

570 Biologische Bodenbehandlung

Biologische Behandlungsverfahren nutzen die Fähigkeit von Mikroorganismen, Kohlenstoff haltige Verbindungen als Nährstoffe (Substrat) verwerten zu können. Beim vollständigen Abbau organischer Schadstoffe (= Mineralisierung) nutzen die Mikroorganismen die Schadstoffe als Energiequelle, wobei als Endprodukte Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) entstehen. Häufig kommt es jedoch nur zu einem Teilabbau der Schadstoffe (= Transformation). Die entstehenden Abbauprodukte werden anschließend entweder von anderen Bodenorganismen weiter umgesetzt oder verbleiben im Boden, wo ein Einbau in die organische Bodenfraktion erfolgen kann (Humifizierung). Schadstoffe können durch Mikroorganismen auch cometabolisch umgesetzt werden. Der Begriff Cometabolismus bezeichnet in diesem Zusammenhang die Abhängigkeit der Umsetzung eines Schadstoffes vom Vorhandensein eines anderen Stoffes (= Co-Substrat). Bei cometabolischen Umsetzungen gewinnen die Mikroorganismen aus dem Schadstoffabbau keine Energie und benötigen daher zur Aufrechterhaltung von Stoffwechsel- und Wachstumsprozessen zusätzliche organische Nährstoffe.

Umfang und Geschwindigkeit des biologischen Schadstoffabbaus werden maßgeblich durch die chemisch-physikalischen Eigenschaften der Schadstoffe wie z.B. Wasserlöslichkeit und Molekülstruktur bestimmt. Kontaminanten, die toxische Wirkungen auf Mikroorganismen ausüben, limitieren den biologischen Schadstoffabbau. Darüber hinaus werden mikrobielle Degradationsprozesse auch durch bodenspezifische Eigenschaften beeinflusst. Bei tonigen schluffigen Böden mit hohen Adsorptionskräften ist der überwiegende Schadstoffanteil i. d. R. in der Feinkornfraktion anzutreffen und daher weniger bioverfügbar.

Um bei der biologischen Behandlung kontaminierter Böden bzw. Wässer einen möglichst raschen und vollständigen Schadstoffabbau zu erreichen, werden Wachstum und Abbauleistung der Mikroorganismen durch gezielte Maßnahmen gefördert, z.B. durch

- Verbesserung der Sauerstoffversorgung (z.B. durch Druckbelüftung, Einsatz von H₂O₂),
- Zufuhr von Nährstoffen,
- Erhöhung der Bioverfügbarkeit der Schadstoffe (z.B. durch Einsatz von Tensiden),
- Optimierung der äußeren Wachstumsbedingungen (pH-Wert, Temperatur, Redoxpotential).

Verfahren der biologischen Bodenbehandlung stehen gegenwärtig in zahlreichen unterschiedlichen Verfahrensvarianten mit unterschiedlichem Entwicklungsstand zur Verfügung. Biologische Behandlungsverfahren werden grundsätzlich unterschieden in

- **in-situ**-Verfahren (Sanierung erfolgt im natürlichen Lagerungsverbund des Bodens) und
- **ex-situ**-Verfahren (Behandlung erfolgt nach Aushub des kontaminierten Materials).

Bei *ex-situ*-Verfahren wird darüber hinaus differenziert zwischen *on-site*- (Behandlung vor Ort) und *off-site*-Techniken (Behandlung in Anlagen außerhalb des Sanierungsortes). *Ex-situ*-Verfahren kommen in der Praxis i.d.R. zum Einsatz, wenn

- im Rahmen von Baumaßnahmen belastetes Bodenmaterial anfällt, das aufgrund seiner Schadstoffgehalte nicht wiedereinbaufähig ist und somit einer geordneten Entsorgung zuzuführen ist,
- das kontaminierte Bodenmaterial nur ein geringes Volumen besitzt und mit vergleichsweise wenig Aufwand ausgekoffert werden kann,
- aufgrund der bestehenden bzw. geplanten Nutzung eine rasche Sanierung der Bodenkontamination erforderlich ist, welche mit einer i.d.R. zeitintensiven *in-situ*-Sanierung nicht realisierbar ist,

- der verunreinigte Boden einen hohen Kontaminationsgrad aufweist, so dass eine effektive Schadstoffreduzierung nur mittels einer Intensivbehandlung, wie sie z.B. in Mieten oder Bioreaktoren durchführbar ist, erfolgversprechend ist,
- aufgrund der lokalen Standortbedingungen (u.a. geringe pneumatische und/oder hydraulische Durchlässigkeit des Untergrundes, sehr inhomogene Schadstoffverteilung) eine *in-situ*-Sanierung nicht aussichtsreich erscheint.

Um zu beurteilen, ob biologische Verfahren zur Behandlung einer Bodenkontamination eingesetzt werden können, sind zunächst die jeweiligen geologisch/hydrogeologischen Gegebenheiten des Standortes sowie Art, Höhe und räumliche Ausdehnung der Schadstoffbelastung zu ermitteln. Anhand dieser Kriterien kann häufig bereits eine Vorentscheidung bezüglich der Anwendbarkeit von *in-situ*- oder *ex-situ*-Verfahren getroffen werden.

Boden- und Schadstofffaktoren zur Beurteilung der Wirksamkeit mikrobiologischer Dekontaminationsverfahren		
	Parameter	Bemerkungen
physikalisch	Wassergehalt	Bestimmung der generellen Behandlungsfähigkeit des Bodens und Vorauswahl geeigneter Verfahren
	Feldkapazität	
	pH-Wert	
	Temperatur	
	O ₂ -Angebot	
	Durchlässigkeit	
chemisch	Art der Schadstoffe	Bestimmung der generellen Behandlungsfähigkeit des Bodens und Vorauswahl geeigneter Verfahren, Bestimmung des natürlichen Nährstoffangebotes
	Schadstoffkonzentration	
	organ. Gesamtkohlenstoff (TOC)	
	Redox-Potential	
	C:N:P – Verhältnis	
biologisch	Inkubationstests	Bestimmung der Biodegradierbarkeit und Quantifizierung der Degradationsrate
	Batchversuche	
	Mikrokosmen-Technik	Best-Case-Zeitprognose, Prüfung Reaktions- und Massenbilanz
	Respirometertests	Messung der O ₂ -Aufnahme und der Biodegradationsraten
	Kulturstudien	Bestimmung der im Boden natürlich auftretenden Bakterienstämme bzw. besonders angepasster Mikroflora
	Wachstumstests (spread-plate Techniken)	Bestimmung der Bakterienstammdichte in Laborversuchen
	Wachstumshemmtests	Bestimmung der biologischen Aktivität bzw. deren Einschränkung durch spezifische Bodeneigenschaften

Um Erkenntnisse bezüglich der Zahl der im Boden vorhandenen Mikroorganismen und deren schadstoffspezifischen Abbaupotentials zu gewinnen, sind anschließend geeignete Laboruntersuchungen durchzuführen. Diese Untersuchungen ermöglichen darüber hinaus auch Aufschluss darüber, ob im Boden bakteriotoxische Stoffe vorhanden sind, die sich hemmend auf den biologischen Schadstoffabbau auswirken.

