusätzlicher fossiler Energieträger erforderlich ist, um die erforderlichen Temperaturbedingungen aufrecht zu erhalten. Dieses Verfahren eignet sich auch für kleinere Anlagengrößen.

Alternativ hat sich die Luftaufbereitung mittels **katalytischer Oxidation** gerade auf Sanierungsbaustellen bewährt. Da die Anlagen klein sind und häufig im Dauerbetrieb ohne externe Energiezuführung arbeiten, lassen sie sich kostengünstig und «unauffällig» einsetzen. Die Katalysatoren, die die Zerstörung der Schadstoffe induzieren, haben inzwischen einen hohen Qualitätsstandard erreicht und sind wartungsarm. Eine Entsorgung von Reststoffen entfällt.

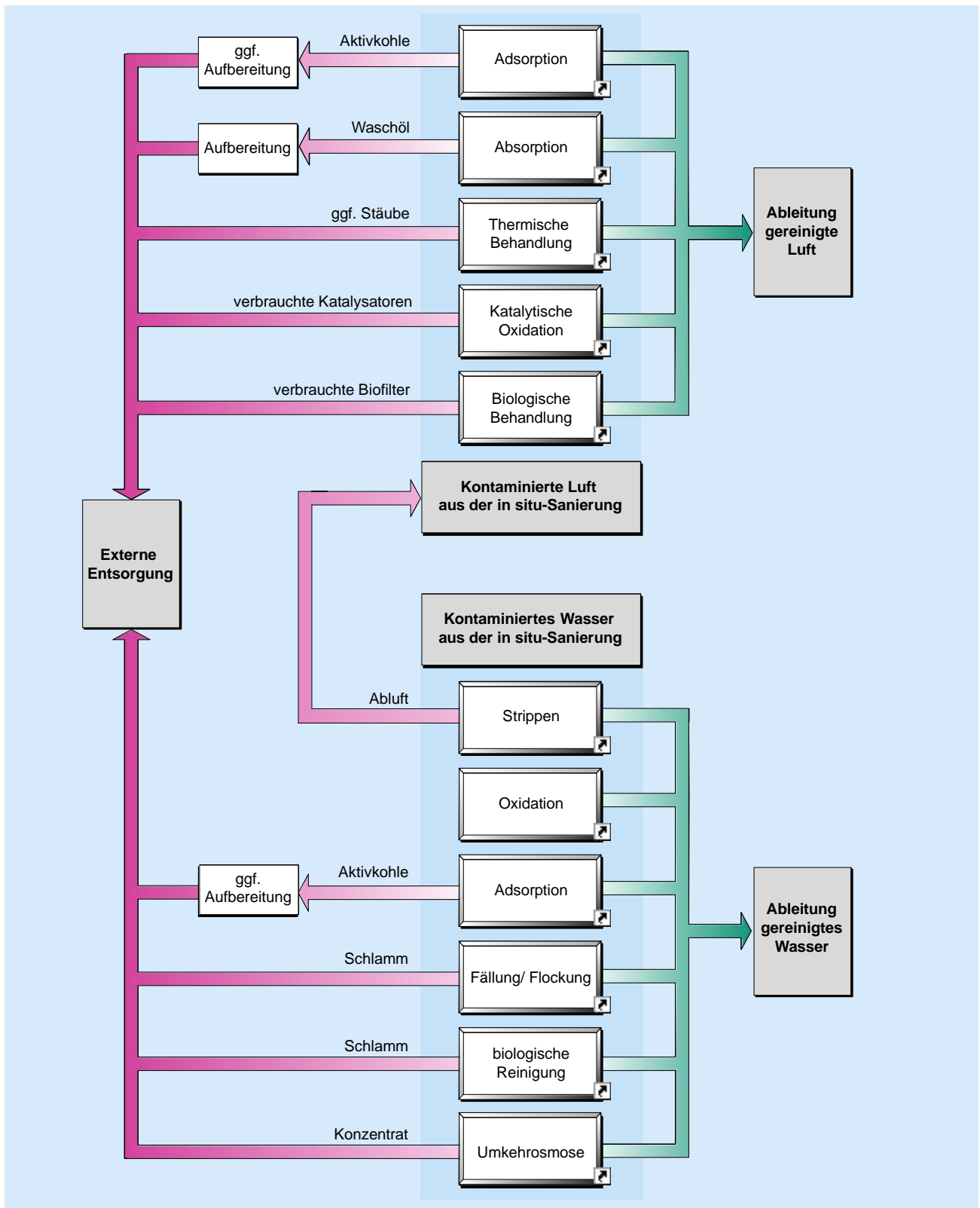
Ähnlich wie bei der Abwasseraufbereitung besteht auch für kontaminierte Abluftströme die Möglichkeit der **biologischen Behandlung**. In der Regel werden Festbettreaktoren verwendet. Das Verfahren eignet sich gut für biologisch leicht abbaubare organische Stoffe.

