

Maßnahmen zum Bodenschutz

Umgang mit schädlichen Bodenveränderungen
– Sanierungsverfahren –



Maßnahmen zum Bodenschutz

**Umgang mit schädlichen Bodenveränderungen
– Sanierungsverfahren –**



Herausgegeben von der
Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
1. Auflage

Karlsruhe 2001

IMPRESSUM

Herausgeber	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg 76185 Karlsruhe, Postfach 2107 52, http://www.lfu.baden-wuerttemberg.de
ISSN	0949-0256 (Bd. 9, 2001)
Bearbeitung	Dipl. Agrarbiol. Irma Schumacher Prof. Dr. rer. nat. Martin Kaupenjohann Universität Hohenheim Institut für Bodenkunde und Standortslehre
Redaktion	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Abteilung 2, Ökologie, Boden- und Naturschutz Herr Schmid, Herr Dr. Kohler (Ref. 44)
Umschlaglayout	Stephan May Grafik-Design, 76227 Karlsruhe
Titelbild	Jutta Ruloff, Dipl. Designerin, 76275 Ettlingen
Druck	Hausdruck der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Umwelthinweis	gedruckt auf Recyclingpapier aus 100% Altpapier, chlorfrei
Bezug über	Verlagsauslieferung der LfU bei JVA Mannheim – Druckerei Herzogenriedstr. 111, 68169 Mannheim Telefax: 0621/398-370

Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

VORWORT	5
1 DEKONTAMINATIONSMAßNAHMEN	6
1.1 Bioremediation: Sanieren durch mikrobiologischen Abbau von Schadstoffen..	6
1.1.1 Bioreaktor, ex-situ	9
1.1.2 Mietenverfahren, ex-situ.....	10
1.1.3 Wendeverfahren (Landfarming) ex-situ/in-situ.....	12
1.1.4 Bodenbelüftung (Bioventing), in-situ	13
1.2 Phytoremediation	14
1.2.1 Entzug von Schwermetallen durch Pflanzen, in-situ.....	14
1.2.2 Abbau organischer Schadstoffe durch Pflanzen, in-situ	16
1.3 Chemische/Physikalische Dekontamination	17
1.3.1 Thermische Bodenreinigung, ex-situ	18
1.3.2 Bodenwäsche, ex-situ	19
1.3.3 Bodenluftabsaugung, in-situ	20
1.3.4 Thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung, in-situ.....	21
1.3.5 Elektrokinetische Separation, in-situ.....	23
1.3.6 Bodenwäsche (Soil flushing), in-situ	24
1.3.7 Bodenabtrag.....	25
2 SICHERUNGSMÄßNAHMEN	26
2.1 Einkapselung, in-situ	26
2.2 Hydraulische Sicherung, in-situ	27
2.3 Reaktive Wände zur Abstromsanierung, in-situ	28
2.4 Stabilisierung/Fixierung, in-situ/ex-situ	29
2.5 Natural Attenuation (NA), in-situ.....	31
3 AUSBLICK	33

Anhang

- 4.1 : UFORDAT (I)
- 4.2 : ULIDAT (II)
- 4.3 : STN (III)
- 4.4 : ENVIROLINE (IV)
- 4.5 : Sonstige Quellen

Maßnahmen zum Bodenschutz

Umgang mit schädlichen Bodenveränderungen

– Sanierungsverfahren –

Vorwort

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Verdachtsflächen und altlastverdächtige Flächen erfasst, auf denen Maßnahmen zum Schutz von Menschen, Tieren und der Umwelt (z.B. des Grundwassers) erforderlich werden. Soweit es sich hierbei um schädliche Bodenveränderungen oder Altlasten handelt, ist zu prüfen, ob und wie die Flächen saniert werden können oder ob andere Schutzmaßnahmen (z.B. Nutzungsbeschränkungen) zu ergreifen sind.

Insbesondere im Bereich der Altlastenbearbeitung wurden in den vergangenen Jahren bereits Grundlagen zur Sicherung oder Sanierung erarbeitet. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass im Gegensatz zu schädlichen Bodenveränderungen Altlasten häufig kleiner (Fläche, Volumen) sind, jedoch höhere Schadstoffkonzentrationen aufweisen. Insofern können die Erkenntnisse aus dem Bereich der Altlastenbearbeitung nicht immer direkt auf die Behandlung von schädlichen Bodenveränderungen übertragen werden.

Die Landesanstalt für Umweltschutz befasst sich seit einigen Jahren mit der genannten Fragestellung. Für die Altlastenbearbeitung liegen bereits zahlreiche Arbeitshilfen vor, die in AlfaWeb, dem Altlasten-Fachinformationssystem zur Verfügung stehen. Für den Umgang mit schädlichen Bodenveränderungen wurden in einem ersten Schritt die Weber-Ingenieure Pforzheim GmbH beauftragt, im Rahmen einer Literaturstudie die vorhandenen Erfahrungen und Erkenntnisse zu sammeln und Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufzuzeigen.

Die von den Weber-Ingenieuren im Jahre 1996 verfasste Literaturstudie wurde nun aktualisiert. Dazu wurden die internationale Datenbank Agris sowie die UBA Datenbanken UFORDAT und ULIDAT mit den Veröffentlichungen der Jahre 1995 bis 4/2000 nach Literatur zum gesamten Thema Bodensanierungsverfahren durchsucht. Dabei wurden Stichworte nach Vorgabe der vorhandenen Recherche verwendet, es wurde jedoch darüber hinaus auch gezielt nach Bezeichnungen für Sanierungsverfahren gesucht. Bei der Suche nach nationalen und internationalen Fachbüchern wurde der Buchhandel im Internet verwendet. Ergiebig waren Amazon.com, Amazon.de und auch Buchhandel.de.

Insgesamt wurden 143 neue Literaturstellen ausgewertet, die am Ende eines jeden Kapitels aufgelistet sind. Dazu ist die von den Weber-Ingenieuren verwendete Literatur als Zahlenschlüssel aufgenommen, die genauen Quellen hierzu sind den Listen im Anhang zu entnehmen.

Die ursprüngliche Gliederung wurde neu gestaltet. Entsprechend dem Bundesbodenschutzgesetz (§2 Abs.7 BBodSchG) wurden Maßnahmen zur Sanierung unterteilt in Dekontaminations- und Sicherungsmaßnahmen, so dass einige der angesprochenen Verfahren zusammengefasst oder umbenannt und einige neu aufgenommen werden mussten. Die Benennungen der Verfahren erfolgte nach den Vorgaben der Fachbücher, einige wurden aus dem Englischen übertragen.

1 Dekontaminationsmaßnahmen

Ziel von Dekontaminationsmaßnahmen ist es, Schadstoffe aus dem belasteten Boden zu entfernen. Hierzu stehen verschiedene biologische, chemische und physikalische Verfahren zur Verfügung, wobei die biologischen Verfahren unterteilt werden in Bioremediation und Phytoremediation. Nicht selten werden verschiedene Verfahren miteinander kombiniert.

1.1 Bioremediation: Sanieren durch mikrobiologischen Abbau von Schadstoffen

Übersicht

Böden weisen generell eine hohe Besiedlung durch Mikroorganismen (Mikroedaphon: Bakterien und Pilze) auf. Die Bioremediation nutzt die Fähigkeiten von Mikroorganismen verschiedenste organische Substanzen abzubauen, in dem sie diese als Substrat zum Biomasseaufbau benutzen, als störende Verbindung entgiften oder aber co-metabolisch ohne einen Nutzen abbauen.

Zur Verbesserung des Schadstoffabbaues werden im kontaminierten Boden die Lebensbedingungen für Mikroorganismen in Bezug auf Mineralstoffversorgung, Sauerstoffbedarf (aerob oder anaerob /4/), Säuregehalt, Feuchte und Temperatur optimiert /6/, /13/. Auch können Lösungsvermittler zur Erhöhung der Schadstoffverfügbarkeit /10/ eingesetzt werden. Hierzu werden verschiedene Tenside verwendet, die mäßig mikrobiell abbaubar sein sollten, um einerseits ausreichend lange als Lösungsvermittler zur Verfügung zu stehen und andererseits selbst keine zusätzliche Bodenbelastung darzustellen.

Neben der Verbesserung der Umweltbedingungen für die im Boden lebenden Mikroorganismen werden den belasteten Böden aber auch gezielt Mikroorganismen mit bestimmten Abbaufähigkeiten zugemischt /3/, /8/. Dieses hat besondere Bedeutung für den Abbau von chlorierten Kohlenwasserstoffen /5/, /12/, /14/, die nur von sehr wenigen Stämmen und meist nur co-metabolisch abgebaut werden, was geringe Abbauraten zur Folge hat. Hier wird weiter nach geeigneten Stämmen gesucht.

Auch chemische/physikalische Vorbehandlung wird praktiziert, wie z.B. Oxidierung mittels Ozon /11/, /16/ oder Wasserstoffperoxid in Verbindung mit Fentons Reagenz [I,9], Vorreinigung durch Bodenwäsche oder Flotation /20/, Dispersion durch Chemische Reaktion (DCR) /7/.

Eine künftige Möglichkeit, Schadstoffe abzubauen, könnte der Einsatz immobilisierter Enzyme /1/ liefern. Mehrere extrazelluläre Enzyme im Boden sind bekannt. Darauf aufbauend wird versucht, schadstoffabbauende Enzyme an einen Träger zu binden, um sie zu schützen, und in den belasteten Boden einzubringen. Es besteht aber noch erheblicher Forschungsbedarf bis zur praxisreifen Umsetzung dieser Idee.

Schadstoffe:

- Explosivstoffe,
- Chlorierte Kohlenwasserstoffe mit Einschränkung.
- PAK
- Generell alle organischen Schadstoffe in Konzentrationen, die mikrobielles Wachstum zulassen.

z.B.:

- PAK [III,23], [III,27], [18] [II,17], [I,5], /8/, /10/, /13/
- Dioxine [4], /12/
- Chlorphenole [III,43], /12/
- Phenol [14]
- Aromaten [II,12]
- KW [III,31], [II,13], [II,15], [I,10], [I,11], /4/,
- CKW [III,35], /4/, /5/, /12/, /15/, /13/, /38/
- Nitroverbindungen [II,15] (anaerob)
- As-Oxidation [II,15]
- Organophos [II,15] (enzymatische Aufspaltung)
- Industriechemikalien [8]
- Atrazin /16/
- BETX /4/
- Mineralöle /7/, /35/, /36/, /44/, /46/,
- Ölschlamm /20/, /39/,
- Explosivstoffe /30/
- Herbizide /31/

Technischer Stand:

- Technisch ausgereifte Verfahren sind auf dem Markt, wie z.B. Mietenverfahren, Wendeverfahren.
- Weitere Verfahren sind noch nicht ausgereift , z.B. Bioreaktor, Bioventing.

Beurteilung:

- Bei großflächigen Kontaminationen sind in-situ Verfahren wie z.B. Wendeverfahren und Bioventing geeignet, die ex-situ Verfahren sind hier i.d.R. nicht geeignet. Sie werden zur Behandlung kleinflächiger Kontaminationen und hoher Schadstoffbelastungen (Altlasten, hot spots in größeren Arealen) eingesetzt.
- Die Dauer der Behandlung ist abhängig von Art und Höhe der Kontamination sowie vom Verfahren.
- Mit abnehmender Verfahrensdauer steigen Technikaufwand und Kosten.
- Die Behandlungsintensität nimmt in der Reihenfolge: Wendeverfahren, Bioventing, Miete, Bioreaktor, zu.
- In der Regel sind biologische Verfahren zeitaufwendiger, dafür aber preiswerter als chemisch/physikalische Verfahren.

Literatur:

[I,1], [I,5], [I,9], [I,10], [I,11], [II,2], [II,12], [II,13], [II,15], [II,17], [III,23], [III,27], [III,31], [III,35], [III,43], [4], [6], [8], [10], [14], [18]

- /1/ W.A. Dick and M.A. Tabatabai. 1999. Use of immobilized enzymes for bioremediation. In: Bioremediation of Contaminated Soils. Agronomy No.37, Chapter 13, pp: 315-338.
- /2/ P. Doelman and G. Breedveld. 1999. In-situ versus on-site practices. Agronomy No.37, Chapter 20, pp: 539-558.
- /3/ R.U. Edgehill. 1999. Bioremediation by inoculation with microorganisms. In: Bioremediation of contaminated soils. Agronomy No.37, Chapter 12, pp: 289-313.
- /4/ B.Z. Fathepure and J.M. Tiedje. 1999. Anaerobic Bioremediation: Microbiology, Principles, and Applications. In: Bioremediation of contaminated soils. Agronomy No.37, Chapter 14, pp: 339-396.
- /5/ P. Koziollek et al. 1999. Aerobes Verfahren zur mikrobiellen Eliminierung von Dichlorethen und Vinylchlorid. In: Innovative Techniken der Bodensanierung. Spektrum Akademischer Verlag. Kapitel 10, S.136-152.
- /6/ D.C. Sims and J.L. Sims. 1999. Introduction to engineering aspects of soil bioremediation. In: Bioremediation of contaminated soils. Agronomy No.37, Chapter 19, pp: 509-537.
- /7/ K. Stöven. 1999. Untersuchung zur Kombination des DCR-Verfahrens (Dispersion durch Chemische Reaktion) mit einer biologischen Bodensanierung. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 202.
- /8/ M. Wolter. 1999. Abbau von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen durch den Weissfäulepilz *Pleurotus* sp. Florida. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 204.
- /9/ J. Hoffmann und H. Viedt. 1998. Biologische Bodenreinigung: Ein Leitfaden für die Praxis. Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- /10/ B. Mahro und G. Schaefer. 1998. Bioverfügbarkeit als limitierender Faktor des mikrobiellen Abbaus von PAK im Boden – Ursachen des Problems und Lösungsstrategien. altlasten spektrum, 3/98, S.127-135.
- /11/ G. Ohlenbusch, S. Hesse, F.H. Frimmel. 1998. Effects of ozone treatment on the soil organic matter in contaminated sites. Chemosphere, Vol. 37, pp: 1557-1569.
- /12/ C. Fieseler et al.1997. Biologischer Abbau von chlorierten Aromaten in Feststoffen. altlasten spektrum 1/97,S. 9-13.

