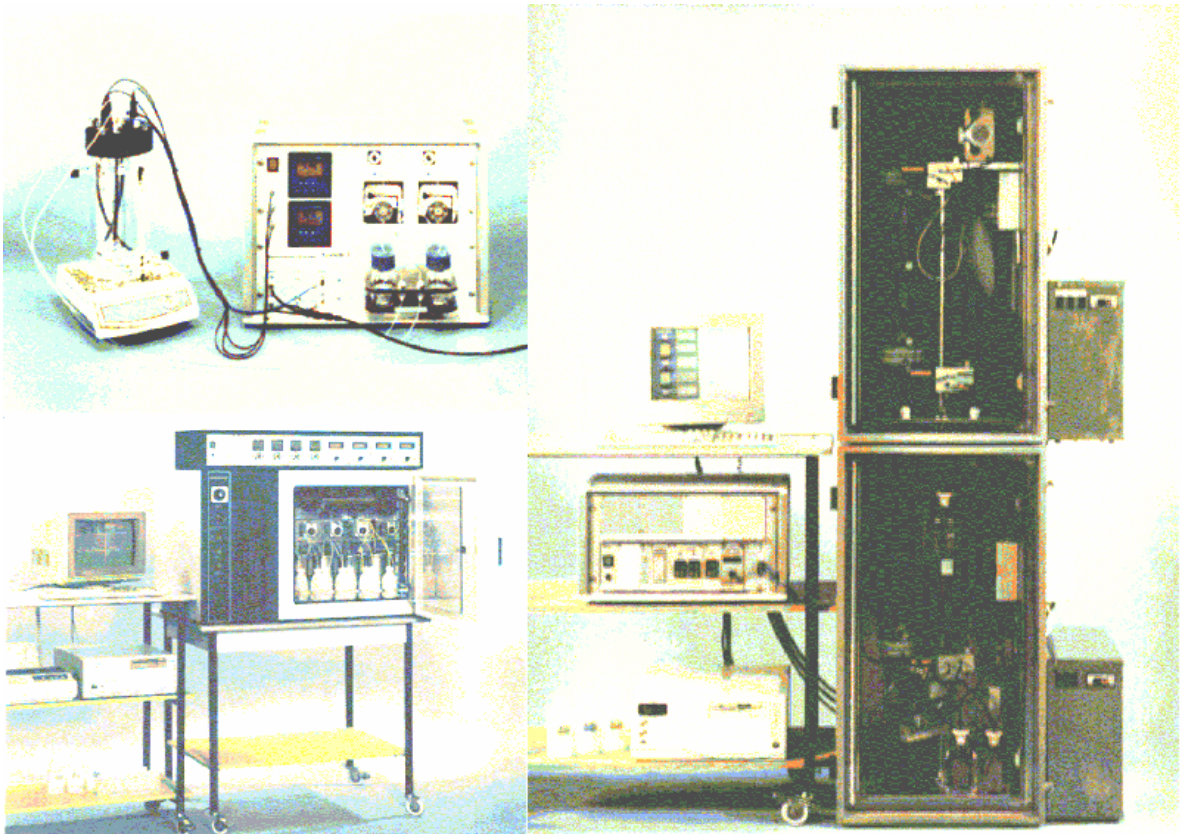


**Materialien zur Altlastenbehandlung**

# **Vorversuche im Rahmen der Sanierungsuntersuchung und Sanierung**

**(Batch- und Säulentests)**



**Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie**

---

---

**Inhaltsverzeichnis**

<b>Vorwort</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>4</b>
<b>2 Ziele von Vorversuchen</b> .....	<b>7</b>
<b>3 Wirkmechanismen der in situ und ex situ Sanierungsverfahren</b> .....	<b>8</b>
3.1 Grundlagen .....	8
3.2 Ableitung der Wirkmechanismen von Sanierungsverfahren.....	10
Immobilisierung .....	12
Passive hydraulische Maßnahmen .....	12
Vertikale Abdichtung .....	12
Mikrobiologische Verfahren .....	13
Aktive hydraulische Verfahren .....	13
Chemisch-physikalische Verfahren.....	14
<b>4 Einteilung der laborativen Vorversuche</b> .....	<b>17</b>
4.1. Grundlagen .....	17
4.2. Batch-Tests .....	18
Klassische Batchtests .....	18
Statische Batchtests .....	19
Dynamische Batchtests .....	20
4.3. Säulenversuche .....	23
Klassische Säulenversuche.....	23
Klassische Säulenversuche mit seitlicher Probennahme.....	24
Diskretisierte Säulenversuche .....	24
<b>5 Recherche nach Anwendung von Vorversuchen</b> .....	<b>26</b>
<b>6 Hinweise zu weiterführender Literatur und Regelwerken</b> .....	<b>31</b>
<b>7 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>34</b>
<b>8 Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>35</b>
<b>9 Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>36</b>
<b>10 Anlagenverzeichnis</b> .....	<b>37</b>

---

## Vorwort

Für die Sanierung von Altlasten stehen verschiedene Verfahren und Techniken zur Verfügung. Mit der Kenntnis über Standort bzw. den Untersuchungsergebnissen allein ist es nicht immer möglich, ein Sanierungsverfahren zu wählen und diese Auswahl zu begründen.

Die Stufen Sanierungsuntersuchung und Sanierung bilden eigenständige Bearbeitungsetappen innerhalb der Sächsischen Altlastenmethodik (SALM). Diese sollen die Verfahrenauswahl und standortspezifische Durchführung von Sanierungsverfahren ermöglichen.

Vordringliches Ziel der Sanierungsuntersuchung ist es, ein rechtlich und technisch abgesichertes Sanierungsverfahren unter Berücksichtigung der Standortbedingungen auszuwählen und diese Auswahl zu begründen. Dies kann mit Hilfe sogenannter Vorversuche im Labormaßstab erfolgen. Derartige Laborversuche können aber auch im Zuge der Planung und Durchführung der Sanierungsmaßnahme hilfreich sein. Dadurch wird es möglich, die Eignung eines Sanierungsverfahrens besser einzuschätzen, Kosten genauer zu kalkulieren sowie etwaige Risiken der Ausführung aufzuzeigen.

Die vorliegende Veröffentlichung greift diese Thematik auf und stellt entsprechende Versuche im Labor modellhaft dar.

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kinze

Präsident des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie

---

# 1 Einleitung

Nach Sächsischer Altlastenmethodik (SALM) ist im Ergebnis der Detailuntersuchung die Entscheidung zu treffen, ob eine Sanierung der Altlast durchzuführen ist. Die anschließende Sanierungsuntersuchung stellt die wesentliche Grundlage für alle folgenden Planungs- und Ausführungsschritte der Sanierungsmaßnahme dar.

Ziel der Sanierungsuntersuchung ist die Ermittlung eines technischen geeigneten, rechtlich zulässigen und verhältnismäßigen Sanierungsszenarios zur Beseitigung oder Verminderung von Gefahren unter Berücksichtigung der planungsrechtlich zulässigen Nutzung. Mit dem Sanierungsentscheid nach Sächsischer Altlastenmethodik (SALM) –Beweisniveau 4- wird das zur Realisierung vorgesehene Sanierungsszenario verbindlich durch die zuständige Behörde festgelegt. Nach dem behördlichen Sanierungsentscheid erarbeitet der Gutachter das Sanierungskonzept. Die methodischen Grundlagen zur Durchführung der Sanierungsuntersuchung sind im Handbuch zur Altlastenbehandlung, Teil 8, Sanierungsuntersuchung beschrieben. Vorversuche können im Rahmen der Sanierungsuntersuchung im Arbeitsschritt *Vorauswahl von grundsätzlich geeigneten Sanierungsvarianten* notwendig werden.

Die Sanierung umfaßt nach SALM die Planung, Vorbereitung, Ausführung und den Abschluß der Sanierungsmaßnahme. Dabei wird mit der Sanierungskontrolle die Wirksamkeit der Maßnahme festgestellt und die Sanierung abgeschlossen (Beweisniveau 5). Die fachlichen Anforderungen an die Sanierung sind im Handbuch zur Altlastenbehandlung, Teil 9, Sanierung dargestellt. Vorversuche können hier im Arbeitsschritt *Sanierungsplanung* notwendig werden.

