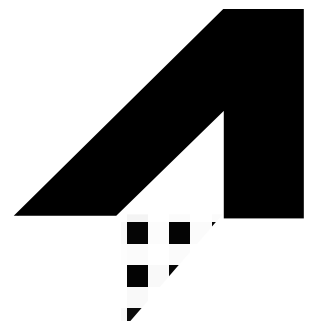


**Mikrobiologische Verfahren zur
Bodendekontamination**



Herausgeber:

Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V. ITVA, Pestalozzistraße 5-8
D-13187 Berlin

Mitglieder des Fachausschusses H1 zur Zeit der Erstellung der Arbeitshilfe:

Dr.-Ing. Peter Dreschmann, Aachen (Obmann); Dipl.-Ing. Martin Anemüller, Arnsberg; Dr.-Ing. Petra Beckefeld, Essen; Dr.-Ing. Joachim Beckmann, Stuttgart; Dr.-Ing. Reinhard Beine, Bochum; Dr.-Ing. Bernd Engelmann, Berlin; Dr. rer.nat. Hans-Jürgen Heimhard, Essen; Dr. rer.nat. Jürgen Klein, Essen; Dipl.-Ing. Gerhard Kmoch, Hattingen; Dipl.-Ing. Holger Mergen, Neustadt; Dr.-Ing. Volker Neumann, Berlin; Dipl.-Ing. Andreas Rebhan, Bochum; Dr. rer.nat. Peter Schröder, Dreieich-Sprendlingen; Dr. rer.nat. Gerd Tremmel, Köln; Dipl.-Ing. Stepanka Urban-Kiss, Stuttgart; Dipl.-Ing. Peter Zarbok, Mannheim

Autoren dieser Arbeitshilfe:

Dr. rer.nat. J. Klein, Dr.-Ing. J. Beckmann, Dr.-Ing. P. Dreschmann, Dr.-Ing. D. Grimski, Dr.-Ing. P. Jahns, Dr. rer.nat. H.-J. Heimhard, Dipl.-Ing. G. Kmoch, Dr.-Ing. V. Neumann, Dipl.-Ing. A. Rebhan, Dr. rer.nat. G. Tremmel, Prof. Dr. D. Uhlig, Dipl.-Ing. P. Zarbok

© Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V. ITVA Berlin

Berlin 1995



Mikrobiologische Verfahren zur Bodendekontamination

Satzungsgemäß gehört zu den Aufgaben des Ingenieurtechnischen Verbandes Altlasten e. V. (ITVA) die Erarbeitung von Regelwerken sowie Handlungsempfehlungen für das Fachgebiet Altlasten. Dementsprechend hat sich der Fachausschuß H1 „Technologien und Verfahren“ zum Ziel gesetzt, ein Merkblatt „Sanierungstechniken/-verfahren“ zu erstellen, in dem neben der Beschreibung des Ist-Zustandes von Sanierungstechniken u. a. die Bereiche Qualitätssicherung, Gewährleistung, Genehmigung, Wirksamkeit, Wirtschaftlichkeit, Akzeptanz, Nachsorge und Bauartzulassung beschrieben werden.

Gemäß der Empfehlung des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen (SRU) werden unter Sanierungsmaßnahmen sowohl Maßnahmen zur Sicherung als auch zur Dekontamination verstanden. Unter dem Begriff Bodenbehandlung werden Maßnahmen zur Beseitigung oder Verminderung der stofflichen Belastung von Böden subsummiert, unabhängig davon, ob es sich um Altlasten oder sonstige Verunreinigungen handelt.

Um bereits vor Fertigstellung des Merkblattes frühzeitig informieren zu können, wird vom Fachausschuß im ersten Schritt der Ist-Zustand von Sanierungstechniken in Form von Arbeitshilfen veröf-

fentlicht. Diese behandeln schwerpunktmäßig nachfolgende Punkte:

- Grundprinzip,
- Anwendungsbereich,
- allgemeines Verfahrensprinzip,
- Voraussetzungen für die Anwendung
 - schadstoff- und materialspezifisch
 - Vor- und Nachteile,
- Anforderungen an Material bzw. Verfahren,
- weiterführende Literatur.

Die Arbeitshilfen berücksichtigen die mittlerweile aus zahlreichen Sanierungsprojekten vorliegenden Praxiserfahrungen. Die vom Fachausschuß erarbeitete Arbeitshilfe wurde inhaltlich mit externen Fachleuten abgestimmt. Die bewußt knappe Darstellungsform soll über die wichtigsten Punkte informieren und dem Interessierten die weiterführende Literatur aufzeigen.

Die Anwendung der Arbeitshilfe steht jedermann frei. Die Arbeitshilfe dient zur Unterstützung von Behörden, Gutachtern und Industrie. Durch sie wird eine ingenieurtechnische Projektbearbeitung keinesfalls ersetzt. Rechtliche Ansprüche aus der Anwendung ergeben sich nicht.

Arbeitshilfe "Mikrobiologische Verfahren zur Bodendekontamination"

erarbeitet im Fachausschuß H1 des
Ingenieurtechnischen Verbandes Altlasten e. V. (ITVA)

Gliederung

1. Grundprinzip
2. Anwendungsbereiche
 - 2.1 Abbaubarkeit der Schadstoffe durch Mikroorganismen
 - 2.2 Verfügbarkeit der Schadstoffe in der Bodenmatrix
 - 2.3 Geologisch-hydrogeologische Eigenschaften
 - 2.4 Kriterien für biologische Verfahren
 - 2.5 Verwendung des behandelten Bodens
 - 2.6 Hinweise zum Arbeitsschutz
3. Verfahrensprinzipien
 - 3.1 Ex-situ-Verfahren
 - 3.1.1 Mietenverfahren
 - 3.1.2 Reaktorverfahren
 - 3.2 In-situ-Verfahren
4. Sanierungsüberwachung
5. Kosten
6. Weiterführende Literatur
7. Glossar

1. Grundprinzip

Mikrobiologische Dekontaminationsverfahren [1] benutzen bevorzugt die Fähigkeit von Mikroorga-

nismen, organische Verbindungen (Substrate) unter geeigneten Bedingungen zu Kohlendioxid, Wasser und Biomasse umzusetzen (Mineralisierung). Sie nutzen dabei die Substrate als Energiequelle sowie zum Aufbau ihrer Zellen (Wachstum). Es sind sowohl aerobe wie anaerobe biochemische Prozesse möglich[2].

Unter Mikroorganismen versteht man meist einzellige Organismen, die in Eukaryonten (Algen, Pilze, Protozoen) und Prokaryonten (Eubakterien, Archebakterien) unterschieden werden. Für den Abbau von Schadstoffen im Boden sind vorrangig Bakterien und Pilze von Bedeutung.

