

Technischer Leitfaden

**PHYTOEXTRAKTION zur SANIERUNG von  
SCHWERMETALLBELASTETEN  
BÖDEN**

erstellt im Forschungsprojekt  
INTERLAND

April 2006

Technischer Leitfaden

# PHYTOEXTRAKTION zur SANIERUNG von SCHWERMETALLBELASTETEN BÖDEN

Autoren: Unterbrunner Reinhard, Wieshammer Gerlinde, Puschenreiter Markus und Wenzel Walter W.



Departement für Wald- und Bodenwissenschaften, Institut für Bodenforschung,  
Arbeitsgruppe Rhizosphärenökologie und Biogeochemie, Universität für  
Bodenkultur Wien, 1190 Wien, Österreich

Gefördert aus Mitteln des  
Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft  
Förderungsmanagement by Kommunalkredit Public Consulting GmbH



[lebensministerium.at](http://lebensministerium.at)



## Vorwort

Der hier vorliegende Leitfaden wurde neben weiteren Leitfäden im Zuge des Projektes INTERLAND (INnovative TEchnologies for Remediation of LANDfills and Contaminated Soils; <http://interland.arcs.ac.at>) erstellt. Ziel dieses Projektes war es, in situ Methoden für die Sanierung von Altlasten und kontaminierten Standorten weiterzuentwickeln und die wissenschaftlichen Grundlagen zu erarbeiten, die eine fundierte Anwendung der Methoden in der Praxis ermöglichen. Die nach derzeitigem Kenntnisstand mögliche praktische Anwendung der Ergebnisse des Forschungsprojektes wird in den vorliegenden Leitfäden dargestellt. Damit soll ein Beitrag zur Etablierung der Methoden als „Stand der Technik“ geleistet werden. Die Leitfäden richten sich daher vor allem als Entscheidungshilfe an Amtssachverständige und Planer, ob eine bestimmte Methode für einen aktuellen Sanierungsfall prinzipiell geeignet ist und inwieweit sie dem Stand der Technik entspricht. Diese Information wird vor allem in den Kapiteln „Einsatzbereiche und Einsatzrandbedingungen (ERB)“ sowie „Vorversuche“ gegeben. Darüber hinaus gibt der Leitfaden Informationen zu den Qualitätsanforderungen an die jeweilige Methode in den Kapiteln „Qualitätssicherung des Verfahrens“ und „Monitoring“. Schlussendlich werden als Entscheidungshilfe Informationen zur „Erreichbaren Restkontamination“, zu den „Kosten“ und zu „Nutzung/Nachnutzung“ gegeben.

Der Inhalt gibt ausschließlich die fachliche Meinung der Autoren wieder. Eine allgemeine technische oder rechtliche Gültigkeit oder ein diesbezüglicher Meinungsstand des Förderungsgebers kann daraus nicht abgeleitet werden.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>IN SITU VERFAHREN ZUR SANIERUNG UND SICHERUNG VON SCHWERMETALLKONTAMINATIONEN .....</b>	<b>6</b>
1.1	Wirkungsweise von in situ Verfahren .....	6
1.2	Anforderung an das Schadensbild- Anorganische Schadstoffe.....	6
1.3	Sanierungs und Sicherungsziele .....	6
<b>2</b>	<b>EINSATZBEREICHE VON IN SITU VERFAHREN .....</b>	<b>7</b>
2.1	Verfahren PHYTOEXTRAKTION- Einsatzrandbedingungen ERB.....	7
2.1.1	<i>Kontaminationsprofil .....</i>	<i>7</i>
2.1.2	<i>Geomorphologisch – klimatische ERB.....</i>	<i>7</i>
2.1.3	<i>Bodenchemische ERB.....</i>	<i>8</i>
2.1.4	<i>Bodenphysikalische ERB.....</i>	<i>8</i>
2.1.5	<i>ERB aus Vorversuch .....</i>	<i>9</i>
<b>3</b>	<b>GRUNDLAGEN- LEGISTISCH / TECHNISCH / NATURWISSENSCHAFTLICH.....</b>	<b>12</b>
3.1	Bestehende Rahmengesetzgebungen und Normen .....	12
3.2	Stand der Technik .....	14
3.3	Stand der Wissenschaft.....	14
3.3.1	<i>Phytoextraktion von anorganischen Schadstoffen .....</i>	<i>14</i>
<b>4</b>	<b>BESTANDSAUFNAHME DER ALTLAST .....</b>	<b>15</b>
4.1	Allgemeine Standortparameter der Altlast.....	15
4.1.1	<i>Grundcharakterisierung des Substrates .....</i>	<i>16</i>
4.2	Schadensbild .....	
4.2.1	<i>Charakterisierung des Kontaminationsprofiles .....</i>	<i>16</i>
4.3	Risikoabschätzung- Ökotoxizität .....	16
4.3.1	<i>Transferpfad Boden- Wasser (- Tier- Mensch) .....</i>	<i>16</i>
4.3.2	<i>Transferpfad Boden- Pflanze (- Tier- Mensch).....</i>	<i>17</i>
4.3.3	<i>Transferpfad Boden- Mensch .....</i>	<i>17</i>
<b>5</b>	<b>VORVERSUCHE.....</b>	<b>17</b>
5.1	Ziele der Vorversuche zum Verfahren Phytoextraktion.....	17
5.2	Versuchsbeschreibung .....	17
5.3	Versuchsparameter .....	17
5.4	Sanierungs- und Sicherungsmittel.....	18
5.5	Qualitätssicherung.....	18
5.6	Auswertung und Interpretation .....	19
5.7	Versuchsdauer.....	19
5.8	Kosten.....	19
<b>6</b>	<b>IN SITU VERFAHREN PHYTOEXTRAKTION .....</b>	<b>19</b>
6.1	Verfahrensbeschreibung .....	19
6.2	Qualitätssicherung des Verfahrens .....	20
6.3	Monitoring .....	20
6.3.1	<i>Dokumentation des Sanierungsverlaufes .....</i>	<i>20</i>

6.3.2	<i>Dokumentation des Sanierungserfolges</i> .....	20
6.4	Entsorgung von Sanierungsmitteln.....	23
6.5	Sanierungsdauer .....	23
6.6	Erreichbare Restkontamination .....	23
6.7	Kosten.....	23
<b>7</b>	<b>NUTZUNG UND/ ODER NACHNUTZUNG</b> .....	<b>24</b>
7.1	Nutzungseinschränkungen .....	24
7.2	Nutzungspotentiale während der Sanierung und Sicherung.....	24

# **1 IN SITU VERFAHREN ZUR SANIERUNG UND SICHERUNG VON SCHWERMETALLKONTAMINATIONEN**

## **1.1 Wirkungsweise von in situ Verfahren**

In situ Verfahren stellen alternative Sicherungs- und Sanierungsalternativen dar, sofern diese für ein gegebenes Schadensbild anwendbar sind und von der Altlast keine unmittelbaren Gefahren für die menschliche Gesundheit sowie für die Umwelt ausgehen („Gefahr in Verzug“). Im Gegensatz zu ex situ und off site Verfahren verbleibt das kontaminierte Material vor Ort in seiner natürlichen Lagerung. Auskoffnung und Transport des kontaminierten Bodens entfallen gleichfalls wie der Bau von Anlagen zur Behandlung des kontaminierten Materials.

Pflanzengestützte in situ Verfahren wie die Phytoextraktion erhalten bzw. verbessern die natürliche Bodenfruchtbarkeit sowie die natürliche Dichtelagerung des Bodens. Sanierungsmittel im Falle der Phytoextraktion sind höhere terrestrische Pflanzen sowie deren assoziierte Mikroorganismenflora. Schadstoffe werden bei Phytoextraktionsverfahren (siehe Kapitel 6) dem Schutzgut Boden entzogen. Neben dem Entzug von Schadstoffen führt Pflanzenbewuchs zu Sickerwasserminimierung und damit zu einer Reduktion des Schadstoffauswaschungsrisikos aufgrund der Evapotranspirationsleistung der Pflanzen. Zusätzlich erfolgt durch die Vegetationsdecke eine mechanische Stabilisierung des kontaminierten Bodens, die Wind- und Wassererosion vermindert (Teildisziplin Phytostabilisierung).

Die bei in situ Verfahren grundsätzlich mögliche Weiterführung der gegenwärtigen Nutzung einer Altlast unterbleibt im Falle der Phytoextraktion aufgrund der dichten Bepflanzung der zu behandelnden Fläche.

## **1.2 Anforderung an das Schadensbild- Anorganische Schadstoffe**

Verfahren der Phytoextraktion sichern und sanieren mit Metallen und Metalloiden moderat kontaminierte Altlasten. Derzeit sind effiziente Phytoextraktionsverfahren für Cd, Zn sowie As verfügbar. Die Gehalte dieser Metalle und Metalloide im Boden liegen über dem jeweiligen Maßnahmenschwellenwert der ÖNORM S 2088-2, wobei die Kontamination homogen im Boden verteilt ist und bis in eine Tiefe von maximal 2 m reicht (Abb. 1). Es besteht keine unmittelbare Gefahr für die menschliche Gesundheit sowie die Umwelt.

Hohe labile/bioverfügbare Anteile an Metall-Gesamtgehalten bergen das Risiko des Eintritts von Schadstoffen in die Nahrungskette durch die landwirtschaftliche Primärproduktion und bedeuten infolgedessen eine Gefährdung der Ernährungssicherheit.