Durch Vorversuche sollen die Wirkprinzipien der Sanierungsverfahren im Modell nachgebildet werden. Daher muß bei der Versuchsauswahl festgelegt werden, mit welchem Versuch prinzipielle Wirkmechanismen der Sanierung am besten nachempfunden werden können. Ausgehend von verschiedenen Sanierungsverfahren werden dazu in diesem Materialienband Hinweise gegeben. Die Darstellung konzentriert sich auf Sanierungsverfahren, die Stand der Technik sind und für die die Durchführung von Vorversuchen technisch machbar und sinnvoll ist.

---

Hauptsächlich werden laborative Verfahren und Vorrichtungen beschrieben, die mit Hilfe des verfahrenstechnischen Grundprinzips der Extraktion (im Besonderen der Elution) betrieben werden. Die Einteilung dieser Versuche folgt einer prinzipiellen Unterscheidung in Batchtests und Säulenversuche. Die beschriebenen Batch- und Säulenversuche sind grundsätzlich auch zur Beschreibung bzw. Ermittlung natürlicher Stofftransportprozesse (Sorptions- und Abbauverhalten) im Untergrund geeignet. Daher können sie zielführend auch ab der Phase der Detailuntersuchung eingesetzt werden und für die Phase der Sanierungsuntersuchung nutzbar gemacht bzw. modifiziert werden.

An Vorversuche für in situ und ex situ Sanierungsmaßnahmen sind grundsätzlich andere Anforderungen zu stellen. Batchtests und Säulenversuche unter Verwendung von Kernproben sind insbesondere für in situ-Sanierungsmaßnahmen geeignet.

Die Entscheidung, ob und in welcher Form Vorversuche durchgeführt werden, ist grundsätzlich vom Sanierungsverpflichteten bzw. beauftragten Gutachter in Abstimmung mit der fachbegleitenden Behörde zu treffen. Mit dieser Veröffentlichung sollen Hinweise gegeben werden, welche Vorversuche für die Auswahl und Optimierung von bestimmten Sanierungsverfahren sinnvoll sind. Versuchsaufbau und Durchführung sind teilweise in einschlägigen Normen (z.B. DIN-Vorschriften) enthalten.

Grundlage für den vorliegenden Materialienband ist eine Studie [6], in welcher laborative Vorversuche recherchiert und dargestellt wurden. Daher konzentrieren sich die Ausführungen in diesem Materialienband auf die Anwendungsmöglichkeiten von **laborativen** Vorversuchen.

In Abbildung 1 wird dargestellt, wie sich die Vorversuche in den Ablauf der Sanierungsuntersuchung und Sanierung und damit in das Strukturbild der Sächsischen Altlastenmethodik ab der Phase der Detailuntersuchung einordnen.

---

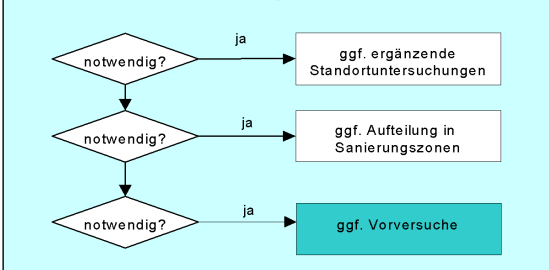
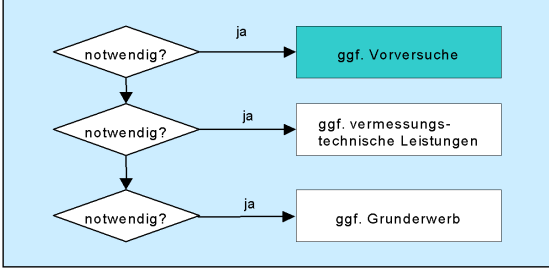
Beweis-niveau	Handlung	Entscheidung zum weiteren Handlungsbedarf			
	<b>Detailuntersuchung und integrale Betrachtung</b> E <sub>2-3</sub>	(Verwendung von laborativen Verfahren zur Ermittlung von Abbau- und Sorptionswegen sowie Migrationskenngrößen)			
<b>BN 3</b>	<b>Bewertung auf BN 3</b>	E <sub>3,4</sub>	B	C	
	<b>Sanierungsuntersuchung</b> E <sub>3-4</sub>	<p style="text-align: center;">Optionale Tätigkeiten</p> 			
<b>BN 4</b>	<b>Sanierungsentscheid</b>	E <sub>4,5</sub>			C
	<b>Sanierung</b>	<p style="text-align: center;">Optionale planungsbegleitende Tätigkeiten</p> 			
<b>BN 5</b>	<b>Sanierungskontrolle</b>		A	B	C
		Erkundung	Aus-scheiden	Belasse-n	Controlle

Abbildung 1: Einordnung von Vorversuchen in das Strukturbild der Sächsischen Altlastenmethodik (ab Detailuntersuchung)

## 2 Ziele von Vorversuchen

Die Durchführung von Vorversuchen im Rahmen der **Sanierungsuntersuchung** kann folgende grundlegende Ziele haben:

1. Die Prinzipielle Eignung oder den Ausschluß von Sanierungsverfahren im Rahmen der Vorauswahl festzustellen.
2. Eine Abschätzung der standortspezifischen Eignung vorzunehmen.
3. Eine Abschätzung von Zeitbedarf und Kosten zu ermöglichen.

In der Phase der Sanierung können Vorversuche dazu dienen,

1. die Abschätzung von Zeitbedarf und Kosten zu präzisieren,
  2. eine verfahrenstechnische Optimierung herbeizuführen sowie
  3. genehmigungsrechtliche Erfordernisse zu erfüllen.
-

## 3 Wirkmechanismen der in situ und ex situ Sanierungsverfahren

### 3.1 Grundlagen

Um die Wirkungsweise von Sanierungsverfahren analysieren zu können, ist es zunächst erforderlich, die Prozesse zu beschreiben, die auf das Migrationsverhalten von Kontaminanten im Mehrphasensystem "Boden" einwirken. Die komplex wirkenden Prozesse können untergliedert werden in [1]:

- **Transportprozesse (TP):**  
(nur bei in situ-Verfahren) Konvektion + hydrodynamische Dispersion + molekulare Diffusion
- **Speicherprozesse (SP)** Adsorption/Desorption gasförmiger, flüssiger oder fester Migranten (Inhaltsstoffe) an der Oberfläche von Feststoffkomponenten (Gleichgewichtsreaktionen)
- **Austauschprozesse (AP)** Ionenaustausch zwischen den Phasen (Nichtgleichgewichtsprozeß)
- **Interne Reaktionen (IR)** Komplexierung / Dekomplexierung; Lösung / Fällung; Oxidation / Reduktion; Säure-Base-Reaktionen; biologischer Abbau
- **Externe Quellen und Senken (Q/S)**  
(Bilanzterm) Stoffeintrag (z.B. durch Tanklager),  
Stoffentzug (z.B. durch Pflanzenaufnahme oder Bodenluftabsaugung)

Um die komplexe Wirkung der o.g. Einzelprozesse zu beschreiben und damit verständlich bzw. zugänglich zu machen, bedient man sich der mathematischen Modellbildung, deren allgemeine Darstellung der Gleichung 1 zu entnehmen ist.

$$[ \text{TP} ] = [ \text{SP} ] + [ \text{AP} ] + [ \text{IR} ] + [ \text{Q/S} ]$$

Gl. 1



Im allgemeinen wird diese Beschreibung für die natürliche Migration von Schadstoffen durch den Untergrund verwendet. In einem natürlichen Boden wird von einer mobilen und immobilen fluiden Phase ausgegangen. Die durch Konvektion, Dispersion und Diffusion hervorgerufenen Transportprozesse sind in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Transports unterschiedlich präsent.

Dabei hängt die Präsenz der einzelnen Terme bzw. die Formulierung eines qualitativen mathematischem Modells des Stofftransports von folgenden Größen ab:

- Stoffkonzentration in der mobilen flüssigen Phase,
- Stoffkonzentration in der immobilen flüssigen Phase,
- Dispersions-/Diffusionskoeffizient,
- Filtergeschwindigkeit,
- Speicherkoeffizient der festen Phase (Bodenpartikel, die mit der mobilen fluiden Phase in Kontakt stehen),
- Speicherkoeffizient der festen Phase (Bodenpartikel, die mit der immobilen fluiden Phase in Kontakt stehen),
- Geschwindigkeitskonstante der Austauschkinetik (1. Ordnung),
- mit immobilem Fluid gefüllter Porositätsanteil,
- durchströmter Porositätsanteil,
- biologische Abbaurate im Bereich der mobilen flüssigen Phase,
- biologische Abbaurate im Bereich der immobilen flüssigen Phase,
- Pflanzenentzugsrate (funktionell abhängig u.a. von Wurzeltiefe, Jahreszeit, Sonnenscheindauer, Temperatur).