4.8.3 Massenströme und Entsorgung bei der Abwasser- und Abluftaufbereitung

Bei allen Aufbereitungsverfahren fallen kontaminierte Stoffe an, die umweltgerecht entsorgt werden müssen.

Einige der in diesem Vollzugshilfemodul beschriebenen Verfahren der Abwasser- und Abluftaufbereitung wirken nicht alleine, sondern ergeben erst im Verbund vollständige Verfahrensketten. Ergänzend sind weitergehende Prozessschritte erforderlich zum Beispiel zur Regeneration von Adsorptionsmaterialien oder zur Behandlung der anfallenden Schadstoffkonzentrate. Am Ende steht die ordnungsgemäße Entsorgung der verbleibenden Abfälle. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über das Zusammenwirken und die gegenseitige Abhängigkeit der zuvor beschriebenen Aufbereitungsverfahren sowie über die wichtigsten anfallenden Abfallarten.

Abb. 21 > Massenströme und Entsorgungsnotwendigkeiten bei der Aufbereitung von Abwasser und Abluft



5 > Erfolgskontrolle, Überwachung und Nachkontrolle

5.1 Kontrollmassnahmen während der Sanierungsausführung

Bei allen In-situ-Sanierungsmassnahmen sind sanierungsbegleitende Kontrollmessungen vorzusehen.

Bei den Kontrollmassnahmen geht es einerseits um die Überwachung des ordnungsgemässen Anlagenbetriebes (zum Beispiel Einhaltung von Einleitbedingungen für aufbereitete Wässer aus der Sanierung; Überwachung der gasförmigen Emissionen aus Anlagen usw.) und andererseits um die laufende Überwachung der Wirkung der Sanierungsaktivitäten.

Die Überwachung des Sanierungsfortschrittes dient der Überprüfung der Frage, ob mit den eingesetzten Verfahren der gewünschte Effekt der Dekontamination eintritt und in der vorgesehenen Sanierungszeit die Sanierungszielwerte auch erreicht werden können. Es ist sinnvoll hinsichtlich dieser Fragen Zwischentermine zu definieren, bei denen über gegebenenfalls erforderliche Anpassungen der Sanierungsdurchführung entschieden werden kann.

5.2 Erfolgskontrolle

Die Erfolgskontrolle steht am Ende der Sanierungsmassnahme und ist in der AltIV gefordert. Sie dient dem Nachweis des Erreichens der Sanierungsziele und dient der Behörde bei der Schlussabnahme dazu, die erfolgreiche Beendigung der Sanierung bestätigen zu können.

Bei Sicherungsmassnahmen ist das Sanierungsziel vor allem die Unterbrechung von Emissionswegen. Es wird bei der Erfolgskontrolle deshalb im Wesentlichen die Übereinstimmung der erstellten Bauwerke mit den Vorgaben aus dem Bauprojekt und die Effizienz hinsichtlich der Unterbrechung der Ausbreitungspfade nachzuweisen sein.

Bei der Dekontamination ist die Erfolgskontrolle der positive Nachweis, dass die Sanierungszielwerte (verbliebene, tolerierbare Schadstoffgehalte) im zu sanierenden Medium (Untergrund, Grundwasser, Porenluft) dauerhaft und stabil erreicht wurden.

Besonderheiten bei Reaktiven Wänden

Reaktive Wände stellen hinsichtlich der Erfolgskontrolle insoweit eine Sonderform dar, als im Untergrund Bauwerke verbleiben.

Die Erfolgskontrolle wird ähnlich wie bei den Sicherungstechniken auf den Zeitpunkt nach Fertigstellung der reaktiven Wand festzusetzen sein, um die Wirkung der Wand zu Beginn ihrer Betriebszeit nachzuweisen (z. B. Einhaltung der Sanierungszielwerte im Abstrom der reaktiven Wand).