Die Konzentrationen der Nichtzielschadstoffe der Phytosanierung verbleiben unterhalb von Maßnahmenschwellenwerten der ÖNORM S 2088-2 bzw. unterschreiten die von der Behörde als zulässig angegebenen Restkonzentrationen und/oder die zulässigen labilen/bioverfügbaren Konzentrationen im Boden.

Der Altstandort ist kontaminiert, aber noch Pflanzenstandort für die eingesetzten Sanierungsmittel (Abb. 1; Kapitel 5.4). Die Sanierungsmittel zeigen im Vorversuch unter Optimierung des Nährstoffhaushaltes im Boden keine Anzeichen von Phytotoxizität, abgesehen von geringfügigen Biomasserduktionen im Vergleich zur Kontrolle von < 20%.

Die Teildisziplin Phytostabilisierung ermöglicht auch für Nicht-Zielschadstoffe eine Verringerung des Auswaschungsrisikos bzw. eine deutliche Reduktion der Winde- und Wassererosionsfrachten auf kontaminierten Standorten.

## **1.3 Sanierungsziel**

Sanierungsziel von Phytoextraktionsverfahren ist die Verringerung des Schadstoffgehaltes im Boden unter den Maßnahmenschwellenwert eines Schadstoffes gemäß ÖNORM S-2088-2 bzw. unter den von der Behörde im Einzelfall festgelegten Sanierungswert durch Schadstoff-Entzug aus dem Boden. Neben der Reduktion des

Gesamtgehaltes an anorganischen Schadstoffen im Boden erfolgt schwerpunktmäßig die nachhaltige Reduktion des labilen/bioverfügbaren anorganischen Schadstoffpools im Boden.

Zusätzliche positive Effekte von Verfahren der Phytoextraktion (Teilverfahren Phytostabilisierung) sind a) die Minimierung des Schadstoffmassentransportes durch Wind- und Wassererosion aufgrund der Bepflanzung sowie b) die Verringerung der Schadstoffverlagerung in die Tiefe durch Sickerwasserminimierung aufgrund der Transpirationsleistung der Sanierungsmittel (Pflanzen). Zu diesem Zweck ist im Zuge der Anlage der Phytoextraktionsflächen die Stabilisierung des Erdreiches durch die Errichtung einer geschlossenen Pflanzendecke erforderlich. Die Bedeutung der Phytostabilisierung steigt mit der Inklination der Altlast sowie mit deren Gefährdung durch Wind- und Wassererosion.

## 2 EINSATZBEREICHE VON IN SITU VERFAHREN

### 2.1 Verfahren PHYTOEXTRAKTION- Einsatzrandbedingungen ERB

#### 2.1.1 Kontaminationsprofil

Ein Altstandort weist schädliche Bodenverunreinigungen durch anorganische (Cd, Zn und As) und/oder organische Schadstoffe (MKW) auf, welche bis zu einer Tiefe von 2 m homogen im Boden verteilt sind (Tab. 1 und Tab. 2). Anorganische Schadstoffe weisen einen hohen Anteil an labilen/bioverfügbaren Gehalten im Boden auf (Tab. 1) und gleichen nach ersten Entzügen diesen labilen/bioverfügbaren Pool durch Nachlieferung wieder aus. Ein hoher labiler/bioverfügbarer Schadstoffpool zusammen mit hohen Nachlieferungsraten aus stärker fixierten Pools ermöglichen hohe Gesamtentzugsraten durch das Teilverfahren Phytoextraktion. Phytoextraktion von anorganischen Schadstoffen wird solange fortgesetzt, bis die jeweiligen Maßnahmenschwellenwerte gemäß ÖNORM S 2088-2 unterschritten werden bzw. bis zum Erreichen einer von der Behörde festgelegten zulässigen labilen und/oder totalen Restkontamination.

Tabelle 1 Maximalgehalte anorganischer Schadstoffe im Boden für das Verfahren Phytoextraktion. Labile/Bioverfügbare Konzentrationen als 1 M  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (Cd und Zn) sowie 0,05 M  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (As) extrahierbare Fraktion. Die angegebenen Konzentrationen orientieren sich an erfolgreich durchgeführten Forschungsvorhaben. Unter den angegebenen Schadstoffkonzentrationen im Boden ist ein Erfolg des Verfahrens zu erwarten. Der Einsatz von Phytoextraktion auf höher kontaminierten Standorten ist unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Vorversuchen (Kapitel 4. Vorversuche) grundsätzlich möglich.

Schadstoff	Sanierungsmittel (Pflanzen)	Max. Konzentration (Total in $\text{mg kg}^{-1}$ TS)	Max. Konzentration (Labil in $\text{mg kg}^{-1}$ TS)
Cd	Weiden und Pappeln	30	1
Zn	Weiden und Pappeln	5.000	50
As	Farne	5.000	10

#### 2.1.2 Geomorphologisch – klimatische ERB

Methoden der Phytoextraktion sind grundsätzlich an die Vegetationsperiode gebunden. Mit längeren Vegetationsperioden erhöht sich die Sicherungs- und Sanierungsleistung.

Pappeln und Weiden dienen als Vertreter von Pioniergehölzen der sogenannten „weichen Au“ der Standortfixierung auf Schotter und Sandbänken sowie der Förderung der Verlandung entlang von Fließgewässern. Dementsprechend sind ihre Standortanforderungen bezüglich Bodentextur, Humusgehalt und Nährstoffhaushalt sehr gering. Weiden und Pappeln sind grundsätzlich licht- und wasserliebend bzw. resistent gegen periodische Überflutungen, während sich Schwarzpappeln auch durch das Tolerieren von kurzen Trockenphasen auszeichnen.

Manche Weiden (*Salix caprea*) sind vom Tiefland bis in die hochmontane und im Extremfall subalpine Stufe einzusetzen. Die Inklination einer Altlast ist kein einschränkendes Standortkriterium.

Farne sind raschwüchsig und stellen ebenfalls keine besonderen Ansprüche an das Substrat. Farne gelten als Waldbodenaufbereiter und sind universell einsetzbar. As-hyperakkumulierende Farne sind im Freilandmaßstab unter mitteleuropäischen Klimabedingungen noch nicht getestet worden und vorerst als nicht winterhart einzustufen, was gegebenenfalls eine jährliche Neupflanzung bedingt.

Standorteinschränkungen bezüglich geomorphologisch-klimatischer Randbedingungen sind im Wesentlichen bei zu großer Trockenheit (Niederschlag < 500 mm m<sup>-2</sup> Jahr<sup>-1</sup>) zu sehen.

In niederschlagsärmeren Gebieten Ostösterreichs ist eine Bewässerung der Kultur daher unerlässlich.

Standortoptimum für die Phytoextraktion ist ein lockerer, tiefgründiger, ausgeglichen bis feuchter, neutraler bis schwach saurer Boden im humiden Klimaraum.

### 2.1.3 Bodenchemische ERB

Neben Weiden und Pappeln stellen auch Farne als Sanierungspflanzen keine besonderen Standortansprüche an bodenchemische Parameter. Einschränkungen sind lediglich:

Hohe Salinität.....	Osmotischer Stress (bei elektri. Leitfähigkeit > 2 mS cm <sup>-1</sup> )
pH Extreme.....	Wurzelschädigung durch Al-Toxizität (pH < 4,2) sowie zu hohe Alkalinität (pH > 9)
Niedriges Redoxpotential.....	Anaerobie durch Wassersättigung oder Sauerstoffkonsumierung durch hohe biochemische Aktivität

Na- und Mg- Anteile am Austauscher (ÖNORM L-1086) unter 1 % bzw. kleiner 40% gewährleisten eine hohe Strukturstabilität des Bodens.

Das Verhältnis der Elemente C:N:P:K beträgt idealerweise 100:10:1:1. Speziell Akkumulatorpflanzen nehmen neben anorganischen Schadstoffen auch hohe Mengen an Nährstoffen auf. Der Bedarf an Makro- wie Mikronährstoffen ist daher im Vorfeld abzuschätzen und ggf. je nach Standort in Form von Düngegaben zu decken (Kapitel 4.1.1).

Neben der Menge ist auch die Verfügbarkeit von Makro- und Mikronährstoffen essentiell für die Etablierung der Kultur. Besonders bei der Verwendung von Weiden (speziell *Salix fragilis*) als Sanierungsmittel ist die Pflanze bezüglich Eisen (Fe) auf neutralen bis alkalischen Standorten häufig im Mangel. Blattchlorosen muß durch periodische Fe-Blattdüngungen begegnet werden.

Grundsätzlich sind Nährstoffimbancen der Sanierungsmittel im neutralen bis schwach alkalischen Bodenmilieu zu erwarten. Die Verfügbarkeit vieler Nähr- und anorg. Schadstoffe steigt mit sinkendem pH. Die höchste Extraktionseffizienz (Totalentzug Jahr<sup>-1</sup> Schadstoffkonzentration im Boden<sup>-1</sup>) von Phytoextraktionsverfahren anorganischer Schadstoffe (Phytoextraktion) ist auf schwach sauren Altlasten zu erwarten.

### 2.1.4 Bodenphysikalische ERB

- Wassergehalt im Boden:

Ein Wassergehalt zwischen 40-100% der maximalen Wasserhaltekapazität ist für Methoden der Phytoextraktion einzuhalten.