Der Stand der Technik auf dem Gebiet der biologischen Bodenbehandlung wird im Wesentlichen durch die biologische Mietensanierung von **Mineralölkontaminationen** definiert. Das Abbaupotential nimmt bei den im Allgemeinen gut degradierbaren n-Alkanen mit zunehmender Kettenlänge ab. Langkettige n-Alkane (> C₃₀) und iso-Alkane sind dem mikrobiellen Abbau kaum noch zugänglich.

Monoaromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX) sind unter aeroben Bedingungen relativ gut biologisch abbaubar. Bei Alkylbenzolen nimmt im Allgemeinen die Abbaubarkeit mit zunehmender Länge und Verzweigungsgrad der Alkyl-Seitenketten ab.

Im Vergleich zu aliphatischen und monoaromatischen Kohlenwasserstoffen sind **polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)** dem biologischen Abbau in geringerem Umfang zugänglich. Die biologische Abbaubarkeit der PAK ist abhängig von der Anzahl der kondensierten Benzol-Kerne. Mit steigender Anzahl der aromatischen Ringe nimmt die Wasserlöslichkeit und damit auch die Verfügbarkeit der PAK für die biologische Degradation ab. Während PAK mit bis zu 3 kondensierten Benzol-Kernen relativ gut durch Mikroorganismen degradiert werden können, sind 4- und 5-kernige PAK als schwer biologisch abbaubar einzustufen. Bei PAK mit mehr als 5 aromatischen Ringen erfolgt kein signifikanter biologischer Abbau. PAK werden aerob von Bakterien, Hefen und höheren Pilzen umgesetzt. Bakterien können PAK mineralisieren und damit als Kohlenstoff- und Energiequelle verwerten oder cometabolisch umsetzen. Pilze bauen PAK dagegen nur cometabolisch ab.

Bei der Beurteilung der biologischen Abbaubarkeit von Chlorkohlenwasserstoffen ist zwischen aliphatischen und aromatischen Verbindungen zu differenzieren. **Leichtflüchtige chlorierte aliphatische Kohlenwasserstoffe (LCKW)** sind grundsätzlich biologisch abbaubar, wobei der Abbau insbesondere der höher chlorierten Vertreter dieser Stoffgruppe wie z.B. Tri- und Tetrachlorethen bevorzugt unter anaeroben Bedingungen erfolgt. Die biologische Abbaubarkeit von **Chloraromaten** ist wesentlich vom Chlorierungsgrad der Verbindungen abhängig. Während niederchlorierte Aromaten vergleichsweise gut mikrobiologisch degradierbar sind, sind höher chlorierte Verbindungen dem biologischen Abbau nur in geringem Maße zugänglich.

Für die häufig als Bodenkontaminanten im Bereich von Rüstungsaltpasten anzutreffende Stoffgruppe der **Nitroaromaten** wurden biologische Degradationsvorgänge nachgewiesen. Der Abbau verläuft jedoch i.d.R. langsamer als bei den entsprechenden nicht nitrierten Aromaten. Der Abbau von Nitroaromaten erfolgt häufig cometabolisch und ist i.d.R. unvollständig.

Der Einsatz von biologischen Verfahren zur Sanierung von Bodenkontaminationen durch **polychlorierte Biphenyle (PCB)** und **polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F)** erscheint aufgrund der überwiegend geringen Bioverfügbarkeit und schweren und unvollständigen biologischen Abbaubarkeit dieser Verbindungen nicht sinnvoll.

Schwermetalle werden nicht biologisch abgebaut. Einige Schwermetalle können jedoch mikrobiell komplexiert werden. Sie wirken außerdem z. T. toxisch auf Mikroorganismen und können einen Abbau organischer Stoffe behindern.

Mikrobiologisch behandelte Böden sind wiederverwendbar, wenn sichergestellt ist, dass die Schadstoffe bis auf für die jeweilige Nutzung tolerierbare Schadstoffgehalte abgebaut sind und keine schädlichen Stoffwechselprodukte (Metaboliten) angereichert wurden. Bei Mietenverfahren fällt je nach Betriebsweise der Mieten überschüssiges Prozesswasser als Abwasser an, in dem Schadstoffe und zugesetzte Nährstoffe enthalten sein können.

Die Hinweise zu Literatur und Leistungsanbietern werden nachfolgend für alle Teilleistungsbereiche zusammenfassend dargestellt.

Im Leistungsbereich 541 (Biologische Insitu.-Verfahren) erfolgen spezielle Angaben zu den Biologischen In-situ-Verfahren).

Literatur

Alef, K. (Hrsg.): Biologische Bodensanierung – Methodenbuch. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1994.

Hupe, K., Meyer, O.: Emissionsminderung bei biologischen Ex-situ-Bodenbehandlungsverfahren. TerraTech 3/2000, S. 23-26.

EPA (1995): Bioventing Principles and Practice, Volume I: Bioventing Principles. EPA/540/R-95/534a, U:S: Environmental Protection Agency, Washington DC, September 1995.

EPA (1995): Bioventing Principles and Practice, Volume I: Bioventing Design. EPA/625/XXX/001, U:S: Environmental Protection Agency, Washington DC, September 1995.