In der Phase der Erfolgskontrolle werden die folgenden Aufgaben durchzuführen sein:

- > **Langzeitbetrieb:** Betriebsführung und Unterhaltung (Tätigkeiten zur Aufrechterhaltung der Funktionen wie z. B. Inspektion, Wartung, Pflege, Ersatz verbrauchter reaktiver Materialien, Reinigung und Instandhaltung)
- > **Langzeiterhaltung:** Reparatur oder teilweise Erneuerung, d. h. alle Massnahmen, die bei einem Schaden oder bei Abnutzung notwendig sind, um die angestammten Funktionen wiederherzustellen
- > **Funktionskontrolle:** Nachweis, dass die reaktive Wand ihre Aufgaben im Sinne der Sanierungsziele erfüllt (z. B. Messung der Grundwasserstände und der Schadstoffgehalte im An- und Abstrom der reaktiven Wand)

5.3 Nachkontrolle

5.3.1 Allgemeines

Als Nachkontrolle wird der zeitliche Abschnitt der Sanierung bezeichnet, der nach der Erfolgskontrolle erforderlich ist. Er dient bei der Dekontamination als Beleg, dass das Entfernen der Schadstoffe auch nachhaltig zu einer Reduzierung der Gefährdungen der Schutzgüter geführt hat. Nachkontrolle ist erforderlich, wenn eine Gefahr für die Schutzgüter für die Zukunft nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann.

Der Sanierungspflichtige hat im Rahmen der Erstellung des Sanierungsprojektes ein Konzept für die Erfolgs- und Nachkontrolle aufzustellen. Dabei sind insbesondere die vom Pflichtigen durchzuführenden Eigenkontrollmassnahmen und die gegenüber der zuständigen Behörde einzuhaltenden Berichts- und Nachweispflichten darzustellen.

Zu den grundsätzlichen Aufgaben der Nachkontrolle zählen:

- > Langzeitbetrieb;
- > Langzeiterhaltung;
- > Funktionskontrolle von Bauwerken und Anlagen;
- > Überwachung der Wirkungspfade.

Hinsichtlich der Überwachung und Nachkontrolle wird auf die Vollzugshilfe «Überwachung von belasteten Standorten», BAFU 2015 verwiesen, welche grundlegende Informationen zu diesem Themenbereich enthält.

Für die Dekontamination beschränkt sich die Nachkontrolle auf eine Überwachung der Wirkungspfade. Die übrigen Aspekte sind vor allem bei den Sicherungsmassnahmen relevant.

5.3.2 Überwachung der Wirkungspfade

Die Überwachung der Wirkungspfade im Rahmen der Nachkontrolle spielt bei In-situ-Dekontaminationsmassnahmen eine Rolle, um die Wirkung der auf dem Standort verbleibenden Restbelastung auf die Schutzgüter langfristig zu überwachen.

Diese Restbelastungen resultieren aus Schadstoffen, die in Konzentrationen unterhalb der Sanierungszielwerte am Standort verblieben sind, und aus Kontaminationen, die bei der Standorterkundung nicht entdeckt und damit nicht gezielt dekontaminiert wurden.

Die Überwachung kann neben der wiederholten oder kontinuierlichen Kontrolle der dauerhaften Einhaltung der festgelegten Sanierungsziele somit umfassen:

- > die Ermittlung von Veränderungen des Schadstoffpotentials, das sich nach der Dekontamination der Altlast noch am Standort befindet, eine Beschreibung, Bewertung und Prognose des Emissionsverhaltens sowie eine Prognose der weiteren Entwicklung im Hinblick auf die Gefährdung oder Beeinträchtigung von Schutzgütern.
- > die Erfassung und Prüfung von Standortparametern wie hydrogeologische, geochemische, hydrochemische Standortgegebenheiten, Versiegelungsgrad, Geländemorphologie, Pflanzenbewuchs, klimatische Einflüsse und besondere Vorkommnisse im Hinblick auf eine Beeinflussung der relevanten Wirkungspfade.
- > die Erfassung und Kontrolle aktueller und planungsrechtlich zulässiger Nutzungen auf dem Standort und in seinem Umfeld im Hinblick auf sich verändernde Expositionsbedingungen.

> Literatur

Vollzugshilfen/Leitfäden/Informationsschriften

BUWAL 2001: Erstellung von Sanierungsprojekten für Altlasten. Vollzug Umwelt.

BAFU 2007: Sicherung von Deponie-Altlasten. Stand der Technik, Grenzen und Möglichkeiten.

BAFU 2013: Projektmanagement bei komplexen Altlastensanierungen.

BAFU 2014: Evaluation von Sanierungsvarianten. Ein Modul der Vollzugshilfe «Sanierung von Altlasten».

BAFU 2015: Überwachung von belasteten Standorten. Vollzugshilfe zur Altlasten-Verordnung.

ITVA Dezember 1994: Mikrobiologische Verfahren zur Bodendekontamination. ITVA-Arbeitshilfe H1–3. Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V.

ITVA 1997: Bodenluftsanierung. ITVA-Arbeitshilfe H1–7. Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V.

ITVA 1998: Grundwasserreinigung. ITVA-Arbeitshilfe H1–9. Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V.