Ausreichend verfügbares Bodenwasser ist neben der Etablierung der Sanierungsmittel auch für den Sanierungsfortschritt erforderlich. Bodenchemische Prozesse wie Desorption anorganischer Schadstoffe sowie



Schadstoffdiffusion und -massentransport hin zur Pflanzenwurzel finden im Medium Bodenwasser statt. Wassermangel verlangsamt demzufolge die Extraktionsleistung der Sanierungsmittel.

- Textur und Struktur des Bodens:

Böden, die zu Dichtelagerung und Verschlämmung neigen, sind für Methoden der Phytoextraktion nur eingeschränkt geeignet. Einer ungünstigen Bodenstruktur kann vor der Bepflanzung im Zuge der Bodenaufbereitung durch Tiefenlockerung, Kalkung sowie der Applikation von organischen Zugschlagstoffen (Stallmistgaben, Kompost etc.) begegnet werden. Die Veränderung der Schadstoffverfügbarkeit (Labilität/Bioverfügbarkeit) aufgrund der Bodenmelioration ist anhand der in Kapitel 5 beschriebenen Vorversuche aufzuzeigen.

### 2.1.5 ERB aus Vorversuch

Die Vorversuche in Form von Gefäß- sowie Kleinparzellenversuchen im Freiland und Batch Versuchen im Labor dienen der

- Abschätzung der Phytotoxizität des Systems
- Auswahl des Sanierungsmittels
- Bestimmung der zu erwartenden Sanierungsraten (Entzug)
- Voraussage des Schadstoffverhaltens (Labilität/Bioverfügbarkeit sowie Nachlieferung)
- Abschätzung der Sanierungsdauer (im Vorfeld nur eingeschränkt möglich, im Zuge des Monitorings aufgrund des Schadstoffverhaltens anzupassen)

Tabelle 2: Zusammenfassung der Einsatzrandbedingungen ERB (aus Kapitel 2) für Phytoextraktionsverfahren

ERB Parameter	Einsatzrandbedingungen ERB	Kommentar
<b>Kontaminationsprofil</b>		
<b>Schadstoff</b> anorganisch	Cd, Zn, As	Schwermetalle und Metalloide
<b>Matrix der Kontamination</b>	Böden und Sedimente	Inklusive technologische Böden
<b>Schadstoff-Gesamtgehalt</b>	(in mg kg <sup>-1</sup> )	ÖNORM L 1085-89
Cd	< 30	
Zn	< 5.000	
As	< 5.000	
<b>Schadstoff-labil/bioverfügbar</b>		
Cd	< 1	1 M NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> Extrakt (ÖNORM L 1094-1)
Zn	< 50	1 M NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> Extrakt (ÖNORM L 1094-1)
As	< 10	0,05 M (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Extrakt
<b>Tiefe der Kontamination</b>	bis maximal 2 m	
<b>Verteilung der Kontamination</b>	Homogen im Profil	
<b>Geomorphologisch - klimatische ERB</b>		
<b>Inklination und Exposition</b>	in Praxis keine Einschränkung	
<b>Höhenstufe</b>	planar bis (hoch)montan	
<b>Niederschlag</b>	> 500 mm	Keine Einschränkung bei Bewässerung
<b>Bodenchemische ERB</b>		
<b>Salinität</b>	< 2 mS cm <sup>-1</sup>	Auswaschung der Salze
<b>pH</b>	4,5 < pH < 9,0	Aufkalkung / Zugaben von physiologisch sauer wirkenden Düngern
<b>Bodenphysikalische ERB</b>		
<b>Wassergehalt</b>	40-100% max. WHC	Bewässerung oder Drainage
<b>Bodenstruktur</b>	Dichtelagerung und Verschlammung	Meliorationsmaßnahmen vor Bepflanzung
<b>Skelettgehalt</b>	Keine Einschränkung	Geräteabnutzung bei Bodenaufbereitung vor Bepflanzung
<b>ERB aus Vorversuche</b>		
<b>Phytotoxizität</b> Biomassereduktion anorg. Schadstoffe	< 20 %	Im Vergleich zu Referenzboden
<b>Schadstoffverhalten im Boden</b> Geschätzte Sanierungsdauer gemäß Schadstoffverhalten sowie Entzugsraten	> 7 Jahre	Bei schwerpunktmäßiger Biomassennutzung längere Sanierungsdauer möglich

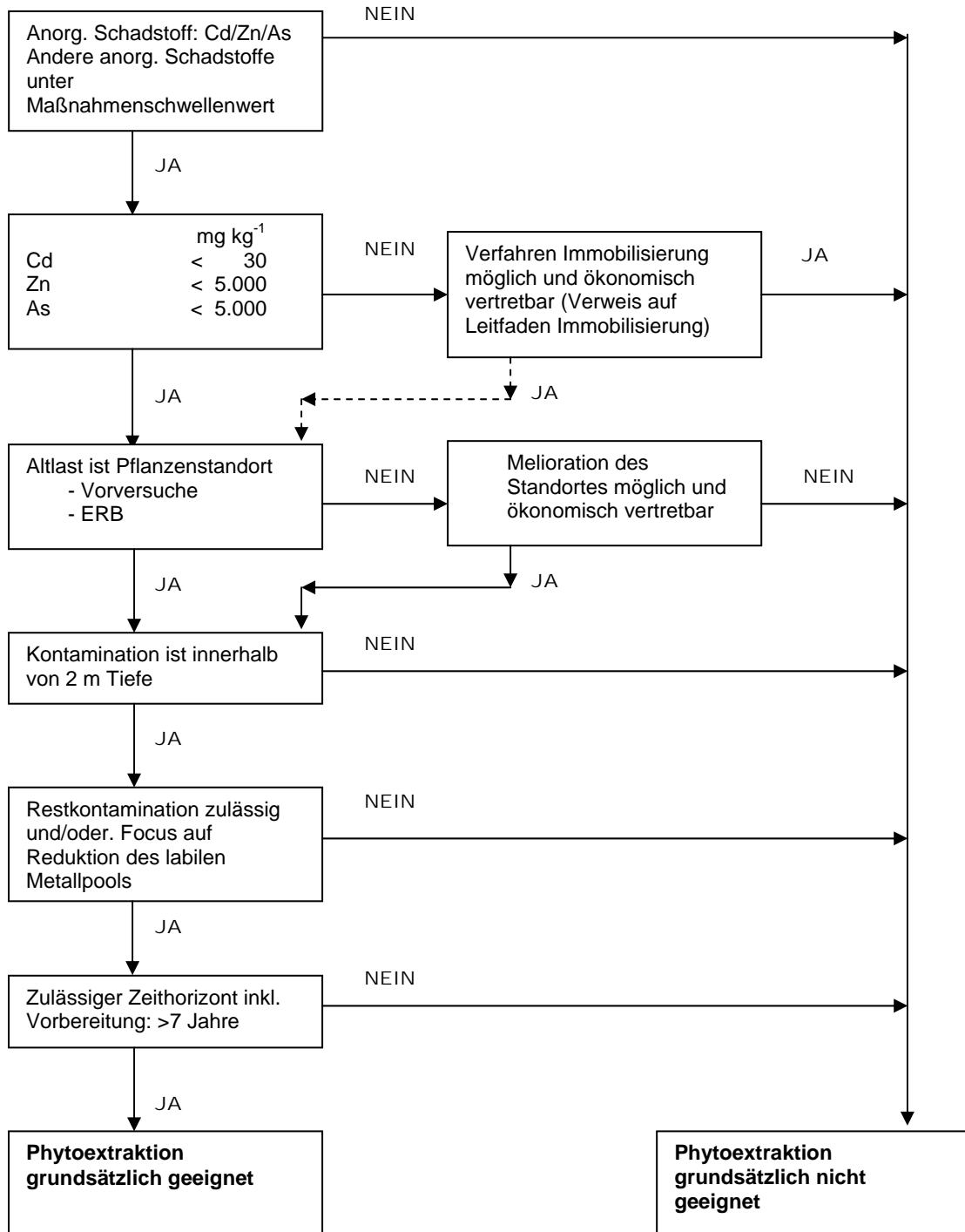


Abbildung 1: Einsatzentscheidungsbaum EEB. Schematisierte Entscheidungsgrundlage für Verfahren der Phytoextraktion.

### **3 GRUNDLAGEN-LEGISTISCH / TECHNISCH / NATURWISSENSCHAFTLICH**

#### **3.1 Bestehende Rahmengesetzgebungen und Normen**

Maßnahmen zum Schutz des Bodens (Gesetzgebung und Vollziehung) in Österreich fallen in Ermangelung eines Bundesbodenschutzgesetzes in die Zuständigkeit der Bundesländer. Boden auf Bundesebene wird somit als Querschnittsmaterie in folgenden Bundesgesetzen behandelt (Raschauer, 2002).