Von wesentlicher Bedeutung ist, dass die Wirkung der genannten Teilprozesse der Migration von Kontaminanten im Mehrphasensystem "Boden" von den **intensiven Zustandsgrößen**:

- Temperatur,
  - Druck (Phasendrucke) und
  - Stoffaktivitäten bestimmt wird.
-

## 3.2 Ableitung der Wirkmechanismen von Sanierungsverfahren

Sanierungsverfahren werden in Sicherungs- und Dekontaminationsverfahren unterschieden. In Abhängigkeit vom Wirkungsort der Dekontamination bzw. Sicherung kann folgende Untergliederung vorgenommen werden:

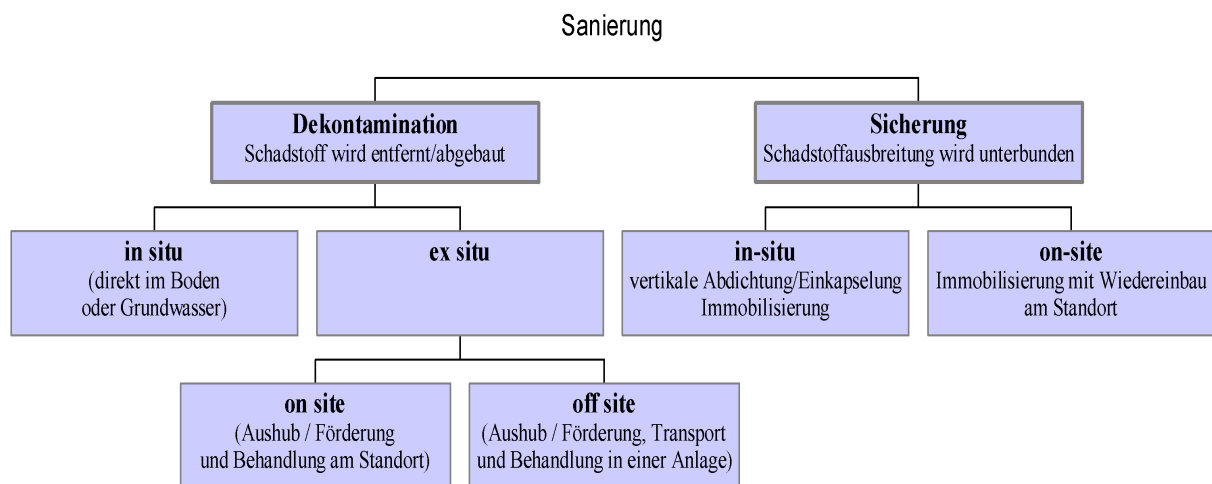


Abbildung 2: Untergliederung von Sanierungsverfahren in Abhängigkeit vom Wirkungsort

Bei den Sicherungsverfahren ergibt sich bei der Betrachtung vom Wirkungsort der Sanierung eine Untergliederung in in situ-Verfahren und ex-situ Verfahren. Bei den in-situ Verfahren wird der Schadstoff im Boden/Grundwasser belassen und durch geeignete technische Abdichtungs- oder Verfestigungsmaßnahmen sichergestellt, dass keine Schadstoffe von der Altlast emittieren. Bei den ex situ bzw. on site-Sicherungsverfahren wird der belastete Bodenbereich ausgehoben und am Standort so verwahrt, dass keine Emissionen entstehen. Vorversuche für Oberflächenabdichtungs- bzw. abdeckungsmaßnahmen richten sich meist auf Materialtests hinsichtlich der Wasserwegsamkeit.

Prinzipiell gilt:

- **Alle in situ Sanierungsmaßnahmen** erfordern im Boden einen wirksamen Transportprozeß der einen  $k_f$ -Wert von  $\geq 10^{-4}$  m/s bedingt. Dadurch bedingt müssen alle laborativen Untersuchungen zur in situ Dekontamination mit Verfahren und Vorrichtungen durchgeführt werden, die folgenden Anforderungen genügen:
  - Verwendung von quasi ungestört entnommenen, d.h. in ihrer Struktur und Textur weitgehend unveränderten Bodenproben,
  - Einstellung konstanter, den Untergrundbedingungen entsprechenden Temperatur- und Druckbedingungen,
  - Verwendung von Wasserproben, die aus dem Untersuchungsraum entnommen wurden und
  - Ausgrenzung von nicht den realen Prozessen entsprechenden Einwirkungen, wie Stoffein-/ -austräge über die Gerätematerialien.
- **Alle ex situ Sanierungsverfahren** basieren nicht auf der Nutzung von natürlich vorhandenen oder künstlich erzeugten Transportprozessen, und sind unabhängig vom  $k_f$ -Wert des kontaminierten Substrates durchführbar. Dementsprechend ergeben sich folgende Anforderungen an die für laborative Untersuchungen zur ex situ Sanierung einzusetzenden Verfahren und Vorrichtungen:
  - Verwendung von gestört entnommenen, d.h. in ihrer Struktur und ggf. Textur veränderten Substratproben, (Anpassung an das zu untersuchende Sanierungsverfahren)
  - Einstellung von Temperatur- und Druckbedingungen, die den technischen Prozeßbedingungen entsprechen sowie
  - keine Beschränkung an das zu verwendende Prozeßwasser .

Für eine gezielte Auswahl laborativer Vorversuche ist es Bedingung, die Voraussetzungen sowie das Wirkprinzip der Sanierungsverfahren zu beschreiben. Nachfolgend soll für die hier relevanten Verfahren eine entsprechende Übersicht gegeben werden.

---

## **Immobilisierung**

- Die Schadstoffeinbindung kann durch Verfestigung in Form erdbetonähnlicher Produkte hoher Festigkeit erfolgen.
- Der Nachweis, ob und zu welchem Teil Schadstoffe eingebunden werden können, kann durch Untersuchungen des Auslaugverhaltens mittels verschiedener Extraktionsverfahren sowie durch die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften (Durchlässigkeitsbeiwert, einaxiale Druckfestigkeit) erfolgen.

## **Passive hydraulische Maßnahmen**

- Es erfolgt eine Schadstoffadsorption und/oder chemische Umwandlung durch Einstau und Durchführung des kontaminierten Grundwasserstroms mit Hilfe von Dichtwänden und reaktiven (Filter-)materialien.
- Vorversuche richten sich in erster Linie auf die Durchlässigkeit, Reinigungsleistung sowie Beständigkeit des reaktiven Materials.

## **Vertikale Abdichtung**

- Die kontaminierten Boden- und Grundwasserbereiche werden mit Hilfe von vertikalen Spund- oder Dichtwänden aus bindigen, wasserundurchlässigen Materialien vom Grundwasserstrom und dem Versickerungsprozeß abgeriegelt oder eingeschlossen.
  - Vorversuche richten sich meist auf den Nachweis der Nichtdurchdringens der Schadstoffe durch die Dichtwand hinsichtlich Wasserwegsamkeit und Stoffdiffusion.
-

## **Mikrobiologische Verfahren**

- Voraussetzung zum Einsatz mikrobiologischer Verfahren ist die mikrobielle Abbaubarkeit sowie die Bioverfügbarkeit der Schadstoffe.
- Die Bioverfügbarkeit der Schadstoffe wird entscheidend beeinflusst von der Bodenmatrix, d.h. der stofflichen Zusammensetzung und Bodenart (Porengrößenverteilung), Ad-/Desorptionsprozessen, Diffusion bzw. dem Lösungsverhalten sowie dem Alter der Kontamination.
- Die geologisch-hydrogeologischen Eigenschaften des Untergrundes entscheiden über die anzuwendende Verfahrenstechnik sowie eine in situ bzw. ex situ Dekontamination. Entscheidend sind hier der Durchlässigkeitsbeiwert, die Homogenität des Bodens sowie der Feinkornanteil.