- /13/ S.S. Suthersan. 1997. Remediation Engineering Design Concepts. CRC Press, Chapter 5 S.123-157.
- /14/ V. Romanov and R. P. Hausinger. 1996. NADPH-dependent reductive *ortho* dehalogenation of 2,4-Dichlorobenzoic Acid in *Corynebacterium sepeidonicum* KZ-4 and Coryneform Bacterium Strain NTB-1 via 2,4-Dichlorobenzoyl Coenzyme A. Journal of Bacteriology, Mai 1996, pp: 2656-2661.
- /15/ Z. Filip. 1996. Biologische Verfahren. In: Altlasten – Erkennen, Bewerten, Sanieren, S. 381-410.
- /16/ C.M. Huang and M.K. Banks. 1996. Effect of ozonation on the biodegradability of atrazine in GAC columns. J. Environ, Sci. Health, B31(6),1253-1266.
- /17/ Enhanced Bioremediation: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_2.html
- /18/ Fungal Biodegradation: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_14.html

1.1.1 Bioreaktor, ex-situ

Beschreibung:

Ziel des Verfahrens ist es, den mikrobiellen Schadstoffabbau durch technische Optimierung so weit wie möglich zu beschleunigen.

Der ausgekofferte und - z.B. durch Sieben - aufbereitete Boden wird in einem geschlossenen Behälter (Reaktor) mit Wasser und Zusatzstoffen versetzt und kontinuierlich gemischt. Durch das Erzeugen von optimalen Bedingungen für die abbauenden Mikroorganismen im Behälter (pH-Wert, Nährstoffe, Sauerstoff, Wasser, Zusatzstoffe) und die ständige Homogenisierung des zu behandelnden Bodens /19/, /21/, wird die Abbaugeschwindigkeit im Vergleich zu anderen biologischen Verfahren deutlich erhöht.

Zum Einsatz kommen statische Reaktoren mit rotierenden Mischeinrichtungen bis ca. 10 m³ Volumen, oder Drehtrommeln mit fest eingebauten Mischvorrichtungen bis ca. 100 m³ Volumen /22/. Die Behandlung kann kontinuierlich oder in hintereinander geschalteten Reaktoren verlaufen.

Das Verfahren ermöglicht eine Vorbehandlung (z.B. Wäsche, chemischer Aufschluss) des Bodens im gleichen Behälter.

Schadstoffe:

- Organische Schadstoffe z.B.: Mineralöle, BETX, Ölschlamm, PAK, Phenole.
- für chlorierte Verbindungen nur bedingt geeignet,
- Explosivstoffe.

Technischer Stand:

Noch nicht ganz Stand der Technik, das Verfahren wird weiter entwickelt.

Beurteilung:

- Bei Belastung mit leichtflüchtigen Schadstoffen kann es bei der Auskoffierung des Bodens – wie bei allen ex-situ Verfahren - zu Schadstoffemissionen in die Atmosphäre kommen.

- Das Bioreaktorverfahren stellt die optimale Kombination aus mikrobiologischem Abbau und verfahrenstechnischem Know-how dar. Es verbindet die Vorteile beider Verfahrensansätze.
- Der Energieaufwand ist deutlich höher als bei den anderen biologischen Verfahren, die Sanierungsdauer deutlich niedriger.
- Die Ansprüche an Mess- und Regeltechnik sind deutlich höher als bei anderen biologischen Verfahren.
- Der Mechanisierungsgrad ist hoch und vergleichbar mit dem einer Bodenwaschanlage.

Literatur:

[III, 16], [III, 29]

- /19/ P. Doelman and G. Breedveld. 1999. In-situ versus on-site practices. In Bioremediation of Contaminated Soils. Agronomy No. 37, Chapter 20, pp: 550-557.
- /20/ B. Gallenkemper, A. Kötter, G. Janikowski. 1999. Weiterführende Untersuchungen zur Biologischen Ölschlammaufbereitung im Mietenverfahren und im Suspensionsreaktor. Innovative Techniken der Bodensanierung. Spektrum Akademische Verlag. Kapitel 15, S. 234-247.
- /21/ J. Scholz und J. Schwedes. 1999. Einfluss des Wassergehaltes auf biologische und physikalische Bodeneigenschaften bei der mikrobiologischen Bodenreinigung in Feststoffreaktoren. altlasten spektrum 1/99, S. 34-39.
- /22/ J. Hoffmann und H. Viedt. 1998. Biologische Bodenreinigung: Ein Leitfaden für die Praxis. Springer Verlag, S.174-177, 218-219.
- /23/ Slurry Phase Biological Treatment: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_16.html .

1.1.2 Mietenverfahren, ex-situ

Beschreibung:

Das Prinzip des Verfahrens ist der mikrobielle Schadstoffabbau in aufgeschütteten statischen Bodenmieten.

Der ausgekofferte Boden wird meistens durch Sieben homogenisiert. Die Einmischung von Strukturverbessernern z.B. Rindenhäcksel, Stroh, Kompost, Holzschnitzel, dient der Verbesserung der Sauerstoffversorgung, der Zufuhr von Mineralstoffen und der Ernährung der Mikroorganismen mit Kohlehydraten. Lösungsvermittler und Cosubstrate werden zur Verbesserung der Abbaubarkeit beigemischt. Auch können Mikroorganismen mit bekanntem Abbauvermögen zugegeben werden.

Nach der Aufbereitung wird der Boden in dafür eingerichtete Anlagen (on-site / off-site), bestehend aus einem festen Untergrund, Mess- und Regeltechnik und evtl. einer Einhausung, zu Regenerationsmieten aufgesetzt. Im Mietenmaterial werden die Lebensbedingungen (z.B.: Temperatur, O₂-Gehalt, pH-Wert, Wassergehalt) für die abbauenden Mikroorganismen optimiert, kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert. Die Art der Aufbereitung, die dabei verwendeten Zusatzmittel, die Ausstattung und der Aufbau der

Regenerationsmieten können sich je nach Anbieter stark unterscheiden /24/, /25/, /27/, /29/, /30/, /31/.

Einen neuen Aspekt des Mietenverfahrens stellt die perkolierte Miete dar. Zur Anlage gehören hier auch Beregnung, Dränage und Prozesswasseraufbereitung. Durch den regelmäßigen Durchfluss von Prozesswasser kann der Schadstoffabbau weiter beschleunigt werden /26/, /28/.

Schadstoffe:

- Organische Schadstoffe z.B.: Mineralöle, BETX, Ölschlamm, PAK, Phenole.,
- für chlorierte Verbindungen nur bedingt geeignet,
- Explosivstoffe.

Technischer Stand:

Stand der Technik.

Beurteilung:

- Bei Auskoffnung und Aufbereitung des Bodens kann es zur Emission leichtflüchtiger Schadstoffe kommen.
- Mittelfristiges Sanierungsverfahren, Preisgünstig im Vergleich zu den chemisch/physikalischen Verfahren.
- Kontrollier-, steuer- und bilanzierbares Verfahren, gute Wirksamkeit bei optimiertem Aufwand.

Literatur:

[II,1], [III,7], [III,19]

- /24/ M. Brecht, L. Bayer, S. Hüttmann. 2000. Promotion of oil hydrocarbon degradation in fine-grained marsh soils under aerobic and denitrifying conditions. *Wasser & Boden* 52/4, 44-47.
- /25/ B. Gallenkemper, A. Kötter, G. Janikowski. 1999. Weiterführende Untersuchungen zur Biologischen Ölschlammaufbereitung im Mietenverfahren und im Suspensionsreaktor. In: *Innovative Techniken der Bodensanierung*. Spektrum Akademische Verlag. Kapitel 15, S. 234-247.
- /26/ C. Löser et al. 1999. Mikrobieller Kohlenwasserstoffabbau im Boden in Perkolationssystemen mit Prozesssteuerung. In: *Innovative Techniken der Bodensanierung*. Spektrum Akademische Verlag., Kapitel 9, S. 117-135.
- /27/ J.L. Sims, R.C. Sims, D.L. Sorensen. 1999. Prepared Bed Bioreactors. In: *Bioremediation of Contaminated Soils*. Agronomy, No.37, Chapter 21, pp: 559-595.
- /28/ A. Zehnsdorf et al. 1999. Maßnahmen zur Beschleunigung des Kohlenwasserstoffabbaus bei der mikrobiellen Bodensanierung in einer Perkolationsanlage. *altlasten spektrum* 2/99, S. 104-108.
- /29/ J. Hoffmann und H. Viedt. 1998. *Biologische Bodenreinigung: Ein Leitfaden für die Praxis*. Springer Verlag, S.166-174, 217-218.
- /30/ K.S. Ro et al. 1998. Remediation composting process principles: Focus on soils contaminated with explosive compounds. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 28(3): 253-282.

- /31/ S.C. Wagner and R.M. Zablotowicz. 1997. Utilisation of plant material for remediation of herbicide-contaminated soils. *Phytoremediation of Soil and Water Contaminants*. American Chemical Society, pp: 65-76.
- /32/ Biopiles: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_12.html
- /33/ Composting: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_13.html

1.1.3 Wendeverfahren (Landfarming) ex-situ/in-situ

Beschreibung:

Ziel des Verfahrens ist mikrobieller Schadstoffabbau bei minimalem Technikeinsatz.

Für das Wendeverfahren ist eine vorlaufende Bodenaufbereitung nicht unbedingt notwendig. Der Boden wird auf einer abgedichteten Fläche (on-site oder off-site) ca. 50 cm hoch aufgeschüttet, regelmäßig gewendet, homogenisiert und belüftet, um den mikrobiellen Abbau zu fördern, und dabei mit Wasser und Nährstoffen versorgt. Aufgrund des häufigen Wendens (in Zeiten hoher biologischer Aktivität täglich) ist ein ständiger Einbau von Messinstrumenten zur Überwachung des Prozesses nicht möglich. Oft erfolgt eine Einhausung mit Zelten zur Kontrolle von Regenwasser und Abluft /37/.

Bei Kontamination der oberen Bodenschicht ohne Auswaschungsgefahr, kann das Verfahren auch in-situ angewendet werden /35/.

Schadstoffe:

- Organische Schadstoffe z.B.: Mineralöle, BETX, Ölschlamm, PAK, Phenole.
- für chlorierte Verbindungen nur bedingt geeignet,
- Explosivstoffe.

Technischer Stand:

Stand der Technik, Maschinen zum Wenden und zur Hilfsstoffausbringung stammen meist aus der Landwirtschaft /37/.

Beurteilung:

- Zur Behandlung großflächiger Oberbodenkontaminationen geeignet.
- Bei Auskoffnung und Wenden kann es zur Emission leichtflüchtiger Schadstoffe kommen, letzteres kann vor allem bei großen in-situ behandelten Flächen von Bedeutung sein.
- Mittelfristiges, relativ preiswertes Verfahren.
- Geringer Technischer Aufwand, hoher Arbeitszeitbedarf, da z.T. täglich gewendet werden muss. Eine weitere Automatisierung ist nur bedingt möglich.
- Verdichtungen, die beim Wendevorgang entstehen, können nur schlecht wieder aufgebrochen werden und führen dann zu ungenügendem Schadstoffabbau /37/.
- Keine gängige Sanierungspraxis, kommt daher nur selten zum Einsatz.
- In-situ Anwendung nur, wenn die Schadstoffe nicht auswaschungsgefährdet sind.

Literatur:

[I,4], [III,33], [III,36], [IV,4]

- /34/ P. Doelman and G. Breedveld. 1999. In-situ versus on-site practices. In: Bioremediation of Contaminated Soils. Agronomy No. 37. Chapter 20, pp: 545-549.
- /35/ I. Le Dren et al. 1999. Kostengünstiges mikrobiologisches Sanierungsverfahren für mineralölkontaminierte Böden. *altlasten spektrum*, 3/99, S. 169-173.
- /36/ R.C. Sims and J.L. Sims. 1999. Landfarming of petroleum contaminated soils. In: Bioremediation of Contaminated Soils. Agronomy No. 37. Chapter 27, pp:767-781.
- /37/ J. Hoffmann und H. Viedt. 1998. Biologische Bodenreinigung: Ein Leitfaden für die Praxis. Springer Verlag, S.163-166, 216-217.
- /38/ J. Hörnig. 1997. Untersuchungen zum biologischen Abbau von Hexachlorcyclohexan. *altlasten spektrum*, 3/97, S. 115-119.
- /39/ G. Genouw et al. 1994. Degradation of oil sludge by landfarming – a case study at the Ghent harbour. *Biodegradation* No. 5, pp: 37-46.
- /40/ Land Treatment (in-situ): http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_3.html
- /41/ Landfarming (ex-situ): http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_15.html

1.1.4 Bodenbelüftung (Bioventing), in-situ

Beschreibung:

Bodenbelüftungssysteme sollen einen geringen Luftstrom im kontaminierten, ungesättigten Bodenbereich erzeugen und durch die verbesserte Sauerstoffversorgung den mikrobiellen Abbau von organischen Schadstoffen anregen.