Der Angriff von Mikroorganismen auf organische Stoffe im Boden führt entweder zum vollständigen Abbau (Mineralisierung) oder zu einem Teilabbau, bei dem Stoffwechselprodukte (Metabolite) entstehen, die entweder von anderen Mitgliedern der Biozönose verwertet werden können oder aber im Boden verbleiben. Diese Stoffwechselprodukte sind oft hydrophiler/wasserlöslicher und damit mobiler als die Ursprungssubstanz. Weiterhin können Ausgangssubstanz und Stoffwechselprodukte dem Kohlenstoffdepot des Bodens zugeführt werden (Humifizierung) [3,4,5,6].

2. Anwendungsbereich

Die Entscheidung zum Einsatz mikrobiologischer Verfahren ist von der Erfüllung folgender Bedingungen abhängig:

1. Die Schadstoffe im Boden sind mikrobiell abbaubar
2. Die Schadstoffe im Boden sind bioverfügbar
3. Die geologisch-hydrogeologischen Eigenschaften des Bodens bzw. des Untergrundes und die

chemisch-physikalischen Eigenschaften des Bodens lassen die Einstellung der für den mikrobiellen Abbau der Schadstoffe erforderlichen physikalisch/chemischen (Milieu-) und verfahrenstechnischen (Stofftransport-) Bedingungen zu.

Mikrobiologische Verfahren können auch zur Behandlung anderer kontaminierter Feststoffe, wie z.B. gebrochenem Bauschutt, eingesetzt werden.

Substanzklasse	prinzipiell gut abbaubar	prinzipiell schwer abbaubar
• aliphatische Kohlenwasserstoffe (KW), Mineralöl-KW und deren Derivate	+	
• monocyclische aromatische (z.B. BTX-Aromaten) und heterocyclische (z.B. Pyridin, Chinolin) KW	+	
• polycyclische aromatische KW (PAK)	+1)	+2)
• leichtflüchtige halogenierte - insbesondere chlorierte - Kohlenwasserstoffe (LHKW bzw. LCKW)	+	
• alicyclische CKW und deren Derivate	+	
• polychlorierte Biphenyle (PCB)		+*
• polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane (PCDD bzw. PCDF)		+*
• Pestizide und deren Derivate		+*
• Schwermetalle	nicht abbaubar	

* Einige niedrigchlorierte Congenere sind prinzipiell abbaubar/dehalogenierbar. Für hochchlorierte ist ein Abbau derzeit nicht nachweisbar.

1) bis 4-Ring-PAK

2) 5- und 6-Ring-PAK

Tabelle 1: Mikrobielle Abbaubarkeit altlastenrelevanter Stoffe (nach [3])

2.1. Abbaubarkeit der Schadstoffe durch Mikroorganismen

Durch Laborversuche *in vitro* läßt sich die prinzipielle mikrobielle Abbaubarkeit von Schadstoffen feststellen. Eine Beurteilung der Abbaubarkeit der Schadstoffe im Boden des kontaminierten Geländes erfordert aber Untersuchungen am originären Boden in Suspension oder mit naturfeuchtem Probenmaterial [8]. Es ist darauf hinzuweisen, daß zur Beurteilung der prinzipiellen mikrobiologischen Sanierbarkeit des kontaminierten Bodens vertiefende chemische, biologische, geologisch-hydrogeologische und verfahrenstechnische Untersuchungen notwendig sind. Entstehung und Verbleib von Stoffwechselprodukten im Boden sollte durch toxikologische Tests bewertet werden.

Tabelle 1 enthält die Auflistung der Substanzgruppen, die als altlastenrelevant gelten [7], sowie die Beurteilung ihrer mikrobiellen Abbaubarkeit [3]. Dabei ist ein Konzentrationsbereich, innerhalb dessen ein mikrobieller Abbau möglich ist, nicht allgemein zu definieren, sondern je nach Substanzklasse unterschiedlich.

Ebenso läßt sich ein Wert für eine erreichbare Restkonzentration nicht allgemein festlegen, da dieser von Art und Ausgangskonzentration der Schadstoffe und der einstellbaren Milieubedingungen abhängt.

2.2 Verfügbarkeit der Schadstoffe in der Bodenmatrix

In vielen Fällen ist nicht die eigentliche mikrobiologische Abbaubarkeit, sondern sind physikalisch/chemische Parameter wie Desorption, Adsorption, Diffusion sowie das Lösungsverhalten der im Boden oft in fester Phase vorliegenden Schadstoffe entscheidend für den Abbau bzw. die Abbaurrate. Die Verfügbarkeit der Schadstoffe im Boden für Mikroorganismen, die sog. Bioverfügbarkeit, wird entscheidend beeinflusst von der Art der Bodenmatrix, d. h. ihrer stofflichen Zu-

sammensetzung und Kornverteilung, aber auch von der Vorgeschichte der Kontamination. Geeignete Methoden zur Beurteilung der Bioverfügbarkeit sind in [8-11] zu finden. Ein Ablaufdiagramm für praxisnahe Voruntersuchungen ist in **Abb. 1** gegeben. Geht man nach diesem Schema vor, so erhält man mit relativ geringem Aufwand zunächst die wichtige Entscheidung, ob eine mikrobiologische Sanierung möglich ist oder nicht. Ist die Bioverfügbarkeit der Schadstoffe im Boden nicht gegeben oder ist eine für Mikroorganismen toxische Kontamination nicht eliminierbar, so folgt daraus, daß dieser Boden **nicht** mikrobiologisch zu behandeln ist [11].

2.3 Geologisch-hydrogeologische Eigenschaften

Die geologisch-hydrogeologischen Eigenschaften des Untergrundes entscheiden darüber, mit welcher Verfahrenstechnik der Boden bzw. Untergrund mikrobiologisch dekontaminiert werden kann. In **Abb. 2** ist der Ablauf von Untersuchungen zur Verfahrensauswahl dargestellt [11]. Die Entscheidung für ein *in-situ*- oder *ex-situ*-Verfahren (s. **Abb. 3**) ist u. a. abhängig von den hydrogeologischen Vorgaben des Untergrundes, dem Durchlässigkeitsbeiwert k_f , der Homogenität des Bodens sowie dessen Schluff- bzw. Feinkornanteil [12-14]. Als Orientierungsgröße gilt der k_f -Wert. Die Praxis zeigt, daß bei k_f -Werten $< 10^{-4}$ m/s eine *in-situ*-Behandlung nicht infrage kommt. Nur in relativ wenigen Sanierungsfällen ergeben sich Bedingungen für eine mikrobiologische *in-situ*-Sanierung.

In den meisten Fällen wird eine *ex-situ*-Behandlung des Bodens durch eine **Mieten-** oder **Reaktor-**technik erforderlich. Die Entscheidung, ob Miete oder Reaktor ist nach Kriterien, wie z. B. Kontaminations- und Bodenart zu fällen.