ITVA 1999: Hydraulische Massnahmen. ITVA-Arbeitshilfe H1–10. Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V.

ITVA 2004: Monitored Natural Attenuation. ITVA-Arbeitshilfe H1–12. Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V.

ITVA 2010: Innovative In-situ-Sanierungsverfahren. ITVA Arbeitshilfe H1–13. Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA), Berlin.

ITVA 2012: Grundwasseraufbereitung. ITVA Arbeitshilfe H1–14. Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA), Berlin.

LfULG 2000: Materialien zur Altlastenbehandlung. Mikrobiologische Sanierungsverfahren. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden. Nr. 1/2000.

LfULG 2007: Materialien zur Altlastenbehandlung. In-situ-Sanierungsverfahren. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie-Referat Grundwasser und Altlasten, Dresden.

TASK 2012: Thermische in situ-Sanierungsverfahren (TISS) zur Entfernung von Schadensherden aus Boden und Grundwasser. Terra-, Aqua- und Sanierungskompetenzzentrums – TASK, Leipzig.

Sonstige Literatur

Birke V., Rosenau D., Burmeier H.: Praxisrelevante Aspekte, Erfahrungen zur Leistungsfähigkeit sowie Trends bei Reinigungswänden in Deutschland und Österreich an 13 Standorten nach 6 Jahren.

Hiester, U., Müller, M.: Thermische in-situ-Sanierung (THERIS) unter Gebäuden und Effekte auf die CKW-Belastung im Grundwasser. Altlastensymposium 2016 - GAB (Gesellschaft zur Altlastensanierung in Bayern mbH) und altlastenforum BW (Baden-Württemberg). Neu-Ulm / Ulm, 22.-23.06.2016, S.110-118

Held T. 2014: «In-situ-Verfahren zur Boden- und Grundwasser-sanierung». Verfahren, Planung und Sanierungskontrolle. Wiley-VCH Verlag, Weinheim.

Stupp H.D.: Vergleich von LCKW-Grundwassersanierungen durch «Pump and Treat» und «Reaktive Systeme» – Verfahren und Kosten – Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement. C.F. Müller Verlag, Heidelberg.

Stupp H.D. 1998: Bodenluftsanierung – Theoretische Grundlagen und Praxiserfahrungen. Terra Tech 2/1998: S. 39–42.

Schroers S., Odensass M. 2005: In-situ-Sanierungsverfahren für die gesättigte Zone – Erste Erfahrungen und Hinweise aus nordrhein-westfälischen Einzelfällen. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen. AAV-Fachtagung am 9.11.2005, Hattingen.

Schwerin 2008: Auswertung internationaler Fachliteratur zu in-situ Anwendungen in der gesättigten Zone bei der Altlastenbearbeitung. Projekt im Rahmen des Länderfinanzierungsprogramms «Wasser, Boden und Abfall» 2007.

Umweltbundesamt Österreich 2010: Technologiequicksan In-situ-Sanierungstechnologien.

Zittwitz M., Gerhardt M. 2006: Das Methan-Biostimulationsverfahren – Vollständige Sanierung von LCKW-Schadensfällen durch biologische In-situ-Massnahme. TerraTech 10/2006.

Internet-Links

Deutschsprachige Seiten

Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden

Württemberg/Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg:
Altlasten – Fachinformationen im World-Wide Web.

www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de

www.itv-altlasten.de

Englischsprachige Seiten

GWRTAC Ground-Water Remediation Analyses Center:

www.gwrtac.org («www.gwrtac.org/html/techs.html» für schnelle
Einstieg in Sanierungstechniken verwenden)

US EPA Hazardous Waste Clean-up Information – Technology Focus:

www.clu-in.org/techfocus

Federal Remediation Technologies Roundtable: www.frtr.gov

(«www.frtr.gov/matrix2/top_page.html» für schnelle Einstieg in
Sanierungstechniken verwenden)

Center for Public Environmental Oversight: www.cpeo.org

(«<http://cpeo.org/techtree/ttdescript/index.html>» für schnelle Einstieg
in Sanierungstechniken verwenden)

Naval Facilities Engineering Service Center Environmental Services:
enviro.nfesc.navy.mil

(«http://enviro.nfesc.navy.mil/erb/webindex/topic_list.htm» oder
«[http://enviro.nfesc.navy.mil/erb/restoration/technologies/remed/
main.htm](http://enviro.nfesc.navy.mil/erb/restoration/technologies/remed/main.htm)» für schnelle Einstieg in Sanierungstechniken verwenden)

> Glossar

In der vorliegenden Vollzugshilfe werden folgende Begriffe und Fachausdrücke verwendet:

Ablagerungsstandort

Stillgelegte oder noch im Betrieb stehende Deponie oder andere Abfallablagerung; ausgenommen sind Standorte, an die ausschliesslich unverschmutztes Aushub-, Ausbruch- oder Abraummaterial gelangt ist.