Die Luftversorgung kann kontinuierlich oder gepulst durch Injektion, Extraktion oder einer Kombination aus beidem erfolgen, muss aber so gering sein, dass es nicht zum Schadstoffaustrag in die Atmosphäre kommt. Zusätzlich zu Be- und Entlüftungsbrunnen werden Kontrollstellen installiert, die Sauerstoff- und CO₂- Gehalt der Bodenluft überprüfen /42/, /43/, /44/, /46/. Neben der Sauerstoffversorgung können über Infiltrationslanzen Nährstoffe zur Versorgung der Mikroorganismen in den Boden gegeben werden.

Schadstoffe:

- Organische Schadstoffe z.B.: Mineralöle, BETX, PAK, Phenole.
- Unchlorierte Lösungsmittel.

Technischer Stand:

Stand der Technik.

Beurteilung:

- Mittelfristiges Sanierungsverfahren bei mittlerem technischen Aufwand.
- Für sandigen Untergrund gut geeignet, bei Schichtungen aus unterschiedlich durchlässigen Substraten nur bedingt geeignet.

- Der Sanierungserfolg ist - wie bei in-situ Verfahren generell - nur bedingt überprüfbar, Schadstoffherde in verdichteten Bereichen können erhalten bleiben.

Literatur:

[I,3], [I,6], [I,8], [I,9], [II,20], [III,4], [III,8], [III,21], [III,26], [IV,1], [20], [21]

/42/ R.S. Baker. 1999. Bioventing systems: A critical review. In: Bioremediation of Contaminated Soils. Agronomy No 37. Chapter 22, pp. 595-630.

/43/ J. Hoffmann und H. Viedt. 1998. Biologische Bodenreinigung: Ein Leitfaden für die Praxis. Springer Verlag S.189-209.

/44/ G. Origi et al. 1997. Bioventing of Hydrocarbon-Contaminated soil and biofiltration of the off-gas: result of a field scale investigation. J. Environ. Sci. Health. A32(8), pp: 2289-2310.

/45/ M.A. Lahvis and A.L. Baehr. 1996. Estimation of rates of aerobic hydrocarbon biodegradation by simulation of gas transport in the unsaturated zone. Water Resources Research Vol. 32 No 7, pp: 2231-2249.

/46/ J. Möller, P. Winther et al. 1996. Bioventing of diesel oil-contaminated soil: comparison of degradation rates in soil based on actual oil concentration and on respirometric data. Journal of Industrial Mikrobiology 16, pp:110-116.

/47/ D.H. Mohr and P.H. Merz. 1995. Application of a 2D Air Flow Model to Soil Vapor Extraction and Bioventing Case Studies. Ground Water Vol. 33 No.3, pp: 433-444.

/48/ Bioventing: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_1.html

1.2 Phytoremediation

Da Pflanzen mit dem Bodenwasser neben den darin gelösten Nährstoffen auch Schwermetalle und organische Schadstoffe aufnehmen und ggf. abbauen, sowie aufgrund von Wurzelexudation und Strukturverbesserung den mikrobiellen Abbau in der Rhizosphäre anregen, können sie zur Sanierung von belasteten Flächen verwendet werden. Zur Sanierung werden bei den beiden Schadstoffgruppen unterschiedliche Stoffwechseleigenschaften der Pflanzen genutzt.

1.2.1 Entzug von Schwermetallen durch Pflanzen, in-situ

Beschreibung:

Auf der belasteten Fläche werden Pflanzen angebaut, die in der Lage sind, Schwermetalle in größeren Mengen aufzunehmen. Bei der Auswahl der verwendeten Pflanzen werden zwei unterschiedliche Strategien verfolgt. Zum einen wird nach Pflanzenarten gesucht, die hohe Schwermetallkonzentrationen in oberirdischen Teilen aufweisen (Hyperakkumulatoren /50/, /51/), meist aber nur geringe Biomasse erzeugen, zum anderen nach solchen, die moderate Schwermetallkonzentrationen aufweisen, aber große Mengen Biomasse produzieren und auch zur Energiegewinnung genutzt werden können.

Zum Teil wird mit Boden-Zusatzstoffen gearbeitet, um die Verfügbarkeit der Schwermetalle und damit die Aufnahme in die Pflanzen zu verbessern /49/, /55/. Dabei ist zu beachten, dass nicht gleichzeitig die Auswaschungsgefahr für die Schadstoffe steigt. Auch Bodenbakterien haben einen Einfluss auf die Schwermetallaufnahme /52/. Die Entzüge

variieren mit den bekannten Pflanzen zwischen einigen g und kg/ha, je nach betrachtetem Schwermetall, Pflanzenart und Ausgangskonzentration im Boden.

Durch die Transpiration der Pflanzen kann die Sickerwasserbildung verringert und so die Auswaschung von Schadstoffen ins Grundwasser reduziert werden. Das anfallende Pflanzenmaterial wird abgeerntet, entsorgt und nach Möglichkeit wird das Schwermetall von der Pflanzenmasse getrennt. Dies kann erfolgen über Verbrennung, oder Veraschen der Biomasse bei niedriger Temperatur /55/. Die verbleibende Asche wird deponiert oder evtl. zur Wiedergewinnung der Metalle verwendet. Je nach Art der Pflanze kann die schwermetallbelastete Biomasse zur Energiegewinnung verwendet werden. Hierbei ist auf eine geeignete Rauchgasreinigung insbesondere bei Quecksilber- oder Cadmiumbelastung zu achten.

Schadstoffe:

Schwermetalle in Konzentrationsbereichen, die keine erheblichen Beeinträchtigungen des Pflanzenwachstums verursachen.

Technischer Stand:

- Weiterhin in der Entwicklung.
- Einige Hyperakkumulatoren für Schwermetalle sind bekannt.
- Schwermetalltolerante Pflanzen mit gleichzeitiger Nutzungseignung sind bekannt.
- Verbesserte Sorten mit hohen Schwermetallgehalten und hoher Biomasseproduktion sind in der Entwicklung /53/.
- Im Bereich der Verfügbarkeitsverbesserung von Schwermetallen besteht noch Forschungsbedarf.

Beurteilung:

- Auf oberflächennah gering belasteten Standorten ggf. auch größerflächig einsetzbar, wo eine Auskoffierung des Materials und anschließende chemisch/physikalische Reinigung aus Kostengründen nicht sinnvoll ist.
- Sehr langwieriges Verfahren, da mit Pflanzen pro Vegetationsperiode meist nur wenige Prozent der vorhandenen Belastung entzogen werden können. Es dauert einige Jahre bis Jahrzehnte, um einen ausreichenden Schadstoffentzug zu erreichen.
- Beim Einsatz von Substanzen zur Verbesserung der Schadstoffverfügbarkeit muss die erhöhte Auswaschungsgefahr berücksichtigt werden.
- Im Vergleich zu anderen Verfahren kostengünstig, da kein hoher maschineller Aufwand betrieben wird, die Wirtschaftlichkeit hängt aber von der Entsorgungsmöglichkeit ab.
- Die Verwendung von Pflanzen, die zur Energiegewinnung dienen, ist ein weiterer Vorteil des Verfahrens.
- Grobe Kostenschätzung einschl. Begleit-/Folgekosten (Betrieb, Unterhalt, Monitoring, Erfolgskontrolle, etc. nach U.S.-Literatur: \$ 60.000 - 100.000 / acre = 0,41 ha).

Literatur:

[II,14], [IV,6], [IV,7], [2], [III,18], [III,41], [III,45], [IV,11], [12], [17]

- /49/ U. Schmidt. (2000) Enhancing Phytoextraction: The effect of chemical soil manipulation on mobility, plant uptake and leaching of heavy metals. Eingereicht bei: Journal of Environmental Quality.
- /50/ S.P. McGrath, S.J. Dunham, and R.L. Correll. 1999. Potential for Phytoextraction of zinc and cadmium from soils using hyperaccumulator plants. In: Phytoremediation of Contaminated soil and water. CRC Press Lewis Publishers. Chapter 6, pp: 109-127.
- /51/ R.L. Chaney et al. 1999. Improving metal hyperaccumulator wild plants to develop commercial phytoextraction systems: Approaches and progress. In: Phytoremediation of Contaminated soil and water. CRC Press Lewis Publishers. Chapter 7, pp: 129-158.
- /52/ D. van der Lelie et al. The role of bacteria in the phytoremediation of heavy metals. In: Phytoremediation of Contaminated soil and water. CRC Press Lewis Publishers. 1999. Chapter 15, pp: 265-281.
- /53/ S.K. Gupta et al. 1999. In-situ gentle remediation measures for heavy metal-polluted soils. In: Phytoremediation of Contaminated soil and water. CRC Press Lewis Publishers. Chapter 17, pp: 303-321.
- /54/ M. Mench et al. 1999. In-situ metal immobilization and phytostabilization of contaminated soil. In: Phytoremediation of Contaminated soil and water. CRC Press Lewis Publishers. Chapter 18, pp: 323-357.
- /55/ S.D. Cunningham and W.R. Berti. 1999. Phytoextraction and phytostabilization: Technical, economic, and regulatory considerations of the soil-lead issue. In: Phytoremediation of Contaminated soil and water. CRC Press Lewis Publishers. Chapter 19, pp: 359-376.

1.2.2 Abbau organischer Schadstoffe durch Pflanzen, in-situ

Beschreibung:

Auf mit organischen Verbindungen belasteten Flächen werden Pflanzen zur Beschleunigung des Abbaues der Schadstoffe eingesetzt /56/, /59/. Durch die Wurzelexudate der Pflanzen wird das mikrobielle Bodenleben angeregt und auf diesem Wege der mikrobielle Schadstoffabbau gefördert /57/. Außerdem können von den Pflanzen aufgenommene Substanzen /58/ metabolisiert und entgiftet werden, da sie deren Stoffwechsel beeinträchtigen. Neben artspezifischem Abbauvermögen scheint es auch sortenspezifische Unterschiede zu geben /64/. Durch den Wasserverbrauch der Pflanzen kann die Auswaschung verringert werden.

Schadstoffe:

- mäßig hydrophobe organische Verbindungen wie BTEX,
- chlorierte Lösungsmittel, /60/
- PAK, /61/, /63/
- Nitrotoluen, Sprengstoffe und deren Derivate.

Der Einsatz von Phytoremediation ist nur sinnvoll, wenn die Kontamination in solchen Konzentrationen vorliegt, dass Pflanzenwachstum möglich ist.

Technischer Stand:

In den USA in Pilotprojekten im Einsatz /56/, in Deutschland in der Entwicklung.

Beurteilung:

- Im Vergleich zu anderen Verfahren kostengünstig, da kein hoher maschineller Aufwand betrieben wird.
- Auf oberflächennah gering belasteten Standorten ggf. auch größerflächig einsetzbar, wo eine Auskoffnung des Materials und anschließende chemisch/physikalische Reinigung aus Kostengründen nicht sinnvoll ist.
- Dauer des Verfahrens ist von der Art der Kontamination abhängig.

Literatur:

- /56/ P. Schwab and K. Banks. 1999. Phytoremediation of Petroleum-Contaminated Soils. In: Bioremediation of Contaminated Soils. American Society of Agronomy. Chapter 28, pp: 783-795.
- /57/ W.W. Wenzel et al. 1999. Phytoremediation: A Plant-Microbe-Based Remediation System. In: Bioremediation of contaminated soils. American Society of Agronomy, Chapter 18, pp:457-508.
- /58/ A.P. Schwab, A.A. Al-Assi, and M.K. Banks. 1998. Adsorption of naphthalene onto plant roots. J. Environ. Qual. 27: 220-224.
- /59/ S.D. Cunningham et al. 1997. Phytoremediation of contaminated water and soil. In: Phytoremediation of soil and water contaminants. American Chemical Society, Chapter 1, pp: 2-17.
- /60/ M. Gordon et al. 1997. Phytoremediation of trichlorethylen with poplars. In: Phytoremediation of soil and water contaminants. American Chemical Society, Chapter 13, pp:177-185.
- /61/ X. Qiu et al. 1997. Field study: Grass remediation for clay soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons. In: Phytoremediation of soil and water contaminants. American Chemical Society. Chapter 14, pp:186-199.
- /62/ S.S. Suthersan. 1997. Remediation Engineering Design Concepts. CRC Press. Chapter 10, S. 255-264.
- /63/ K.A. Reilley, M.K. Banks, and A.P. Schwab. 1996. Dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere. J. Environ. Qual. 25: 212-219.
- /64/ C.C. Wiltse et al. 1998. Greenhouse evaluation of agronomic and Crude oil-phytoremediation potential among alfalfa genotypes. J. Environ. Qual. 27: 169-173.
- /65/ Phytoremediation: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_5.html
Phytoremediation Bibliography: <http://www.rtdf.org/public/phyto/phytobib/biba-b.html>

1.3 Chemische / Physikalische Dekontamination

Chemische / Physikalische Dekontaminationsverfahren sind i.d.R. nicht zur Sanierung großflächiger Kontaminationen geeignet. Sie sind aber ein wichtiges Instrument zur Unterstützung der Sanierung von hochkontaminierten Bereichen in einer großflächigen Belastung. Eine Kombination mit anderen Verfahren ist dann erforderlich.