- Hoffmann, J.; Viedt, H. (1998): Biologische Bodenreinigung: Ein Leitfaden für die Praxis. Springer Verlag, Berlin – Heidelberg, 1998.
- Kästner, M., Mahro, B., Wienberg, R.: Biologischer Schadstoffabbau in kontaminierten Böden unter besonderer Berücksichtigung der Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe. Hamburger Berichte, Band 5, Economica Verlag, Bonn, 1993.
- Klein et al. (1991): Einsatzmöglichkeiten und Grenzen mikrobiologischer Verfahren zur Bodensanierung. 1. Bericht des Interdisziplinären DECHEMA-Arbeitskreises „Umweltbiotechnologie – Boden“. DECHEMA, Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Frankfurt/Main, Juni 1991.
- Klein, J. (Hrsg.): Labormethoden zur Beurteilung der biologischen Bodensanierung. 2. Bericht des Interdisziplinären DECHEMA-Arbeitskreises „Umweltbiotechnologie – Boden“. DECHEMA, Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Frankfurt/Main, Juni 1992.
- LfU BW (Hrsg.): Handbuch Mikrobiologische Bodenreinigung. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe, 1995.
- LfU BW (Hrsg.): Mikrobiologische Verfahren bei der Altlastensanierung. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe, 1996.
- LfUG SA (Hrsg.): Mikrobiologische Sanierungsverfahren. Materialien zur Altlastenbehandlung Nr. 1/2000, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden, Juli 2000.
- LUA NRW: Anforderungen an biologische Bodenbehandlungsanlagen nach dem Mietenverfahren. Merkblatt Nr. 8 des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen, Essen, 1997.
- Mackenbrock, U., Kopp-Holtwiesche, B., Blank, W.: Zur biologischen Abbaubarkeit von Industriechemikalien. TerraTech 4/1994, S. 41-51.
- McCutcheon, S.C., Schnoor, J.L., Zehnder, A.J.: Phytoremediation - Transformation and Control of Contaminants. John Wiley & Sons, New York, 2003.
- Trapp, S. Aspekte der Phytoremediation organischer Schadstoffe. UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox. 12 (5), S. 246-255, ecomed-Verlag, Landsberg/Lech, 2000.
- UBA (Hrsg.): Leitfaden Biologische Verfahren zur Bodensanierung. Erarbeitet von Michels, J., Track, T.; Gehrke, U., Sell, D. (DECHEMA e.V.) im Auftrag des Umweltbundesamtes, Fachgebiet III 3.6, Projektträger Abfallwirtschaft und Altlastensanierung (PT AWAS), Berlin, Mai 2001.
- Wilhelm, V. et al.: Mikrobiologische Bodensanierung: Planung, Genehmigung, Arbeitsschutz, Umwelt- und Qualitätsmanagement bei mikrobiologischen Sanierungsmaßnahmen. Kontakt & Studium, Band 498, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1996.

Information über Leistungsanbieter

Kompetente Leistungsanbieter für die biologische Behandlung von Boden oder Bauschutt sind anhand aussagefähiger Referenzen auszuwählen.

570.1 Biologische Behandlung in Mieten

570.1.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche / technische Grundlagen)

Unter den ex-situ-Verfahren stellt die biologische Bodenbehandlung in Mieten derzeit den Stand der Technik dar. Bei diesem Verfahren zur biologischen Behandlung kontaminierter Böden wird das ausgekofferte Bodenmaterial nach mechanischer Aufbereitung zu lockeren Haufwerken, den sog. Mieten, aufgeschichtet. Dabei wird grundsätzlich unterschieden zwischen

- **statischen** Mietenverfahren (keine Umschichtung des Bodenmaterials während der Sanierung) und
- **dynamischen** Mietenverfahren (mittels spezieller Wendeeinrichtungen kann während der Sanierungsphase eine Umschichtung des Bodenmaterials erfolgen).

Die Höhe der Mieten beträgt im Allgemeinen 1,5-3,0 m, in selteneren Fällen werden auch flachere Mieten als sog. „Biobeete“ bzw. Hochmieten > 3 m betrieben. Die horizontale Ausdehnung der Mieten richtet sich in der Praxis eher nach den lokalen Platzverhältnissen als nach besonderen mikrobiologischen Erfordernissen (übliche Abmessungen der Mietenbasis sind etwa 20 m Breite und 50-80 m Länge). Die Behandlung des kontaminierten Bodenmaterials erfolgt auf Flächen, die mit einer Untergrundabdichtung versehen wurden. Die Mieten werden entweder den Witterungsbedingungen ausgesetzt (= offene Mieten) oder aber in geschlossenen Zelten oder Leichtbauhallen betrieben, wobei die Einhausung der Mieten das derzeit übliche Verfahren darstellt. Zur Optimierung der Abbaubedingungen werden die Mieten in Abhängigkeit von den jeweiligen Erfordernissen mit Strukturmaterial (Stroh, Rindenmulch, Komposte), Nährstoffen und Mikroorganismen angereichert, befeuchtet sowie passiv oder aktiv belüftet.

Bezüglich der Regulation des Wassergehaltes der Mieten wird prinzipiell unterschieden zwischen **Trockenmieten** und **Nassmieten**. Beim Trockenrotteverfahren wird zu Beginn der Behandlung ein der natürlichen Bodenfeuchte entsprechender Wassergehalt in der Miete eingestellt, so dass während des Betriebes kein Sickerwasser anfällt. Zur Vermeidung einer Austrocknung der Miete wird der Wassergehalt während der Behandlungsdauer regelmäßig kontrolliert und ggf. neu eingestellt.

Bei Nassmieten wird das zu behandelnde Bodenmaterial durch Berieselungsanlagen befeuchtet. Das beim Betrieb von Nassmieten anfallende Sickerwasser wird über installierte Drainageeinrichtungen erfasst und kontrolliert abgeleitet. Nach entsprechender Aufbereitung in Abhängigkeit von der Schadstoffbelastung kann das gereinigte Wasser anschließend zur Befeuchtung der Mieten verwendet oder in die Kanalisation abgeleitet werden.

Die Mietenbehandlung von kontaminiertem Bodenmaterial erfolgt in der Regel unter aeroben Bedingungen. Bezüglich der verfahrenstechnischen Realisierung der Sauerstoffversorgung wird zwischen **passiver** und **aktiver Belüftung** unterschieden.

Eine passive Belüftung der Bodenmieten kann durch ein lagenförmiges, abwechselndes Aufbringen von Bodenmaterial und groben Strukturstoffen erzielt werden. Die letztgenannten Materialien bilden dabei Belüftungsschichten, durch die über passive Diffusion die Schichten mit dem zu behandelnden Bodenmaterial mit Luftsauerstoff versorgt werden.

Die aktive Belüftung von Bodenmieten kann mittels Zwangsbelüftung oder dynamischer Belüftung erfolgen. Bei der Zwangsbelüftung wird Umgebungsluft in den Mietenkörper mittels Luftpflanzen oder Vakuumpumpen eingebracht (Druck- bzw. Saugbelüftung). Bei der dynamischen Belüftung erfolgt die Optimierung der Sauerstoffversorgung durch maschinelles Wenden bzw. Umsetzen der Mieten. Mittels spezieller Wendeeinrichtungen werden die Mieten in regelmäßigen Abständen aufgenommen, homogenisiert und erneut aufgesetzt, wodurch das Bodenmaterial mit Luftsauerstoff in Kontakt gebracht wird. Die bei der Mietenbehandlung entstehende Abluft wird in der Regel über Bio- oder Aktivkohlefilter geleitet und gereinigt.