Absorption (bei der Abluftreinigung)

Unter Adsorption versteht man die Anreicherung eines gasförmigen oder in Flüssigkeit gelösten Stoffes (Adsorptiv) an der Oberfläche eines Festkörpers (Adsorbens). Die Anreicherung wird hauptsächlich durch physikalische Kräfte bewirkt. Die hierbei angelagerten Stoffe gehen keine feste Bindung mit dem Adsorbens ein. A. ist wichtige Eigenschaft des Untergrunds beim Rückhalt von Schadstoffen.

aerob

Milieubedingung für biologische Abbauvorgänge, bei der Sauerstoff vorhanden ist

Aktivkohle

Reiner Kohlenstoff, der aufgrund seiner porösen Struktur eine riesige innere Oberfläche besitzt; Anwendung in der Technik zur von vor allem organischen Schadstoffen (Wasseraufbereitung).

Altlasten

Sanierungsbedürftige belastete Standorte

anaerob

Milieubedingung für biologische Abbauvorgänge, bei der kein Sauerstoff vorhanden ist

Aquifer

Grundwasserleitende geologische Schicht; bestehend aus Sedimenten (Sande und Kiese) oder Festgesteinen (Dolomit, Kalkstein, Mergelkalkstein)

Aquitard

Gering grundwasserleitende geologische Schicht; bestehend aus Sedimenten (Schluffe, Lehme) oder Festgesteinen (Quarzit, Sandstein, Schluffstein)

Aquiclude

Nicht grundwasserleitende geologische Schicht; bestehend aus Sedimenten (Ton) oder Festgesteinen (Tonstein, Granit, Metamorphite)

Belasteter Standort

Ort, dessen Belastung von Abfällen stammt und der eine beschränkte Ausdehnung aufweist

Betriebsstandort

Standort, dessen Belastung von stillgelegten oder noch in Betrieb stehenden Anlagen oder Betrieben stammt, in denen mit umweltgefährdenden Stoffen umgegangen worden ist.

Biopuster®

Verfahren zum Einbringen von Luftsauerstoff in Deponiekörper; Anwendung zur Entfernung von Methan vor einer Deponieumlagerung bzw. zur schnelleren Stabilisierung von Deponien

BTEX

Chemische Stoffklasse: Bezeichnung für die Summe an monoaromatischen Verbindungen (Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol)

CKW

Chemische Stoffklasse: Chlorierte Kohlenwasserstoffe (z. B. Tri- und Perchlorethen, Di-, Tri- und Tetrachlormethan, Vinylchlorid usw.)

Degradation

Abbau von chemischen Verbindungen z. B. im Rahmen des Stoffwechsels (→ Metabolisierung)

Dehalogenierung

Dehalogenierung ist die Entfernung von Halogenen aus organischen Verbindungen. Die Halogene werden meist durch Wasserstoff oder eine Doppelbrücke ersetzt.

Deponie-Altlasten

→ Adsorption Sanierungsbedürftige belastete Ablagerungsstandorte

Desorption

Unter Desorption versteht man die der entgegengesetzt wirkende Abreicherung eines gasförmigen oder in Flüssigkeit gelösten Stoffes (Adsorptiv) von der Oberfläche eines Festkörpers (Adsorbens).

Diffusion

Die molekulare Diffusion sorgt aufgrund der BROWNschen Molekularbewegung für eine Ausbreitung von Stoffen entsprechend einem Konzentrationsgefälle. Sie findet auch in unbewegter Flüssigkeit statt und ist besonders beim Transport durch Tone und bei der Ausbreitung gasförmiger Stoffe von grösserer Bedeutung.

Dissoziation

Zerfall von Molekülen in einfachere Bestandteile (z. B. Ionen)

Dispersion

Die Dispersion ist ein Verteilungsprozess, der durch die unterschiedlichen Transportgeschwindigkeiten, Weglängen und Fließrichtungen im Porenraum bewirkt wird. Er führt zu einer Verbreiterung und Verlängerung der Schadstoffbahnen.

Eisen (nullwertiges Eisen, Eisenschwamm oder -späne)

Elementares unedles Metall («nullwertiges Eisen»); Anwendung zur Dehalogenierung organischer Verbindungen (Entfernung von Chlor, Fluor etc.); technische Anwendung bei reaktiven Wänden in verschie-

denen Formen, die besonders grosse Oberflächen (Eisenspäne, Eisenschwamm) aufweisen.