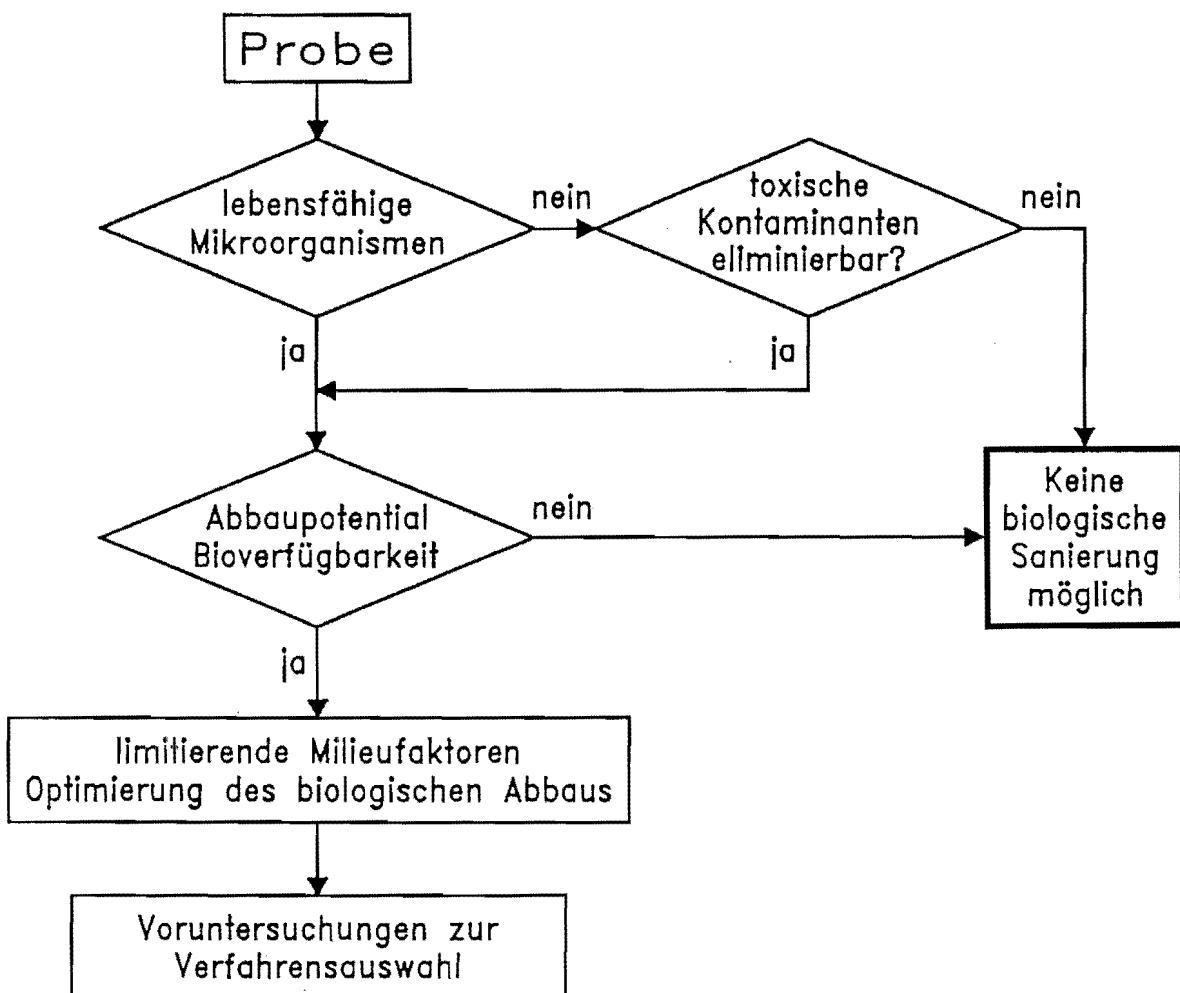


Abb. 1: Mikrobiologische Bodensanierung - Voruntersuchungen zur Verfahrensauswahl -