Anforderungen an biologische Bodenbehandlungsanlagen nach dem Mietenverfahren sind im Merkblatt Nr. 8 des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen beschrieben (u.a. Anforderungen an die Entwässerung, Untergrundabdichtung, Arbeits- und Nachbarschaftsschutz).

Errichtung und Betrieb einer biologischen Bodenbehandlungsanlage nach dem Mietenverfahren bedürfen – bei einem Anlagenbetrieb von mehr als 12 Monaten an demselben Ort – einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung gemäß § 4 BImSchG i.V.m. 4. BImSchV, Anhang, Nr. 8.7 Spalte 1 (Durchsatz ≥ 10 t/d) bzw. Spalte 2 (Durchsatz < 10 t/d). Bezüglich Abluft und Lärmemissionen sind die Vorgaben gemäß TA Luft und der einschlägigen VDI-Richtlinien (insbesondere VDI 2280) sowie die TA Lärm zu berücksichtigen. Die immissionsschutzrechtliche Genehmigung schließt die anderen, die Anlage betreffenden behördlichen Entscheidungen ein, insbesondere öffentlich-rechtliche Genehmigungen und Zulassungen. Ausgenommen hiervon sind wasserrechtliche Erlaubnisse und Bewilligungen (§ 13 Satz 1 BImSchG).

570.1.2 Kostenermittlung

570.1.2.1 Abrechnungseinheiten, Kostenkalkulation

In der Kostenkalkulation sind die Abrechnungseinheiten wie folgt vorgesehen:

Leistung	Abrechnungseinheit	alternativ
Biologische Behandlung von Boden / Bauschutt in Mieten	t	

570.1.2.2 Leistungsregister

weiterführende Leistungen:

LB 110	Geotechnische Felduntersuchung
LB 130	Chemisch-physikalische Analytik
LB 270	Direkt-, Indirekteinleitung, Versickerung
LB 300	Erdarbeiten
LB 310	Wiedereinbau
LB 340	Eigenkontrollmaßnahmen der Überwachung und Nachsorge
LB 500	Fassung und Absaugung von Bodenluft / Deponiegas
LB 510	Behandlung von Bodenluft, Deponiegas und Abluft
LB 541	Biologische In-situ-Verfahren
LB 700	Oberflächenabdeckung
LB 710	Oberflächenabdichtung
LB 800	Aufbereitung
LB 810	Verwertung und Beseitigung von Aushub- und Abbruchmaterial

570.2 Biologische Behandlung in Beeten / Landfarming

570.2.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche / technische Grundlagen)

Das Landfarming-Verfahren weist Gemeinsamkeiten mit dem Mietenverfahren auf, stellt jedoch deutlich geringere Anforderungen an Verfahrenstechnik und Prozesssteuerung.

Beim Landfarming wird der belastete Boden in dünnen Lagen (Schichtdicke 0,2-0,4 m) in großen Flachbeeten ausgelegt. Das verunreinigte Bodenmaterial wird durch wiederholte Bearbeitung mit landwirtschaftlichen Maschinen (Egge, Pflug, Fräse) mechanisch aufgelockert, wodurch die Sauerstoffversorgung verbessert wird. Der Schadstoffabbau kann zusätzlich durch Infiltration von Nährlösungen und Mikroorganismen gefördert werden. Aufgrund der fehlenden Abdeckung kann es insbesondere während der Bearbeitungsphasen zu einem Ausstrippen von Schadstoffen in die Atmosphäre kommen. Gegebenenfalls können die Behandlungsflächen mit einer Basisabdichtung versehen werden, die eine Fassung des Sickerwassers ermöglicht.

Das Landfarming wird aufgrund seiner relativ geringen Behandlungskosten häufig zur Sanierung von größeren Bodenmengen, die mit aerob leicht abbaubaren Schadstoffen verunreinigt sind (z.B. MKW), eingesetzt. Die Behandlungsdauer ist bei diesem Verfahren relativ lang, da aufgrund der fehlenden Abdeckung das zu behandelnde Bodenmaterial der Witterung ausgesetzt ist und somit bei Frostperioden der biologische Schadstoffabbau vorübergehend nahezu zum Stillstand kommen kann.

Der Flächenbedarf ist aufgrund der geringen Schichtdicke des Bodens wesentlich größer als beim Mietenverfahren. Aufgrund dieser Eigenschaft ist das Landfarming-Verfahren vorrangig in den USA von praktischer Bedeutung, während es in Deutschland nur geringe Praxisrelevanz besitzt.

Abweichend zur Anwendung in Deutschland wird unter Landfarming in den USA das Untermischen kontaminierter Böden unter unbelastetes Material, z.T. unter Zugabe von Klärschlamm, verstanden. Ebenso wird in den USA die in-situ-Sanierung großflächiger oberflächennaher Kontaminationen durch Bearbeitung mit landwirtschaftlichen Geräten unter Zumischung von Nährlösungen und / oder Bakterienkulturen verstanden.

570.2.2 Kostenermittlung

570.2.2.1 Abrechnungseinheiten, Kostenkalkulation

In der Kostenkalkulation sind die Abrechnungseinheiten wie folgt vorgesehen:

Leistung	Abrechnungseinheit	alternativ
Biologische Behandlung in Beeten / Landfarming	t	

570.2.2.2 Leistungsregister

weiterführende Leistungen:

LB 110	Geotechnische Felduntersuchung
LB 130	Chemisch-physikalische Analytik
LB 270	Direkt-, Indirekteinleitung, Versickerung
LB 300	Erdarbeiten
LB 310	Wiedereinbau
LB 340	Eigenkontrollmaßnahmen der Überwachung und Nachsorge
LB 500	Fassung und Absaugung von Bodenluft / Deponiegas

LB 510	Behandlung von Bodenluft, Deponiegas und Abluft
LB 541	Biologische In-situ-Verfahren
LB 700	Oberflächenabdeckung
LB 710	Oberflächenabdichtung
LB 800	Aufbereitung
LB 810	Verwertung und Beseitigung von Aushub- und Abbruchmaterial

570.3 Biologische Behandlung in Reaktoren

570.3.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche / technische Grundlagen)

Das Verfahrensprinzip der Reaktortechnik beruht auf dem Eintrag mechanischer Energie in den Boden, wodurch das Bodenmaterial aufgeschlossen und homogenisiert wird. Darüber hinaus wird die Desorption und Solubilisation der Schadstoffe, d.h. der Übergang der Kontaminanten in die wässrige Phase gefördert und damit deren Bioverfügbarkeit erhöht. Es kommen vertikale und horizontale Bioreaktoren zur Anwendung. Der hohe Homogenisierungsgrad, der in Bioreaktoren realisiert werden kann, ermöglicht einen intensiven und kontinuierlichen Kontakt zwischen Schadstoffen, Mikroorganismen, Nährstoffen, Wasser und Luftsauerstoff. Dadurch kann eine Beschleunigung des Schadstoffabbaues sowie eine Verbesserung der Reinigungsleistung erreicht werden. Da es sich bei Bioreaktoren um geschlossene Systeme handelt, können die den biologischen Schadstoffabbau limitierenden Faktoren (u.a. Sauerstoff- und Nährstoffkonzentration, Feuchtigkeit, pH-Wert, Temperatur) besser überwacht und reguliert werden als dies bei einer *in-situ*-Behandlung oder bei anderen *on-site*-Verfahren (z.B. Mietenverfahren) der Fall ist. Darüber hinaus ist eine gezielte Emissionskontrolle von ausgasenden Schadstoffen bzw. Abbauprodukten möglich.