Enhanced Natural Attenuation

Enhanced Natural Attenuation (ENA) ist die Stimulierung oder Initiierung von natürlich ablaufenden Prozessen (Natural Attenuation) durch das Einbringen von Substanzen in den Untergrund unter Nutzung naturgegebener Reaktionsräume. ENA ist ein in situ-Verfahren und dient der Unterstützung von NA-Prozessen im Untergrund.

Enteisung

Verfahren der Wasseraufbereitung: Entfernung des gelösten Eisens

Entmanganung

Verfahren der Wasseraufbereitung: Entfernung des gelösten Mangans

Erosion

Zerstörerische Wirkung (z. B. Abtrag) von Untergrund durch Wasser, Eis oder Wind

Evaporation

Direkte Verdunstung von Niederschlagswasser vom Boden und von oberirdischen Pflanzenteilen

Fällung

Ein chemisches Verfahren zur Überführung in Wasser gelöster Verbindungen in einen ungelösten Zusatz durch Zugabe geeigneter Chemikalien. Das entstehende Fällungs-Produkt kann dann durch geeignete physikalische Verfahren abgeschieden werden. Fällungsreaktionen werden vor allem auch zur Abtrennung von gelösten Metallionen angewandt.

FCKW

Chemische Stoffklasse: Fluorchlorkohlenwasserstoffe

Feldkapazität

Wassergehalt als Volumenanteil in Prozent, den ein ungesättigter Untergrund in ungestörter Lagerung maximal gegen die Schwerkraft speichern kann

Fluid

Flüssigkeit

Funnel and gate

Bezeichnung für eine spezielle Bauform einer reaktiven Reinigungswand, bei der der Grundwasserstrom durch ein dichtendes Bauwerk («funnel») gefasst und zu einem unterirdischen Reaktionsbereich («gate») geleitet wird; Begriff ist patentrechtlich geschützt

Gefahr

Eine Situation, die früher oder später mit hinreichender Wahrscheinlichkeit zu einem Schaden führen wird, wenn vorher keine Vorbeugemassnahmen ergriffen werden

Gesättigte Zone

Grundwasser erfüllter Bereich des Untergrundes (vgl. auch → Ungesättigte Zone)

Gradient

Höhenunterschied der Standrohrspiegelhöhe zwischen zwei Messpunkten

Grenzflächenspannung

Die Benetzungseigenschaften eines Feststoffes lassen sich durch die Grenzflächenspannung σ und den Randwinkel der Benetzbarkeit α ausdrücken. Die Grenzflächenspannung σ ist die freie Grenzflächenenergie zweier nicht mischbarer Phasen i und j. Diese Phasen können fest, flüssig oder gasförmig vorliegen. Der Randwinkel α ist der Winkel zwischen den Tangenten zweier Grenzflächen.

Hydraulischer Gradient

Druckunterschied im Grundwasser zwischen zwei Punkten, der eine Grundwasserströmung hervorruft; i.d.R. Gefälle der Grundwasser-oberfläche

In situ

Bezeichnung für Massnahmen, bei denen der Untergrund oder Abfall in seiner natürlichen Lagerung verbleibt

laminar

Gleichmässig fliessend (Strömungszustand)

LCKW

→ CKW

Lehm

Korngrössengemisch aus allen drei Korngrössenklassen Sand (0,063–2 mm), Schluff (0,002–0,063 mm) und Ton (<2 μ m) (auch «Dreikornmenge»)

Kolmatierung

Sedimentation von Schwebstoffen

Kontaminante

Schadstoff

Konvektion

Unter Konvektion versteht man den Transport der gelösten bzw. suspendierten Stoffe mit der Wasserströmung. Im Allgemeinen wird dabei von laminarem Fliessen und der Gültigkeit des Darcy-Gesetzes ausgegangen. Massgeblich ist die Porengeschwindigkeit v_n .

Matrixporosität

→ Porosität des festen Gesteins (Matrix)

Mehrphasenströmung

Strömung einer → Phase im Untergrund in Anwesenheit anderer strömender Phasen

Metabolisierung

Umsetzung von chemischen Verbindungen im Rahmen des Stoffwechsels

Monitored Natural Attenuation

Monitored Natural Attenuation (MNA) steht für die Überwachung von Natural Attenuation-Prozessen (Natural Attenuation) durch zeitlich gestaffelte Untersuchung und Überprüfung der Prognose.

Natural Attenuation

Unter Natural Attenuation (NA) werden in verschiedene physikalische, chemische und biologische Prozesse verstanden, die ohne menschlichen Einriff wirken und unter bestimmten Bedingungen zur Reduktion von Masse, Toxizität, Mobilität, Volumen oder Konzentration von Schadstoffe im Untergrund und Grundwasser führen

PAK

Chemische Stoffklasse: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (z. B. Naphthalin, Benz(a)pyren usw.)