## **Aktive hydraulische Verfahren**

- Die Grundwasserreinigung besteht prinzipiell aus den Stufen der Grundwasserentnahme, der Grundwasseraufbereitung und/oder -behandlung sowie der Reinfiltration oder Ableitung. Eine Ausnahme bilden sogenannte Grundwasserzirkulationssysteme
  - Die Grundwasserbehandlung kann in situ (bei ausreichenden Kenntnissen über die geologischen und hydraulischen Verhältnisse) oder on site durchgeführt werden.
  - Vorversuche richten sich hierbei nach dem sich anschließenden Aufbereitungs- oder Behandlungsverfahren. Dabei werden mit verschiedenen chemischen, physikalischen, mikrobiologischen oder Kombinationsverfahren die Schadstoffe aus dem Wasser entfernt. Hierbei sind das Strippen und die Adsorption die am häufigsten eingesetzten Verfahren.
-

## Chemisch-physikalische Verfahren

- Wirkprinzip dieser Verfahren ist die Aufhebung der Bindungskräfte zwischen Matrix und Kontamination mit anschließendem Abtransport der Schadstoffe von der Oberfläche mit Hilfe eines Transportmediums und
- das Abscheiden der Schadstoffe aus dem Transportmedium unter Zufuhr von Energie und / oder Hilfsstoffen.
- Es gibt sehr viele Ausführungsvarianten, die sich im wesentlichen in der Form des Energieeintrags, der Trennstufen, der Wahl des Prozeßfluids und in der nachträglichen Aufbereitung unterscheiden.

Auf Grundlage der vorgenommenen Aussagen und der Gl. (1) sind folgende Wirkmechanismen für die hier betrachteten Sicherungs- und in situ Dekontaminationsverfahren ableitbar. In Tabelle 1 wurden gekennzeichnet mit:

- wirksame Prozesse
- unwirksame Prozesse

Tabelle 1: wirksame Teilprozesse der allgemeinen Migrationsgleichung (Gleichung 1) bei Sicherungsverfahren und in situ Dekontaminationsverfahren

Sicherungsverfahren	TP	SP	AP	IR	Q/S
<i>Immobilisierung</i>					
Durch <u>Verfestigung</u> z.B. Vitrifikation, Vermörtelung, Verdichtung	●	○	○	○	○
Durch <u>chemische Reaktionen</u> pH-Wert-Verschiebung, Komplexierung	●	○	○	●	○
<i>Hydraulische Maßnahmen</i>					
Passiv	●	●	●	●	○

Tabelle 1 (Forts.): wirksame Teilprozesse der allgemeinen Migrationsgleichung (1) bei Sicherungsverfahren und in situ Dekontaminationsverfahren

<i>Einkapseln</i>					
Durch vertikale Abdichtung Spundwand- und Schlitzwandverfahren	●	○	○	○	○

Dekontaminationsverfahren	TP	SP	AP	IR	Q/S
<b>Boden</b>					
<i>Chemisch-physikalische Verfahren - Desorptionsverfahren</i>					
Bodenluftabsaugung	●	●	●	○	●
<i>Chemisch-physikalische Verfahren - Elektrokinetik</i>					
Elektrokinetische Separation	●	●	●	●	●

Dekontaminations- verfahren Grundwasser	TP	SP	AP	IR	Q/S
<i>Hydraulische Maßnahmen</i>					
Aktiv	●	○	○	●	●
<i>Chemisch-physikalische Verfahren - Desorptionsverfahren</i>					
Luftinjektion (Strippen, Airsparging)	●	●	●	○	●

Dekontaminations- verfahren Boden und Grundwasser	TP	SP	AP	IR	Q/S
<i>Chemisch-physikalische Verfahren - Extraktion / Dispersion</i>					
Extraktion (anorg. bzw. organ. Lösungsmittel)	●	●	●	●	●
Tensidwäsche (Dispergierung)	●	●	●	●	●
<i>Biologische Verfahren</i>					
Mikrobiologischer Abbau durch Bakterien (Boden und Grundwasser)	●	○	●	●	●

## 4 Einteilung der laborativen Vorversuche

### 4.1. Grundlagen

Ausgehend vom verfahrenstechnischen Grundprinzip der Extraktion<sup>1</sup> oder Elution (bei Wasser als Extraktionsmittel) werden im Rahmen der laborativen Untersuchungen insbesondere Extraktions- bzw. Elutionsversuche durchgeführt. Anlage 1 gibt eine Übersicht über verschiedene **Elutionsverfahren**. Aus diesem Verfahren resultieren zwei prinzipielle Verfahrensweisen. Während bei der **statischen** Extraktion die Extraktionsflüssigkeit nur einmalig zugegeben und über den gesamten Versuchszeitraum nicht ausgetauscht wird, wird bei einer **dynamischen** Arbeitsweise nach definierten Zeiträumen (kontinuierlich oder stufenweise) das Fluid ausgetauscht. Auf der Grundlage der verwendeten Verfahrenstechnik und des Versuchsmaßstabs ergibt sich ein weiterer grundlegender Unterschied in Schüttel- und Standversuche (sog. Batchtests) oder Säulenversuche. Zur Einteilung dieser Versuche soll im Materialienband auf der Grundlage des in Abbildung 3 dargestellten Schemas im folgenden von **Batchtests und Säulenversuchen** gesprochen werden. Bei Untersuchungen, bei denen biologische Abbauprozesse im Vordergrund stehen, wird zusätzlich zwischen **offenen und geschlossenen Systemen** unterschieden. Die erwähnten laborativen Vorversuche sind außerdem in ihrem Zusammenhang mit dem jeweiligen Versuchsmaßstab zu sehen (Anlage 2).

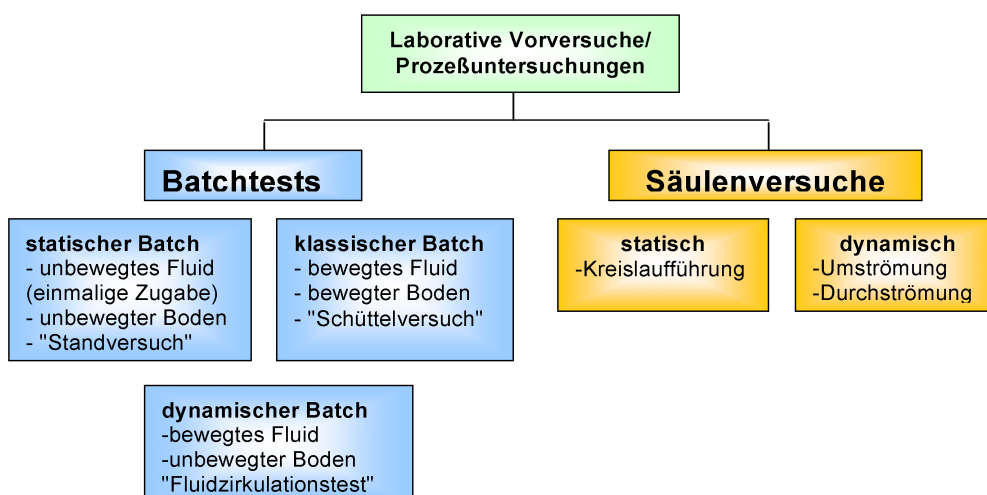


Abbildung 3: Einteilung laborativer Vorversuche in Batchtests und Säulenversuche

<sup>1</sup> Def.: Extraktion = Herauslösen fester oder flüssiger Stoffe durch geeignete Lösungsmittel



## 4.2. Batch-Tests

Die im allgemeinen als Batch-Tests<sup>2</sup> bezeichneten Laboruntersuchungen sollen neben der punktbezogenen repräsentativen Untersuchung von Transport- und Speicherprozessen sowie interner Reaktionen und externer Senken/Quellen auch den demonstrativen Nachweis von Szenarien (z.B. Szenarien der Grundwasserbewegung und des daran gekoppelten Schadstofftransportes) sowie die Überprüfung, ob die zu untersuchenden Prozeßkennwerte dem geforderten Gleichgewichtszustand zwischen den Phasen des Mehrphasensystems entsprechen, ermöglichen. Die hierfür verwendeten Batchtests werden in Tabelle 2 zusammengefaßt. Batchtests lassen sich danach prinzipiell unterscheiden in:

- klassische Batchtests,
- statische Batchtests und
- dynamische Batchtests.

Bei der Bewertung des Schadstofftransportes in der fluidungesättigten Bodenzone (z.B. bei der Bodenluftabsaugung) ist die Ermittlung der Kapillardruck-Fluidsättigungs-Verteilungsfunktion (auch als pF-Kurve bezeichnet) eine wesentliche Grundlage.