- Wasserrechtsgesetz (Boden als Grundwasserfilter)
- Forstgesetz (Waldböden)

Die Sanierung verunreinigter Böden fällt in den Kompetenzbereich des Bundes bei

- Verunreinigungen durch gefährliche Abfälle
- Waldböden
- Grundwassergefährdung

Zugrundeliegende Regelwerke im Falle der Sanierung verunreinigter Böden sind

- das Altlastensanierungsgesetz ALSAG
- das Wasserrechtsgesetz WRG
- sowie die bundes- und landesrechtlichen Instrumente des Abfallrechtes

Zu verwendende Regelwerke bezüglich der Risikoabschätzung des Eintritts in die Nahrungskette-Ernährungssicherheit:

- Verordnung (EG) Nr.466/2001 der Kommission vom 8. März 2001 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln
- Richtlinie 1999/29/EG des Rates vom 22. April 1999 über unerwünschte Stoffe und Erzeugnisse in der Tierernährung
- A. Prueß, 1994. Einstufung mobiler Spurenelemente in Böden. In: D. Rosenkranz, G. Einsele und M. Harres (Hrsg.): Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser; 15. Lieferung I/94, Erich Schmidt Verlag, Berlin.

Die Anwendung von in situ Verfahren kann derzeit nur auf Basis eines rechtlichen Gutachtens geklärt werden (Raschauer, 2002). Einleitende sowie prozeßbegleitende Untersuchungen (Monitoring) stützen sich auf eine Reihe von Normen und publizierten Verfahren nach Stand der Technik bzw. Stand der Wissenschaft:

ÖNORMEN:

- S 2088-2

Altlasten – Gefährdungsabschätzung für das Schutzgut Boden

- L 1075

Grundlagen für die Bewertung der Gehalte ausgewählter Elemente in Böden

- L 1083:

Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der Acidität (pH-Wert)

- L 1061  
Physikalische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der Korngrößenverteilung des Mineralbodens Teile 1-3
- L 1068  
Physikalische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der Dichte von Mineralböden
- L 1080  
Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung des organischen Kohlenstoffs durch trockene Verbrennung
- L 1082  
Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung von Stickstoff nach Kjeldahl
- L 1084  
Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung von Carbonat
- L 1085  
Chemische Bodenuntersuchungen - Säureextrakt zur Bestimmung von Nähr- und Schadelementen
- L 1086-1  
Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der austauschbaren Kationen und der effektiven Kationen-Austauschkapazität (KA<sub>Keff</sub>) durch Extraktion mit Bariumchlorid-Lösung
- L 1087  
Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung von "pflanzenverfügbarem" Phosphor und Kalium nach der Calcium-Acetat-Lactat (CAL)-Methode
- L 1088  
Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung von "pflanzenverfügbarem" Phosphor und Kalium nach der Doppel-Lactat-Methode (DL-Methode)
- L 1089  
Chemische Bodenuntersuchungen - EDTA-Extrakt zur Bestimmung von Schwermetallen
- L 1091  
Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung von mineralischem Stickstoff - N<sub>min</sub>-Methode
- L 1094-1  
Chemische Bodenuntersuchungen - Extraktion von Spurenelementen mit Ammoniumnitratlösung
- L 1095  
Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung des Gesamtstickstoffgehaltes durch trockene Verbrennung
  
- W.E.H. Blum H. Spiegel und W.W. Wenzel; 1996. Bodenzustandsinventur - Konzeption Durchführung und Bewertung. 2. Auflage. ARGE Bodenzustandsinventur der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft; BMLF (Hrsg.)
  
- W.E.H. Blum, A. Brandstetter, C. Riedler und W.W. Wenzel; 1995. Bodendauerbeobachtung Empfehlung für eine einheitliche Vorgehensweise in Österreich; Österreichische Bodenkundliche Gesellschaft und Umweltbundesamt.
  
- W.J. Fitz, W.W. Wenzel, H. Zhang, J. Nurmi, K. Stipek, Z. Fischerova, P. Schweiger, G. Köllensperger, L.Q. Ma, G. Stingeder; 2003. Rhizosphere Characteristics of the Arsenic Hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and Monitoring of Phytoremoval Efficiency. *Environmental Science and Technology*; 37, 5008-5014.

- Molina Millan, W.J. Fitz, R. Unterbrunner, W.W. Wenzel; 2006: Comparison of methods for measuring metal desorption from soils for parameterising rhizosphere models. *European Journal of Soil Science*, 57, 38-46.
- W. W. Wenzel, N. Kirchbaumer, T. Prohaska, G. Stingeder, E. Lombi und D. C. Adriano; 2001. Arsenic Fractionation in Soils Using an Improved Sequential Extraction Procedure. *Analytica Chimica Acta* 436, 309-323.
- W. W. Wenzel, A. Brandstetter, H. Wutte, E. Lombi, T. Prohaska, G. Stingeder und D. C. Adriano; 2002. Arsenic in Field-Collected Soil Solutions and Extracts of Contaminated Soils and its Implication to Soil Standards. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165, 221-228.

## 3.2 Stand der Technik

Die Idee der Verwendung von schwermetall-akkumulierenden Pflanzen (Hyperakkumulatoren) zur Sanierung von Böden reicht bis in die 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts zurück.

Seitdem hat sich speziell im angloamerikanischen Raum ein Markt für Verfahren der Phytoextraktion etabliert, der zunehmend auch in Europa Fuß fasst.

Aufgrund fehlender Anwendungen in Österreich abseits von Forschungsprojekten kann Phytoextraktion im Sinne des AWG noch nicht als ein Verfahren, das dem Stand der Technik entspricht, gewertet werden. Die Einsatzrandbedingungen in diesem Leitfaden wurden daher eng in Anlehnung an erfolgreich durchgeführte Forschungsvorhaben gewählt. Innerhalb dieser definierten Einsatzgrenzen ist ein Erfolg des Verfahrens zu erwarten.

## 3.3 Stand der Wissenschaft

### 3.3.1 Phytoextraktion von anorganischen Schadstoffen

Weltweit sind derzeit über 400 Hyperakkumulatoren – Pflanzen, die in hohem Maße Metalle oder Metalloide aufnehmen und im Sproß anreichern – bekannt. Neben Cd und Zn, As und Ni akkumulieren manche dieser Pflanzen noch B, Co, Mo, Se, V sowie Radionuklide wie  $^{90}\text{Sr}$  und  $^{137}\text{Cs}$  und U in ihrem Gewebe. Die geringe Biomasse der natürlich vorkommenden Hyperakkumulatoren ist für Sanierungsverfahren jedoch ein limitierender Faktor weswegen nach biomassereicheren Alternativen wie landwirtschaftliche Nutzpflanzen sowie Gehölzen gesucht wurde. Farne sowie Pioniergehölze wie Weiden und Pappeln gingen daraus als vielversprechendste Alternativen hervor. Selektierte Weiden erreichen Cd- und Zn- Konzentrationen in den Blättern von bis zu 400 mg  $\text{kg}^{-1}$  respektive 5.000 mg  $\text{kg}^{-1}$  TS. In Farnen konnten As- Konzentrationen in den Wedeln von bis zu 8.000 mg  $\text{kg}^{-1}$  TS gemessen werden. Die zu erwartende Blattbiomasse einer etablierten Kultur kann mit etwa 5.000 kg TS  $\text{ha}^{-1}$  beziffert werden, woraus sich mögliche Gesamtentzugsraten von bis zu 2 kg Cd, 25 kg Zn sowie 40 kg As je Hektar und Jahr ergeben.

Selbst auf moderat kontaminierten Böden konnten im Rahmen des Forschungsprojektes Interland Metallkonzentrationen von bis zu 250 mg Cd  $\text{kg}^{-1}$  TS in den Blättern gemessen werden. Nach drei Jahren ergaben sich durch Pflanzenentzug (Cd-Gehalte in Pflanze mal Pflanzenbiomasse) Reduktionen der Cd-Totalgehalte im Boden um bis zu 21% (Abb.1).

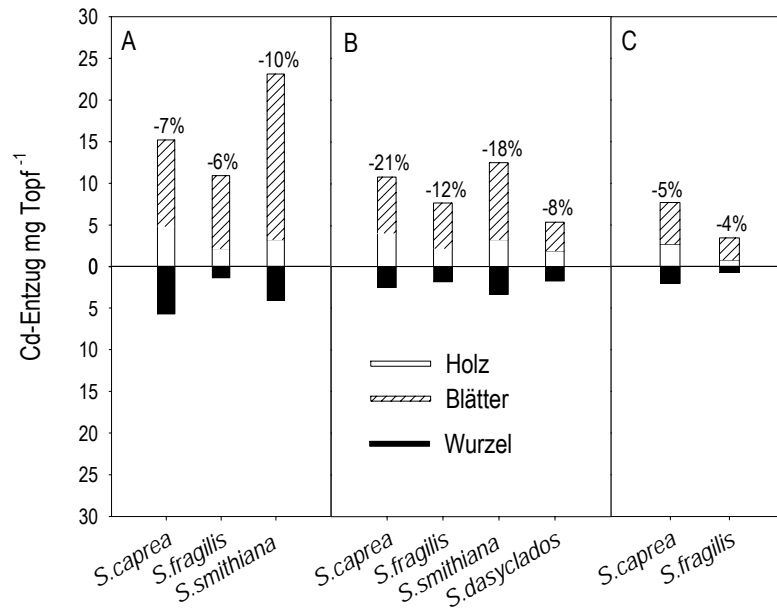


Abbildung 2: Cd- Gesamtentzug durch Akkumulation in den Sanierungsmitteln (Weiden) innerhalb von drei Vegetationsperioden (2003-2005) auf drei unterschiedlich kontaminierten Versuchsböden (Boden A: 13,4 mg Cd kg<sup>-1</sup>; Boden B: 4,75 mg Cd kg<sup>-1</sup>; Boden C: 4,03 mg Cd kg<sup>-1</sup>).aus dem Raum Arnoldstein im Großgefäßversuch. Werte über den Balken entsprechen den prozentualen Reduktionen des Cd-Totalgehaltes im Boden im Vergleich zur unbepflanzten Kontrolle.