1.3.1 Thermische Bodenreinigung, ex-situ

Beschreibung:

Der Boden wird direkt (oder indirekt) z.B. in Drehrohrofen oder Wirbelschichtanlagen erhitzt, bis die flüchtigen Schadstoffe oder ihre Spaltprodukte aus dem Boden verdampfen. Eine Verbrennung der Schadstoffe erfolgt in der Regel erst in der nachgeschalteten Gasbehandlung. Das Grundprinzip einer thermischen Bodenreinigungsanlage umfasst folgende Verfahrensschritte:

- Bodenkonditionierung, durch Sieben und Brechen,
- thermische Behandlung, z.B.: Thermische Desorption, evtl. Pyrolyse oder Verbrennen,
- Abgasreinigung.

Die benötigte Temperatur ist abhängig von den Siedepunkten der vorhandenen Schadstoffe. Bei flüchtigen Verbindungen reichen Temperaturen bis 500°C aus, bei halogenierten Verbindungen sind meist Temperaturen von 1000 bis 1200°C erforderlich /68/.

Schadstoffe:

- Flüchtige Substanzen z.B.: Lösungsmittel, Mineralöle, PAK, BTX, Cyanide, Quecksilber,
- Halogenierte org. Verbindungen z.B.: Insektizide, PCB, Dibenzodioxine, Dibenzofurane,
- Nitroaromate aus der Sprengstoffproduktion.

Technischer Stand:

- Von allen Bodenreinigungsverfahren am weitesten entwickelt.
- Konventionelles Verfahren, bei dem unterschiedliche Anlagentypen zum Einsatz kommen. Verschiedene Anbieter sind auf dem Markt.
- Verfahren im Bereich 60-350°C bei Anwendung von Vakuum oder Wasserdampf sind entwickelt, aber aus wirtschaftlichen Gründen nicht im Einsatz !

Beurteilung:

- In der Regel ist eine nahezu vollständige Abtrennung der Schadstoffe aus dem Boden möglich.
- Hoher technischer und energetischer Aufwand.
- Bei Verfahrenstemperaturen von 400 bis 600°C wird die organische Bodensubstanz zerstört, bei höheren Temperaturen werden auch mineralische Bestandteile verändert oder zerstört.
- Es müssen wegen der erhöhten Freisetzung von Schadstoffen leistungsfähige Rauchgasreinigungsverfahren adaptiert werden.
- Bei der Auskofferung können -wie bei allen ex-situ-Verfahren- flüchtige Kohlenwasserstoffe in die Atmosphäre emittiert werden.
- Der Boden ist nach der Behandlung „tot“.

Literatur:

[II,8], [II,10], [II,16], [III,39], [9]

/66/ M. Bleier et al. 1999. Sanierung Rüstungsaltsstandort Stadtallendorf. Sanierung einer Testfläche im Vorfeld der flächenhaften Sanierung. altlasten spektrum 5/99. S. 284-291.

/67/ S. Behnke et al. 1997. Thermodynamische Simulation eines Verfahrens zur Bodensanierung mit Aspen PlusTM. altlasten spektrum 1/97 S.15-25.

/68/ J. Fortmann, P. Jahns. 1996. Thermische Bodenreinigung. In: Altlasten Erkennen, Bewerten, Sanieren. Springer Verlag, S. 272-303.

/69/ Hot Gas Decontamination: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_25.html

/70/ Incineration: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_26.html

/71/ Pyrolysis: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_28.html

/72/ Thermal Desorption: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_29.html

1.3.2 Bodenwäsche, ex-situ**Beschreibung:**

Das Ziel der Bodenwäsche ist das Freisetzen der im Ausgangsmaterial enthaltenen Schadstoffteilchen und das Abtrennen des Schadstoffes vom Boden. Dabei soll der Schadstoff in einer im Vergleich zum gereinigten Boden massenmäßig geringen Fraktion konzentriert werden.

Der ausgekofferte Boden wird in der Waschanlage (mechanische Klassier- und Sortiereinrichtung) mit der Waschflüssigkeit gemischt. Die Korngrößen werden fraktioniert und der hochbelastete Tonanteil vom gering bis unbelasteten Sandanteil getrennt. Die Bodenwäsche kann als physikalisches Verfahren weder einen Schadstoff vernichten noch in eine ökologisch unbedenkliche Form umwandeln. Der hoch belastete Teil wird deponiert oder in einem weiteren Verfahren behandelt.

Siehe auch: LfU: "Handbuch Bodenwäsche":

<http://www.uvm.baden-wuerttemberg.de/Alfaweb/berichte/mza11/hbbod.html>

Schadstoffe:

- Mineralöle,
- Teer, PAK,
- Schwermetalle.

Technischer Stand:

Stand der Technik, verschiedene Anlagen zur Bodenwäsche sind realisiert.

An der Optimierung der Waschzusätze, des Waschverfahrens sowie der Prozesswasser-aufbereitung wird weiterhin gearbeitet. Kombinationen mit biologischen Abbauprozessen (z.B.

Bioreaktor) sind möglich, wenn bioverträgliche Additive verwendet werden. Belastete Feinfraktion, die nicht hinreichend gereinigt ist, kann deponiert oder mit einem weiterem Verfahren immobilisiert werden.

Beurteilung:

- Für sandigen, hochbelasteten Boden ein gutes, schnelles Sanierungsverfahren.
- Stark tonhaltige Böden bereiten Schwierigkeiten, da die Feinfraktion meist hoch belastet und das Entfernen der Tonteilchen aus der Suspension aufwendig ist.
- Beim Waschen werden auch nicht schädliche Bestandteile (Minerale, organische Substanz) entfernt.

Literatur:

[II,19], [III,2], [III,9], [III,25], [IV,8], [5], [19]

/73/ T. Sobisch. 1999. Entwicklung neuer Tensidformulierungen für den Einsatz in der Bodenreinigung. In: Innovative Techniken in der Bodensanierung. Spektrum Akademischer Verlag. S.213-233.

/74/ T. Röhling et al. 1999. Dekontamination PCB-belasteter Materialien. altlasten spektrum 2/99.S 86-90.

/75/ S.-H. Kong et al. 1998. Treatment of Petroleum-Contaminated Soils Using Iron Mineral Catalysed Hydrogen Peroxide. Chemosphere, Vol. 37 No. 8, pp: 1473-1482.

/76/ H.-J. Heimhard et al. 1996. Waschen. In: Altlasten Erkennen, Bewerten, Sanieren. Springer Verlag. S. 303-339.

/77/ Soil washing: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4.21.html>

1.3.3 Bodenluftabsaugung, in-situ

Beschreibung:

Im kontaminierten Bereich werden Absaugbrunnen installiert. Durch Anlegen eines Vakuums können leichtflüchtige Schadstoffe mit der Bodenluft über den Absaugpegel mittels eines Luftstromes, der von einer Pumpe erzeugt wird, abgesaugt werden. Anschließend erfolgt die Reinigung des Abluftstromes z.B. durch Oxidation, Adsorption oder Biofilter. Bei der Absaugung wird unterschieden in den Sättigungsaustrag zu Beginn, der die schadstoffgesättigte Bodenluft erfasst, und den geringeren Verdunstungsaustrag, der durch Diffusionsvorgänge aus dem Porenraum gering durchlässiger Bereiche limitiert wird. In dieser Phase ist meist ein Intervallbetrieb sinnvoll /80/, /82/.

Eine Variante der Bodenluftabsaugung ist das Bioventing (1.1.4). Hier dient der erzeugte Luftstrom im Boden primär zur Sauerstoffversorgung der schadstoffabbauenden Mikroorganismen /83/

Schadstoffe:

- Leichtflüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe: z.B. BETX, Styrol,
- aliphatische Kohlenwasserstoffe: z.B. Benzin-Kohlenwasserstoffe
- Leichtflüchtige CKW

Technischer Stand:

Wird meist in Kombination mit anderen Sanierungsverfahren z.B. Hydraulische Maßnahmen angewendet. Sanierungen wurden erfolgreich durchgeführt.

Beurteilung:

- Das Verfahren benötigt manchmal einige Jahre bis zur erfolgten Sanierung.
- Es muss sicher gestellt werden, dass der Boden gleichmäßig vom angelegten Unterdruck erreicht wird.
- Linsen mit Feinmaterial können oft nicht erfasst werden, weshalb Belastungen in stark geschichtetem Material problematisch oder für dieses Verfahren ungeeignet sind.

Literatur:

- /78/ ITVA Richtlinie Bodenluftabsaugung. Entwurf Stand 8/2000.
- /79/ C. M. Aelion, B.C. Kirtland, and P.A. Stone. 1997. Radiocarbon assessment of aerobic petroleum bioremediation in the vadose zone and groundwater at an AS/SVE site. Environmental Science & Technology, Vol.31, No.12, pp:3363-3370.
- /80/ S.S. Suthersan. 1997. Remediation Engineering Design Concepts. CRC Press. Chapter 3 S. 27-90.
- /81/ S.S. Suthersan. 1997. Remediation Engineering Design Concepts. CRC Press. Chapter 6 S. 159-185.
- /82/ F. Bruckner et al. 1996. Bodenluftabsaugung In: Altlasten - Erkennen, Bewerten, Sanieren. Springer Verlag S. 410-431.
- /83/ R.M. Capuano and M.A. Johnson. 1996. Geochemical Reactions during Biodegradation /Vapor-Extraction Remediation in the Vadose Zone. Ground Water, Vol.43 No 1, pp: 31-40.
- /84/ U. Fischer et al. 1996. Experimental and numerical investigation of soil vapor extraction. Water Resources Research, Vol. 32 No.12, pp: 3413-3427.
- /85/ J.R. Russel Boulding. 1995. Practical Handbook of Soil, Vadose Zone and Ground-Water Contamination. CRC Press Lewis Publishers, Chapter 13 pp: 732-745.
- /86/ Soil Vapor Extraktion, in-situ: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_9.html
- /87/ Soil Vapor Extraktion, ex-situ: : http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_22.html

1.3.4 Thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung, in-situ**Beschreibung:**

In der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung wird mit Hilfe von im Boden erzeugten Mikrowellen /89/, /92/, eingepresster Heißluft oder Dampf /88/, /90/ eine Erwärmung des belasteten Bodens erreicht, durch welche der Übergang der Schadstoffe in die Bodenluft beschleunigt wird.

Bei der Anwendung von Mikrowellen ist ein Mindestwassergehalt im Boden erforderlich, um eine Erwärmung zu erreichen, auch dient der Wasserdampf als Trägersubstanz /90/. Zu

hohe Wassergehalte behindern durch die Verringerung des Luftporenvolumens bei allen Verfahrensvarianten die Effizienz der Sanierung und erhöhen den Energiebedarf.

Im kontaminierten Bereich werden Absaugbrunnen installiert. Durch Anlegen eines Vakuums können die Schadstoffe mit der Bodenluft über den Absaugpegel mittels eines Luftstromes, der von einer Pumpe erzeugt wird, abgezogen werden. Anschließend erfolgt die Reinigung des Abluftstromes z.B. durch Oxidation oder Adsorption.

Schadstoffe:

- Alle wasserdampfflüchtigen organischen Verbindungen mit Siedepunkt unter 300°C wie leichtflüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe: z.B. BTEX, Styrol,
- Aliphatische Kohlenwasserstoffe: z.B. Benzin-Kohlenwasserstoffe,
- CKW

Technischer Stand:

In den USA Stand der Technik, in Deutschland in der Entwicklung (VEGAS), Modelsanierungen sind erfolgt.

Beurteilung:

- Relativ schnelles Verfahren (ca. 10 m³ in 2 Wochen).
- Standorte mit hohen Wassergehalten sind ungeeignet, hohe Grundwasserstände müssen abgesenkt werden.
- Hoher technischer Aufwand, dadurch teures in-situ Verfahren.

Literatur:

[I,7], [III,30], [IV,3]

/88/ K. Balshaw-Biddle. 2000. Steam and Electroheating Remediation of Tight Soils. CRC Press Lewis Publishers.

/89/ P. Jütterschenke. 1999. Thermische in-situ Bodensanierung unter Einsatz hochfrequenter elektromagnetischer Felder - eine innovative Methode zur Reinigung kontaminierter Böden. In: Innovative Techniken der Bodensanierung. Spektrum Akademischer Verlag. Kapitel 11, S 153-171.

/90/ A. Färber et al. 1998. Wasserdampfdestillation zur in-situ Sanierung der ungesättigten Bodenzone. In: Bodenschutz und Altlasten Bd.6: Sanierung kontaminierter Standorte und Bodenschutz, S. 79-90.

/91/ Z. Kawala and T. Atamanczuk. 1998. Microwave-Enhanced Thermal Decontamination of soil. Environ. Sci. Technol. 32, 2602-2607.

/92/ G. Heron et al. 1998. Soil heating for enhanced remediation of chlorinated solvents: a laboratory study on resistive heating and vapor extraction in a silty, low-permeable soil contaminated with trichlorethylene. Environ. Sci. Technol. 32,1474-1481.

/93/ Thermally enhanced soil vapor extraction: : http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_11.html

1.3.5 Elektrokinetische Separation, in-situ

Beschreibung:

Die elektrokinetische Separation nutzt die Mobilität von Schwermetallionen im elektrischen Feld.