### Klassische Batchtests

**Merkmal:** bewegte fluide Phase und bewegte Feststoffphase

**Prinzipielle Zielsetzung:**

Sie besteht darin, eine Einschätzung der prinzipiellen Eluierbarkeit bzw. mikrobiologischen Abbaubarkeit oder der Stoffumwandlung von an Böden bzw. Substraten gespeicherten Inhaltsstoffen zu ermöglichen.

**Versuchsbedingungen für bestimmte Sanierungsverfahren:**

Für die Anwendung von klassischen Batch-Tests bei in-situ Dekontaminationsverfahren sowie für in situ-Immobilisierungsverfahren wird die Einstellung der Untergrundtemperatur sowie die Verwendung von Wasser aus dem Untersuchungsgebiet empfohlen.

---

<sup>2</sup> batch: schub-, stoßweises Zugeben bzw. abgeschlossener Reaktorraum

**Typische Laborverfahren (einzelne Beschreibungen siehe auch Anlage 1):**

- DIN 38414 S4 und dessen Modifikationen
- DIN V 19730
- pH STAT Nordrhein-Westfalen
- TCLP<sup>3</sup> (US-EPA) Methode 1311
- TCLP (US-EPA) Methode 1312
- Maximale Auslaugbarkeit (Verfügbarkeitstest - NEN 7341)
- Kaskadentest (NEN 7343)
- AFNOR X31-210
- Suspensionsreaktor [2]
- Bodenreaktor [2]
- Triaxial-Versuch (in Anlehnung an DIN 18 130, Teil 1,  $k_F$ -Wert-Bestimmung)
- dynamische Schaufelmischer-Reaktoren[15]

**Statische Batchtests**

**Merkmal:** nicht bewegte fluide Phase und nicht bewegte Feststoffphase

**Prinzipielle Zielsetzung**

Ist die Bewegung der fluiden Phasen uninteressant oder ist die Durchlässigkeit hydraulisch nicht mehr wirksam wird die prinzipielle Eluierbarkeit untersucht, die durch Stoffdiffusion hervorgerufen werden kann. Es kann auch ein genereller Stoffumsatz beschrieben werden.

**Versuchsbedingungen für bestimmte Sanierungsverfahren:**

Statische Batchtests werden in [6] insbesondere für die Untersuchung von elektrochemischen in-situ Sanierungsverfahren empfohlen. Da die Entwicklung solcher Verfahren weitestgehend noch Gegenstand der Forschung sind, soll hier nicht näher darauf eingegangen werden.

Für die Anwendung auf Immobilisierungsverfahren ist ein Mehrfachtausch des Prozeßwassers sowie eine pH-Wert-Einstellung empfehlenswert.

Für in-situ Dekontaminationsverfahren, insbesondere für aktive hydraulische Verfahren sind diese Art von Vorversuchen weniger geeignet.

Für Untersuchungen im Rahmen von biologischen on-site Dekontaminationsverfahren ist das Verhältnis von Wasser zu Feststoff zu beachten.

---

<sup>3</sup> TCLP Toxicity Characteristic Leaching Procedure

**Typische Laborverfahren:**

- Schweizer Eluattest
- Trogtest
- Diffusionstest (z.B. NEN 7345)
- Standgefäßtests, Weckglastest [2]
- Statische Festbettreaktoren[15]

**Dynamische Batchtests**

**Merkmal:** im Kreislauf bewegte fluide Phase und nicht bewegte Feststoffphase

**Prinzipielle Zielsetzung:**

Untersuchungen von Transport- und Speicherprozessen sowie internen Reaktionen (biologischen und chemischen Transformationen), die im wesentlichen den natürlichen Untergrundbedingungen entsprechen.

**Versuchsbedingungen für bestimmte Sanierungsverfahren:**

Die Anwendungsbreite von dynamischen Batchtests ist hinsichtlich der einstellbaren Versuchsbedingungen für in-situ Sanierungsverfahren wesentlich größer.

Bei mikrobiologischen Verfahren, aktiven hydraulischen Verfahren sowie chemisch-physikalischen Verfahren werden folgende Versuchsbedingungen empfohlen:

- geschlossene Kreislaufführung,
- Einstellung der Untergrundtemperatur,
- Verwendung von Wasser aus dem Untersuchungsgebiet,
- Einstellung der Milieubedingungen des Untergrundes (z.B. hydrostatischer Druck und Gaspartialdrücke).

**Typische Laborverfahren:**

- dynamische Festbettreaktoren (Bioreaktortests)[15]
- REV- Fluidperkolationstest [6]
- REV- Fluidzirkulationstest [6]
- Umlaufsäulenapparatur [3]
- Kreislaufelution [3]
- Perkolator/ Lysimeter [2]

Tabelle 2: Übersicht über Batchtests

Vorversuch	Schema (Prinzipskizze)	Merkmale
<b>KLASSISCHER BATCH-TEST</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ bewegte Feststoffphase</li> <li>✓ bewegte fluide Phase</li> </ul>
<b>BIOREAKTORTEST/ FESTBETTREAKTORTEST</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ bewegte bzw. stark aufgelockerte Feststoffphase</li> <li>✓ bewegte fluide Phase</li> </ul>
<b>STATISCHER BATCH-TEST</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ nicht bewegte Feststoffphase</li> <li>✓ nicht bewegte fluide Phase</li> </ul>
<b>DYNAMISCHER BATCH-TEST</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ nicht bewegte Feststoffphase</li> <li>✓ mittels Perkolation o. Pumpe bewegte fluide Phase</li> </ul>

REV - repräsentatives Elementarvolumen (entspricht einer Bodenkernprobe)

V - Volumen (der Flüssigkeit)

$c_0$  - Ausgangskonzentration

$c_{i+1} \equiv c_t$  - nächste Konzentrationsstufe

n - Porosität

### 4.3. Säulenversuche

Säulenversuche ermöglichen die Erweiterung des Untersuchungsspektrums der Batchtests, da sie von der punktbezogenen, zeitunabhängigen Betrachtung zur örtlich eindimensionalen, zeitabhängigen Betrachtung überleiten. Sie ermöglichen:

- die Ermittlung **transportabhängiger Prozeßgrößen** (z.B. der hydrodynamischen Dispersion, der mit mobilen Fluid gefüllten Porosität - hydraulisch wirksame Porosität),
- die Ermittlung von Prozeßkennwerten von Austauschprozessen und internen Reaktionen (Geschwindigkeitskonstanten z.B. der Austauschkinetik 1.Ordnung),
- eine demonstrative Nachweisführung von Sanierungsverfahren anhand naturnaher Prozeßbedingungen und Fließwege,
- die Verifizierung und Validierung eindimensionaler Simulationsmodelle

Nach der in Tabelle 3 gegebenen Beispielsübersicht lassen sich Säulenversuche unterscheiden in:

- Klassische Säulenversuche
- Klassische Säulenversuche mit seitlicher Probennahme
- Diskretisierte Säulenversuche

#### Klassische Säulenversuche

**Merkmal:** bewegte fluide Phase und nicht bewegte Feststoffphase,

**Prinzipielle Zielsetzung:**

Untersuchungen von Transport-, Speicher- und Austauschprozessen sowie internen Reaktionen (biologische und chemischen Transformationen) unter der Bedingung eines homogenen bzw. in der Säule adäquat geschichteten Untergrundes).

**Versuchsbedingungen für bestimmte Sanierungsverfahren:**

Für die Anwendung bei mikrobiologischen Verfahren, chemisch-physikalischen in situ-Verfahren, aktive und passiven hydraulischen Verfahren sowie elektrokinetische Verfahren werden folgende Versuchsbedingungen favorisiert:

- Einstellung der Untergrundtemperatur und sonstigen Milieubedingungen des Untergrundes (z.B. Gehalt gelöster Gase, pH-Wert, hydrostatischer Druck)
  - Einstellung der natürlichen bzw. künstlich zu erzeugenden Fließgeschwindigkeiten,
  - Verwendung von Wasser aus dem Untersuchungsgebiet
-

**Typische Laborverfahren:**

- Niederländische Testverfahren Säulentest (NEN 7343)[9],[10]
- Überstaute Bodensäulenversuche [2]
- Perkolations säule [3]
- Laborlysimeter [3]

**Klassische Säulenversuche mit seitlicher Probennahme**

**Merkmal:** bewegte fluide Phase und nicht bewegte Feststoffphase, vertikal differenzierte Entnahmemöglichkeit von Fluidproben<sup>4</sup>.

**Prinzipielle Zielsetzung:**

Es gilt die gleiche Zielsetzung wie bei klassischen Säulenversuchen.