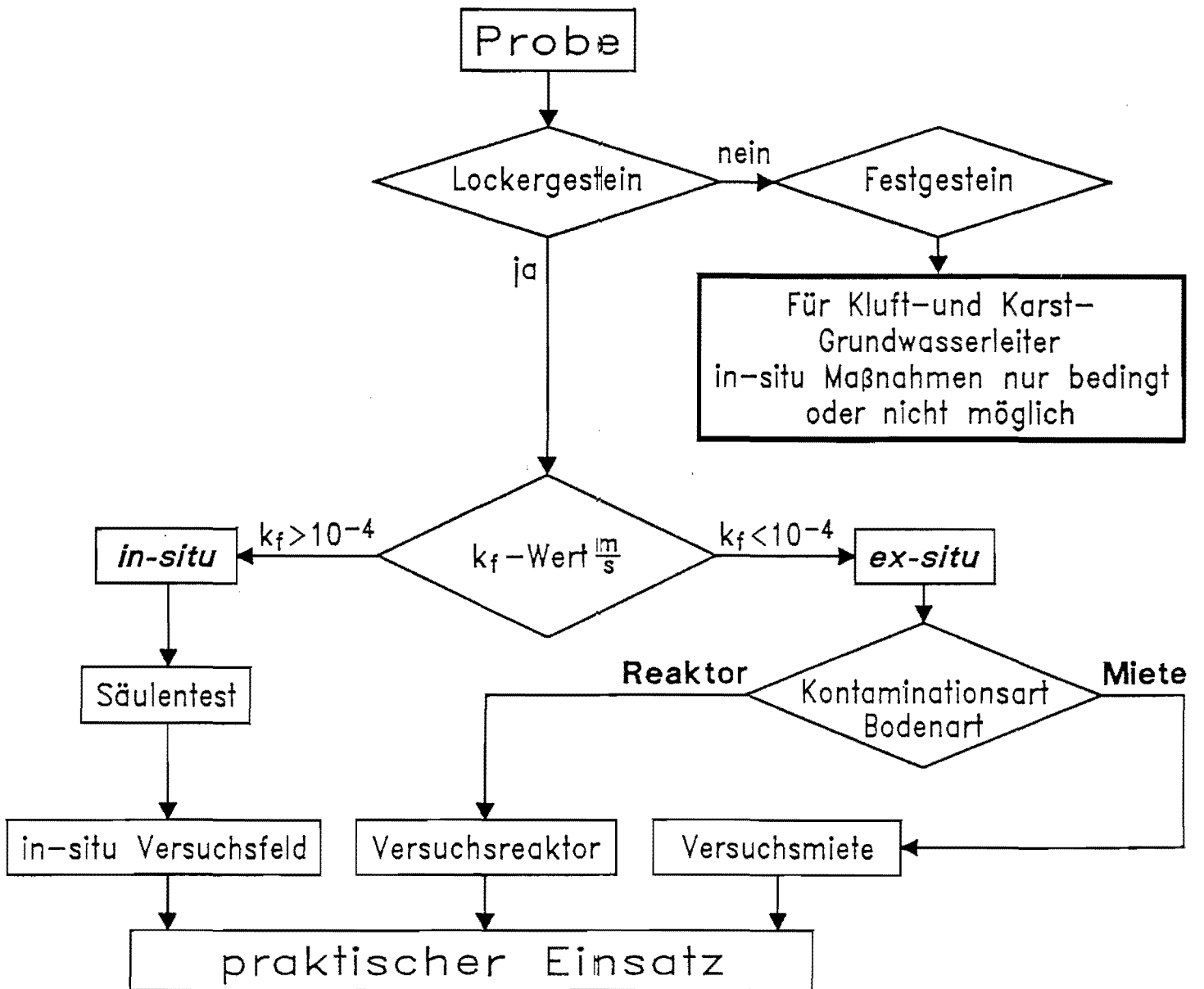


Abb. 2: Mikrobiologische Bodensanierung - Voruntersuchungen zur Verfahrensauswahl -

2.4 Kriterien für biologische Verfahren

Für jede der gewählten Methoden müssen einerseits die optimalen Milieubedingungen für den Stoffabbau ermittelt, andererseits die Scaling-up-Faktoren für die technische Anwendung durch z. B. Versuchs-

mierte, Versuchsreaktor oder in-situ-Versuchsfeld abgeleitet werden.

In Tabelle 2 sind einige Merkmale als für biologische Verfahren besonders bedeutsam aufgeführt.

	Verfahren	
	ex-situ	in-situ
Beseitigung bioverfügbarer Schadstoffe durch Mineralisation zu CO ₂ und H ₂ O	+	+
Einsatz natürlich entstandener/vorhandener (autochthoner) Mikroorganismen	+	+
Behandlung großer Bodenmengen möglich, bei Verfügbarkeit geeigneter Flächen	+	
bei ausreichender Sanierungszeit	+	+
Flexible Anpassung an Standortgegebenheiten (z. B. überbautes Gelände)		+
Geringer Energieaufwand	+	+
Zeitaufwendige (4 - 6 Wochen) Voruntersuchungen zur Abbauoptimierung	+	+
Lange Behandlungsdauer, insbesondere bei hochkontaminierten Standorten und schwer abbaubaren Schadstoffen	+	+
Notwendigkeit der Kontrolle und langfristigen Aufrechterhaltung bestimmter Milieubedingungen	+	+
Eignung als Sofortmaßnahme bei Unfällen	+	
Schwierige Prognose des Sanierungserfolges		+

Tabelle 2: Merkmale für die Anwendung biologischer Verfahren

2.5 Verwendung des ex-situ behandelten Bodens

Mikrobiologisch behandelte Böden können je nach Reinigungserfolg und Behandlungsverfahren für **vegetationstechnische** oder **erdbautechnische** Zwecke verwendet werden. Eine Klassifizierung nach Hauptbodenarten erfolgt nach DIN 18 196 (Erdbau), DIN 18 915 (vegetationstechnische Zwecke) sowie nach DIN 4022 und 4023 (Beprobung von Böden). Für den Wiedereinbau der behandelten Böden gelten unterschiedliche Regelungen in den einzelnen Bundesländern. Vor der Weiterverwendung muß in der Regel eine behördliche Freigabe erfolgen.

2.6 Hinweise zum Arbeitsschutz

Für Arbeiten in der biologischen Bodensanierung sind besondere Arbeitsschutzregeln zu beachten. Hier gelten sämtliche Anforderungen der ZH 1/183 "Richtlinie für Arbeiten in kontaminierten Bereichen" des Hauptverbandes der Gewerblichen Berufsgenossenschaften hinsichtlich der organisatorischen, technischen, analytischen, medizinischen und persönlich-ausrüstungstechnischen Aspekte. Derzeit wird von der Tiefbau-Berufsgenossenschaft, München, ein Arbeitsschutzmerkblatt "Sicherheitsmaßnahmen gegen die Gefährdung durch biologische Arbeitsstoffe bei der Bodensanierung" erarbeitet.

3. Verfahrensprinzipien

Eine Übersicht über die verfügbaren Verfahren der mikrobiologischen Bodendekontamination ist in **Abb. 3** [3,4,11] dargestellt. Nach Durchführung der erforderlichen Voruntersuchungen mit möglichst weitgehender Bilanzierung der mikrobiologischen Abbauvorgänge erfolgt die Entscheidung für die Anwendung eines ex-situ oder in-situ-Verfahrens.

3.1 Ex-situ-Verfahren

Diese Verfahren erfordern die Auskoffierung des belasteten Bodens und dessen Behandlung entweder in Mieten oder in Reaktoren, was entweder auf dem Gelände (on-site) oder nach einem zusätzlichen Transport in einem Boden-Behandlungszentrum (off-site) erfolgen kann.

Die einzelnen Schritte einer Behandlung sind in **Abb. 4** dargestellt. Durch eine Homogenisierung des Bodenmaterials wird eine lockere Bodenstruktur sowie eine verbesserte Zugänglichkeit der Schadstoffe für Mikroorganismen erreicht. Zusätzlich können organische Zuschlagstoffe, wie z. B. Kompost, Rindenmulch oder Stroh, als Trägersubstanzen für Mikroorganismen oder mineralische Zuschlagstoffe, z. B. gebrochener Bauschutt, zur Strukturverbesserung zugesetzt werden. Dabei muß das Vermischungsverbot der TA-Abfall beachtet werden.

3.1.1 Mietenverfahren

Die Mietenverfahren werden unterschieden in statische und dynamische Verfahren.

Im Gegensatz zu den statischen wird bei den dynamischen Mietenverfahren der zu Mieten aufgeschüttete Boden mit speziellen Wendeeinrichtungen in bestimmten Zeitspannen aufgenommen, homogenisiert und erneut aufgeschüttet. Je nach Bodenart und Behandlungsweise kann die Schichthöhe des Bodenmaterials zwischen 0,5 und 3 m variieren. Bei

diesem Wendevorgang werden, falls erforderlich, Wasser und Nährstoffe erneut zugesetzt. Bei den statischen Mietenverfahren werden zur Realisierung der erforderlichen Milieubedingungen Versorgungsleitungen zur Bewässerung und Belüftung installiert. Ein Beispiel für den Aufbau einer statischen Miete ist in **Abb. 5** gegeben.