#### 4 BESTANDSAUFNAHME DER ALTLAST

Die Bestandsaufnahme einer Altlast gliedert sich in 3 Untersuchungsschritte:

##### 1. Recherche der Kontaminationshistorie

- Emittent (Verursacher)
- Mögliche Schadstoffe
- Immissionsdauer
- Screening etwaiger Vorerhebungen

##### 2. Literaturrecherche zu folgenden Fachdisziplinen bezüglich des Standortes

- Geologie, Hydrogeologie und Bodenkunde
- Vegetationsökologie und Klimatologie

##### 3. Felduntersuchungen

- Aufnahme der Vegetation und Landnutzung (Land- und Forstwirtschaft, Bebauung)
- Feldbodenkundliche Ansprache
- Flächenbeprobung und Ermittlung allgemeine Standortparameter (Kapitel 4.1.)

#### 4.1 Allgemeine Standortparameter der Altlast

Die Ermittlung allgemeiner Standortparameter erfolgt gemäß Bodenzustandsinventur- Konzeption, Durchführung und Bewertung (Blum et. al.; 1996). Das Probenahmedesign erfolgt in Anlehnung an das

Bodendauerbeobachtungskonzept (Blum et al.; 1996) und erfolgt in der Grundbeprobung in 4 Tiefenstufen (0-20, 20-40, 40-70 und > 70 cm).

#### 4.1.1 Grundcharakterisierung des Substrates

Die Ermittlung allgemeiner Standortparameter erfolgt gemäß Bodenzustandsinventur- Konzeption, Durchführung und Bewertung (Blum et. al; 1996). Folgende Bodenparameter sind zu erheben:

- Textur (ÖNORM L 1061)
- Elektrische Leitfähigkeit und pH ( $\text{CaCl}_2$  und Wasser; ÖNORM L 1083-89)
- Lagerungsdichte (ÖNORM L 1068)
- Organischer Kohlenstoff (ÖNORM L 1080)
- Gesamtstickstoff (ÖNORM L 1082-89)
- Gesamtschwefel
- Karbonatgehalt (ÖNORM L 1084-89)
- Austauschbare Kationen (ÖNORM L 1086-89)
- Phosphor und Kalium im CAL/DL Extrakt (ÖNORM L 1087 / ÖNORM L 1088)
- Mineralischer Stickstoff (ÖNORM L 1091)
- Mineralische Nähr- und Schadelemente im Säureaufschluß (ÖNORM L 1085-89)
- Maximale Wasserhaltekapazität

#### 4.2 Schadensbild

Die Charakterisierung des Schadensbildes erfordert folgende Angaben:

- Art und Konzentration des/der Schadstoffe(s) im Boden
- Angaben zum Schadstoffverhalten im Boden
- Verteilung der Kontamination im Boden

#### 4.2.1 Charakterisierung des Kontaminationsprofiles

Folgende Parameter sind zu erheben:

- Elemente im EDTA Extrakt- austauschbarer Metallpool im Boden (ÖNORM L 1089-93)
- Elemente im 1 M  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  Extrakt- labiler Metallpool im Boden (ÖNORM L 1094-1)
- Desorptionsisothermen
- Metall Flüsse in Diffusive Gradient in Thin Films (DGT)

Die Beprobung erfolgt in 4 Tiefenstufen zusammen mit der Bestimmung der Grundcharakterisierung des Substrates. Die Proben werden bis auf die Bestimmung der Totalgehalte naturfeucht eingewogen unter Einhaltung möglichst kurzer Lagerzeiten (Kühlraum 4 ° C; < 2 Wochen).

#### 4.3 Risikoabschätzung- Ökotoxizität

##### 4.3.1 Transferpfad Boden- Wasser (- Tier- Mensch)

Die Risikoabschätzung des Eintritts von Schadstoffen in die Nahrungskette über das Boden- und Grundwasser erfolgt durch Angaben zum labilen Schadstoffpool im Boden (anorganische Schadstoffe; Prueß, 1994) sowie auf



der Grundlage der Messung von Schadstoffkonzentrationen im Eluat (anorganische/organische Schadstoffe; ÖNORM S 2088-1; Wenzel et. al.; 2002).

#### 4.3.2 Transferpfad Boden- Pflanze (- Tier- Mensch)

Die Risikoabschätzung des Eintritts von Schadstoffen in die Nahrungskette über die Pflanze erfolgt einerseits durch Angaben zum labilen Schadstoffpool im Boden (anorganische Schadstoffe; Prueß, 1994) sowie durch Gefäßversuche mit dem kontaminierten Boden, bepflanzt mit verschiedenen Sorten standortspezifischer landwirtschaftlicher Nutzpflanzen. Die Pflanzengehalte werden verglichen mit Werten aus folgenden Regelwerken:

- Verordnung (EG) Nr.466/2001 der Kommission vom 8. März 2001 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln
- Richtlinie 1999/29/EG des Rates vom 22. April 1999 über unerwünschte Stoffe und Erzeugnisse in der Tierernährung

#### 4.3.3 Transferpfad Boden- Mensch

Die Risikoabschätzung des Eintritts von Schadstoffen in die Nahrungskette über den Transferpfad Boden – Mensch erfolgt unter der Annahme der oralen Aufnahme von Bodenmaterial. Zugrundeliegende Orientierungswerte (ÖNORM S 2088-2) sind daher unter dem Gesichtspunkt der Nutzung des betroffenen Areals im Sinne der Lebensraumfunktion zu sehen.

## 5 VORVERSUCHE

### 5.1 Ziele der Vorversuche zum Verfahren Phytoextraktion

Vorversuche finden im Anschluß an die Bestandsaufnahme der Altlast/des Altlasten statt.

Vorversuche dienen der Entscheidungsfindung bezüglich der Anwendbarkeit von Verfahren der Phytoextraktion unter den jeweiligen Randbedingungen einer Altlast.

Zusätzlich erlauben Vorversuche die Abschätzung des zu erwartenden Sanierungsverlaufes sowie der Sanierungsdauer und der damit verbundenen Kosten.

### 5.2 Versuchsbeschreibung

Vorversuche sind überwiegend Gefäßversuche mit den Böden einer Altlast und bepflanzt mit den in Frage kommenden Sicherungs- und Sanierungsmitteln.

5-8 kg Boden werden in Gefäße verfüllt und mit einjährigen Sanierungsmitteln bepflanzt. Die Versuchsanordnung erfolgt im Glashaus unter kontrollierten und optimierten Bedingungen in 4-6 Wiederholungen. Unbepflanzte Gefäße sowie bepflanzte Gefäße mit unkontaminiertem Referenzbodenmaterial laufen als Kontrollen mit.

Zum Testen der Sanierungsmittel hinsichtlich ihrer Performance unter den herrschenden Randbedingungen im Freiland werden 3 Versuchsplots je Boden (8x8m) auf der Altlast errichtet.

### 5.3 Versuchsparameter

Parameter der Vorversuche sind:

- Sprossbiomassereduktion der Sanierungsmittel auf Altlast-Bodenmaterial im Vergleich mit einem unkontaminierten Referenzboden ähnlicher physiko-chemischer Eigenschaften
- Wurzelbiomassereduktion der Sanierungsmittel auf Altlast-Bodenmaterial im Vergleich mit einem unkontaminierten Referenzboden ähnlicher physiko-chemischer Eigenschaften

- Anorganische Schadstoffgehalte der Pflanzenteile (Blatt/Sproß, Zweige, Wurzel)
- Austauschbarer anorganischer Schadstoffgehalt im Boden
- Labiler anorganischer Schadstoffgehalt im Boden

Aus diesen Daten lassen sich geeignete Sanierungsmittel selektieren sowie für die Dauer des Vorversuches Schadstoffzugraten kalkulieren.

## 5.4 Sanierungs- und Sicherungsmittel

Neben Gehölzpflanzen wie Weiden und Pappeln sowie selektierten Farnen eignen sich auch natürliche Hyperakkumulatoren bedingt zur Sanierung von anorganischen Schadstoffen. Hyperakkumulatoren dienen dabei in erster Linie als Unterwuchs der Gehölzkultur, wobei je nach Standort jährlich eine erneute Ansaat vorzunehmen ist.

