

GREENLAND – Sanfte Sanierung von schwermetallbelasteten Flächen

Gute fachliche Praxis bei der Anwendung sanfter Bodensanierungsverfahren

- ein Leitfaden -



Dezember 2014.

GREENLAND: leitende Wissenschaftler des Konsortiums

- Markus Puschenreiter, Universität für Bodenkultur, Wien (Koordinator)
- Jaco Vangronsveld, Universiteit Hasselt
- Jurate Kumpiene, Luleå tekniska universitet
- Michel Mench, Institut National de la Recherche Agronomique
- Valerie Bert, Institut National de l'Environnement industriel et des Risques
- Andrew Cundy, University of Brighton
- Petra Kidd, Consejo Superior de Investigaciones Cientificas
- Giancarlo Renella, University of Florence
- Wolfgang Friesl-Hanl, AIT Austrian Institute of Technology GmbH
- Grzegorz Siebielec, Instytut Uprawy Nawożenia I Glebooznawstwa – Panstwowy
- Rolf Herzig, Phytotech-Foundation
- Ingo Müller, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
- Jannis Dimitriou, Sveriges lantbruksuniversitet
- Xose Quiroga Troncosco, Tratamientos Ecológicos del Noroeste SL
- Patrick Lemaitre, Innoveox
- Anne Serani Loppinet, CNRS-ICMCB

Weitere Mitwirkende: Paul Bardos, Andrew Church, Jolien Janssen, Silke Neu, Nele Weyens, Nele Witters, Angela Sessitsch

GREENLAND - Kontaktstellen



Dr. Markus Puschenreiter
Universität für Bodenkultur
(BOKU); Department für Wald und
Bodenwissenschaften
Peter Jordan Strasse 82
A-1190 Wien
Tel: ++43 1 47654 3126
markus.puschenreiter@boku.ac.at



Dr. Rolf Herzig
Phytotech-Foundation (PT-F)
Quartiergasse 12
CH 3013 Bern
Tel. 031 / 332 66 29
rolf.herzig.agb@bluewin.ch



Dr. Ingo Müller
Landesamt für Umwelt,
Landwirtschaft und Geologie
Halsbrücker Str. 31a
D-09599 Freiberg
Tel. 03731 294 2810
ingo.mueller@smul.sachsen.de

Die in diesem Leitfaden dargestellten Ansichten sind jene der Autoren und spiegeln nicht zwangsläufig Meinungen oder Entscheidungen der Arbeitgeber oder der Europäischen Kommission wider. Die Erwähnung von Handelsnamen oder Handelsprodukten stellt keine Billigung oder Empfehlung für den Einsatz dar.

Die Eigentumsrechte der Inhalte liegen bei dem GREENLAND Konsortium. Obwohl alle Anstrengungen unternommen wurden, Genauigkeit und Gültigkeit des Inhalts zu gewährleisten, übernehmen die Autoren keine Gewähr oder Haftung, weder ausdrücklich noch implizit, für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Nützlichkeit der Informationen, Geräte, Produkte oder Verfahren und übernehmen weiterhin keine Gewähr, dass bei deren Nutzung u.U. private Rechte vorliegen und zu beachten sind.

Das GREENLAND Projekt wird von der Europäischen Kommission im Rahmen des Siebten Forschungsrahmenprogramms (FP7-KBBE-266.124, Greenland) unterstützt.

Vorwort:

Dieser Leitfaden stellt eine Bündelung der Ergebnisse des GREENLAND-Projekts dar, welches durch das 7. Rahmenprogramm der Europäischen Union gefördert wurde. Das europaweite Multi-Partner-Projekt beleuchtete den Einsatz von Sanften Bodensanierungsverfahren (SBV) als praktische Lösung im Bereich Bodensanierung und Risikomanagement. SBV wurden bislang als praktische Sanierungsstrategien im Kontext kontaminierter Flächen in Europa kaum eingesetzt, trotz ihrer Fähigkeit, ein schnelles Risikomanagement zu gewährleisten und gleichzeitig eine Reihe zusätzlicher wirtschaftlicher, ökologischer und sozialer Vorteile zu erbringen. Dieser Leitfaden möchte dazu beitragen, SBV als wirksames Instrument der Gefahrenabwehr und des Risikomanagements in Europa und in anderen Regionen in der Planung wie auch in der Anwendung zu fördern. Folgende Bereiche werden dargestellt:

- Grundlagen und Rahmenbedingungen für die praktische Anwendung von SBV als effektives Instrument der Gefahrenabwehr und des Risikomanagements
- Beispiele für die erfolgreiche Anwendung von SBV im Kontext kontaminierter Flächen in Europa
- Darstellung von weiteren wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Vorteilen, die während und nach der Anwendung von SBV realisiert werden können und
- Überblick über das Einsatzspektrum für eine Erfolg versprechende Anwendung von SBV

Darüber hinaus bietet der Leitfaden ergänzend eine Reihe von technischen Anhängen, um die standortspezifische Planung und Anwendung wirksamer SBV-Strategien zu unterstützen. Der Leitfaden richtet sich an Planer, Berater, Behörden, Praktiker, Wissenschaftler und andere Entscheidungsträger/ Akteure im Bereich der Sanierung von Altlasten/Brachflächen oder anderen kontaminierten Flächen. Ebenfalls enthalten ist ein Entscheidungshilfelinstrument (EHI) im MS Excel-Format, das praktische Entscheidungshilfen bei der Prüfung verschiedener Optionen für das Management kontaminierter Flächen anbietet. Leitfaden und EHI sind dabei als Entscheidungs- und Informations-Hilfe zu verstehen; sie treffen keine Entscheidungen und ersetzen keinesfalls die Konsultation von Fachleuten. Wie auch andere Sanierungsstrategien sind SBV keine Standardverfahren „von der Stange“, sondern bedürfen in jedem Fall einer standortspezifischen Bewertung und Prüfung im Vorfeld der tatsächlichen Anwendung.



1. Was sind SBV und wie funktionieren sie?

1.1 SBV – eine Definition

Sanfte Bodensanierungsverfahren (SBV) sind Maßnahmen bzw. Techniken für die Gefahrenabwehr bzw. das Risikomanagement kontaminierter Flächen, die zugleich einen Zugewinn (oder zumindest keine Verminderung) an natürlichen Bodenfunktionen ermöglichen. Diese Strategien und Techniken wurden bereits erfolgreich an Standorten, die eine Reihe von organischen, anorganischen oder radioaktiven Schadstoffen aufweisen, angewendet. Den Zielen des EU-Projektes GREENLAND folgend, konzentriert sich dieser Leitfaden auf die Anwendung von SBV auf Flächen, die mit Schwermetallen bzw. Spurenelementen (einschließlich Metallen, Metalloiden und Nichtmetallen) belastet sind.

1.2 Kontext

Zwei wesentliche Schritte im Management kontaminierter Böden haben sich in den vergangenen 30 Jahren herausgebildet: die Risikobewertung bzw. Gefährdungsabschätzung, um die möglichen Probleme und ihre Signifikanz zu ermitteln, und das Risikomanagement, um Probleme bzw. Gefahren, die durch die Risikobewertung als signifikant festgestellt wurden, zu mindern oder abzuwehren. Für das Vorliegen einer Gefahr (siehe Abbildung 1) muss es eine **Schadstoffquelle** geben, einen oder mehrere **Rezeptoren** (oder auch Schutzgüter), die nachteilig durch die Schadstoffe betroffen sein können und zwar durch einen oder mehrere **Expositionspfade** (Verknüpfungswege der Quelle mit den Rezeptoren). Rezeptoren können z.B. die menschliche Gesundheit, Wasserressourcen oder die umgebende Umwelt sein. Die Verknüpfung *Quelle-Expositionspfad-Rezeptor* („pollutant linkage“) findet sich in zahlreichen Regelungen in Deutschland, Österreich und der Schweiz wieder, z.B. als *wirkungspfadspezifisches Gefährdungspotenzial* oder *Expositionsszenario*. Jede Boden- und Grundwassersanierung muss sich dem entsprechend streng an den Anforderungen des Risikomanagements (Sanierungsziel) orientieren und wird sich somit auch nach der späteren Flächennutzung richten; dieses gilt sowohl bei einer "harten" Nachnutzung mit Bebauung/Versiegelung, als auch bei eine "sanfte" Nachnutzung, wie z.B. eine Park- oder Erholungsfläche, bei der der Boden unversiegelt bleibt. Das Risikomanagement konzentriert sich immer auf die Unterbrechung des Wirkungs- oder Expositionspfades; entweder durch Sanierung der Quelle (z.B. Entfernung oder biologischer Abbau der Schadstoffe), Management der Expositionspfade (z.B. Sicherung des mobilen Schadstoff-Pools, Verhinderung des Schadstofftransfers), Schutz der Rezeptoren (z.B. (Raum-)Planung, staatliche Kontrollen, Vermeidung sensibler Landnutzung) oder eine Kombination dieser Ansätze.

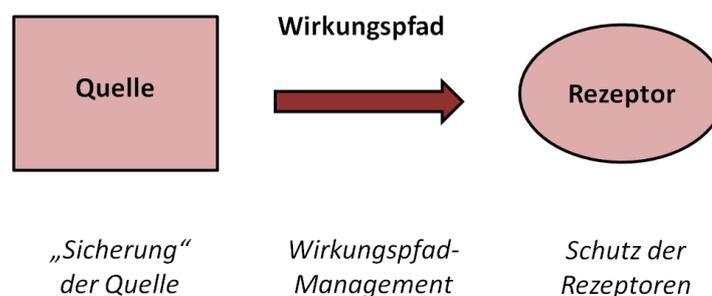


Abbildung 1: Wirkungspfadmodell und Ansatzpunkte für das Risikomanagement (nach Cundy et al. 2013, basierend auf DEFRA 2012).