Die Mieten werden in Zelten bzw. Hallen betrieben. Durch die Einhausung werden die Milieubedingungen wie Feuchtigkeit, Temperatur, etc. besser steuerbar und die Emissionen durch Prozeßwasser, flüchtige Stoffe und Staub vermieden bzw. gefaßt und, falls erforderlich, behandelt.

Für Mietenverfahren ist neben der Vorbehandlung der Böden folgende technische Ausrüstung erforderlich:

a) statische Mietenverfahren

- Basisabdichtung
- Belüftungseinrichtung mit Meß- und Regeltechnik
- Bewässerungseinrichtung mit Meß- und Regeltechnik
- Vorratsbehälter für Wasser und Nährstoffe
- evtl. Wasseraufbereitung
- Einhausung (Folie, Zelt, Halle) mit Be- und Entlüftung sowie Abluftreinigung

b) dynamische Mietenverfahren

- Zelt- und Hallenkonstruktion zur Aufschichtung der Miete mit Basisabdichtung
- Wendeeinrichtung mit entsprechenden Vorrichtungen zur Befeuchtung des Bodens und Überimpfung mit Kultur- und Nährlösung
- Be- und Entlüftungseinrichtung mit Abluftreinigung

Weitere Ausrüstungsteile können je nach Anbieter oder Standortbedingungen erforderlich werden.