Die Bodenbehandlung in Bioreaktoren ermöglicht aufgrund der hohen Bioverfügbarkeit der Schadstoffe, der Einstellung optimaler Abbaubedingungen und der vollständigen Emissionskontrolle eine deutliche Erweiterung des Spektrums der behandelbaren Schadstoffe. Bioreaktoren werden daher häufig gezielt zur Behandlung von Bodenkontaminationen eingesetzt, deren Sanierung mittels konventioneller Verfahren Probleme bereitet. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang z.B.

- Bodenbelastungen durch Kontaminanten mit geringer Wasserlöslichkeit,
- Bodenkontaminationen durch flüchtige Schadstoffe,
- Bodenverunreinigungen mit sehr heterogener Schadstoffverteilung.

Die Behandlung des Bodens erfolgt in speziellen geschlossenen Behältern, den Reaktoren, in denen das kontaminierte Bodenmaterial unter optimierten Milieubedingungen kontinuierlich oder zeitweise umgewälzt wird. In Abhängigkeit vom Wassergehalt des behandelten Bodenmaterials wird prinzipiell unterschieden zwischen

- **Feststoffverfahren** (Wassergehalt des Bodenmaterials beträgt etwa 50 -70 % der maximalen Wasserhaltekapazität) und
- **Suspensionsverfahren** (die Behandlung des Bodens erfolgt als Boden/Wasser-Suspension mit einem Feststoffanteil von 25-50 %).

Feststoffreaktoren werden entsprechend dem jeweiligen Bauprinzip eingeteilt u.a. in Drehtrommel-, Röhren-, Wannen- und Flachbettreaktoren. Bezüglich der vorhandenen Mischeinrichtungen wird unterschieden zwischen statischen Bioreaktoren (unbewegliche Reaktoren, bei denen die Mischung des Bodens durch innenliegende Rührwellen oder Transportschnecken erfolgt) und dynamischen Bioreaktoren (um ihre Längsachse rotierende Reaktoren, in deren Inneren Misch- und Schneideblätter unbeweglich installiert sind).

Feststoffreaktoren werden vorwiegend zur Behandlung von grobkörnigen Böden mit geringen Anteilen bindiger Materialien eingesetzt. Bei der Behandlung feinkörniger Böden kommt es in diesen Reaktoren häufig zur Aggregation von Bodenpartikeln, wodurch die Sauerstoffversorgung behindert wird.

Zur Behandlung von feinkörnigen, bindigen Böden sind Suspensionsreaktoren besser geeignet als Feststoffreaktoren. Das Verfahrensprinzip der Suspensionsreaktoren beruht auf dem hydraulischen Aufschluss des Bodenmaterials. Durch Zugabe von Wasser wird bei diesem Verfahren die maximale Wasserhaltekapazität des Bodens deutlich überschritten, so dass Bodenschlämme entstehen. Durch den Einsatz von Rühreinrichtungen können in diesen Reaktoren sehr homogene Gemische erreicht werden. Die Bauprinzipien der Suspensionsreaktoren stammen im Wesentlichen aus dem Bereich der Abwasser- und Schlammbehandlung. Neben Rührreaktoren kommen auch Schlaufen- und Wirbelschichtreaktoren zum Einsatz, in denen eine Kreislaufführung der Bodensuspension erfolgt. Bei Airlift-Reaktoren wird eine Durchmischung der Bodensuspension durch am Reaktorboden eingeleitete Luft erreicht, welche die Bodenpartikel in der Schwebe hält.

Als Nachteile von Suspensionsreaktoren sind der erhöhte Aufwand bei der Herstellung der Bodensuspensionen sowie die nach Abschluss der Behandlung erforderliche Entwässerung der Bodensuspension anzusehen.

Reaktorverfahren können sowohl *on site* als auch *off site* eingesetzt werden. Grundsätzlich ist jedoch festzustellen, dass sich Reaktorverfahren weitgehend noch in der Entwicklungs- und Erprobungsphase befinden. Großtechnisch kommt Reaktorverfahren am Anteil der biologischen Bodenbehandlung bislang nur geringe Bedeutung zu. Vereinzelt werden Suspensionsreaktoren im technischen Maßstab in Kombination mit Bodenwaschverfahren angewendet. Dabei erfolgt in den Suspensionsreaktoren eine biologische Behandlung der zuvor abgetrennten Feinkornfraktion des kontaminierten Bodenmaterials.

Bei Bioreaktoren handelt es sich um Anlagen zur Behandlung von verunreinigten Böden. Diese Anlagen bedürfen einer immissionschutzrechtlichen Genehmigung. Nach § 4 Abs. 1 BImSchG i.V.m. § 1 Abs. 1 und Nr. 8.7 des Anhangs der 4. BImSchV bedürfen Anlagen zur Behandlung von verunreinigtem Boden einer Genehmigung durch die nach den landesrechtlichen Vorschriften zuständige Behörde, soweit den Umständen nach zu erwarten ist, dass sie länger als zwölf Monate an demselben Ort betrieben werden.

Bei Bodenbehandlungsanlagen mit einem Durchsatz von mindestens 10 t/d ist das Verfahren nach § 10 BImSchG anzuwenden. Für die Genehmigung Behandlungsanlagen mit einem Durchsatz < 10 t/d ist gemäß § 19 Abs. 1 BImSchG i.V.m. § 2 Abs. 1 Nr. 2, Abs. 2, Anhang Nr. 8.7 4. BImSchV ein vereinfachtes Verfahren durchzuführen. Das vereinfachte Verfahren kommt auch bei Anlagen zur Anwendung, die ausschließlich oder überwiegend der Entwicklung und Erprobung neuer Verfahren dienen (Versuchsanlagen).