Konventionelle Ansätze für die Gefahrenabwehr bzw. Sanierung kontaminierter Flächen haben sich zumeist auf Einkapselung, Abdeckung oder die Verbringung auf Deponien konzentriert ("dig and dump"). Ende der 1990er Jahre führte die Entwicklung hin zu technischen Sanierungsverfahren unter Verwendung von *in situ* und *ex situ* Techniken (z.B. Bodenwäsche). Erst in jüngerer Zeit ist das Konzept der Sanften Bodensanierungsverfahren (SBV) entstanden. Hierunter werden Verfahren und Techniken verstanden, die neben einer effektiven Gefahrenabwehr auch einen Zugewinn (oder zumindest keine Verringerung) an Bodenfunktionalität erwarten lassen. Daher erweisen sie sich im Rahmen der Sanierung als besonders nützlich für die Erhaltung oder Wiederherstellung biologisch aktiver Böden. SBV umfassen eine Reihe ganz unterschiedlicher Technologien: den Einsatz von Pflanzen (phyto-), Pilzen (myco-) oder bakteriell-basierten Verfahren, teils mit, teils ohne Verwendung auch chemischer Zusätze. Ziel ist dabei die Verringerung der Exposition der lokalen Rezeptoren durch *in situ*-Stabilisierung (mit biologischen und / oder chemischen Verfahren) oder mit die Extraktion, Transformation oder der Abbau von Schadstoffen.

Unter den SBV finden sich Techniken wie z.B. *in situ* Immobilisierung und Phytoexklusion, Phytovolatilisation, Phytostabilisierung oder Phytoextraktion (siehe Tabelle 1). Ähnliche Konzepte sind auch für das Grundwasser bekannt, zum Beispiel könnte überwachter natürlicher Abbau (MNA) ebenso als ein sanftes Verfahren betrachtet werden. SBV sind eine Weiterentwicklung ausgehend von einem früheren Konzept "extensiver" Technologien, bei dem die Sanierungsansätze anhand des Aufwands an Energie, Ressourcen und Arbeitseinsatz differenziert wurden.

Tabelle 1: Definitionen Sanfter Bodensanierungsverfahren für durch Spurenelemente oder Mischkontamination belastete Böden (nach Peuke und Rennenberg, 2005, Mench et al., 2010).

SSV	Definition
Phytoextraktion	Entfernung von Metall(oid)en oder organischen Schadstoffen aus Böden durch Akkumulation in der erntefähigen Biomasse von Pflanzen. Bei Verwendung von Bodenzusatzstoffen, wird dies als unterstützte bzw. verstärkte Phytoextraktion bezeichnet.
Phytodegradation / Phytotransformation	Nutzung von Pflanzen (und assoziierten Mikroorganismen wie Rhizosphären- und endophytischen Bakterien) zur Aufnahme, Speicherung und Umwandlung bzw. zum Abbau organischer Schadstoffe.
Rhizodegradation	Nutzung von Pflanzenwurzeln und Mikroorganismen in der Rhizosphäre zur Umwandlung bzw. zum Abbau organischer Schadstoffe
Rhizofiltration	Entfernung von Schadstoffen aus wässrigen Umweltmedien von Pflanzenwurzeln und assoziierten Mikroorganismen.
Phytostabilisierung	Reduktion der Bioverfügbarkeit von Schadstoffen durch Immobilisierung im Wurzelsystem und/oder lebender oder toter Biomasse in der Rhizosphäre; auch Schaffung eines Milieus, das die Bildung einer Vegetationsdecke (erst) ermöglicht. Bei Verwendung von Bodenzusatzstoffen, wird diese als unterstützte bzw. verstärkte Phytostabilisierung bezeichnet.
Phytovolatilisation	Nutzung von Pflanzen, um Schadstoffe aus der Wachstumsmatrix zu entfernen, zu transformieren und sie (oder ihre Abbauprodukte) in die Atmosphäre zu überführen.
<i>In situ</i> Immobilisierung / Phytoexklusion	Verringerung der Bioverfügbarkeit von Schadstoffen; Bindung an die Bodenmatrix durch Einbringen von organischen / anorganischen Materialien in den Boden, einzeln oder in Kombination, um der übermäßigen Aufnahme in die Nahrungskette vorzubeugen. Phytoexklusion, die Implementierung einer stabilen Vegetation mit Exkluderpflanzen, die keine Schadstoffe in der erntefähigen Biomasse akkumulieren, kann mit <i>in situ</i> Immobilisierung kombiniert werden.

Eine gezielte Anwendung von SBV kann Folgendes bieten: (a) schnelles und flexibles Risikomanagement über die Kontrolle der Wirkungspfade, durch Sicherung und Stabilisierung, durch langfristige Immobilisierung / Festlegung bzw. Entfernung von Schadstoffen; und (b) eine Reihe von zusätzlichen wirtschaftlichen (z.B. Biomasseerzeugung), sozialen (z.B. Freizeit und Erholung) und ökologischen (z.B. C-Sequestrierung, Schutz des Sicker- und Grundwassers, Wiederherstellung von Lebensgemeinschaften) Vorteilen. Diese werden insgesamt unter dem Oberbegriff "Ökosystemdienstleistungen" subsummiert. Die Einsatzmöglichkeiten und Vorteile der SBV werden in den folgenden Kapiteln 2 und 4 erörtert.

2. Aktueller Stand der Entwicklung von SBV

Info-Box 1: SBV- Technische Anwendbarkeit.

SBV werden überwiegend auf kontaminierten Böden eingesetzt, um die labile (oder bioverfügbare) Fraktion von anorganischen Schadstoffen zu entfernen (Phytoextraktion), organische Schadstoffe abzubauen oder umzuwandeln (z.B. Phytodegradation), Wasserressourcen zu schützen oder zu reinigen (z.B. Rhizofiltration), oder Schadstoffe im Boden zu stabilisieren oder zu immobilisieren (Beispiel Phytostabilisierung, in situ Immobilisierung / Phytoexklusion).

Trotz des weit verbreiteten Einsatzes von "grünen" Technologien, z.B. in der Landschaftsgestaltung, Oberflächenbegrünung und in Pflanzenkläranlagen/„constructed wetlands“, steckt die Anwendung von SBV als praktische Sanierungslösung oder in Revitalisierungsprojekten noch in den Kinderschuhen, insbesondere für schwermetall- bzw. spurenelementbelastete Flächen. Die Hemmnisse für eine umfangreiche Akzeptanz, besonders in Europa, liegen sowohl in der Natur der SBV als Sanierungsverfahren begründet als auch in der wahrnehmbaren Unsicherheit auf dem Markt und bei Entscheidungsträgern darüber, ob diese Methoden auch langfristig eine effektive Gefahrenabwehr sicherstellen können.

Der Großteil der Sanierungsarbeiten in Europa wurde in Folge von behördlich geforderten Maßnahmen in besonders kritischen Kontaminationsfällen durchgeführt und/oder um die Wiedernutzung oder Entwicklung von urbanen Brachflächen zu stimulieren. Daher überrascht es nicht, dass die meisten geförderten Sanierungs- und Flächenrecycling-Projekte in und um städtische Umgebungen konzentriert sind und ebenso wie die Wiedernutzung von Brachflächen stark von wirtschaftlichen Faktoren bestimmt werden. Diese Projekte sind oft durch zeitlichen Druck und relativ begrenzte Flächengröße gekennzeichnet. Beide Faktoren führen in der Regel dazu, dass SBV bei der Maßnahmenauswahl unberücksichtigt bleiben, da sie als langsam und als eher geeignet für großflächig kontaminierte Areale empfunden werden.

Als nachteilig für SBV wird auch die Zeitspanne bis zum Erreichen von Sanierungszielwerten gesehen, wenn diese feste Grenzen auf Basis von Gesamtgehalten vorschreiben. Dies hat zu intensiven Diskussionen insbesondere über die Phytoextraktion, als die vielleicht bekannteste und umfangreich im Demonstrationsmaßstab getestete SBV, geführt. Phytoextraktion wird in der Regel als Verfahren der Quellensanierung gesehen, mit einer allmählichen, schrittweisen Entfernung von Metall(oid)en

aus dem Boden über die Aberntung der Biomasse. Phytoextraktion findet als realistisches Verfahren der Quellensanierung zumeist kaum Akzeptanz, weil die Entfernung der Schadstoffe Jahrzehnte in Anspruch nehmen kann, sofern das Sanierungsziel auf Gesamtgehalte fixiert ist. Darüber hinaus gibt es auch Besorgnis über die Konzentration von Schadstoffen in der geernteten Biomasse und deren letztendlichen Verbleib.

Die Akzeptanz anderer SBV, wie Phytostabilisierung und *in situ* Immobilisierung, ist wiederum begrenzt, weil eine Dekontamination durch Entfernung der Schadstoffquelle nicht stattfindet. Zudem besteht die Auffassung, dass die Stabilisierung oder Immobilisierung im Laufe der Zeit möglicherweise nachlassen könnte.