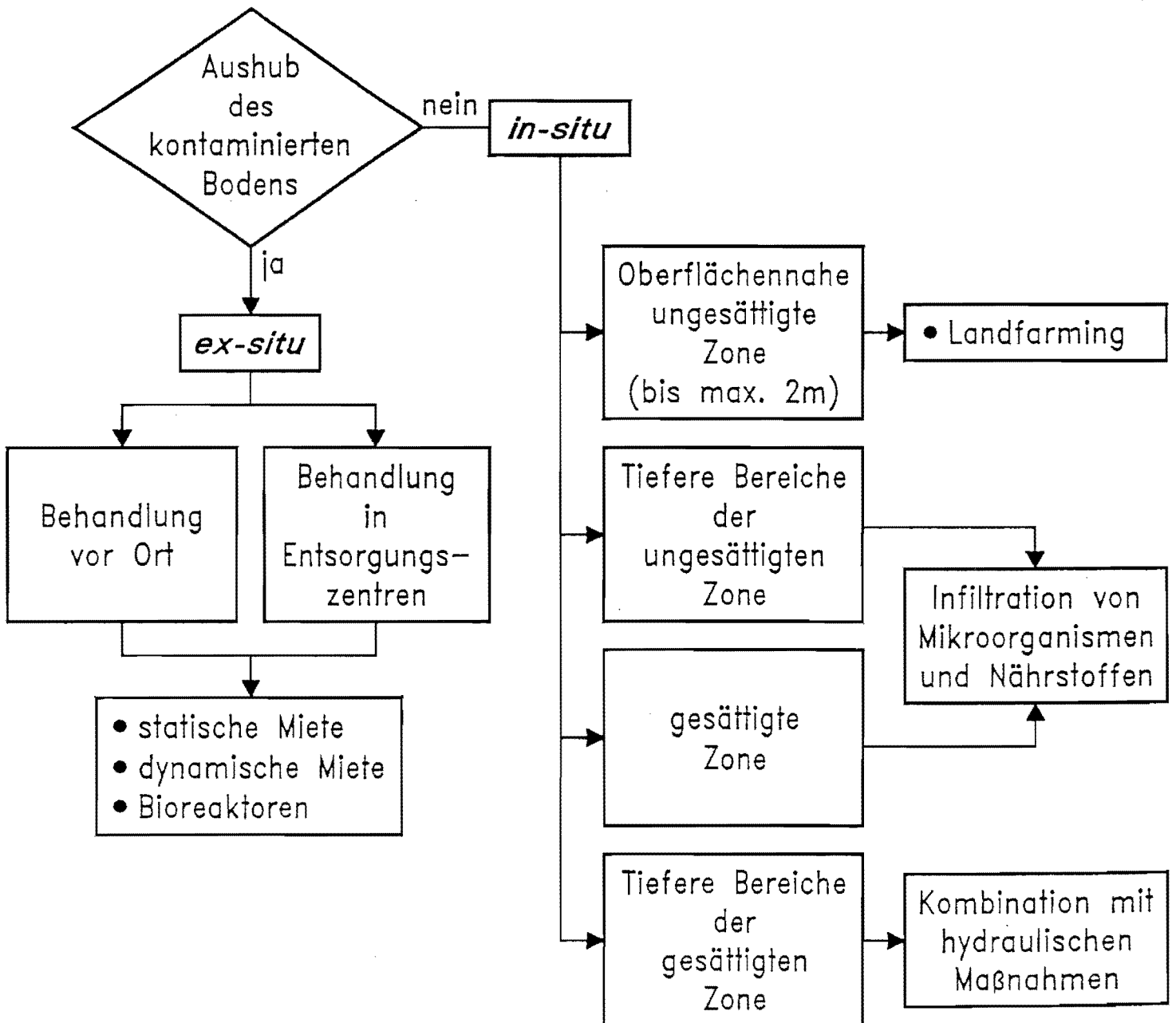


Abb. 3: Mikrobiologische Verfahren zur Bodendekontamination

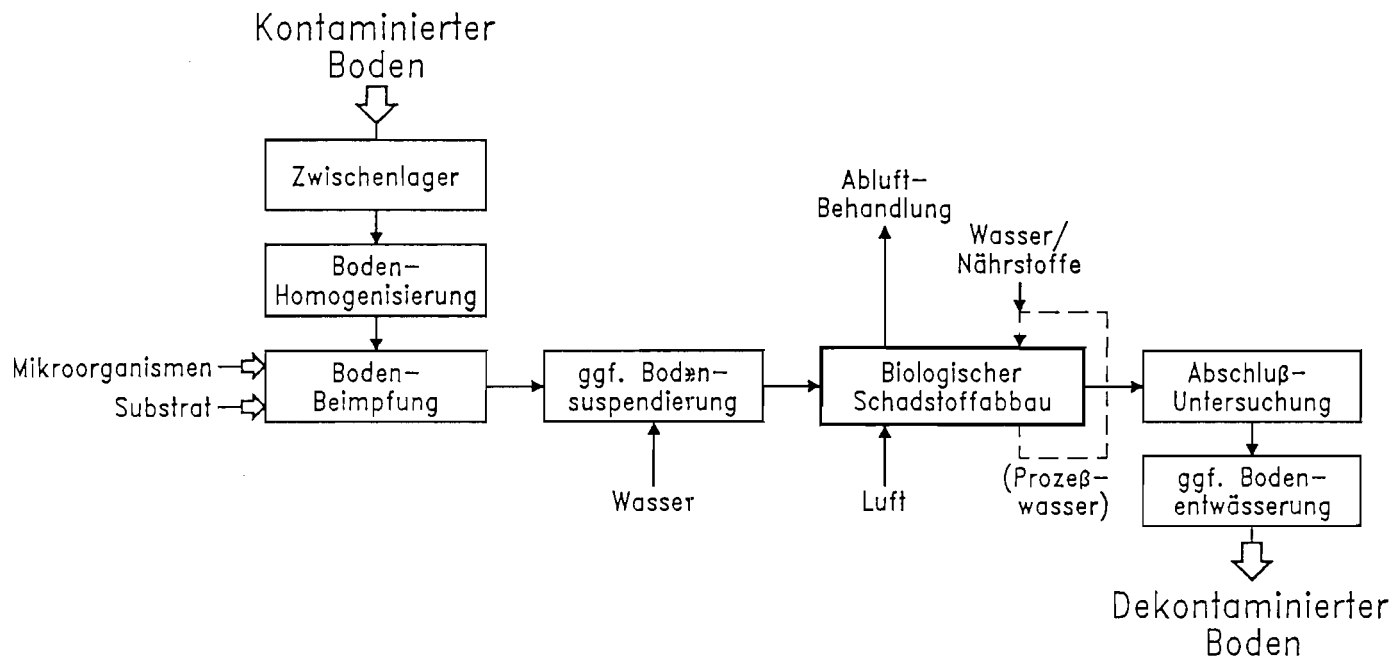


Abb. 4: Biologische ex-situ Sanierung

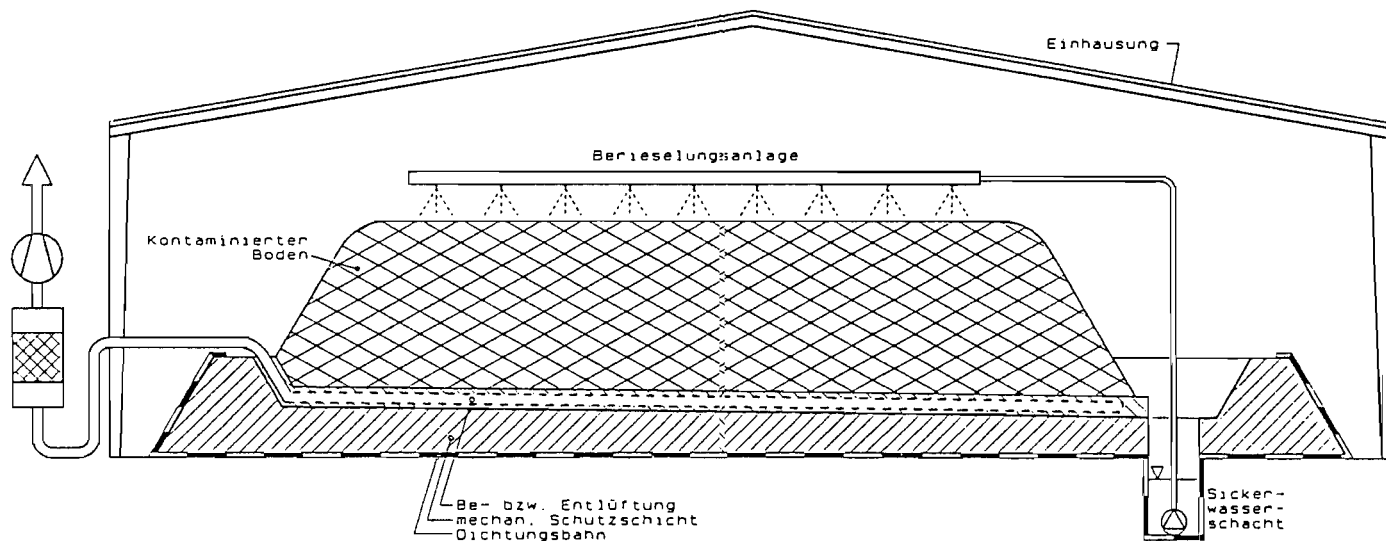


Abb. 5: Prinzipskizze für statischen Mietenaufbau

3.1.2 Reaktorverfahren

Eine neuere Entwicklung stellt die mikrobiologische Bodenreinigung in speziellen Reaktoren dar. Dabei handelt es sich um geschlossene Behälter z. B. liegende Zylinder, Wirbelschicht- oder Airliftreaktoren, in denen der zu reinigende Boden unter optimierten Bedingungen ständig oder zeitweise umgewälzt wird.

Ziel ist eine Verkürzung der Behandlungszeit, die Behandlung von Böden mit hohen Feinstkomponenten und hohen Schadstoffkonzentration sowie eine verbesserte Prozeßführung auch im Hinblick auf die Abluft- und Abwassererfassung und -kontrolle.

Für Reaktorverfahren ist derzeit noch kein allgemeiner Stand der Technik definiert worden, sie befinden sich jedoch in technischem Einsatz.

3.2 In-situ-Verfahren

Der in-situ-Behandlung liegt die Vorstellung zugrunde, den Boden nicht auskoffern zu müssen und die gesättigte bzw. ungesättigte Bodenzone eines kontaminierten Geländes als integralen Reaktor für den mikrobiologischen Abbau der Schadstoffe einzusetzen.

Je nach kontaminierter Zone kommen unterschiedliche Varianten in Frage.

Für die oberflächennahe ungesättigte Zone ist die Methode des Landfarmings (Bearbeitung mit Geräten zur Bodenauflockerung) möglich, um die Zugabe von Nährstoffen bzw. die Einstellung der Milieubedingungen realisieren zu können.

In tieferen Bereichen der ungesättigten Zone sowie in den Bereichen der gesättigten Zone kommt die Infiltration von Mikroorganismen und Nährstoffen durch einen Spülkreislauf sowie die Kombination mit hydraulischen Maßnahmen zur Anwendung. Ein Beispiel für das Prinzip einer in-situ-Behandlung ist in **Abb. 6** gegeben. Entscheidend für den raschen aeroben Abbau der Schadstoffe ist die Verfügbarkeit von

molekularem Sauerstoff, der im Wasser gelöst herangeführt werden muß. Hier kann die Zugabe eines Sauerstofflieferanten (z. B. Wasserstoffperoxid, techn. Sauerstoff) Vorteile bieten.

Für die Sanierung unter anoxischen oder anaeroben Bedingungen (z. B. in der ungesättigten Zone) ist anstelle des Sauerstoffes die Zugabe eines anderen Elektronenakzeptors (z. B. Nitrat) für den mikrobiellen Stoffwechsel erforderlich.