Tabelle 3: Eingesetzte Pflanzenspezies als Sicherungs- und Sanierungsmittel sowie korrespondierende Schadensbilder

Sicherungs- /Sanierungsmittel	Anorganische Kontamination
<b>Weiden</b>	
<i>Salix caprea</i>	Cd, Zn
<i>Salix fragilis</i>	Cd, Zn
<i>Salix smithiana</i>	Cd, Zn
<i>Salix dasyclados</i>	Cd, Zn
<b>Pappeln</b>	
<i>Populus tremula</i>	Cd, Zn
<b>Hyperakkumulatoren</b>	
<i>Arabidopsis hallerii</i>	Cd, Zn
<b>Farne</b>	
<i>Pteris cretica</i>	As
<i>Pteris vittata</i>	As

## 5.5 Qualitätssicherung

Zur Dokumentation der Vorversuche sowie zur Reproduzierbarkeit der Versuchsreihen sind neben den Analysenergebnissen auch die detaillierten Versuchsrandbedingungen anzugeben:

1. Angaben zur Werbung des Versuchsbodenmaterials
  - Ort und Datum
  - Art der Entnahme (Auskoffnung, Bohrungen)
  - Entnahmestellen (Beprobungsskizze)
  
2. Art und Dauer der Lagerung
  - Temperatur 4 ° C
  - Keine Trocknung
  - Lagerdauer < 2 Wochen
  - Verwendung von Lagerbehältnissen mit nicht-adsorbierenden Oberflächen

### 3. Versuchsbedingungen

- Aufzeichnungen von Wasser- und Nährstoffzugaben sowie Pflanzenschutzmaßnahmen
- Klimadaten (Parzellenversuche im Freiland)
- Anzahl der Versuchs- und Meßwiederholungen
- Analysenmethoden
- Kommentar über Besonderheiten des Versuchsverlaufes (Pflanzenkrankheiten,...)

## 5.6 Auswertung und Interpretation

Die Leistungen der im Vorversuch selektierten „best-performing“ Pflanzen hinsichtlich Schadstoffentzug werden mit den Schadstoff-Konzentrationen/-Konzentrationsänderungen im Boden verglichen.

Die Extraktionseffizienz steigt bis zum Erreichen der maximalen Durchwurzelungsintensität im kontaminierten Boden sowie der maximalen Blattbiomassebildung stetig an. Mit zunehmender Schadstoffextraktion und der damit verbundenen Verringerung des labilen/bioverfügbaren Pools sinkt die Extraktionseffizienz (Totalentzug  $\text{Jahr}^{-1}$  Schadstoffkonzentration im Boden $^{-1}$ ) zu Verfahrensende aufgrund der sich verringern den Schadstoffkonzentrationen der Blätter. Die Verringerung des bioverfügbaren Schadstoffpools unter einen Zielwert bedeutet jedoch gleichzeitig das Erreichen des Sanierungszieles wenn sich die behördliche Zielvorgabe auf die labile Restkontamination im Boden bezieht.

Eine Abschätzung der Sanierungsdauer kann in Ermangelung entsprechender Freilandversuche zur Abschätzung des Schadstoffverhaltens derzeit nur eingeschränkt erfolgen.

## 5.7 Versuchsdauer

Die Vorversuchsdauer inkl. Bestandsaufnahme der Altlast (siehe Kapitel 4.) sowie Datenauswertung und – Interpretation beträgt 6 Monate.

## 5.8 Kosten

Durch Vorversuche im Freiland- und Glashausexperimentansatz sowie zur Bestandsaufnahme einer Altlast (Größe unter 5 ha) sind nach eigenen Schätzungen aus dem Jahr 2005 Kosten von etwa 30.000 EURO zu veranschlagen wobei der Aufwand für Vorversuche unabhängig von der Größe der Altlast ist. Diese Kosten inkludieren auch Angaben zum Schadstoffverhalten (Mobilität und Bioverfügbarkeit) im Boden.

# 6 IN SITU VERFAHREN PHYTOEXTRAKTION

## 6.1 Verfahrensbeschreibung

Die Sicherung und Sanierung von Altlasten erfolgt bei Verfahren der Phytoextraktion durch den Einsatz von Pflanzen. Vor der Bepflanzung ist je nach Gelände und Bodenbeschaffenheit eine Pflanzbeetaufbereitung durchzuführen, um maximale Anwachsrate zu erzielen und Sanierungsmittelausfälle zu minimieren. Das Niederhalten von Licht- und Nährstoffkonkurrenz (= Pflanzen die nicht Sanierungsmittel sind) sowie ein auf den Standort abgestimmter Dünge- und Pflanzenschutzmitteleinsatz ermöglicht die für die Sicherung- und Sanierung erforderlichen maximalen Biomassezuwächse. Die kalkulierte Bepflanzungsdichte der Gehölze beträgt zu Beginn 0,5 Pflanze je  $\text{m}^2$ , jene von Farnen 1 Pflanze je  $\text{m}^2$ . Mit zunehmendem Alter der stockenden Biomasse der Gehölze kann eine Bestandsausdünnung erfolgen (Durchforstung).

Der ergänzende Einsatz von Hyperakkumulatoren erfolgt mit einer Saatedichte vergleichbar jener von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen (z.B. Raps) unmittelbar vor der Gehölzpflanzung. Folgeansaat von krautigen Hyperakkumulatoren können bei mangelnder Selbstverbreitung aufgrund der Bestandsdichte nur mehr im Nahbereich des Wegenetzes durchgeführt werden.

Die Bepflanzung erfolgt grundsätzlich in Reihen mit Reihenabständen von 2 m wobei alle 3 Reihen ein Abstand von 4,5m (davon 1,5 m für Bearbeitungsweg) einzuhalten ist. Der Pflanzabstand innerhalb einer Reihe beträgt 2 m. Je nach Geländebeschaffenheit und Zugang zum Areal sind Verbindungswege quer zu den Pflanzreihen einzuplanen.

Die Holzbiomasse der verwendeten Weiden und Pappeln ist lediglich gering belastet und kann sich je nach Standort und Pflanze zur Verwendung als Energieträger eignen. Das Gehölzschnittmanagement erfolgt je nach Gewichtung der Nutzung wobei eine häufige (z.B. jährliche) Schnittfolge die Blattbiomasse (und damit die Metallentzugsraten) maximiert, während längere Umtriebszeiten zu erhöhter Holzbiomasseentwicklung führen.

Die Sanierung von mit anorganischen Schadstoffen belasteten Standorten durch Phytoextraktion setzt die jährliche zeitgerechte Sammlung (Schutz vor Windverfrachtung und Eintritt in die Nahrungskette von Tieren) sowie fachgerechte Entsorgung der Blattbiomasse voraus.

## **6.2 Qualitätssicherung des Verfahrens**

Die Qualitätssicherung des Verfahrens liegt zum einen in der Etablierung und Stabilisierung der Sanierungsmittelkultur sowie in einer lückenlosen Dokumentation des Sanierungsverlaufes.

## **6.3 Monitoring**

### **6.3.1 Dokumentation des Sanierungsverlaufes**

Die Dokumentation des Sanierungsverlaufes erfolgt jährlich und beinhaltet im Falle der Phytoextraktion Biomassebestimmungen sowie Pflanzenanalysen der Sanierungsmittel und Bodenanalysen.

Erfasst werden die Gesamtgehalte anorganischer Schadstoffe im Boden sowie die Menge des labilen und austauschbaren, anorganischen Schadstoffpools im Boden. Folgende Parameter sind zu erheben:

- Elemente im EDTA Extrakt- Austauschbarer Metallpool im Boden (ÖNORM L 1089-93)
- Elemente im 1 M  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  Extrakt- Labiler Metallpool im Boden (ÖNORM L 1094-1)
- Metall Flüsse in Diffusive Gradient in Thin Films (DGT)

Die Beprobung erfolgt in Anlehnung an das Bodendauerbeobachtungskonzept und sieht die Intensivbeprobung kleiner, für die Altlast repräsentativer Flächen vor. Die Beprobung erfolgt über das gesamte, kontaminierte Solum.

Aus den Pflanzen- und Bodendaten sind flächenbezogen anzugeben:

- Kalkulierte Entzugsraten anorganischer Schadstoffe
- Kalkulierte Nachlieferung anorganischer Schadstoffe aus stärker fixierten Pools im Boden

### **6.3.2 Dokumentation des Sanierungserfolges**

Der Sanierungserfolg tritt ein, wenn 1) die Schadstoffkonzentration im Boden den jeweiligen Maßnahmenschwellenwert gemäß ÖNORM S 2088-2 unterschreitet bzw. 2) wenn die von der Behörde festgelegte, zulässige labile und/oder totale Restkontamination nachhaltig unterschritten wird.

Bezieht sich die von der Behörde angegebene, zulässige Restkonzentration auf den labilen Schadstoffgehalt im Boden, so ist die Nachhaltigkeit des Sanierungserfolges zu prüfen.

Die Bewertung der Nachhaltigkeit des Sanierungserfolges erfolgt mittels der Erfassung der Nachlieferung aus stärker fixierten Schadstoffpools.

Der Sanierungserfolg tritt in diesem Fall ein, wenn eine statistisch signifikante Nachlieferung aus stärker fixierten Pools in den labilen Schadstoffpool unterbleibt UND die von der Behörde festgelegte labile Restkontamination im Boden unterschritten wird.

### 6.3.2.4 Innovative Monitoringmethoden zur Dokumentation des Sanierungsverlaufes sowie des Sanierungserfolges in Ergänzung zu bestehenden Regelwerken (Kapitel 3.1)

Abseits der Gefährdung der menschlichen Gesundheit durch die orale Aufnahme der Emissionsquelle Boden ist die Bestimmung der Bioverfügbarkeit und Mobilität von anorganischen Schadstoffen im Boden eine zentrale Aufgabe von Monitoring Tools bei in situ Sicherungs- und Sanierungsverfahren.