Die geringe Akzeptanz von SBV ist kaum zu überwinden, solange der Sanierungserfolg ausschließlich anhand von Bodenkonzentrationen als formaler Zielwert beurteilt wird. Dieser zielwertorientierte Ansatz kann wegen seiner Einfachheit durchaus attraktiv wirken, jedoch kann der ihm eigene ausgesprochen konservative Ansatz zu überzogenen Sanierungen oder Managementlösungen führen, die teuer und invasiv sind und dabei oftmals nicht nachhaltig. Ein standortspezifischer Ansatz, der in einem umfassenden Risikomanagement die Schadstoffquelle und auch alle relevanten Wirkungspfade berücksichtigt, ermöglicht eine gezieltere und damit wahrscheinlich nachhaltigere Lösung. Bei dieser Herangehensweise erscheint der Einsatz von SBV vorteilhaft, weil diese auf dem Einsatz von Pflanzen und Mikroorganismen basieren. Diese Verfahren können die Regeneration kontaminierter Flächen gerade in solchen Fällen ermöglichen, wo sich die Intervention wirtschaftlich kaum lohnt und bei denen durch die Verknüpfung mit anderen Projektleistungen (z.B. Biomasseproduktion, Bereitstellung öffentlicher Grünflächen, Wiederherstellung von Grundstückswerten), SBV-Ansätze passgenau auf den relevanten Expositionspfad (Abbildung 2) zugeschnitten werden können - ausgerichtet auf

- die Quelle: allmähliche Dekontamination oder Immobilisierung der Schadstoffe (Quelltherm)
- den Wirkungspfad: rasche Reduktion des Schadstoffübergangs zu den betroffenen Rezeptoren
- den Rezeptor: Nutzung von Vegetation, um den Zugang des Rezeptors zum belasteten Boden zu steuern.

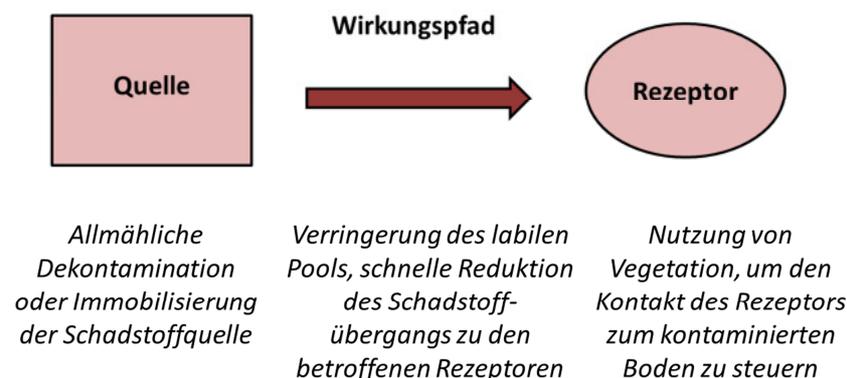


Abbildung 2: SBV-basierte Ansätze für ein Risikomanagement, angepasst an das Wirkungspfadmodell.

Hier einige Hinweise aus Fallbeispielen, bei denen herkömmliche technische Sanierungsverfahren nicht notwendig bzw. weniger geeignet erscheinen, bei denen jedoch das übergreifende Risikomanagement mittels SBV erhebliche Vorteile bieten kann:

- Große zu sanierende Bereiche, vor allem dann, wenn die Kontamination möglicherweise Besorgnis erregt, aber nicht in sehr hohen Konzentrationsbereichen liegt
- Dort, wo nach der Sanierung ein biologisch aktiver Boden z.B. als Pflanzenstandort vorliegen soll
- Wenn weitere Ökosystemdienstleistungen mit Bezug zur Bodenqualität (z.B. Biodiversität, Kohlenstoffbindung) von besonderer Bedeutung sind
- Um Böden auf Grenzertragsflächen wiederherzustellen und dort Biomasse zu erzeugen, ohne die sonst übliche Konkurrenz zum Futter- und Lebensmittelsektor
- Falls das Budget nur kostengünstige Lösungen erlaubt
- Dort, wo standortspezifische Einschränkungen vorliegen, z.B. für stationäre Bodenbehandlungsanlagen bzw. bei eingeschränkten Transportmöglichkeiten. Üblicherweise finden sich diese Beschränkungen oft auf solchen Flächen, auf denen ohnehin eine „sanfte“ bzw. „grüne“ Endnutzung angestrebt wird.

Eine ganze Reihe von guten Anwendungsbeispielen zeigt, dass mit SBV ein flexibles Risikomanagement und rasche Gefahrenabwehr über eine Kontrolle der Wirkungspfade gelingen kann - durch Sicherungs- und Stabilisierungsmaßnahmen, verbunden mit einer langfristigen Verminderung oder Immobilisierung der Schadstoffquelle. Großflächige Langzeitbeispiele einer Anwendung von SBV auf schwermetall- oder spurenelementbelasteten Standorten in Europa werden im Kapitel 3 anhand der GREENLAND-Erfolgsgeschichten dargestellt. In Nordamerika ist die Anwendung von SBV bereits deutlich weiter entwickelt als in Europa; der staatenübergreifende „Interstate Technology & Regulatory Council“ (ITRC) in den USA führt z.B. ein Verzeichnis mit 48 Standorten, vor allem in den USA, mit Phytotechnologie-Studien im Praxismaßstab (Stand: 2007). Die Anwendung von SBV in Nordamerika reicht in der Regel von relativ kleinen Phyto- und Biosanierungsprojekten, angetrieben und umgesetzt von örtlichen Gemeinden, bis hin zu größeren Sanierungsprogrammen mit grüner Technologie auf „Superfund“-Flächen (amerikanische Altlasten), die von einfachen Begrünungsmaßnahmen bis zur Anpflanzung von Bäumen zur Sanierung reichen.

SBV können durchaus dauerhafte Lösungen sein, solange Landnutzung und -bewirtschaftung keinen wesentlichen Veränderungen unterliegen, die z.B. Änderungen im pH-Wert, der elektrischen Leitfähigkeit oder der Pflanzendecke herbeiführen. Daher ist hierzu eine institutionelle oder planerische Kontrolle in geeigneter Form empfehlenswert. Derartige Formen der Kontrolle über die Landnutzung finden sich auch maßgeblich in herkömmlichen Sanierungsverfahren und ebenso bei Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen, so dass die Steuerung und Überwachung von SBV einem ohnehin bekannten Standardvorgehen folgen kann.

3. Fall-/ Erfolgsbeispiele

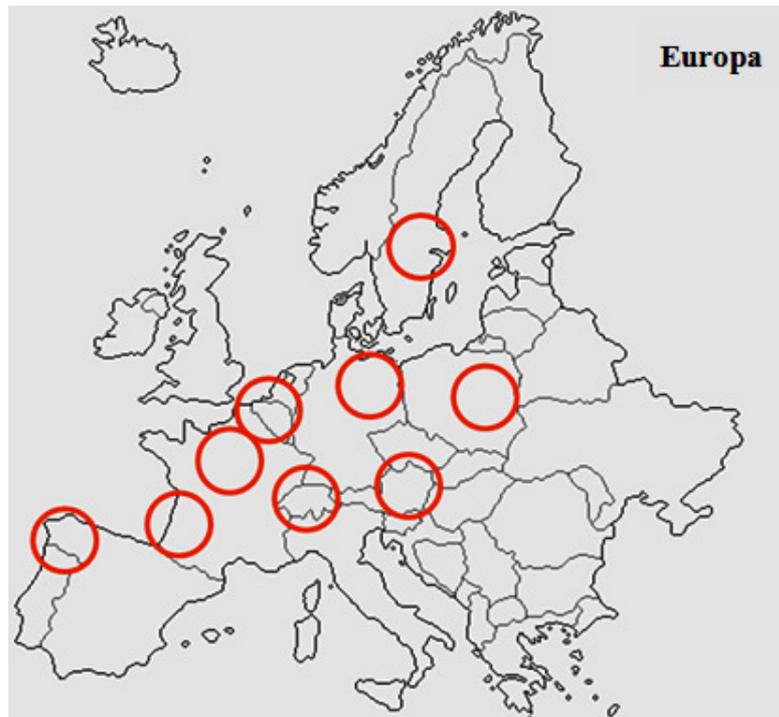


Abbildung 3: Die GREENLAND-Langzeitversuche (> 5 Jahre) mit SBV im Freiland auf schwermetall- bzw. spurenelementbelasteten Flächen in Europa weisen ein breites Spektrum im Hinblick auf Klima, Boden und Schadstoffen auf.

Im GREENLAND-Netzwerk (Abbildung 3) finden sich quer durch Europa belastete Flächen, auf denen die Wirksamkeit von Phytotechnologien über lange Zeiträume (>5 Jahre) für verschiedene Schadstoffgruppen und -konzentrationen, unter verschiedenen Boden- und Klimabedingungen und mit verschiedenen Pflanzenarten und -sorten getestet wurde. Drei dieser Standorte werden auf den folgenden Seiten genauer vorgestellt; hier finden sich Beispiele für die Anwendung unterschiedlicher Phytotechnologien, wie Phytoextraktion, gestützte bzw. verstärkte Phytostabilisierung und *in situ* Stabilisierung / Phytoexklusion, die nachweisbar zu Schadstoffreduktion, Unterbrechung des Wirkungspfads und Schutz der Rezeptoren geführt haben. Weitere Praxisbeispiele finden sich in den technischen Anhängen.