**Versuchsbedingungen für bestimmte Sanierungsverfahren:**

Prinzipiell gelten die gleichen möglichen Versuchsbedingungen wie bei klassischen Säulenversuchen. Die seitliche Entnahme von Fluidproben ist interessant, wenn z.B. Umsetzungsprozesse entlang eines Fließweges beobachtet und untersucht werden sollen.

**Typische Laborverfahren:** Bodensäulenversuche mit Luft als Fluid ([2]; statische Verfahren), u.a.

**Diskretisierte Säulenversuche**

**Merkmal:** bewegte fluide Phase und nicht bewegte Feststoffphase, vertikal differenzierte Entnahmemöglichkeit von Fluidproben nach jeder Teilsäule.

**Prinzipielle Zielsetzung:**

Untersuchungen von Transport-, Speicher- und Austauschprozessen sowie internen Reaktionen unter Beachtung der Heterogenität des Untergrundes (beim Einbau verschiedener repräsentativer Schichten in verschiedene Säulen)

**Versuchsbedingungen für bestimmte Sanierungsverfahren:**

Prinzipiell gelten die gleichen notwendigen Versuchsbedingungen wie bei allen Säulenversuchen. Da sie insbesondere für alle in situ Dekontaminationsverfahren in Frage kommen, ist die Realisierung verschiedener "repräsentativer" Formationen in jeder Teilsäule mit differenzierter Probennahme für Fälle mit heterogener Schichtung und alle solche

---

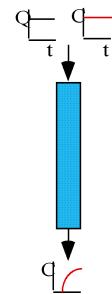
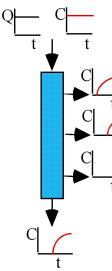
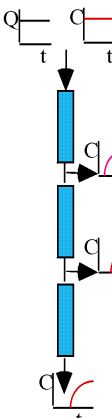
<sup>4</sup> nur repräsentative Untersuchungsergebnisse, wenn der seitlich entnommene Volumenstrom < 10% des Gesamtvolumenstromes beträgt[6]

(insbesondere in situ) Sanierungsverfahren interessant, die diese bei der Sanierung zu berücksichtigen haben.

**Typische Laborverfahren:** Diskretisierte Säulenanlage [6] u.a.

In Tab. 3 werden o.g. Beispiele von Säulenversuchen zur Sanierungsuntersuchung und zur Planung von Sanierungsmaßnahmen dargestellt.

Tabelle 3: Beispiele von Säulenversuchen nach einer Unterteilung aus [6]

Vorversuch	Schema (Prinzipskizze)	Merkmale
<p><b>KLASSISCHER SÄULEN-VERSUCH</b></p> <p>Einsäulensystem mit einem Entnahmeport für die Wasserproben</p>		<p>Entnahme von Wasserproben am Auslauf der Säule</p>
<p>Einsäulensystem mit mehreren, entlang des Strömungsweges seitlich angebrachten Entnahmeports für Wasserproben</p>		<p>Vertikal differenzierte Entnahmemöglichkeit von Wasserproben</p>
<p><b>DISKRETISIERTER SÄULEN-VERSUCH [6]</b></p> <p>Mehrsäulensystem mit je einem Entnahmeport für die Wasserproben</p>		<p>Vertikal differenzierte Entnahmemöglichkeit von Wasserproben, ohne Veränderung der Filtergeschwindigkeit entlang des Gesamtströmungsweges</p> <p>Möglichkeit einer hydraulisch gesteuerten "Verlängerung" des Fließweges</p>

Q- Durchfluß [ml/min], c- Konzentration [mg/l], t- Zeit [h]

## 5 Recherche nach Anwendung von Vorversuchen

Im Rahmen der Studie [6] wurde eine Recherche bei 107 im Freistaat Sachsen ansässigen Firmen sowie 30 nationalen Forschungseinrichtungen zur Anwendung von Vorversuchen im Rahmen von Sanierungsuntersuchungen (in der Sanierungspraxis) bzw. bei der Entwicklung von Sanierungsverfahren durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 bzw. 5 dokumentiert. Eine Bewertung der Aussagekraft laborativer Vorversuche in Abhängigkeit der Kontamination und des Sanierungsverfahrens wurde hinsichtlich folgender Kriterien vorgenommen:

- Nutzbarkeit für grundlegende Untersuchungen
- Nutzbarkeit für die Auswahl des Sanierungsverfahrens
- Nutzbarkeit für die Prognose der Sanierungsdauer
- Nutzbarkeit für die Prognose der Sanierungskosten
- Nutzbarkeit für die Prognose der Entstehung von Reststoffen

Die ausgewählten Kriterien wurden mit folgendem Bewertungsmaßstab versehen:

- sehr gut nutzbar,
  - mit Einschränkungen nutzbar,
  - nicht nutzbar.
-



**Tabelle 4 : In der Sanierungspraxis durchgeführte laborative Vorversuche und deren Bewertung**

Sanierungsverfahren	Kontamination	Laborversuch											
		Batchtest						Säulenversuch					
		Nutzbarkeit hinsichtlich						Nutzbarkeit hinsichtlich					
		Grundlagenuntersuchungen	Verfahrensauswahl	Prognose Sanierungsziele	Prognose Sanierungsdauer	Prognose Sanierungskosten	Entstehung von Reststoffen	Grundlagenuntersuchungen	Verfahrensauswahl	Prognose Sanierungsziele	Prognose Sanierungsdauer	Prognose Sanierungskosten	Entstehung von Reststoffen
Immobilisierung - chem. Reaktionen	SM	■	■	■	⊘	▲	■						
Immobilisierung - Verfestigung	PAK, MKW, SM	■	■	■	⊘	▲	■						
Tensidwäsche	KW, Phenole, PAK, BTEX							▲	▲	▲	▲	▲	▲
Mikrobiologischer Abbau (Bakterien) in situ	MKW	■	■	⊘	⊘	⊘	⊘	■	■	▲	▲	▲	▲
Mikrobiologischer Abbau (Bakterien) ex situ	KW, Phenole, PAK	▲	▲	▲	▲	▲	▲	■	■	■	▲	▲	■

Legende: ■ sehr gut nutzbar. ▲ mit Einschränkungen nutzbar. ⊘ nicht nutzbar

**Tabelle 5: Im Bereich der Forschung durchgeführte laborative Vorversuche und deren Bewertung**

Sanierungsverfahren	Kontamination	Laborversuch											
		Batchtest					Säulenversuch						
		Nutzbarkeit hinsichtlich					Nutzbarkeit hinsichtlich						
		Grundlagenuntersuchungen	Verfahrensauswahl	Prognose Sanierungsziele	Prognose Sanierungsdauer	Prognose Sanierungskosten	Entstehung von Reststoffen	Grundlagenuntersuchungen	Verfahrensauswahl	Prognose Sanierungsziele	Prognose Sanierungsdauer	Prognose Sanierungskosten	Entstehung von Reststoffen
Immobilisierung - chem. Reaktionen in situ	Cyanide, Arsen Chrom	■	▲	▲	⊘	⊘	▲	■	■	▲	▲	▲	▲
Immobilisierung - chem. Reaktionen in situ	Uran, Arsen							■	■	■	▲	▲	▲
Immobilisierung - chem. Reaktionen in situ	TOC ???	■	▲	⊘	⊘	⊘	▲	▲	▲	■	▲	▲	▲
Hydraulisch – passiv in situ	BTEX, AOX, PCB LHKW, PAK, chlor. Benzole	■	■	⊘	⊘	⊘	▲	■	■	▲	▲	▲	▲

Legende: ■ sehr gut nutzbar. ▲ mit Einschränkungen nutzbar. ⊘ nicht nutzbar

**Tabelle 5 (Forts.): Im Bereich der Forschung durchgeführte laborative Vorversuche und deren Bewertung**

Sanierungsverfahren	Kontamination	Laborversuch											
		Batchtest					Säulenversuch						
		Nutzbarkeit hinsichtlich					Nutzbarkeit hinsichtlich						
		Grundlagenuntersuchung	Verfahrensauswahl	Prognose Sanierungsziele	Prognose Sanierungsdauer	Prognose Sanierungskosten	Entstehung von Reststoffen	Grundlagenuntersuchung	Verfahrensauswahl	Prognose Sanierungsziele	Prognose Sanierungsdauer	Prognose Sanierungskosten	Entstehung von Reststoffen
chem.-phys.Verf.- Extraktion mittels Mikroemulsionen in situ	PCB/ PCT, PAK							■	■	■	▲	▲	▲
Tensidwäsche - in situ	PAK, KW, BTEX, Phenole	■	■	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
chem.-physikal. Verfahren- Laugung in situ, on site und off site	Blei, Cadmium,Zink Nickel,Kupfer, Chrom	■	■	■	⊘	⊘	■	■	■	▲	▲	▲	▲
Mikrob. Abbau (Bakterien) in situ	Nitrat, TOC	■	■	⊘	⊘	⊘	■	■	■	▲	▲	▲	▲
Mikrobiologischer Abbau (Bakterien) in situ	Nitrat, PAK, Phenole	■	■	▲	⊘	⊘	■	■	■	■	▲	▲	■