Hierbei kommt der Abschätzung des gesamten bioverfügbaren Schadstoffpools eine entscheidende Bedeutung zu. Einmal-Extraktionen mit Neutralsalzen insbesondere bei engen Lösungs-Boden-Verhältnissen geben mitunter wenig Auskunft über die tatsächlich vorhandene, mobilisierbare Schadstoffmenge im Boden.

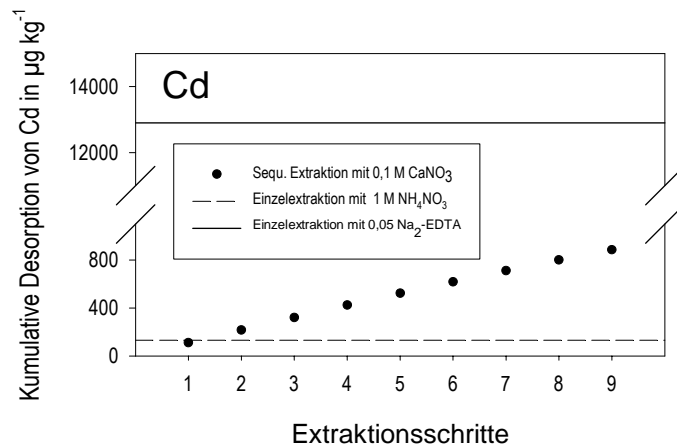


Abbildung 3: Minderbefund der Bestimmung des labilen Cadmiumpools eines anthropogen kontaminierten Bodens aus dem Raum Arnoldstein (Ktn.) durch Einmalextraktion mit einer 1 M  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  gemäß ÖNORM L 1094-1 (gestrichelte Linie). Sequentielle Extraktionen mit 0.1 M  $\text{CaNO}_3$  bewirken selbst nach neun Desorptionsschritten keine Abflachung der Kurve und weisen auf hohe Cd-Nachlieferungen aus stärker fixierten Phasen hin (0,05 M  $\text{Na}_2\text{-EDTA}$  Extraktion gemäß ÖNORM L 1091).

Ein gangbarer Weg sind sequentielle Extraktionen mit einer hochmolaren Neutralsalzlösung (z.B. 1 M  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) als Extraktionsmittel bei weiten Lösungs-Boden-Verhältnis.

Die Bodenproben werden hierbei in mindestens vier Wiederholungen eingewogen und anschließend mehrfach im Batchansatz extrahiert. Nach einer Dekantierung erfolgt erneut die Zugabe des Extraktionsmittelvolumens, wobei die Zugabemenge auch gravimetrisch bestimmt wird. Um das Boden-Bodenlösungsverhältnis (SSR) konstant zu halten, wird die Extraktionsmittelmenge, die im gesättigten Boden verbleibt, durch Differenzwägung mitberücksichtigt.

Die Anzahl der Extraktionsschritte richtet sich nach dem Schadstoff-Bindungsstärkenkontinuum im Boden und kann für kontaminierte Böden mit mindestens 10 angegeben werden. Schadstoffmessungen erfolgen in jedem der mindestens 10 Extrakte. In der Darstellung werden die Desorptionsschritte gegen die Schadstoffkonzentrationen in den Extrakten kumulativ aufgetragen.

Mittels Kurven-Fitting ist ein asymptotisches (=errechnetes) Maximum anzugeben, welches dem maximal austauschbaren und potentiell bioverfügbaren Pool im Boden entspricht. Die Anzahl der Desorptionsschritte ist zu wiederholen, bis eine Abflachung der Kurve erreicht bzw. ein Kurvenfitting zum Erhalt eines asymptotischen Maximums möglich ist.

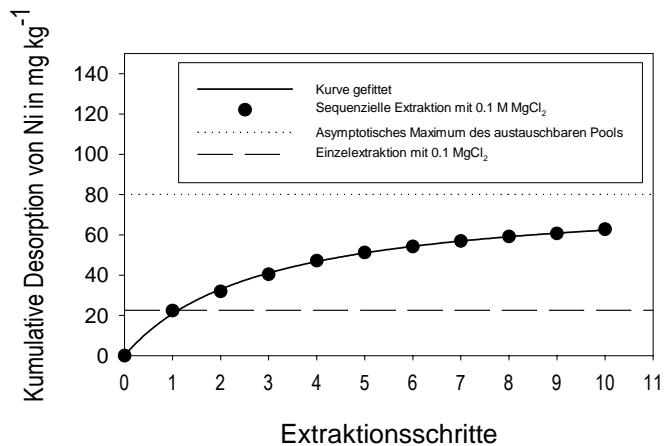


Abbildung 4: Ermittlung des gesamten austauschbaren Ni-Pool eines geogen Ni-kontaminierten Bodens (Serpentinitstandort) im Burgenland (Redlschlag; aus Molina et al.; 2006)

Neben standardisierten Extraktionen mit Neutralsalzlösungen (z.B.  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) zur Bestimmung der Bioverfügbarkeit von Metallen im Boden werden auch neue Techniken entwickelt, die es erlauben effektive Metallkonzentrationen bzw. Metallflüsse in Böden zu bestimmen. In einer DGT – Einheit (DGT: Diffusive Gradients in Thin Films) wird ein Harzgel (z.B. Chelex 100) als Ionenaustauscherschicht auf die Rückseite eines ionendurchlässigen Diffusivgels und eines Membranfilter aufgebracht und auf den Boden aufgedrückt. Der Transport von einfachen Metallionen aus dem Boden zum Harzgel wird durch den Konzentrationsgradienten im Diffusivgel mit bekannter Dicke  $\Delta g$  bestimmt. Nach der Diffusion durch das ionendurchlässige Gel werden die Metallionen sehr schnell im Harzgel immobilisiert. Dieses System ist einer Wurzel dahingehend sehr ähnlich, als Ionen aus der Bodenlösung aufgenommen werden und eine Nachlieferung aus dem Bulkboden stattfindet, um das Gleichgewicht in der Bodenlösung aufrechtzuerhalten. Mit der Anwendung von DGTs können Metallflüsse direkt gemessen werden, weil DGTs ähnlich wie Pflanzenwurzeln lokal die Konzentration von Metallen in der Bodenlösung verringern und damit einen Gradienten erzeugen, der eine Metallnachlieferung aus der Bodenfestphase induziert („standardisierte Simulation der Wurzel“; Zhang et al.; 2001).

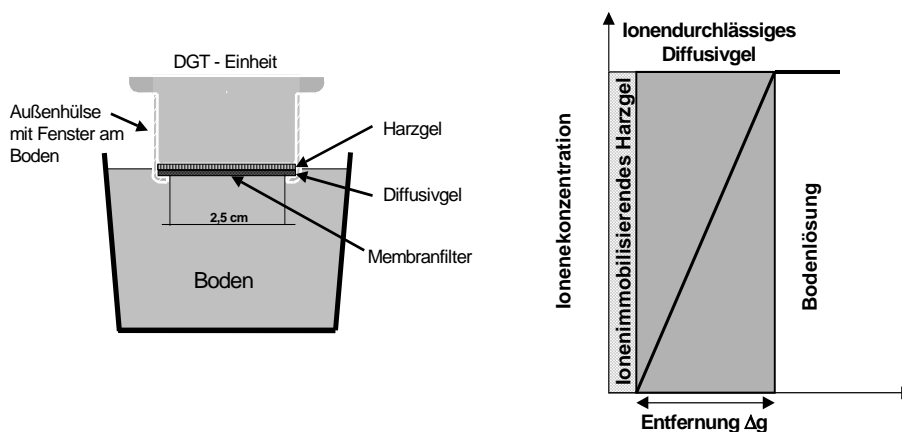


Abbildung 4: Skizze einer DGT-Einheit (links) und Grafik eines Konzentrationsgradienten in einer DGT-Einheit in Kontakt mit Bodenlösung (rechts).

Zur Zeit kommt DGT bei der Analyse von labilen Elementen (Al, As (III), Cd, Co, Cr (III), Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) in Süß- und Salzwasser zur Anwendung. Im Bereich Altlasten ist die Bestimmung von Metallflüssen vs. Zeit und

damit das Erkennen einer verringerten Nachlieferung von Metallen aus der Bodenfestphase ein mögliches Einsatzgebiet der DGT-Technik.

#### **6.4 Entsorgung von Sanierungsmitteln**

Grüne Sproßorgane sowie ggf. die verholzte Sproßbiomasse von Sanierungsmitteln, eingesetzt zur Extraktion von anorganischen Schadstoffen, sind gefährlicher Abfall gemäß AWG und daher zu sammeln sowie fachgerecht zu entsorgen. Die Kosten der Entsorgung der Pflanzenbiomasse verteilen sich auf die thermische Entsorgung der kontaminierten Pflanzenbiomasse sowie die Deponierung der Ascherückstände.

Je nach Schnittmanagement einer etablierten Kultur kann mit kontaminierten Biomassemengen zwischen 3.000 (nur Blätter) und 20.000 kg Trockengewicht (Spross) pro Hektar und Jahr gerechnet werden. Unter der Annahme, dass der Ascheanteil der entnommenen oberirdischen Biomasse bei jährlichem Umtrieb (daher Zweige im Vergleich zu längeren Umtriebszeiten wenig verholzt) höchstens 5% beträgt, ergeben sich somit maximal zwischen 150 und 1.000 kg Pflanzenasche pro Hektar und Jahr.