Beispiel 1: Phytoextraktion und –stabilisierung (DE)

Beispiel 2: *In situ* Immobilisierung / Phytoexklusion (AT)

Beispiel 3: *In situ* Immobilisierung im Grünland (AT)

Beispiel 1: Phytoextraktion und -stabilisierung

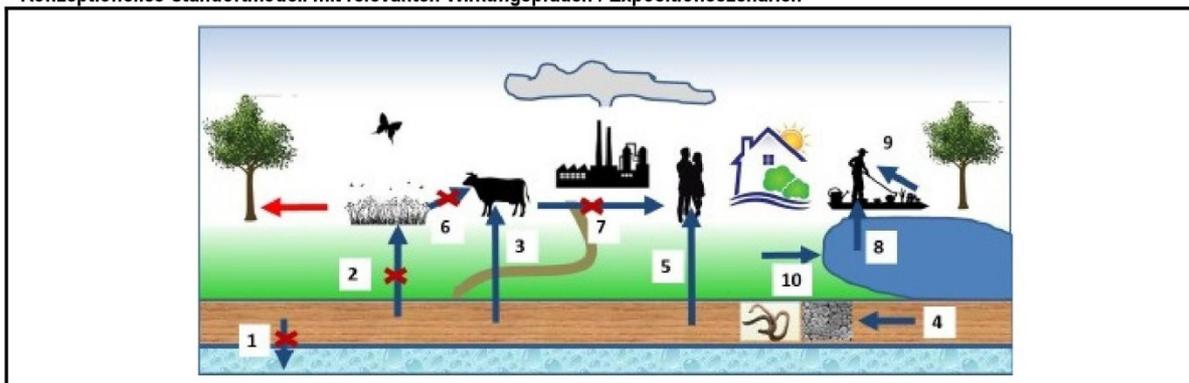
Standortname	Freiberg/Halsbrücke	SBV Typ	Phytoextraktion / -stabilisierung
Ortsangabe	Freiberg, Deutschland	Ursprung der Kontamination	Geogen sowie Hütten-Emissionen seit Jahrhunderten
Standorttyp	Kontaminiertes Ackerland	Anlage des Feldversuchs	Start: 2005 – Ende: 2019
Aktuelle Landnutzung	Kurzumtriebsplantage (KUP)	Versuchsdauer	derzeit: 9 Jahre
Geplante Nachnutzung	Acker/Grünland/KUP	Kontaminierte Fläche	Regionaler Maßstab, 2 ha Testfläche
Ziel	Unterbrechen der Wirkungspfade, Bioenergie-Produktion, Verminderung der mobilen und Gesamtgehalte		

Bodenkenndaten	Vor Beginn	Optimale SBV	Mobiler Gehalt vor Beginn* mg/kg	Mobile Gehalt bei optimaler SBV [§] mg/kg	Lage und Ansicht der Fläche Freiberg/Halsbrücke 
pH	5.7	5.2			
Sand, U, Ton (%)	sandy loam				
Corg (%)	1.4				
KAK mmol _c /kg	7.5				
As (mg/kg)	118	95.9	** (0.13) 0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01	
Cd (mg/kg)	3.2	2.6	0.17 ± 0.06	0.17 ± 0.06	
Cr (mg/kg)	42.4		0.002 ± 0.001	< LOD	
Cu (mg/kg)	24.3		n.d.	n.d.	
Pb (mg/kg)	374		0.37 ± 0.11	0.37 ± 0.18	
Zn (mg/kg)	179.5		1.7 ± 1.2	1.8 ± 1.0	

* NH₄NO₃; § nach 8 Jahren; ** angrenzende Ackerfläche

Wichtige Interessensvertreter	Funktion/Rolle	Bemerkungen	Standort-Verantwortlicher
Landwirt	Eigentümer und Ernte-Logistik		LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE 
SMUL, LfULG	Sächsisches Umweltministerium und Fachbehörde	Forschungsorientierte Anlage	

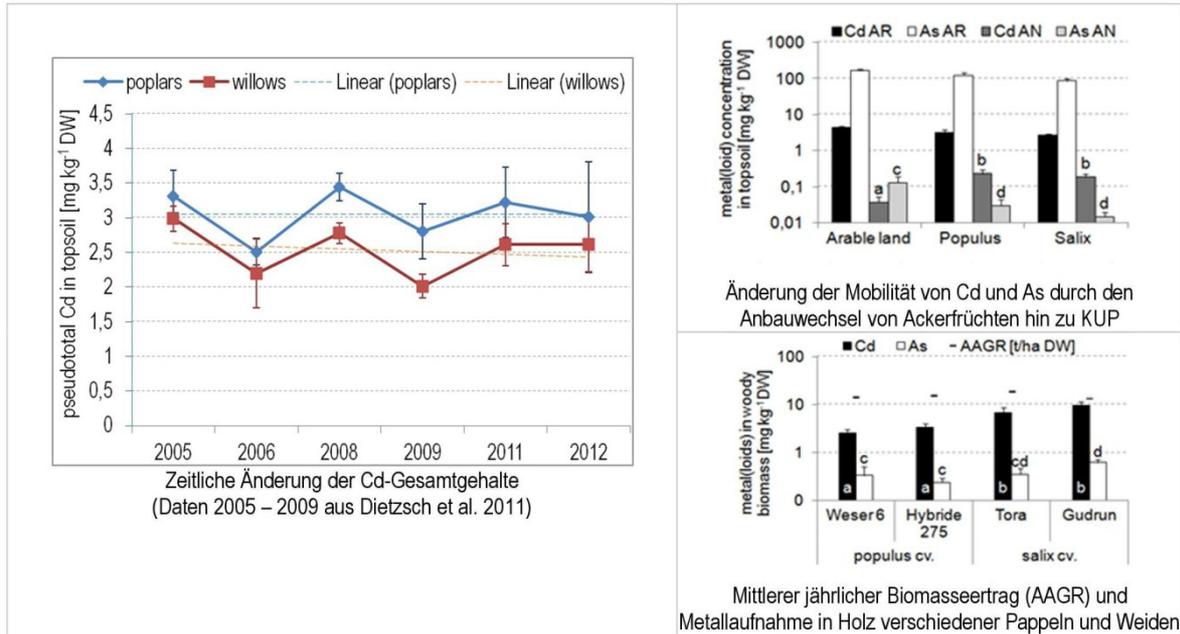
Konzeptionelles Standortmodell mit relevanten Wirkungspfaden / Expositionsszenarien



Wirkungspfad	Lage zu Beginn	Erreichte Ergebnisse
1 Boden-Grundwasser	Verlagerung mobiler Metalle mit Sickerwasser	Verminderung der Sickerwassermenge
2 Boden-Pflanze	Anreicherung von Metallen in Ernteprodukten	Nutzungsänderung zu Biomasse/Bioenergie (KUP)
3 Boden-Tier	Bodenaufnahme während Beweidung	Nutzungsänderung zu Biomasse/Bioenergie (KUP)
4 Boden-Mikroorganismen		Nicht untersucht
5 Boden-Mensch	Bodenaufnahme durch Menschen	Nicht relevant (Resorptionsverfügbarkeit: nicht reduziert)
6 Pflanze-Tier	Metallaufnahme über belastetes Futter	Nutzungsänderung zu Biomasse/Bioenergie (KUP)
7 Tier-Mensch	Metallanreicherung im Tier	Nutzungsänderung zu Biomasse/Bioenergie (KUP)
8 Wasser-Mensch		Nicht untersucht
9 Pflanze-Mensch	Relevant nur für Ackerfrüchte	Nicht untersucht

Praktische Projektausführung	Beschreibung
Vorbehandlung	Übliche landwirtschaftliche Praxis, Zaun gegen Wildtiere erforderlich; Herbizide im ersten Jahr
In-situ Stabilisierung	-
Phytoextraktion/-stabilisierung	Auswahl der Pappel- und Weidensorten nach ihrem Metall-Aufnahmevermögen, Biomasse-Produktion
Biomasse – Bewirtschaftung und Nutzung	Bäume wurden alle 3 Jahre mit dem Vollernter geerntet (Hackschnitzel) Biomasse-Verbrennung im Heizkraftwerk → Erzeugung von Wärme und Strom
Bio- und Bodenmonitoring	Jährliche Untersuchung der mobile und Gesamtgehalte im Boden, Metalle in Pflanzenproben / Hackschnitzel / faunistische und floristische Untersuchungen in den ersten 4 Jahren
Zeiträumen zum Erreichen des Ziels	Vermeidung des Metalltransfers in die Nahrungskette: unmittelbar Vollständige Phytoextraktion mit Bezug auf die Gesamtgehalte: über 100 Jahre (Cd)
Besondere Schwierigkeiten	Unkrautmanagement, Einzäunung zu Beginn, Holz-Vollernter zur Miete, kein jährliches Einkommen (nur jedes 3. Jahr), Trockenheit ist während des ersten Jahres problematisch

Besondere Ergebnisse	Beschreibung
Reduktion der Gehalte (Cd, Zn, Pb) im Boden	Im Vergleich zum benachbarten Ackerland wurde mobiles As um 90 % vermindert
Vermeidung des Metall-Transfers in Nahrungs- und Futtermittel durch Umstellung auf Biomasseproduktion	KUP mit Pappeln und Weiden als Alternative zur üblichen Landwirtschaft, mittlere Biomasse-Produktion lag bei 15 t TM /ha/ Jahr



Wesentliche Fortschritte in der Laufzeit



Kalkulation / Bilanzierung	Einrichtung	(Pflanzen)Bewirtschaftung	Finanzieller Ertrag
Hinweise auf Kosten und Ertragsanteile	Grubbern, Pflanzen der Stecklinge: Weiden < Pappeln	Pestizide, Einzäunung, Miete Vollernter, Biomasse-Logistik	Biomasseertrag, Preis für Hackschnitzel, Laufzeit der KUP (min. 5 – 6 Jahre, Dietzsch 2011), Bewirtschaftung, Zuschüsse
Behandelte Fläche	2 ha	2 ha	
Unsicherheiten bei der Vollarwendung	Mittel; besondere Betreuung bei der Anlage (Pflanzenschutz, Zaun, ggf. Bewässerung)		
Kosten/Nutzenrisiken bei Vollarwendung	Hohe Anlagekosten, Optimierung Pflanzenwahl, Ernteprozess, Zuschüsse (Greening)		
Möglichkeit der Nutzungsänderung	Ja – Baumwurzeln müssen gerodet werden (Technik vorhanden)		
Biomasse-Nutzung	Biomasse-Heizkraftwerk (Energie- und Wärmeproduktion)		