In den ganz oder teilweise mit Wasser gesättigten Boden werden Elektroden zum Aufbau eines elektrischen Feldes im Bereich des Schadstoffherdes eingebracht. Aufgrund elektrokinetischer Transportphänomene (Elektroosmose oder Ionenwanderung) gelangen die Schadstoffe im Bodenwasser entlang des elektrischen Gleichspannungsfeldes zu den Elektroden. Diese werden mit Elektrolytflüssigkeit gespült, welche oberirdisch dekontaminiert wird. Zwecks Ladungsausgleich und zur Verringerung der pH-Wert-Veränderung an den Elektroden werden Austauschionen in die im Kreislauf geführte Elektrodenflüssigkeit eingebracht /96/, /97/.

Schadstoffe:

- Schwermetalle,
- polare organische Verbindungen wie TCE und BTEX.

Technischer Stand:

In Deutschland und den USA in Entwicklung, aber kaum kommerzielle Anwendung.

Beurteilung:

- Es können Konzentrationen von wenigen mg/kg Boden bis in den g/kg Bereich behandelt werden.
- Das Verfahren ist in gering durchlässigen Böden gut anwendbar.
- Durch Einrichten eines elektrischen Feldes werden chemische Bodeneigenschaften verändert.

Literatur:

[II,4], [III,37], [III,40], [IV,5]

/96/ A.N. Alshwabkeh and R.M. Bricka. 2001. Heavy Metals Extraction by Electric Fields. In: Environmental Restoration of Metals-Contaminated Soils. CRC Press Chapter 8, pp:167-186.

/97/ Z: Li, J.-W. Yu and I. Neretnieks. 1997. Removal of Cu(II) and Cr(III) from naturally contaminated loam by electromigration. J. Environ. Sci. Health, A32(5), 1293-1308.

/98/ T.R. Krause and B. Tarman. 1995. Preliminary results from the investigation of thermal effects in electrokinetic soil remediation. In: Emerging Technologies in Hazardous Waste Management V. pp.21-31.

/99/ Electrokinetic Separation: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_6.html

1.3.6 Bodenwäsche (Soil flushing), in-situ

Beschreibung:

In-situ Bodenwäsche extrahiert Kontaminationen mit in Wasser gelösten Additiven /100/ (wasserlösliche organische Substanzen z.B. Alkohol, Tenside) oder Mikroemulsionen /106/. Die Waschflüssigkeiten werden über der Kontamination verrieselt oder in den Boden injiziert. Die Schadstoffe werden mit der Waschflüssigkeit oder der Mikroemulsion im Abstrombereich oder unterhalb der Kontamination über Brunnen entnommen. Um einen ausreichenden Sanierungserfolg zu erreichen, muss der Porenraum des kontaminierten Bereiches i.d.R. mehrfach mit Waschflüssigkeit gespült werden. Verfahren zur Reinigung der Waschlösung sind noch in der Entwicklung.

Schadstoffe:

- Mineralöle,
- NAPL (nonaqueous phase liquids),
- chlorierte Kohlenwasserstoffe,
- Schwermetalle z.B. Chrom /105/.

Technischer Stand:

In der Entwicklung, Pilotversuche im größeren Labormaßstab (VEGAS).

Beurteilung:

- Eher geeignet bei kleinen abgrenzbaren Kontaminationen der Untergrundes, bei gut durchlässigen Böden mit eindeutigen hydrologischen Verhältnissen.
- Da keine Auskofferung des Bodens erforderlich ist, bleiben die physikalischen Bodeneigenschaften unverändert. Die Veränderungen der chemischen und biologischen Eigenschaften sind abhängig von der verwendeten Spüllösung.
- Es besteht die Gefahr, dass Bereiche mit geringer Leitfähigkeit umströmt und von der Spüllösung nicht erreicht werden. Der Erfolg der Sanierungsmaßnahme ist daher nur schwer zu erfassen.
- Beim Einsatz von Lösungsvermittlern zur verbesserten Mobilisierung der Schadstoffe muss die Gefahr der Auswaschung ins Grundwasser berücksichtigt werden.
- Ein Verbleib von Teilen der Waschflüssigkeit kann eine Belastung des Bodens darstellen.

Literatur:

- /100/ M. Bettahar, G. Schäfer, M. Bavière. 1999. An optimized surfactant formulation for the remediation of diesel oil polluted sandy aquifers. *Environ. Sci. Technol.* 33, 1269-1273.
- /101/ M.D. Annable et al. 1998. Field evaluation of interfacial and partitioning tracers for characterization of effective NAPL-water contact areas. *GROUND WATER*, Vol. 36, No. 3: 495-502.
- /102/ J. Fortin, W.A. Jury, M.A. Anderson. 1998. Dissolution of trapped nonaqueous phase liquids in sand columns. *J. Environ. Qual.*, 27: 38-45.

- /103/ D.C.M. Augustijn and P.S.C. Rao. 1995. Enhanced removal of organic contaminants by solvent flushing. Emerging Technologies in Hazardous Waste Management V. pp: 224-236.
- /104/ R.D. Busby, R.L. Lenhard, D.E. Rolston. 1995. An investigation of saturation-capillary pressure relations two- and three- fluid systems for several NAPLS in different porous media. GROUND WATER, Vol. 33, No. 4: 570-579.
- /105/ A. Davis and R.L. Olsen. 1995. The Geochemistry of chromium migration and remediation in the subsurface. GROUND WATER, Vol. 33, No. 5: 759-768.
- /106/ Y. Ouyang, R.S. Mansell, and R.D. Rhue. 1995. Flow of gasoline-in-water microemulsion through water-saturated soil columns. GROUND WATER, Vol. 33, No.3: 399-406.
- /107/ Soil flushing: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_8.html

1.3.7 Bodenabtrag

Beschreibung:

Ziel des Verfahrens ist es, wenige Millimeter der durch staubige Niederschläge kontaminierten Bodenoberfläche zu verfestigen und dann abzutragen. Hier gibt es zwei Ansätze.

Zum einen wird durch flächiges Aufbringen einer flüssigen Saat- und Näh suspension die Voraussetzung für eine gute, oberflächliche Durchwurzelung der obersten (kontaminierten) Bodenschicht durch Graspflanzen geschaffen. Nach einer Vegetationsperiode wird der Pflanzenteppich mitsamt dem anhaftenden Erdreich mittels einer speziell umgerüsteten Torfabbaumaschine abgetragen.

Eine andere Möglichkeit ist das Aufsprühen eines organischen Polymers. Hierdurch werden die ersten Millimeter des Oberbodens so verfestigt, dass sie ohne Staubeentwicklung entfernt werden können.

Der Boden wird anschließend mit einem weiteren Verfahren gereinigt oder Deponiert.

Schadstoffe:

- Isotope: Cs, Sr
- andere Oberflächenkontaminationen z.B. Dioxin.

Technischer Stand:

- Pflanzenteppich: Patent, Pilotversuch
- Polymer: Angemeldet zum Patent

Beurteilung:

Die Verfahren wurden für die flächenhafte Dekontamination nach Nuklearunfällen entwickelt. Auch unmittelbar nach Chemiebränden mit flächiger Verteilung von z.B. Dioxinen sind die Verfahren einsetzbar. Sie empfehlen sich besonders bei nicht abbaubaren Stoffen.

Literatur:

[III,11]

2 Sicherungsmaßnahmen

Ziel der Sicherungsmaßnahmen ist es, die weitere Ausbreitung einer Kontamination zu verhindern, und damit der Belastung von Grundwasser, Luft und Nahrungsmitteln zu begegnen. Die Kontamination selbst wird dabei nicht beseitigt. Sicherungsmaßnahmen werden mechanisch, chemisch oder physikalisch unterstützt.

2.1 Einkapselung, in-situ

Beschreibung:

Die Einkapselung ist eine rein bauliche Sicherung einer Kontamination, bestehend aus seitlicher Abschirmung, Oberflächenabdichtung und gegebenenfalls horizontaler Abdichtung des Untergrundes. Die chemische und physikalische Beschaffenheit des Bodens bleibt unverändert. Die Einkapselung kann durch hydraulische Maßnahmen unterstützt werden.

Um die bestehende Kontamination werden horizontale Dichtwände, die bis in eine undurchlässige Bodenschicht unter die Altlast reichen, installiert /108/, /111/. Hierzu stehen verschiedene Techniken zur Verfügung.

Sind keine Dichtungshorizonte im Untergrund vorhanden, so können unter Umständen Dichtungssohlen im Injektionsverfahren oder mittels Jet-Grouting geschaffen werden /108/.

Ziel einer Oberflächenabdeckung ist es, Sickerwasser und damit Austräge ins Grundwasser oder Gasemissionen zu vermeiden. Es kommen je nach Anforderung wasserdicht befestigte Flächen oder mehrschichtige, dränierte Abdecksysteme aus überwiegend mineralischen Baustoffen zum Einsatz.

Schadstoffe:

Für alle Schadstoffarten verwendbar.

Technischer Stand:

Stand der Technik.

Beurteilung:

- Sicherungsmaßnahmen reduzieren Emissionen und können relativ kurzfristig durchgeführt werden.
- Alle Vertikal- und Horizontaldichtungen sind auch bei einwandfreier Ausführung nicht vollkommen dicht. Eine gewisse Restdurchlässigkeit ist unvermeidbar.
- Für die eingebrachten Bausubstanzen muss eine endliche Haltbarkeit von ca. 50 Jahren angenommen werden, d.h. das Gefährdungspotential der Kontamination bleibt erhalten.

Literatur:

- /108/ H. Görg. 2000. Bau von Oberflächen- und Basisabdichtungen sowie vertikalen Abdichtungen. altlasten spektrum 1/2000. S. 68-69.
- /109/ S. Volkmann, U. Kühner. 1999. Aktueller Entwicklungsstand bei Dichtwandfertigmischungen. altlasten spektrum 2/1999. S. 77-85.
- /110/ R. Wienberg, J. Gerth und M. Silla. 1997. Biochemische Beständigkeit von organisch modifizierten Baustoffen für die Altlastensanierung. altlasten spektrum 4/97, S. 176-180.
- /111/ H. Müller-Kirchenbauer et al. 1996. Einkapselung. Altlasten - Erkennen, Bewerten, Sanieren. Springer Verlag S. 222-251.
- /112/ W. Friedrich et al. 1996. Qualitätssicherung. Altlasten - Erkennen, Bewerten, Sanieren. Springer Verlag S. 264-271.
- /113/ Landfill Cap: : http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_30.html
- /114/ Landfill Cap Enhancement : : http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_31.html

2.2 Hydraulische Sicherung, in-situ

Beschreibung:

Ziel der Hydraulischen Sicherung ist es, die Durchströmung eines kontaminierten Bereiches zu verhindern. Dieses wird erreicht durch flächiges Absenken des Grundwasserspiegels mittels Brunnen oder Dränagen. Es kommen auch Entnahmebrunnen im Grundwasserabstrom einer Kontamination oder Abwehrbrunnen im Oberstrom eines bedrohten Grundwasserschutzgebietes zur Anwendung /115/, /119/. Das abgepumpte Wasser wird gereinigt und evtl. wieder auf dem kontaminierten Bereich verrieselt /116/, /120/, /121/.

Auswaschungen aus Einkapselungen können durch hydraulische Maßnahmen vermindert werden. Durch Kombination mit Bodenluftabsaugung kann durch die verbesserte Sauerstoffversorgung der biologische Abbau der Schadstoffe gefördert werden. Bei leicht flüchtigen Kontaminationen ist dann zusätzlich eine Luftreinigungsanlage erforderlich /117/.

Schadstoffe:

Alle Schadstoffe, die eine Grundwassergefährdung darstellen.

Technischer Stand:

Stand der Technik.

Beurteilung:

- Hydraulische Maßnahmen müssen für die Dauer der Kontamination betrieben werden, bzw. bis zu deren Beseitigung.
- Falls eine eindeutige Zuordnung zwischen Quelle und Schadstofffahne im Grundwasser herstellbar ist, kann durch Abpumpen des verunreinigten Wassers die weitere Ausbreitung der Stoffe verhindert werden.

- Wenn die umgehende Beseitigung der Schadstoffquelle nicht möglich ist, kann die hydraulische Maßnahme zur vorläufigen Sicherung geeignet sein.
- Bei verbleibenden Restkontaminationen (z.B. nach Auskoffnung der hochkontaminierten Bereiche) muss oft eine hydraulische Sicherung über einen längeren Zeitraum betrieben werden.

Literatur:

- /115/ H. Görg. 2000. Hydraulische Maßnahmen und Rückbau kontaminierter Bauwerke als Beitrag zum Flächenrecycling und zur Altlastensanierung. *altlasten spektrum* 3/2000, S.186-187.
- /116/ U. Wöstmann et al. 1999. Das Sanierungsrahmenkonzept des ökologischen Großprojekts PCK Raffinerie GmbH, Schwedt/Oder. *altlasten spektrum* 4/99. S 216-226.
- /117/ C. Wortmann, S. Simon und E. Zartscholten. 1998. Sanierung eines kombinierten BTX-/CKW-Schadens durch innovative Verfahrenskombinationen. In: *Bodenschutz und Altlasten Bd.6: Sanierung kontaminierter Standorte und Bodenschutz*, S. 91-107.
- /118/ Fachausschuß HI. ITVA – Arbeitshilfe Hydraulische Maßnahmen. *altlasten spektrum*. 5/98, S.305-309.
- /119/ C. Weingran, S. Handels, U. Lieser, L. Zipprich. 1998. Sanierung und Sicherung des Rüstungsstandortes Stadtallendorf - Hydraulische Sicherung. *altlasten spektrum* 5/98, S.255-267.
- /120/ S.S. Suthersan. 1997. *Remediaton Engineering*. CRC Press Lewis Publishers. Chapter 11, S. 265-299.
- /121/ R. Mull. 1996. Hydraulische Maßnahmen. In: *Altlasten - Erkennen, Bewerten, Sanieren*. Springer Verlag, S. 251-263.