570.3.2 Kostenermittlung

570.3.2.1 Abrechnungseinheiten, Kostenkalkulation

In der Kostenkalkulation sind die Abrechnungseinheiten wie folgt vorgesehen:

Leistung	Abrechnungseinheit	alternativ
Biologische Behandlung in Reaktoren	t	

570.3.2.2 Leistungsregister

weiterführende Leistungen:

LB 110	Geotechnische Felduntersuchung
LB 130	Chemisch-physikalische Analytik
LB 270	Direkt-, Indirekteinleitung, Versickerung
LB 300	Erdarbeiten
LB 310	Wiedereinbau
LB 340	Eigenkontrollmaßnahmen der Überwachung und Nachsorge
LB 500	Fassung und Absaugung von Bodenluft / Deponiegas

LB 510	Behandlung von Bodenluft, Deponiegas und Abluft
LB 541	Biologische In-situ-Verfahren
LB 700	Oberflächenabdeckung
LB 710	Oberflächenabdichtung
LB 800	Aufbereitung
LB 810	Verwertung und Beseitigung von Aushub- und Abbruchmaterial

570.4 Biologische Behandlung *in-situ* (vgl. LB 541.000.000)

570.4.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche / technische Grundlagen)

Im Gegensatz zu den *on/off-site*-Verfahren verbleibt bei der *in-situ*-Behandlung der kontaminierte Boden bzw. das belastete Grundwasser in ihren standortspezifischen Lagerungsverhältnissen. Ein Aushub von belastetem Bodenmaterial ist somit nicht erforderlich. *In-situ*-Verfahren eignen sich daher auch für die Sanierung von Flächen, bei denen die Zugänglichkeit der kontaminierten Bodenbereiche aufgrund vorhandener Gebäude, Anlagen, Ver- und Entsorgungsleitungen u.ä. stark eingeschränkt ist.

Eine Schwierigkeit der *in-situ*-Verfahren im Vergleich zu Mieten- oder Reaktorverfahren besteht darin, dass sowohl die Abbaubedingungen (u.a. Sauerstoff- und Nährstoffversorgung in der Sanierungszone) als auch der Sanierungserfolg schwerer zu kontrollieren sind. Anwendungsgrenzen ergeben sich darüber hinaus durch die i.d.R. relativ lange Sanierungsdauer (Monate bis Jahre) sowie durch im Boden verbleibende Restkonzentrationen, die zu Nutzungseinschränkungen des Geländes bzw. des Grundwassers führen können.

In-situ-Verfahren können sowohl zur Behandlung der ungesättigten als auch der gesättigten Bodenzone eingesetzt werden. Voraussetzung für die mikrobiologische *in-situ*-Sanierung ist die Bioverfügbarkeit der im Untergrund vorhandenen Schadstoffe. Die Zugänglichkeit der Schadstoffe für den mikrobiellen Abbau wird zum einen von den geologisch-hydrogeologischen Gegebenheiten vor Ort und zum anderen von Art, Konzentration und Verteilung der im Boden vorhandenen Schadstoffe bestimmt. Ein wesentliches Kriterium stellt dabei die Durchlässigkeit der zu sanierenden Bodenzone dar. Um eine gleichmäßige Sauerstoff- und Nährstoffversorgung aller Bodenbereiche zu gewährleisten, ist i.a. eine Durchlässigkeit des Bodens von $k_f > 10^{-4}$ m/s erforderlich.

Um die Möglichkeiten einer mikrobiologischen *in-situ*-Sanierung abschätzen zu können, sind umfangreiche Voruntersuchungen zur Klärung folgender Sachverhalte erforderlich:

- **Geologische Standorteigenschaften:** u.a. Bodenaufbau (Schichtenfolge, Lagerung etc.), Kornverteilung, Porosität, Durchlässigkeiten (k_f -Wert);
- **Hydrogeologische Standorteigenschaften:** u.a. Flurabstand, Grundwasserfließrichtung, Grundwasserspiegelschwankungen;
- **Schadstoffsituation:** u.a. Art, Konzentration und räumliche Verteilung der Schadstoffe, Bioverfügbarkeit, Ökotoxizität;
- **Mikrobiologische Standortcharakterisierung:** u.a. Stoffwechselaktivität der standorteigenen (= autochthonen) Mikroflora, Abbaupotential der autochthonen Mikroflora bezüglich der vorliegenden Schadstoffe, Möglichkeiten zur Optimierung der Abbauleistung.

Um bei der biologischen *in-situ*-Sanierung eine möglichst rasche und effiziente Schadstoffdegradation zu erreichen, müssen die den biologischen Schadstoffabbau limitierenden Faktoren (u.a. Sauerstoff- und Nährstoffmangel, ungünstige pH-Verhältnisse, geringe Bioverfügbarkeit der Schadstoffe) mittels verfahrenstechnischer Maßnahmen beeinflusst werden. In Abhängigkeit von der Tiefenlage der Kontamination kommen hierzu unterschiedliche Verfahrenstechniken zur Anwendung.

Zur biologischen *in-situ*-Sanierung der oberflächennahen ungesättigten Bodenzone können das **Landfarming**-Verfahren (siehe Kapitel 570.2) und **Phytoremediationsverfahren** (siehe Kapitel 570.5) eingesetzt werden.

Zur biologischen Behandlung von tieferen Bereichen der ungesättigten Bodenzone bzw. zur *in-situ*-Sanierung der gesättigten Bodenzone kommen sowohl pneumatische (Belüftungsverfahren) als auch hydraulische Maßnahmen (Infiltrationsverfahren) zum Einsatz.

Die **Belüftungsverfahren** dienen dazu, die Sauerstofflimitierung des aeroben Schadstoffabbaus aufzuheben. Zu diesem Zweck wird die kontaminierte Bodenzone mit Luftsauerstoff versorgt. Dieses kann mittels unterschiedlicher Verfahrenstechniken realisiert werden. Den einfachsten Fall stellt das sog. Bioventing dar, bei dem Druckluft über Belüftungslanzen in die ungesättigte Bodenzone eingeblasen wird. Alternativ kann eine Belüftung kontaminierter Bereiche auch mittels einer Bodenluftabsaugung erreicht werden, durch die innerhalb des Bodenkörpers eine Luftströmung induziert wird. Eine Kombination der beiden o.g. pneumatischen Verfahren ermöglicht eine Kreislaufführung der Bodenluft und damit eine relativ gleichmäßige Sauerstoffversorgung der zu sanierenden Bodenzone.