Bei Fragen und weiterem Informationsbedarf			
Kontaktstelle	LfULG (Sächsisches Landesamt)	Dr. Ingo Müller	Ingo.mueller@smul.sachsen.de

Aussagekraft / Grad der Repräsentativität: Gering / • **Mittel** / Hoch

Literatur

- Neu S & I. Müller (2014 - oral presentation): Gentle remediation options (GRO) for the management of large-scale contaminated agricultural sites in Saxony, Germany. 4th International Conference on Managing Urban Land – Tailored and Sustainable Redevelopment towards Zero Brownfields, 14. – 16. Oktober, Frankfurt am Main.
- Neu S & I. Müller (2013): Gentle remediation options (GRO) for the management of large-scale contaminated agricultural sites in Saxony, Germany. Practical examples from the EU-Projekt GREENLAND (FP7) (in German). Poster and manuscript in conference proceedings of 5th Saxon-Thuringian Soil protection days in Altenburg, Thuringia.
- Dietzsch (2011): Utilisation of contaminated soils (in German); Saxon State Office for Environment, Agriculture and Geology, Dresden. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/14994/documents/17993>

Beispiel 2: *In-situ* Immobilisierung / Phytoexklusion

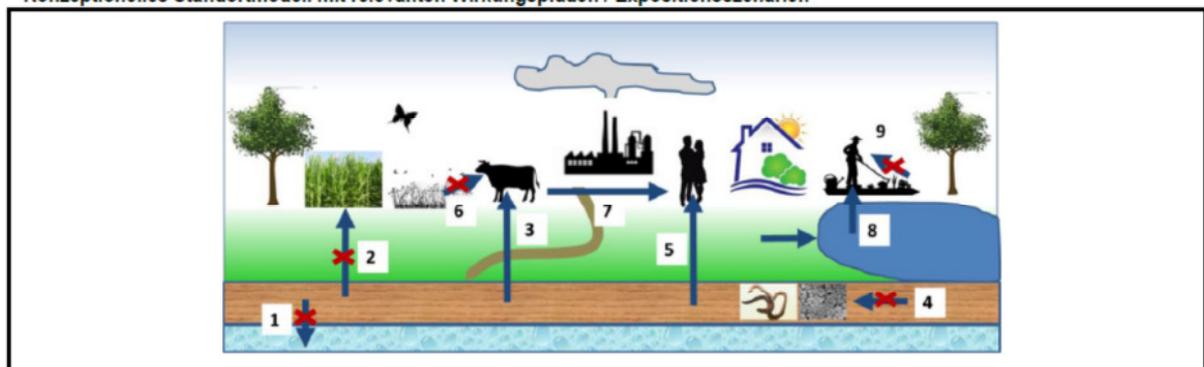
Standortname	Arnoldstein	SBV Typ	<i>In-situ</i> Immobilisierung / Phytoexklusion
Ortsangabe	Arnoldstein, Österreich	Ursprung der Kontamination	Pb/Zn Schmelze (start: 1495 – closed:1992)
Standorttyp	kontaminiertes Ackerland	Implementierung des Feldversuches	Start: 2002 – end:2014
Aktuelle Landnutzung	Ackerland	Versuchsdauer	Dzt.:13 Jahre
Geplante Nachnutzung	Ackerland	Kontaminierte Fläche	2 km ² (Versuchsfeld 500 m ²)
Ziel	Die Produktion von sicheren Futtermitteln, um den Schwermetalleintrag in die Nahrungskette zu reduzieren.		

Boden-Kenndaten	Vor Beginn	Optimale Behandlung	Mobiler Gehalt vor Beginn* mg/kg	Mobiler Gehalt bei optimaler Behandlung [§] mg/kg	Ansicht der Ackerfläche (Arnoldstein) und Lage in Österreich
pH	5	6,5			
Sand, U, Ton (%)	49 – 36 -15				
Corg (%)	3				
KAK (mmol _c /kg)	50				
As (mg/kg)	32		0.025 ± 0.00	0.025 ± 0.00	
Cd (mg/kg)	5		1.26 ± 0.04	0.28 ± 0.05	
Cu (mg/kg)	58		0.10 ± 0.01	0.09 ± 0.01	
Pb (mg/kg)	950		9.68 ± 0.47	0.96 ± 0.34	
Zn	500		75.80 ± 2.95	10.05 ± 2.90	

*1 M NH₄NO₃-extrahierbare Metal(loide) in der Kontrolle; § im behandelten Boden nach 7 Jahren

Wichtige Interessensvertreter	Funktion/Rolle	Bemerkungen	Standort-Verantwortlicher
Landwirte (Mr. Mitsche, Mr. Tschinderle)	Eigentümer, Pächter		
AIT und Landwirte	Bewirtschaftung		
Dr. Wolfgang Friesl-Hanl	Verantwortl. Wissenschaftler	Forschungsorientierte Anlage	
Landwirtschaftsministerium, EU FP7	Fördermittelgeber	durchgeführt von KPC	
Gemeinden (Arnoldstein, Hohenthurn)	Kommunikation		
Greenland-Partner	Wiss. Zusammenarbeit		

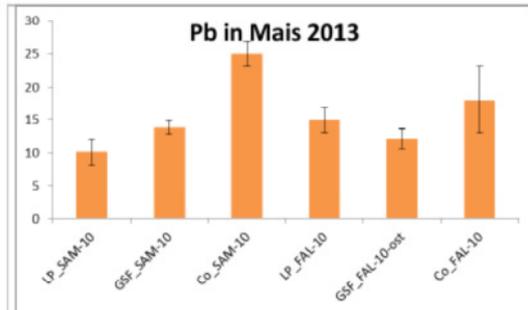
Konzeptionelles Standortmodell mit relevanten Wirkungspfaden / Expositionsszenarien



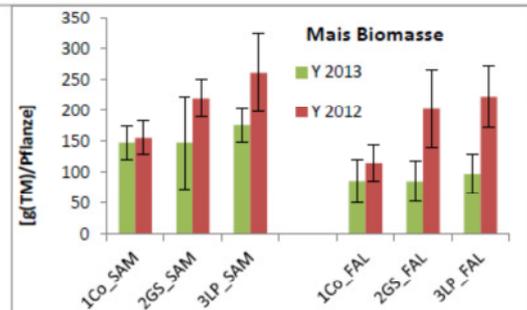
Wirkungspfad	Lage zu Beginn	Erreichte Ergebnisse
1 Boden-Grundwasser	Verlagerung mobile Metalle ins Grundwasser	Mobile Konzentration verringert
2 Boden-Pflanze	Anreicherung von Metallen in Mais und Gerste	Metallaufnahme unter gesetzlichen Grenzwerten
3 Boden-Tier	Biotest mit Asseln (<i>Porcelio scaber</i>) [§]	Bioverfügbarkeit wurde reduziert
4 Boden-Mikroorganismen	Bodenatmung (BA) vermindert	Nach 10 a: BA um 25% erhöht
5 Boden-Mensch		Nicht untersucht
6 Pflanze-Tier	Metallaufnahme über belastetes Futter (zB Maissilage)	Cd in Mais und gesetzl. Grenzwerten (EU, 2002)
7 Tier-Mensch		Nicht untersucht
8 Wasser-Mensch		Nicht untersucht
9 Pflanze-Mensch	Metallaufnahme durch belastete Lebensmittel (zB Kartoffel)	Cd in Kartoffeln reduziert, nahe am Grenzwert EC

Praktische Projektausführung	Beschreibung
Vorbereitung	Nicht erforderlich
<i>In-situ</i> Immobilisierung	Bodenzusätze: Kiesschlamm und Fe-haltiges Material; Menge: 3 % (w/w) = 9 kg/m ² = 90 t/ha
Phytoexklusion	Selektion von Cd-ausschließenden Sorten (Gerste, Mais, Kartoffel) Gute fachliche, landwirtschaftliche Praxis (in diesem Fall: Prinzipien des Biolandbaus)
Biomasse Bewirtschaftung und Nutzung	Ernte: Mais-Biomasse 15 t TM/ha, jährliche Analysen; Biomassennutzung als Futter
Bio- und Bodenmonitoring	Untersuchungen: Pflanzen jährlich, Boden alle 2 Jahre (NH ₄ NO ₃ -Extraktion)
Zeiträumen bis zum Erreichen des Ziels	Bodenzusätze zeigten sofortige Wirkung, Langzeitwirkung gilt nach 10 Jahren als gesichert. Information über schwermetall-exkludierende Sorten sollte angeboten werden.
Besondere Schwierigkeiten	Wetterverhältnisse (kalter und nasser Frühling, trockener Sommer), fehlende Sorteninformation

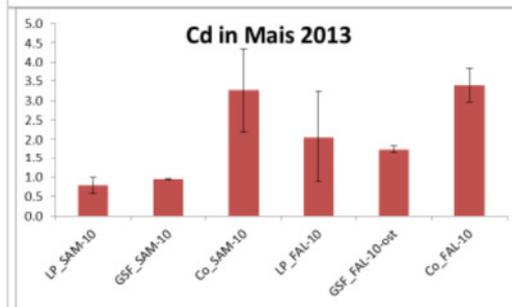
Besondere Ergebnisse	Beschreibung
Reduktion des mobile Metallgehaltes (Cd, Zn, Pb) im Boden	1M NH ₄ NO ₃ -extrahierbares Cd um >80%; Zn >90% und Pb >90% reduziert
Reduktion der Pflanzenaufnahme	Cd Aufnahme in Gerste wurde um >75 % reduziert, verglichen mit einer akkumulierenden Sorte. Aufnahme in Maissilage wurde um 50% (Cd), 60% (Pb), 70% (Zn) reduziert.