2.3 Reaktive Wände zur Abstomsanierung, in-situ

Beschreibung:

Reaktive Wände werden im Grundwasserabstrom von kontaminierten Standorten installiert. Das Ziel ist die Erfassung des gesamten kontaminierten Abstromes eines Standortes ohne die Notwendigkeit einer detaillierten Schadensherd-Erkundung. Die Entnahme von Grundwasser und oberirdische Installationen sind nicht notwendig. Beim Durchströmen des kontaminierten Grundwassers durch die reaktive Wand werden die gelösten Schadstoffe abgebaut, gefällt oder fixiert. Das Füllmaterial der Wand muss auf die vorhandenen Schadstoffe abgestimmt werden /122/, /123/. Um Um- und Unterströmen der Wand zu vermeiden, müssen genaue Kenntnisse der Grundwasserströmungsverhältnisse vorliegen.

Mit konventionellen Methoden des Tiefbaues wird die Reaktive Wand senkrecht zur Grundwasserfließrichtung eingerichtet und mit einem geeigneten, gut durchlässigen Material verfüllt. Es kommen ganzflächig durchströmte Wände sowie Funnel-and-gate-Systeme zum Einsatz.

Zusätzlich können undurchlässige Leitwände installiert werden, um eine Kanalisation des Grundwassers auf die Reaktive Wand zu erreichen.

Schadstoffe:

- Organische Schadstoffe z.B.: Mineralöle, BETX, Phenole, LCKW, PAK
- einige Schwermetalle, z.B. Cr(IV),
- Explosivstoffe.

Technischer Stand:

In den USA bereits an zahlreichen Standorten, in der BRD an Modellstandorten und in Forschungsvorhaben, sowie in einigen privat finanzierten Projekten verwirklicht.

Beurteilung:

- Verfahren kann zum schnellen Schutz von Grundwasserleitern vor Schadstoffeinträgen angewendet werden.
- Die Schadstoffquelle verbleibt im Boden d.h. das Gefährdungspotential bleibt erhalten. Somit ist während der Standzeit ein Monitoring erforderlich.
- Die Kapazität der Füllmaterialien ist bei adsorbierenden Materialien (z.B. Aktivkohle) limitiert, zudem kann es zu biologisch oder chemisch bedingten Veränderungen der Durchlässigkeit kommen.

Literatur:

- /122/ G. Teutsch, C. Schüth, R. Metzler. 1999. Reaktive Wände, Stand der Technik, Planung, Implementierung. Altlastenforum Baden-Württemberg e.V. Arbeitskreis Innovative Erkundungs-, Sanierungs- und Überwachungsmethoden.
- /123/ S.S. Suthersan. 1997. Remediation Engineering. CRC Press. Lewis Publishers. S.187-214.
- /124/ Passive/Reactive Treatment Walls: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_46.html

2.4 Stabilisierung /Fixierung, in-situ /ex-situ

Beschreibung:

Mit Stabilisierungsmaßnahmen werden Problemstoffe durch chemische Reaktionen in weniger mobile Bindungsformen umgewandelt. Wichtige Steuergrößen sind dabei pH-Wert und Redoxpotential im Boden.

Bei einer Fixierung steht eine Anbindung z.B. durch Sorption oder Okklusion an bzw. in eine Feststoffphase im Vordergrund.

Für in-situ Anwendung werden die speziell auf den Sanierungsfall abgestimmten Feststoffe, Lösungen oder Suspensionen auf den Boden aufgebracht und eingemischt bzw. in die Schadstoffquelle, darunter oder in den Grundwasserabstrombereich injiziert.

Bei ex-situ Anwendung wird das kontaminierte Material mit dem stabilisierenden / fixierenden Medium vermischt und anschließend deponiert oder anderweitig eingebaut.

Schadstoffe (z.B.):

- Cd, Pb, Zn im Oberboden: Zugabe von Rotschlamm, Wasserwerksschlamm, Eisenkugelschrot /131/,
- Cu, Zn: Zugabe von (Al)-Montmorillonit [13],
- Pb: Zugabe von natürlichem Apatit [IV,2], /125/, /126/,
- Zn, Cd: Adsorbens auf Tonschiefer-Basis (Berengite/Metasorb-B=Boden) [7],
- As (III): Fällung als Eisenarsenat [II,9], [III,34],
- CN-Oxidation mit H₂O₂ [III,20],
- Chromat-Reduktion mit anschließender Fällung [IV,12],
- Hg + Aquaclean 2000 -> HgS [3],
- Uran: Abdichtung und Immobilisierung mit CaO und SiO₂ /127/,
- organische Schadstoffe: DCR-Immobilisierung /7/ ex-situ (Dispergierung durch Chemische Reaktion); Stabilisierung mit Portland Zement ex-situ /134/.

Technischer Stand:

Es gibt verschiedene Ansätze, die von Art und Ort der Kontamination abhängig sind. Maßnahmen zur Stabilisierung / Fixierung einer Kontamination müssen meist für den Einzelfall maßgeschneidert werden.

Apparatetechnische Verbesserungsmöglichkeiten ergeben sich aus der flächenhaften Aufbringung, bei der effektiven Vermischung mit der obersten Bodenschicht, bzw. Entwicklung von Injektionstechnik zur Applizierung in den Untergrund. Es besteht Forschungsbedarf im Hinblick auf die Nachhaltigkeit der Sicherungsmaßnahmen.

Im ex-situ Verfahren sind u.a. Erfahrungen im Anlagenbau (DCR) vorhanden.

Beurteilung:

- Kann bei flächenhaften Kontaminationen im Oberboden eingesetzt werden.
- Aussichtsreiches Verfahren, wenn Dekontaminationsmaßnahmen nicht möglich oder zu teuer sind.
- Erreicht wird lediglich eine Retardation der Schadstoffverlagerung.
- Eine Immobilisierung der Schwermetalle ohne merkliche Reduktion der Pflanzenverfügbarkeit von Alkali- und Erdalkalitionen ist möglich.
- Kann in Kombination mit mikrobiologischen Verfahren eingesetzt werden /7/.
- Es ist oft schwierig, die Schadstoffquelle umfassend zu erreichen, z.B. bei Kontaminationen im Untergrund.

Literatur:

[II,9], [III,20], [III,34], [IV,12], [3], [IV,2], [7], [13]

/125/ V. Laperche. 2001. Immobilization of Lead by In-situ Formation of Lead Phosphates in Soil. In: Environmental Restoration of Metals Contaminated Soils. CRC Press. Lewis Publishers. S. 61-76.

- /126/ Z.-S. Cheng, G.-J. Lee, J.-C. Liu. 2001. Chemical Remediation Techniques for the Soils Contaminated with Cadmium and Lead in Taiwan. In: Environmental Restoration of Metals Contaminated Soils. CRC Press. Lewis Publishers. S. 93-105.
- /127/ H. Saheli, E. Gock. 1999. Untersuchung zur Immobilisierung von Schadstoffen in Halden des Uranerzbergbaus. In: Innovative Techniken der Bodensanierung. Spektrum Akademischer Verlag, Kapitel 12, S. 172-189.
- /128/ J.C. Seaman, P.M. Bertsch and L. Schwallie. 1999. In-situ Cr(VI) reduction within coarse-textured, oxide-coated aquifer systems using Fe(II) solutions. Environ. Sci. Technol. 33, 938-944.
- /129/ D. Wada and S.-I. Wada. 1999. Kinetics of speciation of copper, lead, and zinc loaded to soils that differ in cation exchanger composition at low moisture content. Commun. Soil Sci. Plant anal., 30 (17&18), 2363-2375.
- /130/ J.E. Van Benschoten et al. 1998. A nonelectrostatic surface complexation model for lead sorption on soils and mineral surfaces. J. of Environ. Qual. 27: 24-30.
- /131/ Verringerung der Bioverfügbarkeit von Schwermetallen in kontaminierten Böden durch Zugabe von Eisenoxiden -Abschlußbericht- Fördernummer: 0339601. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung Hannover. Februar 1998.
- /132/ M. Mench et al. 1998. Physico-chemical aspects and efficiency of trace element immobilization by soil amendments. Metal-Contaminated Soils: In-situ Inactivation and Phytoremediation. Springer Verlag, S. 151-182.
- /133/ S.S. Suthersan. 1997. Remediation Engineering, Design Concepts. CRC Press Lewis Publishers. Chapter 12, pp: 301-311.
- /134/ A. Habekost, R.M. Wagner. 1996. Immobilisierung. Altlasten - Erkennen, Bewerten, Sanieren. Springer Verlag S. 344-381.
- /135/ M. Mench et al. 1994. A mimicked in-situ remediation study of metal-contaminated soils with emphasis on cadmium and lead. J. Environ. Qual., 23: 58-63.
- /136/ Solidification/Stabilisation: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_10.html
- /137/ Chemical Reduction/Oxidation: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_18.html
- /138/ Solidification/Stabilisation: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_24.html

2.5 Natural Attenuation (NA), in-situ

Beschreibung:

Natural Attenuation (NA) nutzt die natürliche Selbstreinigung der Böden durch biologische und abiologische Umwandlung der Schadstoffe in weniger giftige Substanzen. Diese Prozesse werden unterstützt durch Sorption an Bodenpartikel oder Verdünnung und Dispersion.

Im Vergleich zu herkömmlichen, ingenieurtechnischen Reinigungsverfahren stellt sie höhere Anforderungen an die Erkundung des Untergrundes und an die langfristige analytische Überwachung der Rückhalte- und Abbauprozesse. Die Wirksamkeit von NA sollte im jeweiligen Schadensfall durch Laborversuche nachgewiesen werden und der Fortschritt des Abbaus der Kontamination ist langfristig zu überwachen.

Um eine unvorhergesehene Ausbreitung der Schadstoffquelle rechtzeitig erkennen zu können sind Einrichtungen von Beweissicherungsstellen und Langzeitüberwachungen erforderlich. Ausweichmaßnahmen sollten bereits im Voraus geplant werden.

Schadstoffe:

- Mineralölkontaminationen,
- halogenfreie organische Substanzen,
- nicht geeignet für gut wasserlösliche Substanzen wie MTBE!

Technischer Stand:

Wird in der Praxis angewendet, das Überwachungsinstrumentarium kann noch verbessert werden.

Beurteilung:

- In der Regel wird NA als Teil einer Behandlungsfolge zusammen mit aktiven Sanierungsmaßnahmen (z.B. Entfernen der hochkontaminierten Bereiche) eingesetzt.
- Langfristiges Verfahren.
- Die Kosten sind abhängig vom Überwachungsumfang und -aufwand.
- Nur für Kontaminationen geeignet, die keinen akuten Handlungsbedarf begründen.

Literatur:

- /139/ A. Doll, W. Püttmann. 1999. Natural Attenuation - Sanierung von Mineralölkontaminationen in Boden und Grundwasser durch natürliche Rückhalte- und Abbauprozesse in den USA. altlasten spektrum. 6/99 S.331-339.
- /140/ H.-P. Lühr. 1999. Grundsätze für das Monitoring im Zusammenhang mit Natural Attenuation bei der Altlastensanierung. altlasten spektrum. 6/99 S.345-348.
- /141/ D. Müller. 1999. Natural Attenuation - Überwachen als (statt) Sanieren? altlasten spektrum. 6/99 S.349-353.
- /142/ M. Schirmer, H. Weis. 1999. Einfluss refraktärer Substanzen wie Methyltertiärbutylether (MTBE) auf den „Natural Attenuation“- Ansatz in Grundwasserleitern. altlasten spektrum. 6/99 S.340-344.
- /143/ P.V. Brady, M.V. Brady, D.J. Borns. 1998. Natural Attenuation - CERCLA, RBCA's, and the Future of Environmental Remediation. CRC Press, ISBN: 1-56670-302-6.
- /144/ R.A. Petrie, P.R. Grossl, R.C. Sims. 1998. Controlled environment potentiostat to study solid-aqueous systems. Soil Sci. Soc. Am. J. 62: 379-382.
- /145/ Natural Attenuation: http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_4.html

3 Ausblick

Im Laufe der letzten Jahre wurden im Bereich der Bodensanierung viele neue Kenntnisse gewonnen. Der Schwerpunkt lag hierbei im Bereich der in-situ Sanierungsverfahren, nicht zuletzt, weil ex-situ Verfahren gut entwickelt und als Stand der Technik - z.B. Bodenwäsche, thermische Dekontamination, Mietenverfahren - auch angewendet werden. Diese Verfahren sind i.d.R. jedoch mit hohem Technikaufwand verbunden, was hohe Verfahrenskosten bedingt. Biologische Verfahren benötigen meist geringeren technischen Einsatz, sind dafür aber langwieriger. Hier gibt es aber vielversprechende Ansätze z.B. Phytoremediation, die allerdings noch nicht ganz ausgereift sind, so dass hier weiterer Entwicklungsbedarf besteht.