Bei Kontaminationen der gesättigten Zone kommt das sog. Biosparging-Verfahren zum Einsatz. Als Biosparging wird die Injektion von Umgebungsluft in den Aquifer bezeichnet. Durch diese Belüftungsmaßnahme wird zum einen eine Desorption der Schadstoffe sowie eine *in-situ*-Strippung flüchtiger Kontaminanten erreicht, und zum anderen der mikrobielle Schadstoffabbau durch Anreicherung des Grundwassers mit Sauerstoff gefördert. Da beim Biosparging aufgrund von Stripp-Effekten Schadstoffe aus der gesättigten in die ungesättigte Bodenzone eingetragen werden können, wird dieses Verfahren häufig mit einer Bodenluftabsaugung kombiniert, wobei das Volumenverhältnis von Injektion zu Absaugung meist im Bereich von 1:5 bis 1:10 liegt. Dadurch kann in der ungesättigten Bodenzone eine kontrollierte Luftströmung erzeugt und eine Verfrachtung von Schadstoffen in unbelastete Bodenbereiche vermieden werden.

Bei den **Infiltrationsverfahren** werden zur Aufhebung derjenigen Milieufaktoren, die den biologischen Schadstoffabbau *in situ* limitieren, Additive in wässriger Lösung in die zu sanierende Bodenzone eingebracht. Die in der Praxis zum Einsatz kommenden Additive lassen sich in die Kategorien **Nährstoffe**, **Elektronenakzeptoren**, **pH-Regulatoren** und **Tenside** unterteilen.

Untersuchungen zeigten, dass eine optimale Nährstoffversorgung der Mikroorganismen und damit ein effizienter Schadstoffabbau bei einem Verhältnis von Kohlenstoff (C) : Stickstoff (N) : Phosphor (P) von etwa C:N:P = 100:10:1 gegeben ist. Bei der Durchführung einer biologischen *in-situ*-Sanierung besteht im Bereich der Kontaminationszone aufgrund der vorhandenen Schadstoffgehalte i.d.R. ein Überschuss an mikrobiell verwertbarem Kohlenstoff. Um diese Nährstofflimitierung aufzuheben, werden im Rahmen von *in-situ*-Dekontaminationsmaßnahmen Stickstoff und Phosphor mittels entsprechend dosierter Nährlösungen in die schadstoffbelasteten Bereiche des Bodens infiltriert. Andere Nährstoffe wie z.B. Kalium, Magnesium und Spurenelemente liegen im Boden in der Regel in ausreichenden Konzentrationen vor und müssen daher nicht von außen zugeführt werden

Um organische Schadstoffe oxidativ abzubauen zu können, sind Mikroorganismen auf die Anwesenheit von Substanzen angewiesen, die als Elektronenakzeptoren dienen können. Für den praktischen Einsatz im Rahmen von mikrobiologischen Sanierungsverfahren stehen hierzu molekularer Sauerstoff (O₂), Wasserstoffperoxid (H₂O₂), sog. Oxygen Releasing Materials (ORM) sowie Nitrate (NO₃⁻) zur Verfügung. Molekularer Sauerstoff kann entweder gelöst mit dem Infiltrationswasser oder gasförmig mittels Lanzen (s.o. Abschnitt „Belüftungsverfahren“) in den Boden eingebracht werden. Wasserstoffperoxid und ORM werden in Form wässriger Lösungen in den Boden infiltriert, wo sie durch autolytischen oder geochemisch bzw. biologisch katalysierten Zerfall zu einer Freisetzung von Sauerstoff führen. Die Zufuhr von Nitrat als Elektronenakzeptor setzt voraus, dass die im Boden vorhandenen Schadstoffe anaerob abgebaut werden können. Bei Abwesenheit von molekularem Sauerstoff können bestimmte Bakterien den im Nitrat gebundenen Sauerstoff als Elektronenakzeptor nutzen (anaerobe Atmung). Die durch Zusatz von Nitrat erreichbaren Abbaugeschwindigkeiten sind jedoch in der Regel geringer als unter aeroben Bedingungen.

Durch die Infiltration von Tensiden kann die Bioverfügbarkeit der im Boden vorhandenen Schadstoffe erhöht werden. Sofern die durchgeführten Voruntersuchungen ergeben haben, dass im Bereich der Sanierungszone für den biologischen Schadstoffabbau ungünstige pH-Bedingungen vorliegen, kann eine Regulation des pH-Wertes durch Infiltration entsprechend eingestellter Pufferlösungen erzielt werden.

Bei der biologischen Sanierung der ungesättigten Bodenzone erfolgt die Infiltration in Abhängigkeit vom Tiefenprofil und der lateralen Ausdehnung der Kontamination über Versickerungsleitungen bzw. –brunnen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Additive in der Regel aufgrund von Sorptions- und Zerfallsprozessen nur in einem vergleichsweise kleinräumigen Bereich um die Infiltrationsstelle wirksam sind (Nahwirkung). Um eine gleichmäßige und ausreichende Versorgung des Schadensbereiches mit Additiven zu gewährleisten, ist daher u.U. eine hohe Dichte an Infiltrationsstellen erforderlich. Bei einer *in-situ*-Sanierung der ungesättigten Zone sind zeitlicher Ablauf und Volumen der Infiltrationsmaßnahmen verfahrenstechnisch in der Weise zu gestalten, dass ein vertikaler Austrag von Schadstoffen, Abbauprodukten und/oder Additiven in die gesättigte Zone vermieden wird.

Bei der *in-situ*-Sanierung der gesättigten Zone wird das Infiltrationsmedium in Kreislauf geführt. Der hydraulische Kreislauf wird dadurch realisiert, indem kontaminiertes Grundwasser abgepumpt, *on site* mittels einer entsprechenden Aufbereitungsanlage behandelt und nach Zugabe von Additiven in die Sanierungszone reinfiltriert wird. Durch entsprechende Anordnung der Infiltrations- bzw. Entnahmebrunnen kann sowohl eine horizontale als auch eine vertikale Grundwasserströmung induziert werden. Grundsätzlich sind die Anordnung der Brunnen sowie die Entnahme- und Infiltrationsvolumina so zu gestalten, dass ein Abströmen von kontaminiertem Grundwasser aus der Sanierungszone in unbelastete Bereiche des Aquifers verhindert wird. Erreicht werden kann dies u.a. dadurch, dass im Schadensbereich deutlich mehr Grundwasser entnommen als reinfiltriert wird. Eine weitere verfahrenstechnische Möglichkeit stellt die sog. Schutzinfiltration dar, bei der im Randbereich der Kontamination Grundwasser aus unbelasteten Aquiferbereichen bzw. –stockwerken infiltriert wird.

Bei der Aufbereitung des entnommenen Grundwassers werden in der Regel neben den Schadstoffen auch Eisen und Mangan entfernt, um Verockerungsprozesse, welche die Leistungsfähigkeit nachfolgender Behandlungsstufen bzw. der Infiltrationsbrunnen beeinträchtigen können, zu vermeiden.