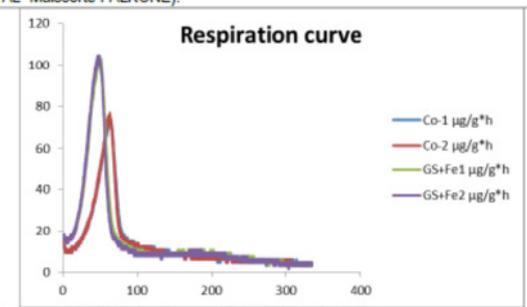
Maisblatt Pb Konzentration (mg/kg), 2013 (Co= Kontrolle, GS=Kiesschlamm und Fe, LP=Lehmpulver, SAM=Maissorte DieSAMANTA, FAL=Maissorte FALKONE).



Biomasseproduktion am Feld ARN_B in 2012 und 2013 (Co=Kontrolle, GS=Kiesschlamm und Fe, LP=Lehmpulver, SAM=Maissorte DieSAMANTA, FAL=Maissorte FALKONE).



Maisblatt Cd Konzentration (mg/kg), 2013 (Co= Kontrolle, GS=Kiesschlamm und Fe, LP=Lehmpulver, SAM=Maissorte DieSAMANTA, FAL=Maissorte FALKONE).



Atmungsaktivität: Behandlungen in LILA, Kontrollen in Rot

Wesentliche Fortschritte in der Laufzeit



Maisaufwuchs: 28. Juli 2011 (Blick nach Norden)



Maisaufwuchs: 13. August 2012 (Blick nach Norden)

Zusammenfassung:

Der Transfer über die Wirkungspfade

- Boden-Pflanze,
- Boden-Grundwasser,
- Pflanze-Tier,
- Pflanze-Mensch

konnte durch

In-situ Immobilisierung in Kombination mit **Phytoexklusion** wirksam vermindert werden.

Kalkulation / Bilanzierung	Einrichtung	(Pflanzen)Bewirtschaftung	(finanzieller) Ertrag
(Hinweise auf) Kosten	Bei Verwendung von Reststoffen – nur Transport- und Ausbringungskosten; Wenn das Produkt (€ 100,00 pro Tonne) = € 9.000,00/ha	Übliche Landwirtschaft	Qualität, Einhaltung von gesetzlichen Grenzwerten
Behandelte Fläche	500 m ²		
Unsicherheit bei Vollarwendung	Gering, Biomasse kann genützt werden, Fruchtwechsel kann angewendet werden		

Bei Fragen und weiterem Informationsbedarf

Contacts	AIT Austrian Institute of Technology GmbH	Dr. Wolfgang Friesl-Hanl	wolfgang.friesl-hanl@ait.ac.at
----------	---	--------------------------	--------------------------------

Aussagekraft / Grad der Repräsentativität: Gering / Mittel / Hoch

References

- Friesl-Hanl W., M.H. Gerzabek, W.W. Wenzel, W.E.H. Blum. Industrial Waste: Soil Pollution. In Encyclopedia of Environmental Management. Taylor and Francis: New York, Published online: 01 May 2013; 1430-1433.
- Friesl-Hanl W, Platzer K, Horak O, Gerzabek MH 2009 Immobilising of Cd, Pb, and Zn contaminated arable soils close to a former Pb/Zn smelter: a field study in Austria over 5 years. Environmental Geochemistry and Health 31(5):581-94
- Friesl W., J. Friedl, K. Platzer, O. Horak, M. H. Gerzabek (2006): Remediation of contaminated soils in the vicinity of a former Pb/Zn smelter in Austria: Batch, Pot, and Field experiments; Environmental Pollution, 144 (1): 40-50.
- Udovic M., Drobne D., Lestan D. (2013). An in vivo invertebrate bioassay of Pb, Zn and Cd stabilization in contaminated soil. Chemosphere 92: 1105–1110

Beispiel 3: *In-situ* Immobilisierung unter Grünland

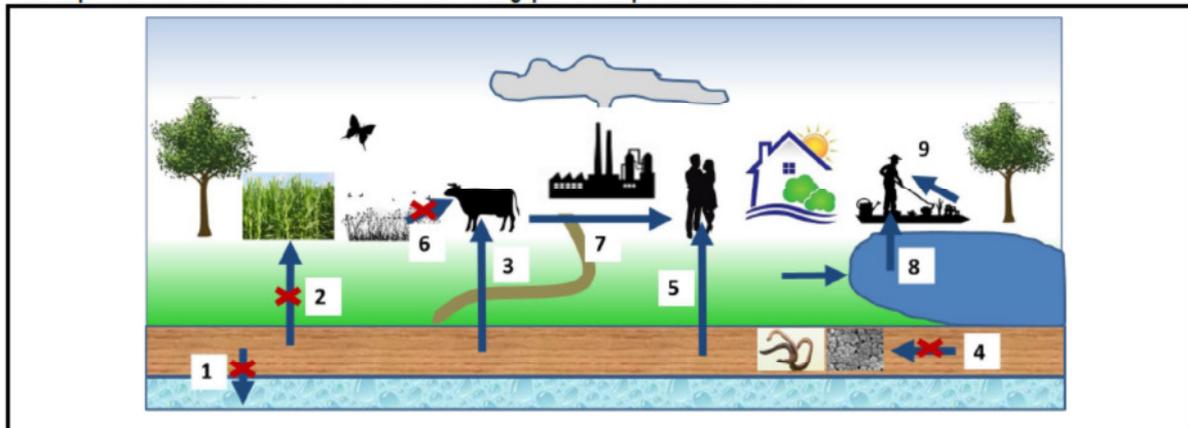
Bezeichnung	Arnoldstein	SBV Typ	<i>In-situ</i> Immobilisierung unter Grünland
Ortsangabe	Arnoldstein, Österreich	Ursache der Bodenbelastung	Emissionen einer Pb/Zn-Hütte (Start: 1495 – Ende: 1992)
Standorttyp	kontaminiertes Grünland	Einrichtung des Feldversuchs	Start: 2002 – Abschluss: 2014
Aktuelle Landnutzung	Grünland	Standzeit des Versuchs	momentan: 13 Jahre
Spätere Nachnutzung	Grünland	Kontaminierte Bodenfläche	2 km ² (Versuchspartellen je 100 m ²)
Ziel	Unterbrechung der Schadstoffwirkungspfad Richtung Sickerwasser; Produktion von sicheren Futtermitteln		

Boden-Kenndaten	Vor Beginn	optimale Behandlung	Mobile Gehalt vor Beginn* mg/kg	Mobile Gehalt bei optimaler Behandlung [‡] mg/kg	Ansicht der Fläche Arnoldstein (Grünland) und Lage in Österreich
pH (CaCl ₂)	5.8	6.5			
Sand-Schluff-Ton (%)	66 – 24 – 10				
C _{org} (%)	6.7				
KAK (mmols/kg)	155				
As (mg/kg)	34		<0.02	<0.02	
Cd (mg/kg)	14		0.23	0.09	
Pb (mg/kg)	1400		1.01	0.31	
Zn (mg/kg)	1650		11.5	1.53	

*1 M NH₄NO₃-extrahierbare Metalle/Metalloide im unbehandelten Boden und [‡] im Boden 10 Jahre nach der Behandlung

Wichtige Interessensvertreter	Funktion/Rolle	Bemerkungen	Standort-Verantwortlicher
Landwirte (Hr. Mitsche, Hr. Tschinderle)	Eigentümer, Pächter		
AIT GmbH und Landwirte	Bewirtschaftung		
Dr. Wolfgang Friesl-Hanl	Verantw. Wissenschaftler	Forschungsorientierte Anlage	
Landwirtschaftsministerium, EU FP7	Fördermittelgeber	durchgeführt von KPC	
Gemeinden (Arnoldstein, Hohenthum)	Kommunikation		
Greenland- Partner	Wiss. Zusammenarbeit		

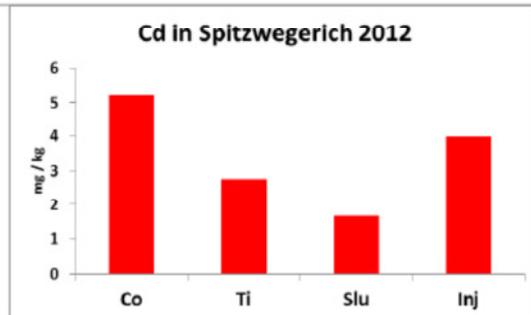
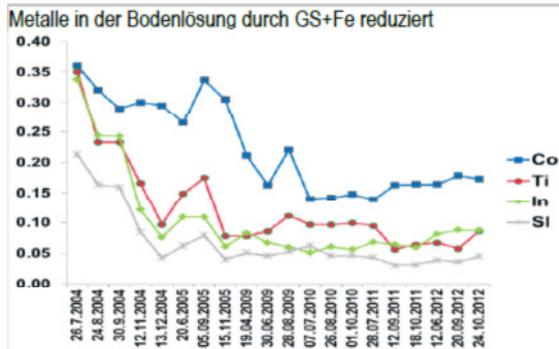
Konzeptionelles Standortmodell mit relevanten Wirkungspfaden / Expositionsszenarien