#### **6.5 Sanierungsdauer**

Entzugsraten einer etablierten Kultur zur Phytoextraktion betragen nach derzeitigem Kenntnisstand bis zu 2 kg Cd, 25 kg Zn sowie 40 kg As je Hektar und Jahr. Die voraussichtliche Sanierungsdauer von Verfahren der Phytoextraktion ist anhand der Vorversuche im Einzelfall und je nach Zielvorgabe der Behörde anzugeben. Als Mindestdauer sind 5 Vegetationsperioden anzunehmen.

Die endgültige Sanierungsdauer (in Ermangelung von Daten aus Upscalingversuchen im Freiland) läßt sich erst im fortgeschrittenen Sanierungsstadium durch den Vergleich der Extraktionseffizienz (Totalentzug Jahr<sup>-1</sup> Schadstoffkonzentration im Boden<sup>-1</sup>) mit der Änderung des Schadstoffverhaltens im Boden über die Zeit festlegen.

#### **6.6 Erreichbare Restkontamination**

Anorganische Schadstoffe sind durch in situ Verfahren nicht gänzlich aus dem Boden zu entfernen. Die minimale, erreichbare Restkontamination im Falle von anorganischen Schadstoffen kann für Phytoextraktionsverfahren als die Differenz von Totalgehalt minus labiler Schadstofffraktion im Boden (entspricht nach derzeitigem Erkenntnisstand näherungsweise der EDTA extrahierbaren Fraktion, siehe Kapitel 4.2.1.) angegeben werden sofern die Nachlieferung in die labile Phasen einen zu ermittelnden Zielwert nicht übersteigt.

#### **6.7 Kosten**

Der Kostenvorteil von in situ Sicherungs- und Sanierungsverfahren besteht im Wegfallen von Auskoffnung und Transport des kontaminierten Bodens sowie im Verzicht auf ansonsten notwendige Investitionen in Anlagenkapazitäten. Die Kosteneffizienz bei gleichem Schadensbild steigt mit der Größe einer Altlast vor allem in Hinblick auf die Kostenstelle Monitoring.

Die Kosten für Verfahren der Phytoextraktion belaufen sich nach eigenen Schätzungen aus dem Jahr 2005 auf etwa 38.000 EURO / ha (Sanierungszeitraum 5 Jahre) bzw. 110.000 EURO / ha (Sanierungszeitraum 20 Jahre) und beinhalten folgende Kostenstellen:

- Projektmanagement
- Grundbeprobung und Vorversuche
  
- Pflanz- und Saatbeetaufbereitung, Sanierungsmittelbereitstellung (Vermehrung/ Verschulung) sowie Bepflanzung der Sanierungsmittel
- Kulturpflegemaßnahmen (Pflanzenschutz, Düngung, Durchforstung und Nachpflanzung) und Entsorgung der kontaminierten Biomasse



- Monitoring (Probenwerbung und Analytik)

Monitoring Kosten können durch Intensivbeprobungen auf repräsentativen, kleineren Flächen gemäß dem Bodendauerbeobachtungskonzept minimiert werden. Kostenvariabilitäten ergeben sich bei der Betreuung der Sanierungsflächen je nach Intensität der Kulturpflfegemaßnahmen (z.B. Bewässerung).

## **7 NUTZUNG UND/ ODER NACHNUTZUNG**

### **7.1 Nutzungseinschränkungen**

Grundsätzlich sind aufgrund der dichten Bepflanzung die behandelten Flächen während des Sanierungsverlaufes außer Ertrag zu stellen.

### **7.2 Nutzungspotentiale während der Sanierung und Sicherung**

Grundsätzlich sind aufgrund der dichten Bepflanzung die Flächen während des Sanierungsverlaufes außer Ertrag zu stellen. Umwegrentabilitäten können sich jedoch durch die Holzbiomassenutzung ergeben wobei das Schnittmanagement sowie die Wegeführung entsprechend auszurichten sind. Mitunter ergeben sich durch die Veränderung der Biomassenstruktur reduzierte Entzugsraten anorganischer Schadstoffe: Maximierung der Holzbiomasse erfolgt grundsätzlich zu Lasten der Blattbiomassebildung.

### **7.3 Nutzungspotentiale nach der Sanierung und Sicherung**

Es ergeben sich durch Verfahren der Phytoextraktion bei gründlicher Abfuhr der Sanierungsmittel (inkl. Wurzelstöcke) nach der Sanierung keine Einschränkungen für Folgenutzungen. Bis auf den Entzug von Schadstoffen bleiben die physiko-chemischen Eigenschaften des Bodens im Zuge der Sanierung erhalten.

## **8 LITERATURVERZEICHNIS**

- Blum W.E.H., Spiegel H. und Wenzel W.W. (1996) Bodenzustandsinventur - Konzeption Durchführung und Bewertung. 2. Auflage. ARGE Bodenzustandsinventur der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft; BMLF (Hrsg.)
- Blum W.E.H., Brandstetter A., Riedler C. und Wenzel W.W. (1995) Bodendauerbeobachtung Empfehlung für eine einheitliche Vorgehensweise in Österreich; Österreichische Bodenkundliche Gesellschaft und Umweltbundesamt.
- Fitz W.J., Wenzel W.W., Zhang H., Nurmi J., Stipek K., Fischerova Z., Schweiger P., Köllensperger G., Ma L.Q., Stinger G. (2003). Rhizosphere Characteristics of the Arsenic Hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and Monitoring of Phytoremoval Efficiency. *Environmental Science and Technology*, 37, 5008-5014.
- Molina Millan, W.J. Fitz, R. Unterbrunner, W.W. Wenzel; 2006: Comparison of methods for measuring metal desorption from soils for parameterising rhizosphere models. *European Journal of Soil Science*, 57, 38-46.
- ÖNORM S 2088-2: Altlasten – Gefährdungsabschätzung für das Schutzgut Boden. Ausgabe: 2000-06-01.
- ÖNORM L 1075: Grundlagen für die Bewertung der Gehalte ausgewählter Elemente in Böden. Ausgabe: 2004-07-01.
- ÖNORM L 1083: Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der Acidität (pH-Wert) Ausgabe: 1999-04-01.
- ÖNORM L 1061: Physikalische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der Korngrößenverteilung des Mineralbodens Teile 1-3 Ausgabe: 1998-09-01.
- ÖNORM L 1068: Physikalische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der Dichte von Mineralböden Ausgabe: 1988-09-01.
- ÖNORM L 1080: Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung des organischen Kohlenstoffs durch trockene Verbrennung Ausgabe: 1999-04-01.
- ÖNORM L 1082: Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung von Stickstoff nach Kjeldahl Ausgabe: 1999-04-01.



- ÖNORM L 1084: Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung von Carbonat Ausgabe: 1999-04-01.
- ÖNORM L 1085: Chemische Bodenuntersuchungen - Säureextrakt zur Bestimmung von Nähr- und Schadelementen Ausgabe: 1999-04-01.
- ÖNORM L 1086-1: Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der austauschbaren Kationen und der effektiven Kationen-Austauschkapazität (KAKeff) durch Extraktion mit Bariumchlorid-Lösung Ausgabe: 1989-01-01.
- ÖNORM L 1087: Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung von "pflanzenverfügbarem" Phosphor und Kalium nach der Calcium-Acetat-Lactat (CAL)-Methode Ausgabe: 1993-11-01.
- ÖNORM L 1088: Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung von "pflanzenverfügbarem" Phosphor und Kalium nach der Doppel-Lactat-Methode (DL-Methode) Ausgabe: 1993-11-01.
- ÖNORM L 1089: Chemische Bodenuntersuchungen - EDTA-Extrakt zur Bestimmung von Schwermetallen Ausgabe: 1993-11-01.
- ÖNORM L 1091: Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung von mineralischem Stickstoff - Nmin-Methode Ausgabe: 1999-09-01.
- ÖNORM L 1094-1: Chemische Bodenuntersuchungen - Extraktion von Spurenelementen mit Ammoniumnitratlösung Ausgabe: 1999-01-01.
- ÖNORM L 1095: Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung des Gesamtstickstoffgehaltes durch trockene Verbrennung Ausgabe: 1999-04-01.
- Prüß. A. Einstufung mobiler Spurenelemente in Böden. In: D. Rosenkranz, G. Einsele und M. Harress (Hrsg.): Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser; 15. Lieferung I/94, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Raschauer B. (2002): Bodenschutzkompetenzen im Österreichischen Rechtssystem. Jahrestagung der ÖBG, 11. und 12. März 2002, Wien; 17 – 22.
- Wenzel W. W., Kirchbaumer N., Prohaska T., Stingeder G., Lombi E. und Adriano D. C. (2001) Arsenic Fractionation in Soils Using an Improved Sequential Extraction Procedure. *Analytica Chimica Acta* 436, 309-323.
- Wenzel W. W., Brandstetter A., Wutte H., Lombi E., Prohaska T., Stingeder G. und Adriano D. C. (2002) Arsenic in Field-Collected Soil Solutions and Extracts of Contaminated Soils and its Implication to Soil Standards. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165, 221-228.
- Zhang H., Zhao F.J., Sun B., Davison W., McGrath S.P. (2001) A new method to measure effective soil solution concentrations predicts copper availability to plants. *Environmental Science and Technology* 35: 2602-2607.