In-Situ-Sanierungsmaßnahmen beinhalten i. d. R. Benutzungstatbestände, die nach § 2 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) eine Erlaubnis oder Bewilligung erfordern. Die Infiltration von Additiven zur Optimierung der Abbaubedingungen stellt eine Gewässerbenutzung i.S. des § 3 Abs. 1 Nr. 5 WHG dar. Auch die Entnahme von Grundwasser sowie hydraulische Sicherungsmaßnahmen, die zu einem Aufstauen oder einer Veränderung der Strömungsrichtung des Grundwassers führen, stellen gemäß § 3 Abs. 1 Nr. 6 bzw. Abs. 2 Nr. 1 WHG eine erlaubnispflichtige Gewässerbenutzung dar.

570.4.2 Kostenermittlung

570.4.2.1 Abrechnungseinheiten, Kostenkalkulation

In der Kostenkalkulation sind die Abrechnungseinheiten wie folgt vorgesehen:

Leistung	Abrechnungseinheit	alternativ
Infiltrationslanzen liefern, einbauen	m	
Vakuumbrunnen herstellen	m	
Voruntersuchungen, Eigenüberwachung, Dokumentation	m ³	
Installation und Vorhalten der Behandlungsanlage	psch.	m ³
Biologische Bodenbehandlung in-situ	m ³	
Verbrauchskosten (Nährstoffe, Wasser, Energie)	Mt	

570.4.2.2 Leistungsregister

weiterführende Leistungen:

LB 110 Geotechnische Felduntersuchung

LB 130	Chemisch-physikalische Analytik
LB 270	Direkt-, Indirekteinleitung, Versickerung
LB 300	Erdarbeiten
LB 310	Wiedereinbau
LB 340	Eigenkontrollmaßnahmen der Überwachung und Nachsorge
LB 500	Fassung und Absaugung von Bodenluft / Deponiegas
LB 510	Behandlung von Bodenluft, Deponiegas und Abluft
LB 541	Biologische In-situ-Verfahren
LB 700	Oberflächenabdeckung
LB 710	Oberflächenabdichtung
LB 800	Aufbereitung
LB 810	Verwertung und Beseitigung von Aushub- und Abbruchmaterial

570.5 Phytoremediation

570.5.1 Leistungsbeschreibung (rechtliche / technische Grundlagen)

Bei der Phytoremediation werden höhere Pflanzen zur Sanierung von mit anorganischen oder organischen Schadstoffen belasteten Flächen eingesetzt. Der Anwendungsbereich dieser Verfahren beschränkt sich dabei in erster Linie auf Standorte mit oberflächennahen Bodenkontaminationen. Im Hinblick auf den Stand der technischen Anwendung von Phytoremediationsverfahren ist festzustellen, dass diese Technologie in den USA derzeit eine deutlich größere Praxisbedeutung besitzt als in Deutschland, wo diese Verfahren bislang vorrangig im Rahmen von Forschungsvorhaben zur Anwendung kamen.

Anhand der biochemischen Prozesse, die bei der Phytoremediation zur Reinigung schadstoffbelasteter Böden genutzt werden, lassen sich die nachfolgend näher beschriebenen Verfahrenstechniken unterscheiden.

Die **Phytoextraktion** stellt das derzeit am häufigsten angewendete Phytoremediationsverfahren dar. Bei diesem Verfahren werden auf der zu sanierenden Fläche Pflanzen angebaut, die für die vorhandenen Schadstoffe ein besonders hohes Anreicherungsvermögen besitzen (sog. Hyperakkumulatoren). Die Pflanzen nehmen die Schadstoffe über die Wurzeln aus dem Boden auf und reichern diese im Pflanzengewebe an. Die Pflanzen werden anschließend geerntet und die kontaminierte pflanzliche Biomasse einer ordnungsgemäßen Entsorgung, z.B. mittels thermischer Verfahren, zugeführt. Phytoextraktionsverfahren werden bislang vorrangig zur Dekontamination von schwermetallbelasteten Böden eingesetzt, wobei in Abhängigkeit von Pflanzenart sowie Art und Höhe der Schwermetallbelastung die Schadstoffmengen, die mittels dieser Verfahren dem Boden entzogen werden können, zwischen einigen g und kg/ha betragen können.

Der Begriff **Phytodegradation** bezeichnet Verfahren, bei denen die von den Pflanzen aus dem Boden aufgenommenen Schadstoffe innerhalb des Pflanzengewebes metabolisiert, d.h. durch pflanzliche Stoffwechselprozesse abgebaut werden. Phytodegradationsverfahren können zur Reinigung von Böden, die durch organische Schadstoffe belastet sind, eingesetzt werden. Untersuchungen zeigten die grundsätzliche Eignung dieses Verfahrens u.a. für die Sanierung von Bodenbelastungen durch Mineralöle, chlorierte Lösungsmittel und sprengstofftypische Verbindungen.

Bei der **Rhizodegradation** erfolgt der Schadstoffabbau nicht innerhalb des Pflanzengewebes sondern in der Wurzelzone. Die Degradationsprozesse werden dort entweder durch von den Pflanzenwurzeln ausgeschiedene Enzyme oder durch vergesellschaftete Bodenorganismen (Bakterien, Pilze) katalysiert.

Unter dem Begriff **Phytostabilisierung** werden Verfahren zusammengefasst, bei denen durch Bepflanzung einer kontaminierten Fläche die Ausbreitung der im Boden vorhandenen Schadstoffe verringert werden kann. Durch die Wasseraufnahme der Pflanzen wird die Bildung von Sickerwasser reduziert und damit einem Auswaschen von Schadstoffen in tiefere Bodenschichten entgegengewirkt. Auch Veränderungen der chemisch-physikalischen

Milieubedingungen im Wurzelbereich können zu einer Verminderung der Schadstoffausbreitung führen, wenn hierdurch die im Bodenwasser gelöst vorliegenden und damit mobilen Schadstoffanteile in eine unlösliche Form überführt werden. Darüber hinaus vermindert die Vegetationsbedeckung einer kontaminierten Fläche auch den Schadstofftransfer durch Erosionsvorgänge.

Der Vorteil von Phytoremediationsverfahren besteht darin, dass sie relativ kostengünstig auch auf größeren Flächen einsetzbar sind, da sie nur einen geringen maschinellen Aufwand erfordern. Als nachteilig ist die in der Regel zu erwartende lange Sanierungsdauer zu bewerten. Darüber hinaus können Phytoremediationsverfahren nicht auf Standorten mit Bodenkontaminationen eingesetzt werden, von denen phytotoxische Effekte, d.h. schädigende Wirkungen auf das Pflanzenwachstum ausgehen.