Legende: ■ sehr gut nutzbar. ▲ mit Einschränkungen nutzbar. ⊘ nicht nutzbar

Hinsichtlich des zur Durchführung laborativer Vorversuche bei Sanierungsuntersuchungen und Sanierungen erforderlichen Finanzmittel- und Bearbeitungszeitaufwandes kann auf Grund praktischer Erfahrungen von folgenden Rahmengrößen ausgegangen werden:

Finanzmittelbedarf: ca. 2% bis 4% der Gesamtsanierungskosten

Bearbeitungszeit: • Batchversuche: ca. 2 bis 3 Monate

• Säulenversuche ca. 6 bis 9 Monate

---

## 6 Hinweise zu weiterführender Literatur und Regelwerken

Im folgenden sollen einige Hinweise zu weiterführenden Regelwerken und sonstigen Literaturquellen zu laborativen Vorversuchen gegeben werden. Sie sind im Literaturverzeichnis aufgeführt.

### **DVWK**

In Heft 116 "Sanierung kontaminierter Böden" der DVWK Schriftenreihe [4] ist ein Ablaufplan enthalten, der vor der Verfahrensauswahl und Sanierungsplanung ergänzende verfahrens- und schutzorientierte Versuche im Labormaßstab vorschreibt. Die Untergliederung von Vorversuchen erfolgt in 4 Versuchsebenen.

### **DECHEMA**

Das Heft zum 9. Dechema-Fachgespräch Umweltschutz "Mikrobiologische Reinigung von Böden" [7] enthält einen Ablaufplan zur Sanierungsplanung, der erstmals den Bodenkörper in seinen geohydraulischen Eigenschaften berücksichtigt. Er enthält Labormethoden und eine Zuordnung der Vorversuche zu Sanierungsverfahren.

### **ITVA**

In der Arbeitshilfe Sanierungsuntersuchung des Ingenieurtechnischen Verbandes Altlasten [8] wird im Rahmen der zu erstellenden Machbarkeitsstudie auf die Sinnfälligkeit von Vorversuchen im Labor- und halbtechnischen Maßstab hingewiesen und einige Möglichkeiten genannt.

### **Chemie und Biologie der Altlasten [3]**

Es wird eine umfangreiche Übersicht zu Elutionsverfahren gegeben, die folgendermaßen gegliedert ist:

- Einteilung,
  - charakteristische Merkmale,
  - Übersicht: DIN 38414 – S4, pH-stat, Zirkulationsversuch und weitere,
  - Ablaufschemen von Elutionsversuchen,
  - experimenteller Aufwand.
-

**Hessische Landesanstalt für Umweltschutz : Laboranalytik bei Altlasten**

Eine Beschreibung der dort vorgestellten Elutionsversuche ist der Anlage 1 zu entnehmen

**Materialien Altlasten und Grundwasserschadensfälle der LfU Baden-Württemberg**

Handbuch "Elutionsverfahren zur Beurteilung von Grundwasserbelastungen durch Altlasten und Schadensfälle"[9]:

- Elutionsverfahren für anorgan. Schadstoffe / Validierung + organ. Stoffe,
- Weiterentwicklung Elutionsverfahren,
- Säulenversuche.

Zur Entwicklung von Elutionsverfahren, die die in situ auftretenden Sickerwasserbelastungen möglichst realitätsnah abbilden sollen, wurden verschiedene Institutionen von der LfU beauftragt. Hintergrund der Fragestellung ist die baden-württembergische Verwaltungsvorschrift "Orientierungswerte für die Bearbeitung von Altlasten und Schadensfällen" vom 16.09.1993, nach der für die Abschätzung von Grundwasserbelastungen durch kontaminierte Böden und Abfall u.a. Eluatuntersuchungen herangezogen werden sollen. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag in der Methodenentwicklung für die Elution organischer Schadstoffe, da dafür bisher keine erprobten Methoden vorlagen.

**"Immobilisierung von Schadstoffen in Altablagerungen" [10]**

Es wird ein Mindestumfang an Eignungstests zur Qualitätskontrolle (mechanische Eigenschaften, Eluatwerte) gefordert, die am verfestigten Produkt zu prüfen sind. Nützlich ist eine kurze Zusammenstellung der unterschiedlichsten Elutionsverfahren, die in Deutschland, den Niederlanden, Österreich und der Schweiz z.T. als Normenverfahren existieren, einschließlich einer Einschätzung ihrer Eignung. Diese Untersuchungen sind am verfestigten Produkt im Vergleich mit dem Ausgangsmaterial vorzunehmen, dienen also auch zur Einschätzung des Sanierungserfolges.

---

Handbuch "Bodenwäsche" [11]

Zunächst werden Vorversuche im Rahmen der Erkundung ("korngrößenfraktionsdifferenzierte chemische Analytik") von "Waschversuchen" unterschieden, die im Labor- oder Technikumsmaßstab i.d.R. von den Anbietern selbst durchgeführt werden. Bestehen am Ende der Sanierungsvorplanung noch Unsicherheiten, z.B. hinsichtlich der Reinigungsleistung eines Bodenwaschverfahrens, können vor der Sanierungsentscheidung noch spezielle Voruntersuchungen oder Technikumsversuche erforderlich sein. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass den Autoren dieses Handbuches die Notwendigkeit von Voruntersuchungen, nicht nur im Labor- sondern auch im Technikumsmaßstab ab einer bestimmten Bearbeitungsphase vollkommen selbstverständlich ist.

"Handbuch für die Einkapselung von Altablagerungen"[12]

Genannt werden hier verschiedene Eignungsprüfungen, die allerdings ebenfalls auf den Nachweis qualitätsgerechter Ausführung der Sanierung gerichtet sind.

"Handbuch Mikrobiologische Bodenreinigung" [13]:

Die Notwendigkeit von Voruntersuchungen wird von den Autoren für selbstverständlich erachtet, eine kurze Beschreibung und schematische Übersicht von Versuchen wird geliefert.

Am Beispiel einer Verfahrensentwicklung zur biologischen Sanierung eines CKW-kontaminierten Standortes wird deutlich, wie notwendig neben einer eingehenden Erkundung des Standortes Laborversuche zur Verfahrensauswahl und -optimierung sind. Beispielhaft ist, dass hier alle Kompartimente (Luft, Wasser, Boden) in die Betrachtung einbezogen werden und neben den LCKW auch BTEX-Aromaten bei der on site-Behandlung eliminiert werden sollen.

---

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Luckner, L. & Schestakow, W.M.: Migration Processes in the Soil and Groundwater Zone Lewis Publishers, Inc. 1991 (ISBN O-87371-302-8)
  - [2] Labormethoden zur Beurteilung der biologischen Bodensanierung; 2. Teilbericht des interdisziplinären Arbeitskreises „Umweltbiotechnologie - Boden“; DECHEMA, 1992
  - [3] Chemie und Biologie der Altlasten, Hrsg. Fachgruppe Wasserchemie in der GdCh, 1997
  - [4] Autorenkollektiv: Sanierung kontaminierter Böden DVWK-Schriften, Heft 116, 1997
  - [5] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): Bestimmung der Eluierbarkeit von festen und schlammigen Abfällen mit Wasser LAGA-Richtlinie EW/77, 1977
  - [6] Nitsche, C.; Neumann V.; Guderitz, I.: Studie zur Nutzung von laborativen Vorversuchen bei Sanierungsuntersuchungen, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 1998
  - [7] DECHEMA: 9. Dechema-Fachgespräch Umweltschutz "Mikrobiologische Reinigung von Böden" vom 27./28.2.91 in Frankfurt am Main
  - [8] ITVA: Arbeitshilfe Sanierungsuntersuchung, Berlin 1997
  - [9] Elutionsverfahren zur Beurteilung von Grundwasserbelastungen durch Altlasten und Schadensfälle, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
  - [10] Handbuch Immobilisierung von Schadstoffen in Altablagerungen, Hrsg. LfU Baden-Württemberg, Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 15, November 1994, 171 Seiten
  - [11] Handbuch Bodenwäsche, Hrsg. LfU Baden-Württemberg, Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 11, März 1993, 270 Seiten
  - [12] Handbuch für die Einkapselung von Altablagerungen, Hrsg. LfU Baden-Württemberg, Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 4, November 1990, 238 Seiten
  - [13] Handbuch Mikrobiologische Bodenreinigung, Hrsg. LfU Baden-Württemberg, Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 7, April 1991, 233 Seiten
  - [14] Hessische Landesanstalt für Umwelt: "Laboranalytik bei Altlasten", 1996
  - [15] Hupe, Koning, Lüth, Heerenklage, Stegmann: "Einsatz von Testsystemen zur bilanzierenden Untersuchung der biologischen Schadstoffumsetzung im Boden" in: altlasten spektrum 6/98, S.360-366
-