Bei höheren Gehalten des Grundwassers an Eisen und Mangan kann deren Ausfällung als Oxide/Hydroxide erfolgen (Verockerung) und zur Verminderung der Bodendurchlässigkeit oder Zusetzen der Filter in den Brunnen führen. Hierzu sind geeignete Gegenmaßnahmen zu ergreifen (z. B. Kohlendioxid-Dosierung, Enteisung, Entmanganung) oder leicht auswechselbare Filter vorzusehen.

Folgende Kriterien sind für eine in-situ-Bodensanierung zu beachten:

- Durchlässigkeitsbeiwert $k_f > 10^{-4}$ m/s
- Möglichkeit zur Einrichtung eines Spülkreislaufes
- Möglichst gleichmäßige Durchströmung der zu reinigenden Zone
- Verhinderung der Schadstoffausbreitung in die Umgebung

Für in-situ-Verfahren kann folgende technische Ausrüstung erforderlich sein:

- Förder- und Infiltrationsbrunnen
- Pumpen zur Infiltration und Förderung des Spülwassers
- Einrichtung zum Sauerstoffeintrag (Belüftung mit Gas, Zugabe von z. B. Wasserstoffperoxid)
- Vorratsbehälter für Nährstoffe und Wasser
- Wasseraufbereitung

Weitere Komponenten können bei einzelnen Anbietern von in-situ-Verfahren und bestimmten Standortbedingungen erforderlich sein.

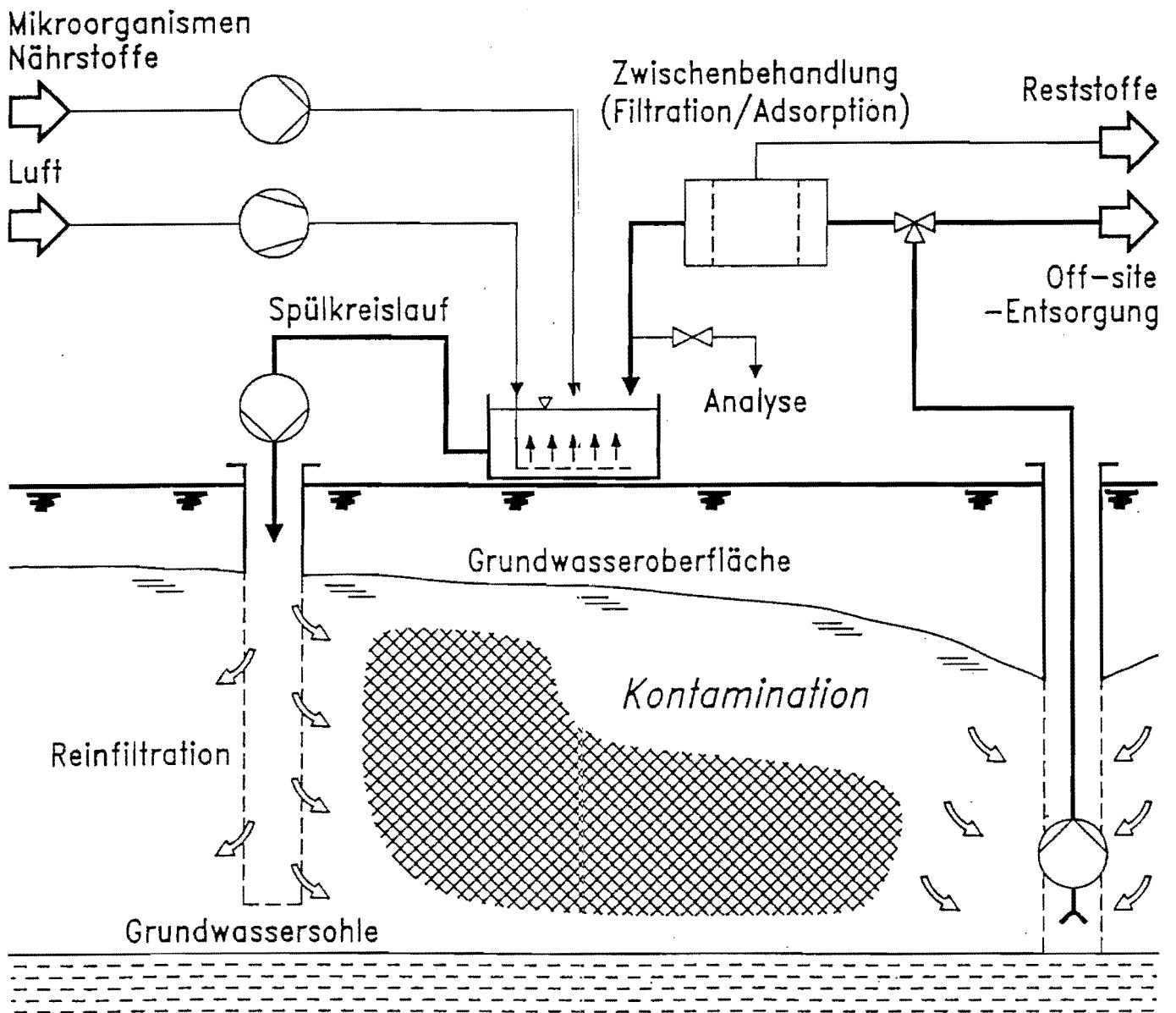


Abb. 6: In-situ-Sanierung in gesättigter Zone
Zwischenbehandlung/Infiltration, alternativ off-site-Entsorgung

4. Sanierungsüberwachung

Bei jeder Verfahrensvariante ist eine regelmäßige Überwachung des Abbauprozesses erforderlich, um den mikrobiellen Reaktionsfortschritt zu verfolgen und bei instabilem Verlauf steuernd eingreifen zu können. Für die Qualitätskontrolle bei ex-situ-Dekontamination müssen die Bodenproben so entnommen werden, daß ihre Analyse repräsentative und vergleichbare Ergebnisse ermöglicht.

Bei der Festlegung des Analysenumfanges ist zu berücksichtigen, daß sich das vorliegende Schadstoffgemisch in seiner Zusammensetzung verändert, möglicherweise Zwischenprodukte im Boden entstehen und schwer oder nicht abbaubare Schadstoffanteile im Boden zurückbleiben können. Die beim Teilabbau entstehenden Zwischenprodukte sind hydrophiler/wasserlöslicher und erscheinen somit im Prozeßwasser. Flüchtige Schadstoffe können ebenfalls zu Emissionen führen. Bei geschlossenen Mieten und Reaktoren wird die Abluft gefaßt und auf die zugelassenen Werte abgereinigt. Verdünnungseffekte sind zu vermeiden.

Bei in-situ-Maßnahmen muß im Zu- und Abstrom des Grundwassers eine Anordnung von Meßstellen vorhanden sein, um durch regelmäßige Probenahmen und Analysen eine Emission von Schadstoffen über den Wasserpfad zu erkennen und entsprechend eingreifen zu können.