Bei in-situ Verfahren entfallen die Kosten für Auskoffnung, Transport, Aufbereitung, Lagerung und evtl. Entsorgung des bearbeiteten Bodens. Dafür entstehen Kosten zur Überwachung des Verfahrens über die Dauer der Sanierung, die bei biologischen Verfahren z.T. einige Jahre in Anspruch nehmen kann. Hinzu kommen Unsicherheiten hinsichtlich der Wechselwirkungen mit der Umwelt, und evtl. Gewinnausfall durch fehlende Nutzung. Dazu kann der Erfolg einer in-situ Bodensanierung in tieferen Zonen nicht immer eindeutig dokumentiert werden. Forschungsbedarf besteht weiter bezüglich Sanierungseffizienz und der Kostenreduzierung für biologische wie chemisch/physikalische Verfahren.

4 Anhang

4.1 UFORDAT (I)

- [I,1],A Projektleiter: Kunze, P.: Verbundvorhaben: Biologische Sanierung von Altlasten der Carbochemie - Teilvorhaben: Machbarkeitsstudie zur biologischen Bodensanierung eines Areals der SOW AG Böhlen. Bundesministerium für Forschung und Technologie (1992)
- [I,2] Projektleiter: Traulsen, B.-D.: Untersuchungen von Sanierungsmöglichkeiten von Böden mit Schwermetallaltlasten. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Institut für ökologische Chemie, Berlin (1995)
- [I,3],A Projektleiter: Dott, W.: Mikrobiologische Biotopcharakterisierung im Zuge der in-situ-Sanierung des Altölraffineriestandorts Pintsch Hanau. Technische Universität Berlin, Fachbereich 21 Umwelttechnik, Fachgebiet Hygiene (1993)
- [I,4] Projektleiter: Steilen, N.: Feldversuche zur mikrobiologischen Sanierung von PAK-kontaminiertem Gaswerksboden. Universität-Gesamthochschule Wuppertal, Fachbereich 9 Naturwissenschaften II, Lehrstuhl für Chemische Mikrobiologie (1991); (Text komplett vorh.)
- [I,5],A Projektleiter: Werner, P.: Untersuchungen zum mikrobiellen Abbau von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen in kontaminierten Böden. Universität Karlsruhe, Institut für Mikrobiologie (1993)
- [I,6],A Projektleiter: Dohmann, M.: In-situ-Sanierung eines Kohlenwasserstoff-Schadens auf dem Gelände der ehemaligen Germania-Brauerei, Münster. Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl und Institut für Siedlungswasserwirtschaft (1992)
- [I,7],A Projektleiter: Dohmann, M.: Altlastenentsorgung - On-site-Aufbereitung und Verwertung organisch- und schwermetallkontaminierter Böden mittels Wasserdampfextraktion bzw. Extraktion mit organischen Komplexbildner. Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl und Institut für Siedlungswasserwirtschaft (1992)
- [I,8] Projektleiter: Ibing, H.P.: In-situ-Sanierung eines Kohlenwasserstoff-Schadens auf dem Gelände der Germania-Brauerei, Münster. Bundesministerium für Forschung und Technologie (1992)
- [I,9],A Projektleiter: Meyer, E.R.: Verbundprojekt: Biologische Sanierung von Altlasten - Teilvorhaben: Untersuchung des Anwendungspotentials von Wasserstoffperoxid bei der biotechnologischen in-situ-Sanierung von kontaminierten Böden. Degussa, Geschäftsbereich Industrie- und Feinchemikalien, Hanau (1991)
- [I,10] Projektleiter: Höke, H.: Verbundprojekt: Biologische Sanierung von Altlasten - Teilvorhaben 2: Entwicklung von mikrobiologisch/adsorptiven Methoden zur on-site Bodendekontaminierung. Bundesministerium für Forschung und Technologie, Berlin (1993)
- [I,11],A Projektleiter: Beyer, M.: Verbundvorhaben: Biologische Sanierung von Altlasten. Teilvorhaben 1: Entwicklung von mikrobiologisch/adsorptiven Methoden zur in-situ-Bodenkontaminierung. Bundesministerium für Forschung und Technologie, Berlin (1993)

4.2 ULIDAT (II)

- [II,1] Henke, G.A.; Lissner, K.: Mikrobiologische Sanierung kontaminierter Böden in Bodenbehandlungszentren. Sanierung kontaminierter Standorte 1989. Grundsätze und Strategien zur Untersuchung und Bewertung - Erfahrung der Genehmigungspraxis bei der Durchführung von Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen. 187. Seminar. 1989. S. 279-284
- [II,2] Bock, H.; Mahmutoglu, I.: Bodensanierung. PAK-Abbau bei hoher Bioverfügbarkeit. Entsorgungspraxis (1992) (1/2) S. 24-25
- [II,3] CPM Communication Presse Marketing, St. Augustin: Sanierung belasteter Liegenschaften der Streitkräfte in Deutschland. Konferenz: Sanierung belasteter Liegenschaften der Streitkräfte in Deutschland (CPM-Symposium und Ausstellung), Bonn, 1991, 18.-19.Jun (n. abkopiert, zu geringer Info-Wert, s. [19])
- [II,4] Lageman, R.; Pool, W.; Seffinga, G.A.: In-situ Bodensanierung durch elektrokinetischen Schadstofftransport. Neuer Stand der Sanierungstechniken von Altlasten. Symposium. Berlin;Bielefeld; München: Schmidt, E. 1990. S. 101-121
- [II,5] Reiss-Schmidt, S.: Entsiegelungsmaßnahmen auf gewerblichen Flächen. Informationen zur Raumentwicklung (1988) (8/9) S. 557-572
- [II,6] Straßer, H.; Holland, K.; et. al.: Bewertungskriterien für die Folgenutzung eines Altstandortes am Beispiel des Sanierungsfalles - Nordhorn Povel. Berlin: Texte (Umweltbundesamt Berlin). 1989. Bd 32, S. 131
- [II,7] Dostal, U.: In-situ-Sanierung von Böden und Grundwasser. Beurteilung und Sanierung ölverunreinigter Standorte, S. 153-169 (n. abkopiert, zu geringer Info-Wert)
- [II,8] Feix, G.; Geilhufe, C.; Richter-Politz, I.: Zur Kinetik der thermischen Dekontamination von Bauschutt und Boden. TerraTech (1994) Bd 3(6), S. 57-59
- [II,9] Cichos, C.; Just, T.; Kretschmer, G.: Modellhafte Sanierung in einer Region mit Bergbau- und Hüttenindustrie. (TV 2: Arsenhütte Freiberg, Land Sachsen.). 1993
- [II,10] Zimmermann, K.; Martens, H.: Kontamination von militärischem Gelände im Raum Munster durch Arsenverbindungen. Abfallwirtschaftsjournal (1994) Bd 6(7/8), S. 510-613
- [II,11] Dannemann, H.: Lösungsansätze für die Wiedernutzung von Industriebrachen unter Berücksichtigung von Kosten-Nutzen-Betrachtungen - dargestellt an Fallbeispielen. Sanierung kontaminierter Standorte 1994. Berlin; Bielefeld; München: Schmidt, E. 1994. S. 215-223 (n. abkopiert, zu geringer Info-Wert)
- [II,12] Fritsche, W.: Aktivitäten von Pilzen zum Einsatz für die Bodensanierung. Mikrobiologische Bodensanierung - Theorie und Praxis. Wien, S. 115-127
- [II,13] Dott, W.: Vom Reagenzglasversuch zur biotechnologischen Bodensanierung - Probleme des Scaling-up and -down. Tagungsberichte (Umweltbundesamt Wien). Bd 11. Konferenz: Mikrobiologische Bodensanierung - Theorie und Praxis, 1993, 15.-17.Dez, S. 43-60
- [II,14] Alef, K.: Biologische Bodensanierung. (Methodenbuch.)
- [II,15] Gebhardt, W.: Biotechnologische Verfahren zur Boden- und Abwasserreinigung bei militärisch genutzten Flächen. Wasser Abwasser Praxis (1994) Bd 3(2) S. 68-70
- [II,16] Fortmann, J; Hanel, J: Industriebrachen - für immer verloren ?. altlasten-spektrum (1993) Bd 2(2), S. 61-74
- [II,17] Thomas, A.O.; Lester, J.N.: The Microbial Remediation of Former Gasworks Sites: A Review. Environmental Technology (1993) Bd 14(1) S. 1-24

- [II,18] ANTEC Gesellschaft für Angepaßte Technologien für Stadtbegrünung und Umweltschutz, Berlin: Biologische Bodensanierung. (Ansätze für einen reparierenden Bodenschutz.). Konferenz: 24. FGU-Kongress Biologische Bodensanierung. Ansätze für einen reparierenden Bodenschutz. UTECH Berlin Umwelttechnologieforum, Berlin, 1993, 17.-18.Feb (derzeit nicht verfügbar)
- [II,19] Niemann, J: Behandlung schwermetallbelasteter Böden. Special. Müllverbrennung und Reststoffverwertung (1992) (10), S. 54-58
- [II,20] Auerbach, C.; Winsel, E.; Wartenberg, G.: Entwicklung eines aeroben-anearoben Verfahrens zur 'In-Situ-Sanierung vorwiegend mineralölkontaminierter Altlaststandorte'. 1993
- [II,21] Holzapfel, A.: Altlastensanierung 'im Revier'. Aktuelle Bestandsaufnahme zum Flächenrecycling im Ruhrgebiet. Umwelt (VDI) (1992) Bd 22(5), S. 322, 324

4.3 STN (III)

- [III,1] Ho, Sa V.; Sheridan, P.W; et. al: Integrated In-situ Soil Remediation Technology: The Lasagna Process. *Environ. Sci. Technol.* (1995), 29(10), 2528-34 (nicht gefunden wg. falscher Angaben aus Datenbank)
- [III,2] Gatchett, A.; Banerjee, P.: Evaluation of the BioGenesisSM soil washing technology. *J. Hazard. Mater.* (1995), 40(2), S. 165-173
- [III,3] Komaromy-Hiller, G.; von Wandruszka, R.: Decontamination of oil-polluted soil by cloud point extraction. *Talanta* (1995), 42(1), S. 83-88 (noch nicht zurück)
- [III,4] Bruckner, F.: In-situ remediation of petroleum contaminated soils by ozone treatment. *ECOINFORMA '92*, 2. Int. Tag. Ausstellung Umweltinf. Umweltkommun., (1993), Bd 2, S. 211-222
- [III,5] Lamar, R.T.; Glaser, J.A.: Field evaluations of the remediation of soils contaminated with wood-preserving chemicals using lignin-degrading fungi. *Bioremediation Chlorinated Polycyclic Aromat. Hydrocarbon Compd.* (1994), S. 239-247 (nicht verfügbar)
- [III,6] Martens, D.A.; Frankenberger, W.T.: Feasibility of in-situ chemical oxidation of refractile chlorinated organics by hydrogen peroxide generated oxidative radicals in soil. *Emerging Technol. Bioremediation Met., fflPap. Int. Symp. In-situ On-Site Bioreclam.*, 2nd (1994), Meeting Date 1993, S. 74-84 (noch nicht zurück)
- [III,7] Cyr, B.; Beriault, A.; Guy, R.: Biological treatment of soil contaminated by PCP: Case History. *Proc. - Conf. Toxic Subst.*, 5th (1992), S. 123-133
- [III,8] Newman, B.; Martinson, M.; et. al.: Enhanced biodegradation of hydrocarbons in-situ via bioventing. *Ground Water Management* (1993), 17, S. 523-538
- [III,9] Losack, B.J.: Method for on-site cleaning of soil contaminated with metal compounds, sulfides and cyanogen derivatives. (Patent), U.S.
- [III,10] Health assessment for Wade Hazardous Waste Site (WHWS) National Priorities List (NPL) site. Agency for Toxic Substances and Disease Registry; Report (1989) (Bestellung zurückgezogen)
- [III,11] Jouve, A.; Schulte, E.; et. al.: Mechanical and physical removing of soil and plants as agricultural mitigation techniques. *Sci. Total Environ.* (1993), 137(1-3), S. 65-79
- [III,14] Hilardes, R.J.; Gray, K.A.: Innovative treatment of soil contamination: radiolytic destruction of dioxin and co-contaminants by cobalt-60. *Crit. Issues Water Wastewater Treat., Proc. Natl. Conf. environ. Eng.* (1994), S. 733-736 (noch nicht zurück)
- [III,15] Method and device for in-situ treatment of polluted soils. *Eur. Pat. Appl.* (noch nicht zurück)
- [III,16] Funk, S.B.; Crawford, D.L.; et. al.: Full-scale anaerobic bioremediation of trinitrotoluene (TNT) contaminated soil: a US EPA site program demonstration. *Appl. Biochem. Biotechnol.* (1995), Bd 51/52, S. 625-633
- [III,17] Gzyl, J.: Ecological impact and remediation of contaminated sites around lead smelters in Poland. *J. Geochem. Explor.* (1995), 52(1-2), S. 251-258
- [III,18] Stottmeister, U.; Martius, G.; et. al.: Bioremediation of contamination in soil sediment and water resulting from lignite pyrolysis. *Int. Symp. Environ. Biotechnol., Three-Day Symp.*, 2nd (1994), S. 79-81
- [III,19] Lamar, R.T.; Davis, M.W.; et. al.: Treatment of a pentachlorophenol- and creosote-contaminated soil using the lignin-degrading fungus *Phanerochaete sordida*: a field demonstration. *Soil Biol. Biochem.* (1994), 26(12), S. 1603-1611