## 8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: wirksame Teilprozesse der allgemeinen Migrationsgleichung (1) bei Sicherungsverfahren und in situ Dekontaminationsverfahren .....	14
Tabelle 2: Übersicht über Batchtests .....	20
Tabelle 3: Beispiele von Säulenversuchen .....	25
Tabelle 4 : In der Sanierungspraxis durchgeführte laborative Vorversuche und deren Bewertung .....	27
Tabelle 5:Im Bereich der Forschung durchgeführte laborative Vorversuche und deren Bewertung .....	28

---

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einordnung von Vorversuchen in das Strukturbild der Sächsischen Altlastenmethodik .....	6
Abbildung 2: Untergliederung von Dekontaminationsmaßnahmen in Abhängigkeit vom Wirkungsort.....	10
Abbildung 3: Strukturierung laborativer Vorversuche .....	17

## **10 Anlagenverzeichnis**

Anlage 1: Beschreibung der Elutionsverfahren aus [14]

Anlage 2: Ablaufplan zur Einordnung laborativer Vorversuche im Rahmen der  
Sanierungsuntersuchung und Sanierung

**Anlage 1:** Beschreibung der Elutionsverfahren aus [14]

Einflußgrößen Testmethode	Anwendungsbereich	Probenvorbereitung	Art des Testes Bewegung	Elutionsmittel	Feststoff: Flüssigkeit s- Verhältnis	pH-Wert	Zahl der Extraktion	Zeit	Filtration
DIN 38414 Teil 4 DEV S4	feste, pastöse, schlammige Materialien	Originalstruktur Grobzerkleinerung	Schütteltest bzw. Überkopftest	dest. Wasser ggf. auch andere Elutionsmittel als Wasser	1 : 10 bez. auf Trocken- gewicht	unkontrolliert	1 oder mehrere	24 h	0,45 µm Membranfilter oder Druckfiltration
Modifikation nach TA Abfall, Teil 1, Anhang B	Sonderabfall	Originalstruktur	in Weithals flaschen 1U/min über Kopf	wie bei DEV S4	1 : 10	unkontrolliert	1	24 h	über Filterspritze 0,45 µm
Modifikation nach VwV „Straßen- aufbruch“ vom 15.11.1991	Straßen- aufbruch, Bau- schutt zur Ver- wendung im Straßenbau	Kornfraktion 0,063 - 2 mm + 2 - 10 mm	Schütteltest wie DEV S4	dest. Wasser	1 : 10	unkontrolliert	1	24 h, 20 °C	0,45 µm Mem- branfilter für anorg. Param. Zentrifugation für organ. Param.
DIN V 19730	Boden	< 2 mm nach Trocknung	Schütteltest 20 U/min. über Kopf	1 mol/l Ammonium- nitratlösung	1 : 2,5	unkontrolliert	1	2 h	Filtration über säurege- waschene Filter zur Boden- untersuchung
pH <sub>stat</sub> Nordrhein- Westfalen	Abfälle, bela- stete Böden (anorgan. Stoffe)		Schütteltest	dest. Wasser	1 : 10	pH 4 pH 11	1	24 h	Druckfiltration über 0,8 µm Cellulosenitrat- Membranfilter O 50 mm
Schweizer Eluattest	Reststoffe Inertstoffe	Originalstruktur zylindrische Körper	Standtest, Um- spülung der Probe durch Begasung	deionis. Wasser, kontinuierliche Begasung mit CO <sub>2</sub>	1 : 10 bez. auf Proben- gewicht	pH 4 - 4,5	2	48 h, Wechsel nach 24 h	0,45 µm Membranfilter

**Anlage 1(Fortsetz.):** Beschreibung der Elutionsverfahren aus [14]

Einflußgrößen Testmethode	Anwendungsbereich	Probenvorbereitung	Art des Testes Bewegung	Elutionsmittel	Feststoff: Flüssigkeit s- Verhältnis	pH-Wert	Zahl der Extraktion	Zeit	Filtration
TCLP (US-EPA) Method 1311	Abfälle flüssig, fest, mehrphasig) anorg. u. org. Stoffe	Zerkleinerung < 9,5 mm	30 U/min über Kopf	Essigsäure pH=4,93 Essigsäure pH=2,88	1 : 20	gemessen am Ende der Extraktion	1	18 h 20 °C	0,6 - 0,8 µm Glasfaserfilter
Methode 1312	Kontaminierte Böden zur Überprüfung der Ergebnisse von Boden- sanierungen	Zerkleinerung < 9,5 mm	30 U/min über Kopf	wäßrige Lösung aus Salpeter- und Schwefelsäure pH 4,2 - 5	1 : 20		1	18 h	0,45 µm Membranfilter oder Druckfiltration
Niederländische Testverfahren Säulentest (NEN 7343)	Verbrennungs- rückstände Abfälle	< 3 mm	Säulentest	deionis. Wasser mit Salpeter- säure angesäuert	0,1; 0,5; 1; 2; 3,3,10	pH = 4	7 Fraktionen		0,45 µm Membranfilter
Kaskadentest (NEN 7343)	Verbrennungs- rückstände Abfälle	< 3 mm	Schütteltest Mehrfach- extraktion	deionis. Wasser mit Salpeter- säure angesäuert	1 : 20	pH = 4	5 Eluate	23 h	0,45 µm Membranfilter
Maximale Auslaugbarkeit (NEN 7341)	Verbrennungs- rückstände Abfälle	< 125 µm	Rühren	deionis. Wasser	1 : 100	pH = 4/7	2	2 x 3 h	0,45 µm Membranfilter
Diffusionstest (NEN 7345)	Verbrennungs- rückstände Abfälle	mind. 40 mm	Standtest	deionis. Wasser mit Salpeter- säure angesäuert	1 : 10	pH = 4	8 Eluate	0,5; 1; 2; 4; 8; 16; 32; 64 Tage	Filtration

**Anlage 1(Fortsetz.):** Beschreibung der Elutionsverfahren aus [14]

Einflußgrößen Testmethode	Anwendungsbereich	Probenvorbereitung	Art des Testes Bewegung	Elutionsmittel	Feststoff: Flüssigkeits-Verhältnis	pH-Wert	Zahl der Extraktion	Zeit	Filtration
AFNOR X31 - 210	Feststoffe	< 4 mm	Schütteltest 60 rpm	demin. Wasser	1 : 10	nicht kontrolliert	3	24 h, 20 °C	0,45 µm Membranfilter
Vornorm CEN TC 292	Feststoffe, Abfälle	90 % < 4 mm < 10 mm	Falltrommel-mischer Kollergang	deion. Wasser	1 : 2 1 : 10	nicht kontrolliert	1 bzw. 2	24 h, 20 °C	0,45 µm Membranfilter
LAGA EA 94 Entwurf *	Anfälle, Reststoffe, verunreinigte Böden, Altlasten	verschiedene Korngrößen je nach Verfahren	Schütteltests Trogtest	unterschiedlich je nach Test *	unterschiedlich je nach Test *	unterschiedlich je nach Test *	unterschiedlich je nach Test *	unterschiedlich je nach Test *	je nach Test *

\* In diesem Entwurf werden verschiedene Elutionsverfahren für unterschiedliche Anwendungsbereiche beschrieben.

---

**Anlage 2: Ablaufplan zur Einordnung laborativer Vorversuche in  
verschiedene Versuchsmaßstäbe**

---