5. Kosten für die biologische Bodenbehandlung

In stationären Behandlungsanlagen werden derzeit Preise zwischen 100 und 300 DM je t verlangt. Für sehr feinkörnige Böden sowie erhöhte Schadstoffkonzentrationen können Zuschläge anfallen.

Für die on-site-Behandlung in Mieten liegen die Kosten in vergleichbarer Größenordnung. Sie sind abhängig z. B. davon, ob ein Zwischenlager, eine Umhausung mit Abluftreinigung, eine Wasseraufbereitung etc. erforderlich werden.

Für die Behandlung in Reaktoren liegen bezüglich der Kosten derzeit noch zu wenig Erfahrungswerte vor.

Für eine biologische in-situ-Behandlung werden Kosten in der Größenordnung von 50 bis 100 DM/t Boden genannt. Die Aufwendungen für eine oberirdische Prozeßwasseraufbereitung führen zu zusätzlichen Kosten.

6. Weiterführende Literatur

- [1]. *Sondergutachten "Altlasten" des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen, Deutscher Bundestag, Drucksache 11/6191 vom 03.01.1990. Verlag Dr. H. Heger, Bonn, ISSN 0722-8333*
- [2]. *Schlegel, H.G.: Allgemeine Mikrobiologie, Georg-Thieme Verlag, Stuttgart, 1985*
- [3]. *Beiträge des 9. DECHEMA-Fachgesprächs Umweltschutz 1991 und 1. Bericht des Interdisziplinären Arbeitskreises der DECHEMA "Umweltbiotechnologie - Boden": Mikrobiologische Reinigung von Böden, DECHEMA, Frankfurt, 1991, ISBN 3-92 6959-29-0*
- [4]. *Handbuch "Mikrobiologische Bodenreinigung", Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe, 1991*
- [5]. *Kästner, M., Mahro, B. u. Wienberg, R.: Biologischer Schadstoffabbau in Böden, Hamburger Berichte 5 Economica Verlag Bonn, 1993*
- [6]. *Cook, A.M., Scholtz, R. und Leisinger, Th.: Mikrobieller Abbau von halogenierten aliphatischen Verbindungen. GWF-Wasser/Abwasser 129, 1988, S. 61-69*
- [7]. *Beratergremium für Umweltrelevante Altstoffe (BUA, Hrsg.): Stoffberichte Nr. 1 - 82. VCH Verlag, 6940 Weinheim (1985-1992)*
- [8]. *DECHEMA-Fachgespräche Umweltschutz 1992: 2. Bericht des Interdisziplinären Arbeitskreises "Umweltbiotechnologie - Bo-*

den", *Ad-hoc-Arbeitsgruppe*, Labormethoden zur Beurteilung der biologischen Bodensanierung, DECHEMA, Frankfurt/M., 1992

- [9]. *Dott, W., Kämpfer, P.*: Systematisierung der mikrobiologischen Untersuchung von Boden und Wasser. Altlasten, Karl-J. Thome-Kozmiensky, EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik GmbH, 1987
- [10]. *Alef, K.*: Auswahl mikrobiologischer Methoden. Methodenhandbuch Bodenmikrobiologie, Aktivitäten - Biomasse - Differenzierung, Ecomed Verlag
- [11]. *Klein, J.*: Möglichkeiten und Grenzen der biologischen Reinigung PAK-kontaminierter Böden. altlasten-spektrum, Heft 1, 1993
- [12]. *Hölting, B.*: Hydrogeologie.- Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie. - 2. Auflage. Ferdinand Enke Verlage, Stuttgart, 1984
- [13]. *Langguth, H.-R., Voigt, R.*: Hydrogeologische Methoden. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1980
- [14]. DIN 4021: Aufschluß durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben, 1990
- [15]. *Doetsch, P., Dreschmann, P.*: Verfahrensdokumente zur mikrobiologischen Bodenbehandlung. - In *Franzius, V.; Stegmann, R.; Wolf, K.; Brandt, E.*: Handbuch der Altlastensanierung, Ordner 2, Kap. 5.4.1.1.0.0 Deckers-Verlag, G. Schenk, Heidelberg (1992/1993)

7. Glossar

Abbau:

Mikrobiell bedingte Abnahme des Stoffes (Ausgangssubstrat). Dabei bleibt es offen, ob der Stoff ganz oder teilweise mineralisiert wurde oder zu organischen Metaboliten transformiert wurde.

Abbausukzessionen:

Aufeinanderfolgende Abbaureaktionen durch verschiedene Mikroorganismen

Aerober Abbau:

Mikrobieller Abbau in Gegenwart von Luftsauerstoff

Anaerober Abbau:

Abbau unter vollständigem Ausschluß von Sauerstoff

Anoxischer Abbau:

Abbau unter Ausschluß von Luftsauerstoff aber in Gegenwart von anderen Elektronenakzeptoren wie Nitrat (NO₃) oder Sulfat (SO₄)

Apolar:

Schlecht wasserlöslich aufgrund der chemischen Struktur

Bioverfügbarkeit:

Die Substanzen (Schadstoffe) liegen im Boden so vor, daß eine Aufnahme und ein Abbau durch Mikroorganismen ermöglicht wird (z.B. keine Adsorption an Bodenkolloide)

Cometabolischer Abbau:

Stoff wird nur abgebaut, wenn ein anderer Stoff (Co-Substrat) als Induktor und/oder Kohlenstoff- und Energiequelle angeboten wird. Ein cometabolischer Abbau liegt auch dann vor, wenn die Zellen auf einem anderen Wachstumssubstrat angezogen wurden und anschließend als "ruhende Zellen" mit dem abzubauenen Stoff in Pufferlösung inkubiert wurden.

Co-Substrat:

Eine Substanz, die zusätzlich zum abzubauenen Schadstoff vorhanden sein muß, um die Energie zum Schadstoffabbau zu liefern

Dehalogenierung:

Entfernung eines Halogenatoms (zumeist ein Chloratom) aus einer halogenhaltigen Substanz durch eine mikrobielle Reaktion

Elektronenakzeptoren:

Für den Energiestoffwechsel der Mikroorganismen erforderliche Substrate

Metabolit:

Substanz, die im Stoffwechsel von Mikroorganismen entsteht (Stoffwechselprodukt)

Mineralisierung:

Teilweiser oder vollständiger Abbau organischer Moleküle zu Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) unter Bildung von Biomasse

Wachstum:

Bei Wachstum eines Organismus auf einem Schadstoff, der als alleinige C- und E-Quelle (Kohlenstoff- und Energiequelle) angeboten wird, wird mindestens ein Teil des Moleküls zu Biomasse und CO₂ umgewandelt