- [III,20]Aronstein, B.N.; Lawal, R.A.; Maka, A.: Chemical degradation of cyanides by Fenton's reagent in aqueous and soil-containing systems. *Environ. Toxicol. Chem.* (1994), 13(11), S. 1719-1726
- [III,21]Shekher, C.; Swindoll, C.M.: In-situ bioventing and soil venting pilot-scale tests and evaluations. *Hazard. Ind. Wastes* (1994), 26th, S. 488-495
- [III,22]Deutsches Patentamt: Jehring, H.: Verfahren zur elektrochemischen Behandlung kontaminierter Böden und/oder Grundwässer
- [III,23]Bouwer, E.; Durant, N.; et. al.: Degradation of xenobiotic compounds in-situ: Capabilities and limits. *FEMS Microbiol. Rev.* (1994), 15(2-3), S. 307-317
- [III,24]Okeke, B.C.; Smith, J.E.; et. al.: Bioremediation of pentachlorophenol (PCP) contaminated soil with "shiitake" mushroom (*Lentinus edodes*). *Int. Symp. Environ. Biotechnol., Three-Day Symp., 2nd* (1994), S. 16-18 (noch nicht zurück)
- [III,25]Gombert, D.: Soil washing and radioactive contamination. *Environmental Progress* (1994), 13(2), S. 138-142
- [III,26]Piontek, K.R.; Simpkin, T.J.: Praticability of in-situ bioremediation at a wood-preserving site. *Bioremediation Chlorinated Polycyclic Aromat. Hydrocarbon Compd* (1994), S. 117-128
- [III,27]Cutright, T.J.; Lee, S.: In-situ bioremediation of PAH contaminated soil using *Mycobacterium* sp. *Fresenius Environ. Bull.* (1994), 3(7), S. 400-406
- [III,28]Piotrowski, M.R.; Doyle, J.R.; et. al.: Bioremedial progress at the Libby, Montana, superfund Site. *Appl. Biotechnol. Site Rem., fflPap. Int. Symp. In-situ On-Site Bioreclam., 2nd* (1994), Meeting Date 1993, S. 240-255 (nicht verfügbar)
- [III,29]Zappi, M.E.; Gunnison, D.; Teeter, C.L.: Bioslurry treatment of a petroleum hydrocarbon-contaminated soil. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* (1994)
- [III,30]Tran, H.; Aylward, R.: Guide to treatment technology for contaminated soils. Report (1992)
- [III,31]Mills, S.A.; Frankenberger, W.T., Jr.: Evaluation of phosphorus sources promoting bioremediation of diesel fuel in soil. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* (1994), 53(2), S. 280-284
- [III,32]Shen, J.; Bartha, R.: On-site bioremediation of soil contaminated by no. 2 fuel oil. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* (1994), 33(1), S. 61-72 (noch nicht zurück)
- [III,33]Srivastava, V.J.; Kelley, R.L.; et. al.: A field-scale demonstration of a novel bioremediation process for MGP sites. *Appl. Biochem. Biotechnol* (1994), 45-46, S. 741-756
- [III,34]Liberti, L.; Polemio, M.: Arsenic accidental soil contamination near Manfredonia (Italy). A case history. *J. Environ. Sci. Health, Part A* (1981), A16(3), S. 297-314
- [III,35]Hanson, R.S.; Brusseau, G.A.: Biodegradation of low-molecular-weight halogenated organic compounds by aerobic bacteria. *Biol. Degrad. Biorem. Toxic Chem.* (1994), S. 277-297
- [III,36]Sims, R.C.; Sims, J.L.: Cleanup on contaminated soils. *Util., Treat. Disposal Waste Land, Proc. Workshop* (1986), Meeting Date 1985, S. 257-277
- [III,37]Acar, Y.B.; Gale, R.J.; et. al.: Electokinetic remediation: Basics and technology status. *J. Hazard. Mater.* (1995), 40(2), S. 117-137
- [III,38]Oda, S.J.: Microwave remediation of hazardous waste: a review. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* (1994), 347(Microwave Processing of Materials IV), S. 371-382
- [III,39]Troxler, W.L.; Goh, S.K.; Dicks, L.W.R.: Treatment of pesticide-contaminated soils with thermal desorption technologies. *Proc., Annu. Meet. - Air Waste Manage. Assoc.* (1993), 86TH(VOL. 16 B)
- [III,40]Gale, R.J.; Li, H.; Acar, Y.B.: Soil decontamination using electrokinetic processing. *Stud. Environ. Sci.* (1994), 59(Environmental Oriented Electrochemistry), S. 621-654

- [III,41]Bartlett, R.W.: Soil decontamination by percolation leaching. Extr. Process. Treat. Minimization Wastes 1994, Proc. Int. Symp. (1994), S. 411-424
- [III,42]Wichert, H.W.: Decontamination procedures for soil contaminated by mineral oil. Bewertung Sanierung Mineralöl-Kontaminierter Böden, Resumee Beitr. DECHEMA-Fachgesprächs Umweltschutz, 10th (1993), Meeting Date 1992, S. 258-272 (noch nicht zurück)
- [III,43]Bollag, J.M.: Decontaminating soil with enzymes. Environmental Science&Technology (1992), 26(10), S. 1876-1881
- [III,44]Krause, T.R.; Helt, J.E.: applications of microwave radiation in environmental remediation technologies. Ceram. Trans. (1993), 36, S. 53-59 (nicht verfügbar)
- [III,45]Brooks, R.R.; Watterson, J.R.: The noble metal biogeochemistry of microorganisms. Noble Met. Biol. Syst. (1992), S. 159-196
- [III,46]Racke, K.D.: Implications of enhanced biodegradation for the use and study of pesticides in the soil environment. ACS Symp. Ser. (1990), 426(Enhanced Biodegrad. Pestic. Environ.), S. 269-282 (noch nicht zurück)
- [III,47]Wade, R.L.: Development of decontamination guidelines for PCB/PCDF and PCDD decontamination in areas of high exposure potential. Environ. Sci. Res. (1988), 37(Hazards, Decontam., Replacement PCB), S. 101-114
- [III,48]Liberti, A.; Brocco, D.: Decontamination of PCDDs and PCDFs in-situ by solar and UV radiations. Rapp. ISTISAN (1988), ISTISAN 88/8, Rep. NATO/CCMS Work. Group Manage. Accid. Involv. Release Dioxins Relat. Compd., S. 78-84 (noch nicht zurück)

4.4 ENVIROLINE (IV)

- [IV,1] Portier, R.J.; Barton, K.K.; Koury, J.: Low Intervention Soil Remediation Approaches. Remediation, 1995, Vol 5(2), S.57ff
- [IV,2] Ma, Q.Y.; Traina, S.J.; Logan, T.J.: In-situ Lead Immobilization by Apatite. Environmental Science&Technology, 1993, Vol 27(9), S.1803ff
- [IV,3] Kim, I.; Parkinson, G.; Moore, S.; Kearns, D.: U.S. Site Cleanups: a New Approach. Chem. Eng., 1993, Vol 100(5), S. 30ff
- [IV,4] Dougherty, E.J.; McPeters, A.L.; Overcash, M.R.; Carbonell, R.G.: Theoretical Analysis of a Method for in-situ Decontamination of Soil Containing 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin. Environmental Science&Technology, 1993, Vol 27(3), S. 505ff
- [IV,5] Shapiro, A.P.; Probststein, R.F.: Removal of Contaminants from Saturated Clay by Electroosmosis. Environmental Science&Technology, 1993, Vol 27(2), S. 283ff
- [IV,6] Baker, A.J.M.; Reeves, R.D.; McGrath, S.P.: In-situ Decontamination of Heavy Metal Polluted Oils Using Crops of Metal-Accumulating Plants-a Feasibility Study. Battelle In-situ Bioreclamation Symp, San Diego, CA, 1991, S. 600ff
- [IV,7] Retana, J.; Parker, D.R.; Amrhein, C.; Page, A.L.: Growth and Trace Element Concentrations of Five Plant species Grown in a Highly Saline Soil. J. Environ. Qual., 1993, Vol 22(4), S. 805ff
- [IV,8] Sheppard, S.C.; Gibb, C.L.; Hawkins, J.L.: Fate of Contaminants During Utilization of Peat Materials. J. Environ. Qual., 1989, Vol 18(4), S. 503ff
- [IV,9] Jones, A.K.; Bell, R.M.; Bradshaw, A.D.; Barker, L.J.: Coverings for Metal Contaminated Land. EPA/et al Manag of Uncontrolled Hazard Waste Sites Natl Symp, Washington, DC, 29.11-01.12.1982, S.183ff
- [IV,10] Parry, J.: Plants Absorb Heavy Metals. Pollut. Eng., 1995, Vol 27(2), S. 40ff
- [IV,11] Haggin, J.: Microbially Based Treatment Process Removes Toxic Metals, Radionuclides. Chem. Eng. News, 1992, Vol 70(30), S.35ff
- [IV,12] Gutierrez-Ruiz, M.E.; Castillo-Blum, S.E.; Aguilera, E.R.: Chromate Contamination North of Mexico City: Proposal for a Solution. Ind. Environ., 1989, Vol 12(1), S. 51ff
- [IV,13] Allen, H.E.; Chen, P-H.: Remediation of Metal Contaminated Soil by EDTA Incorporating Electrochemical Recovery of Metal and EDTA. Environmental Progress, 1993, Vol 12(4), S. 284 (noch nicht zurück)

4.5 Sonstige Quellen

- [1] Praxishandbuch Abfall/Altlasten, Hrsg. Sander, Tremmel, Troge, Dt. Wirtschaftsdienst, Stand 3/95 (im Büro)
- [2] Mühleisen, S.: Pflanzen reinigen Ackerböden, in "Bild der Wissenschaft" 6/1992, Verlag
- [3] Müller, G.: Sanierung quecksilberbelasteter Böden (Immobilisierung, Dekontamination), in Abbau Industrieller Schadstoffe, Bernd Wurster (Hrsg.): Köln, Verlag TÜV Rheinland. ISBN 3-82490124-2
- [4] Fieseler, C., Noll, B.: Biologischer Abbau von Schadstoffen in mischkontaminierten Böden, Entsorgungspraxis 10/94
- [5] Aschhoff, H.-G., Niemann, J.: Betriebsergebnisse einer Versuchsanlage zur Schwermetalldekontamination von Böden, TerraTech 1/1993
- [6] Petersen, R., Oberbremer, A.: Wiederverwertung biologisch sanierter Böden, TerraTech 3/93
- [7] Liske, M., Klein, C.: Schwermetallimmobilisierung in Böden mit Hilfe eines auf Tonschieferbasis hergestellten Adsorbens, TerraTech 2/93
- [8] Mackenbrock, U., Kopp-Holtwiesche B., Blank, J.: Zur biologischen Abbaubarkeit von Industriechemikalien, TerraTech 4/1994
- [9] Hiller, D., Burghardt, W.: Neues Leben im toten Boden, Die Geowissenschaften 11. Jahrg. 1993 / Nr. 1, VCH Verlagsgesellschaft mbH
- [10] Dt. Bundestag, 12. Wahlperiode: Antwort der Bundesregierung: Sanierung kontaminierter Böden durch biologische Verfahren, Drucksache 12/1816
- [11] Eikmann, T., Kloke, A.: Nutzungsmöglichkeiten und Sanierung belasteter Böden - Eikmann-Kloke-Werte, 2. Auflage, VDLUFA-Schriftenreihe 34/1993
- [12] Rammelt, Krebs, Gupta: Erhöhung der mobilen Schwermetallfraktion im Boden als ein Instrument der Phytosanierung, interner Bericht der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrilkulturchemie und Umwelthygiene in Liebefeld, Bern, Dienst Bodenchemie
- [13] Lothenbach, Furrer, Schulin: Sanfte Bodensanierung - eine Lösung für Schwermetallbelastete Böden?, Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 76, 1329 - 1332, (1995)
- [14] Hofrichter, Scheibner, Fritsche: Rolle der Bodenpilze beim Fremdstoffabbau, TerraTech 3/95
- [15] Biologische Bodenreinigung, Hamburger Berichte Bd. 9, Economica-Verlag Bonn (nicht bestellt)
- [16] P+P Geotechnik GmbH, Stuttgart, Firmenschrift 1995
- [17] Calmano, Förstner: Grundlagen der Erfassung, Bewertung und Sanierung schwermetallbelasteter Standorte, TU Hamburg-Harburg
- [18] Mahro, Kästner et al.: Untersuchungen zum Verbleib von PAK in kontaminierten Böden nach Zugabe von Abbau-aktiven Mikroorganismen, TU Hamburg-Harburg
- [19] Weilandt, E.: Konzeption einer Sanierungstechnik zur Behandlung TNT-kontaminierter Böden (Deconterra-Verf.), CPM-Symposium Bonn 1991, 18.-19. Juni
- [20] Karfusehr, Fabig, Hernke: Großflächige in-situ-Sanierung eines heizölkontaminierten Standortes, Altlasten-Spektrum 5/95
- [21] Heinecker, C.: Sanierungsverfahren mittels Bohrbrunnen - Dekontamination aromatischer Kohlenwasserstoffe, bbr 5/95