PCB

Chemische Stoffklasse: Polychlorierte Biphenyle

Pedogenese

Die Pedogenese beschreibt die Entstehung und Entwicklung der Böden

Pedologie

Bodenkunde

Persistenz

Bestehen bleiben eines Zustandes über längere Zeiträume; hier: Beständigkeit chemischer Verbindungen

Petrografie

Wissenschaft von der mineralogischen und chemischen Zusammensetzung der Gesteine, ihrer Gefüge, ihrer Nomenklatur und Klassifikation

Phase

Zustandsform des Schadstoffes im Untergrund. Unterschieden werden reine (flüssige) Schadstoffphasen (ungelöste Schadstoffe wie z. B. → DNAPL oder → LNAPL), gas oder dampfförmige, gelöste (wässrige) und feste Phasen

Porenanteil

Der Porenanteil n bezeichnet den Anteil der Poren in einem gegebenen Untergrundvolumen, bzw. den Raum, der nicht von der Matrix eingenommen wird. Er ist die Summe der Porenanteile von Luft (a : n_a), Wasser n_w und ggf. auch anderer Fluide n_{fluid} , wie z. B. Öl.

Porosität

Beschaffenheit des Gesteins mit Hohlräumen

Randwinkel der Benetzbarkeit

→ Grenzflächenspannung

Redoxverhältnisse/-bedingungen

Milieuverhältnisse auf Grund der ablaufenden Oxidations- und Reduktionsreaktionen

Residuale Phase

→ Phase im Untergrund in der Form festsitzender, nicht mobiler Schadstoffanreicherungen (z. B. in Form von Tröpfchen in den Porenräumen bei LCKW)

Retardation

Die Retardation erfolgt durch → Adsorption und → Desorption.

Sand

Hauptfraktion im feinkörnigen Untergrund mit einer Korngrösse von 0,063–2 mm

Sanierungsbedürftiger Standort

Standort, der zu schädlichen oder lästigen Einwirkungen führt oder bei dem die konkrete Gefahr besteht, dass solche Einwirkungen entstehen

Sättigungsgrad

Der Sättigungsgrad S_{fluid} ist der Anteil am Gesamtporenraum, der vom betreffenden Fluid ausgefüllt wird. Die Summe der Sättigungsgrade aller Fluide im Porenraum ergibt 1. Somit gilt für einen mit Wasser gesättigten Untergrund $S_w=1$ und $S_a=0$, für einen mit Luft gesättigten (also trockenen) Untergrund $S_a=1$ und $S_w=0$.

Schadstoffphasen

→ Phase

Silt

Hauptfraktion von feinkörnigem Untergrund mit einer Korngrösse von 0,002–0,063 mm

Sicherung

Massnahmen zur dauerhaften Unterbrechung des Schadstofftransports zwischen einer Altlast und der Umwelt (Beseitigung der Transmission)

Sorption

→ Adsorption

Standrohrspiegelhöhe

Höhe des freien Grundwasserspiegels in einem Brunnen (= Standrohr)

Tektonik

Lehre vom Bau der Erdkruste und ihrer Bewegungen

Ton

Hauptfraktion im feinkörnigen Untergrund mit einer Korngrösse von $<2 \mu\text{m}$ ($<0,002 \text{ mm}$)

Überwachungsbedürftiger Standort

Standort, bei dem hinsichtlich des Schutzes des Grundwassers bzw. oberirdischer Gewässer bestimmte Anforderungen überschritten sind, bei dem aber noch kein Sanierungsbedarf besteht

Unfallstandort

Standort, der wegen ausserordentlicher Ereignisse, einschliesslich Betriebsstörungen, belastet ist

Ungesättigte Zone

Nicht mit Grundwasser erfüllter Bereich des Untergrundes (vgl. auch → Gesättigte Zone)

Viskosität

Zähigkeit von Flüssigkeiten und Gasen

Vorfluter

Gewässer, in das Wasser abgeleitet wird

Wassergehalt

Der Wassergehalt w eines Untergrunds gibt die Masse des Wassers bezogen auf die (trockene) Masse der Feststoffe in einem Untergrundvolumen an. (Auch andere Definitionen sind in Verwendung, z. B. der Wassergehalt W bezogen auf die Feuchtmasse des Untergrunds und der volumetrische Wassergehalt Θ .)