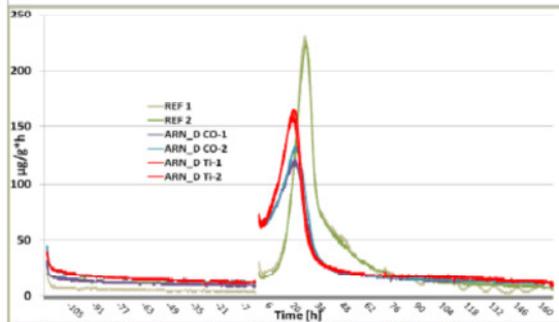
Wirkungspfad	Lage zu Beginn	Erreichte Ergebnisse
1 Boden-Grundwasser	Verlagerung mobiler Metalle ins Grundwasser	Mobile Konzentration vermindert
2 Boden-Pflanze	Anreicherung von Metallen in Futterpflanzen	Metallaufnahme in Ernteprodukte vermindert
3 Boden-Tier	Bodenaufnahme durch Rinder bei der Beweidung	Nicht untersucht
4 Boden-Mikroorganismen	PLFAs Phospholipid-Fettsäuren, Bodenatmung (BA) vermindert	nach 10 a: PLFA: +10% ; BA: +25 %
5 Boden-Mensch	Aufnahmemenge nicht untersucht, nur Tests nach DIN 19738	gleichbleibende Resorptionsverfügbarkeit
6 Pflanze-Tier	Metallaufnahme über belastetes Futter (Grassilage)	Metallaufnahme in Ernteprodukte vermindert
7 Tier-Mensch		Nicht untersucht
8 Wasser-Mensch		Nicht untersucht
9 Pflanze Mensch		Nicht relevant

Praktische Projektausführung	Beschreibung
Vorbehandlung	Nicht erforderlich
<i>In-situ</i> Immobilisierung	Bodenzusätze: Kiesschlamm (GS) und eisenhaltige Materialien (Fe); Menge: 3 % (w/w) = 9 kg/m ² = 90 t/ha; Applikationsverfahren im Test: Injektion/Einpresse und Einschlämmen der bewachsenen Fläche
Biomasse-Bewirtschaftung und Nutzung	Ernte: Gras-Biomasse 5 t TM/ha, jährliche Schnitte mit Untersuchung; Biomassennutzung als Futter
Bio- und Bodenmonitoring	Untersuchungen: Bodenwasser 3 mal/Jahr, Aufwuchs/Futter 1 mal/Jahr, Boden alle 5 Jahre
Zeiträumen bis zum Erreichen des Ziels	Bodenzusätze zeigten sofortige Wirkung, Langzeitwirkung gilt nach 10 Jahren als gesichert
Besondere Schwierigkeiten	Anpassen der Ausbringungstechnik (Injektion/Einpresse bzw. Einschlämmung) für große Flächen

Besondere Ergebnisse	Beschreibung
Reduktion des mobilen Metallgehaltes (Cd, Zn, Pb) im Boden	1 M NH ₄ NO ₃ -extrahierbares Cd konnte um >80%, Zn >90% und Pb >90% reduziert werden
Reduktion der Konzentrationen in Pflanzen	Cd- und Pb-Aufnahme in Gräser: - 50 % und damit bis knapp an die EU-Höchstgehalte
Reduktion der Konzentrationen im Sickerwasser	Metallkonzentration nach 10 Jahren Laufzeit: - 60 %
Mikrobielle Aktivität im Boden gesteigert	PLFAs (Phospholipid-Fettsäuren) und Bodenatmung wurde durch die Behandlung gesteigert



Cd in Wegerich nach Zusatz von Kiesschlamm und Rotschlamm (2,5+0,5%); Co=Kontrolle; Ti=Umbruch; Slu=Einschlammung; Inj=Injektion/Einpresse



Zunahme der Bodenatmung; Kurve in blau=Kontrolle, rot=Behandelter Boden



Zn in Wegerich nach Zusatz von Kiesschlamm und Rotschlamm (2,5+0,5%); Co=Kontrolle; Ti=Umbruch; Slu=Einschlammung; Inj=Injektion/Einpresse

Wesentliche Fortschritte in der Laufzeit



Injektion/Einpresse der Bodenzusätze in 2002



Aufwuchs auf Grünland-Parzellen in 2013

Zusammenfassung:

Der Transfer über die wesentlichen Wirkungspfade

- Boden-Pflanze,
- Boden-Grundwasser,
- Pflanze-Tier

konnten durch *in-situ* Immobilisierung wirksam vermindert werden.

Kalkulation / Bilanzierung	Einrichtung	(Pflanzen)Bewirtschaftung	(finanzieller) Ertrag
(Hinweise auf) Kosten	Abhängig von Bodenzusätzen	Übliche Landwirtschaft	Qualität; Einhaltung von Grenzwerten
Behandelte/bewirtschaftete Fläche	100 m ²	100 m ²	
Unsicherheiten bei Vollarwendung	mittel; Einbringungstechnik ist anzupassen; Umbruch wäre gut, führt aber ggf. zu Bodenerosion		

Bei Fragen und weiterem Informationsbedarf

Kontakt	AIT Austrian Institute of Technology GmbH	Dr. Wolfgang Friesl-Hanl	wolfgang.friesl-hanl@ait.ac.at
---------	---	--------------------------	--

Aussagekraft / Grad der Repräsentativität: Gering / Mittel / Hoch

Literatur

- Friesl-Hanl W., M.H. Gerzabek, W.W. Wenzel, W.E.H. Blum (2013). Industrial Waste: Soil Pollution. In: Encyclopedia of Environmental Management. Taylor and Francis: New York, Published online: 01 May 2013; 1430-1433.
- Friesl-Hanl W., G. Waldner, O. Horak, K. Platzer, and M.H. Gerzabek (2013) Risk Assessment and Remediation of a Cd, Pb, and Zn Contaminated Grassland, 12th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements (ICOBTE), 16th- 20th of June, 2013, Athens, Georgia, USA
- Friesl W., Horak O. and Wenzel W., (2004). Immobilization of heavy metals in soils by the application of bauxite residues: pot experiments under field conditions. J. Plant Nutr. Soil Sci. 167, (1) 54-59.
- DIN 19738 (2004): Bodenbeschaffenheit - Resorptionsverfügbarkeit von organischen und anorganischen Schadstoffen aus kontaminiertem Bodenmaterial. 2004-07, Beuth.

4. Zusätzlicher ökonomischer, umweltbezogener und sozialer Nutzen von SBV

SBV können, neben der Gefahrenabwehr und dem Risikomanagement, eine Reihe zusätzlicher Vorteile bieten, in wirtschaftlicher Hinsicht (z.B. Biomasseerzeugung), im sozialen Bereich (z.B. Freizeit und Erholung) und mit Blick auf die Ökologie (z.B. C-Sequestrierung, Wasserfiltration und Sickerwassermanagement, Wiederherstellung der pflanzlichen, mikrobiellen und faunistischen Lebensgemeinschaften), die insgesamt dem Oberbegriff "Ökosystemdienstleistungen" zugeordnet werden können. Dieser zusätzliche Nutzen wurde in der Vergangenheit oft nur unzureichend bei der Bewertung und Auswahl von Sanierungsoptionen betrachtet, stellt jedoch genau den bedeutsamen zusätzlichen Wert der "sanften" Sanierungsstrategien dar. Diese Vorteile zeigen sich beispielsweise in Form von direkten finanziellen Einnahmemöglichkeiten (z.B. aus dem Verkauf von Biomasse), einer Erhöhung des Natur- und Kulturwertes in einem Gebiet (z.B. durch Verbesserung der Boden- und Wasserqualität, Bereitstellen von grüner Infrastruktur, angenehmer und attraktiver (Wohn-) Umgebung etc.), oder durch materielle oder immaterielle indirekte wirtschaftliche Vorteile (z.B. Anstieg der Immobilienwerte, Schaffung von Arbeitsplätzen usw.). Die wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Vorteile durch den Einsatz von SBV sind stark standort- und projektspezifisch. Dennoch gibt es eine Reihe von qualitativen, semi-quantitativen und quantitativen Instrumenten zur Identifizierung und Bilanzierung dieser zusätzlichen Vorteile. Im GREENLAND Entscheidungshilfelinstrument (EHI) finden sich dazu Links zu den folgenden drei Tabellenwerken bzw. Modulen:

- (a) Die „**Brownfield Opportunity Matrix – BOM**“ (Altlasten-Inwertsetzungs-Matrix) wurde im Rahmen des HOMBRE Projekts im 7. Forschungsrahmenprogramm der EU (Nr. 265.097, www.zerobrownfields.eu) entwickelt. Die BOM ist ein Excel-basiertes, qualitatives Screening-Tool, mit dem Entscheidungsträger erkennen können, welche unterschiedlichen Leistungen sie von "sanften" Wiedernutzungsmaßnahmen (einschließlich SBV) auf der Fläche erwarten können, und wie diese Leistungen untereinander verknüpft sind. In Zusammenarbeit von GREENLAND- und HOMBRE-Partnern wurden in der BOM die möglichen Einsatzbereiche und Vorteile der SBV eingearbeitet. Die Matrix kann verwendet werden, um das Spektrum der möglichen positiven Effekte, die durch eine Sanierung oder Revitalisierung realisiert werden könnte, aufzuzeigen sowie die daraus resultierende Wertschöpfung zu erfassen.
- (b) Die SURF-**Indikatoren für Nachhaltigkeit** enthalten verschiedene Leitindikatoren, die bei einer Bewertung der Nachhaltigkeit im Rahmen von Sanierungsprojekten berücksichtigt werden sollten. Die SURF-Indikatoren stellen ein semi-quantitatives Bewertungssystem dar und basieren auf wichtigen ökonomischen, ökologischen und sozialen Einzelindikatoren. Nach Bearbeitung der SURF-Indikatoren innerhalb des EHI wird der Nutzer bei Bedarf per Link auf detailliertere, externe Web-basierte Werkzeuge für eine semi-quantitative und quantitative Bewertung mittels Ökobilanz als Lebenszyklusanalyse (LCA), Kosten-Nutzen-Analyse (CBA) und Multi-Kriterien-Analyse (MCA) verwiesen.