Zeolithe

Zeolithe sind Alkalialuminiumsilicate unterschiedlicher Zusammensetzung; sie kommen in der Natur vor, lassen sich aber auch synthetisch herstellen. Charakteristisches Merkmal ist ein dreidimensionales Kristallgitter, das von einem regelmässigen Kanalsystem mit definierter Porengrösse durchzogen wird; Anwendung als Ionentauscher oder Adsorbens (→ Adsorption)

Xenobiotika

naturfremde Stoffe

> Verzeichnisse

Abkürzungen

AltV

Altlasten-Verordnung

α

Randwinkel der Benetzbarkeit

BAFU

Bundesamt für Umwelt

BAM

Bundesanstalt für Materialprüfung (Deutschland)

BTEX

vgl. Anhang B: Begriffsbestimmungen Kap. 1

CH₄

Methan

CKW

vgl. Anhang B: Begriffsbestimmungen Kap. 1

CO₂

Kohlendioxid

DNAPL

«Dense non-aqueous phase liquids»; flüssige Schadstoffphasen mit einer Dichte grösser als Wasser (z. B. Phasen aus leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffen)

FCKW

vgl. Anhang B: Begriffsbestimmungen Kap. 1

i

hydraulischer Gradient

k_f

hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)

LNAPL

«Light non-aqueous phase liquids»; flüssige Schadstoffphasen mit einer Dichte kleiner als Wasser (z. B. Phasen aus Mineralölen oder Aromaten)

n

Porenanteil

N₂

Stickstoff

Nm³

Norm-Kubikmeter (bei Gase; bezogen auf standardisierte Druck- und Temperaturbedingungen)

O₂

Sauerstoff

PAK

vgl. Anhang B: Begriffsbestimmungen Kap. 1

PCB

vgl. Anhang B: Begriffsbestimmungen Kap. 1

S_{fluid}

Sättigungsgrad

SIA

Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein

σ_f

Grenzflächenspannung

USG

Umweltschutzgesetz

w

Wassergehalt

Abbildungen

Abb. 1
Verhältnis von Aufwand zu Nutzen von Sanierungsmassnahmen 12

Abb. 2
Zuordnung der Sanierungsverfahren zu den wesentlichen Stoffeigenschaften 15

Abb. 3
Übersicht über die Verfahren der In-situ-Sanierung 18

Abb. 4
Strukturierung der hydraulischen Verfahren 25

Abb. 5
Entscheidungsbaum für die Verfahren zur Phasentrennung 26

Abb. 6
Entscheidungsbaum für die hydraulischen Sanierungsverfahren mit Wasser 28

Abb. 7
Prinzip der Grundwassersanierung durch «Pump and Treat» 29

Abb. 8
Prinzip der vertikalen Infiltration 31

Abb. 9
Prinzip der Grundwasserzirkulation 32

Abb. 10
Prinzip der permeablen reaktiven Wand 34

Abb. 11
Entscheidungsbaum für die Sanierung leicht flüchtiger Schadstoffe 35

Abb. 12
Sanierung der ungesättigten Zone durch Bodenluftabsaugung 36

Abb. 13
Sanierung der gesättigten Zone durch In-situ-Strippen 38

Abb. 14
Anwendungsbereiche der TISS-Verfahren 40

Abb. 15
Dampf-Luft-Injektion in die ungesättigte und gesättigte Zone 41

Abb. 16
Thermische Mobilisierung mit festen Wärmequellen in der ungesättigten Zone 42

Abb. 17
Entscheidungsbaum für die Sanierung lösungsmittellöslicher Schadstoffe 44

Abb. 18
Entscheidungsbaum für die Sanierung mit oxidativen biologischen Verfahren 47

Abb. 19
Anwendungsbeispiel für Bioventing 48

Abb. 20
Verfahrensschema der chemischen In-situ-Sanierung 52

Abb. 21
Massenströme und Entsorgungsnotwendigkeiten bei der Aufbereitung von Abwasser und Abluft 58

Tabellen

Tab. 1
Entscheidungsgründe für die In-situ-Sanierung 14

Tab. 2
Stoffeigenschaften typischer Altlastenschadstoffe 16

Tab. 3
Eignung der In-situ-Verfahren für ausgewählte Schadstoffe 19

Tab. 4
Kriterien für die Eignung und Machbarkeit passiver Grundwassersanierungsverfahren 33

Tab. 5
Einsatzmöglichkeiten der Mobilisierungsverfahren 39

Tab. 6
Abbaubarkeit und Praxiserfahrung des Abbaus für die häufigsten Schadstoffe 45

Tab. 7
Wirksamkeit von Aufbereitungstechniken für belastete Wässer 55

> Anhang

A1 Faktenblätter zu den technischen In-situ-Verfahren

A2 Faktenblätter zu den Wasser- und Abluftbehandlungs-Verfahren

Siehe separate PDF: www.bafu.admin.ch/uv-0834-d