- (c) Ein **Kostenrahmen-Rechner**, der innerhalb des GREENLAND-Projekts entwickelt wurde, verarbeitet die vom Nutzer eingegebenen Kosteninformationen (u.a. Kosten für Standortvorbereitung, Pflanz- und Pflanzenkosten, Standortnutzungskosten, Kosten und Einnahmen der Biomasseproduktion, Kontroll-/Monitoring-Kosten), um den standortspezifischen ökonomischen Wertbeitrag von SBV abschätzen zu können. Dieses Modul wurde unter Verwendung von Daten der Praxisbeispiele aus dem GREENLAND-Netzwerk „kalibriert“; diese Daten liefern zugleich auch Eingabebeispiele für den Benutzer.

Es ist wichtig zu betonen, dass es neben den eher technischen Aspekten der Sanierung auch einer effektiven und nachhaltigen Kommunikationsstrategie mit einem breiten Spektrum von Akteuren bedarf, um sicherzustellen, dass die gesamten potenziellen Vorteile der SBV kommuniziert und dann auch tatsächlich realisiert werden können. Für die wirksame Einbeziehung von Entscheidungsträgern und anderen „stakeholdern“, gerade bei der Anwendung von SBV, finden sich im EHI sowie im Anhang Handreichungen und Leitlinien, z.B. mit Kriterien zur Ermittlung der verschiedenen Profile und Kategorien von Interessengruppen.

5. Anwendungsspektrum für SBV.

5.1 Standortspezifisches Risikomanagement bei „sanfter“ Nachnutzung

Biologisch aktive Böden schließen diejenigen ein, die für die Land- und Forstwirtschaft, grüne Umgebung/Infrastruktur und Landschaftsgestaltung genutzt werden und zugleich Lebensraum für zahlreiche Arten bieten. Damit werden SBV eher dort von besonderem Nutzen sein, wo auch eine "sanfte" Endnutzung des Standorts angestrebt wird. Oft erfolgt die Sanierung und Entwicklung von kontaminierten Standorten hin zu einer sanften Endnutzung mittels Überdeckung durch unbelastetes Bodenmaterial oder über eine Beseitigung der „Hot Spots“ mit anschließender Begrünung. Diese, aber auch technische ex-situ Verfahren der Bodenreinigung (chemische, physikalische oder biologische Reinigungsverfahren) sind weitgehend auf kleinere Flächen beschränkt und zumeist nur bei nachfolgend „harter“ Endnutzung (in der Regel Bebauung) tragfähig, da diese Verfahren für eine sanfte Nachnutzung oftmals einfach zu kostenintensiv sind.

Es gibt zahlreiche Gründe und Argumente für eine sanfte Nachnutzung von kontaminierten Standorten. Der betreffende Standort kann schlicht keine andere gangbare Nutzung zulassen, z.B. aufgrund der Größe oder Lage, aus geotechnischen oder topographischen Gründen oder aufgrund eines schwierigen ökonomischen Umfeldes, infolge (globaler) Veränderungen in der Landnutzung oder des industriellen Wandels. Es kann auch seitens der Stadterneuerung/des Stadtumbaus gute Gründe für die Entwicklung von grüner Umgebung / grüner Infrastruktur geben, insbesondere zur Aufwertung von Bereichen in benachteiligten städtischen Gebieten. Darüber hinaus kann es auch Impulse zu neuer Wirtschaftsentwicklung geben, zum Beispiel durch Anbau und Verwertung von Biomasse. Hier stellt die EU-Richtlinie für erneuerbare Energien (Richtlinie 2009/28 / EC) zudem einen gesteigerten Nachhaltigkeitswert für Biomasse von Grenzertragsflächen, einschließlich

kontaminierten Flächen, heraus. Der Einsatz von SBV kann vollkommen auf eine Biomasseproduktion als Endnutzung abgestimmt werden. Dieses eröffnet eine wichtige und perspektivisch wachsende Rolle für SBV, da sich ein erheblicher Teil des Wertbeitrags aus dem Management von derartigen Flächen künftig aus Erlösen von Biomasse aus SBV ergeben kann.

SBV stellen somit eine alternative kostengünstige Verfahrensweise für Sanierung und Risikomanagement für eine sanfte Nachnutzung dar. Im Vergleich zu herkömmlichen technischen Sanierungsverfahren liegt ihre Attraktivität in den relativ niedrigen Kapitalkosten und durchaus auch in der natürlichen Ästhetik bepflanzter und damit "grüner" Flächen. Der weitere Nutzen einer „ökologischen Begrünung“ von kontaminierten und auch Grenzertragsflächen liegt neben den eigentlichen Ökosystemdienstleistungen (vgl. Kapitel 4) auch in den Bereichen (Umwelt-)Bildung, Wert einer „grünen“ Umgebung/Infrastruktur, C-Sequestrierung sowie in einem nachhaltigen Ressourceneinsatz, z.B. durch Recycling von organischer Substanz, Komposten und anthropogenem Bodenmaterial.

5.2 Spezifisches Anwendungsspektrum

Wie bereits in den Fall- und Erfolgsbeispielen in Kapitel 3 dargestellt, können SBV effektiv im Rahmen einer umfassenden Risikomanagementstrategie auf kontaminierten Standorten eingesetzt werden und gleichzeitig mit zusätzlichen wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Vorteilen punkten. SBV kommen für eine ganze Reihe von Standorten, Schadstoffen, Bodentypen und Klimazonen in Betracht. Sie sind, wie andere Sanierungsstrategien auch, keine fertigen Lösungen „von der Stange“, die immer und für jeden Standort und Schadstoff passen. Es braucht eine standortspezifische Analyse und Beurteilung und in der Regel auch vorab einen kleinflächigen Testeinsatz, dann gelingt auch die Umsetzung von SBV in den Praxismaßstab. Details zu Fragen des Designs und der Implementierung von SBV sind in den technischen Anlagen zu diesem Leitfaden beschrieben. Nachstehend findet sich eine einfache Prüftabelle für die grundsätzliche Anwendbarkeit von SBV sowie Links zu drei komplexeren MS Excel-Tabellen für eine standortspezifische detaillierte Einschätzung (gruppiert nach Verfahren der Phytoextraktion, Phytostabilisierung und Immobilisierung / Phytoexklusion), u.a. mit Blick auf Boden-pH-Werte, Phytotoxizität, Klima, Bodentyp und die Tiefe der Kontamination.

Zweck dieser Tabellenwerke ist es, die mögliche Anwendbarkeit von SBV an einem Standort herauszustellen, NICHT jedoch a priori zu bestätigen, dass SBV eine erfolgreiche Gefahrenabwehr oder ein erfolgreiches Risikomanagement an diesem Standort sicherstellen. Weiterer Input und „Know-how“, in planerischer wie technischer Hinsicht, sind erforderlich, um eine wirklich passende SBV-Strategie zu entwerfen und dann in der Praxis zu implementieren, mit der tatsächlich das Schadstoffrisiko beherrscht wird und die darüber hinaus einen breiten, zusätzlichen Nutzen entfaltet.

Nationale Kontaktstellen für Fragen zu SBV und ihrer Anwendung finden sich auf Seite 1; weitere ergänzende Hinweise und Literatur sind im Kapitel 6 und in den Anhängen aufgeführt.

Kurzanleitungen für den direkten Einstieg

A Sind SBV auch für Ihren Standort geeignet?

Grundsatzfragen:	Falls JA, sind SBV potenziell geeignet?
Erfordert Ihr Standort eine sofortige Sanierung und Flächenentwicklung?	Eher nicht (außer Immobilisierung / Phytoexklusion, die sofortige positive Effekte haben können)
Sind die nationalen/regionalen rechtlichen Regelungen bei Ihnen auf Basis von Boden-Gesamtkonzentrationen festgelegt?	Eher nicht für Phytoextraktion, aber möglicherweise für einige andere SBV
Ist die Fläche versiegelt/bebaut oder befinden sich darauf aktuell genutzte Gebäudekomplexe?	Eher nicht (es besteht die Notwendigkeit, die Versiegelung oder Gebäude zu entfernen und eine Bodenschicht so vor- und aufzubereiten, dass diese ein Pflanzenwachstum ermöglicht)
Sollen die natürlichen Bodenfunktionen während und nach der Sanierung erhalten bleiben?	JA
Ist die zu sanierende Fläche eher groß und die Kontamination auf moderatem Niveau?	JA (selbst wenn die (Phyto)Toxizität im Boden hoch ist, können Vorbehandlungen und Bodenzusatzstoffe den Einsatz von SBV ermöglichen)
Ist die Kontamination oberflächennah, d.h. im Bereich bis max. 5 - 10 Meter unter der Geländeoberfläche Tiefe?	JA (abhängig von der Durchwurzelbarkeit; sofern die Kontamination nur bis ca. 1 Meter Tiefe reicht, können die meisten Pflanzen eingesetzt werden. Eine tiefer liegende Kontamination kann mithilfe von Bäumen behandelt werden, möglicherweise verbunden mit Maßnahmen, die eine tiefere Durchwurzelung ermöglichen).
Sind die ökonomischen Erwartungen für das Eingreifen und die Nutzung „harter“, technischer Sanierungsmaßnahmen gering?	JA
Möchten Sie den Standort für eine "sanfte" Nachnutzung herrichten (Biomasseproduktion, städtische Grünflächen etc.)?	JA

B Welche Metall(oid)e lassen sich durch SBV effektiv sanieren?

Schadstoff	SBV	Phytoextraktion (Entfernen des mobilen/ bioverfügbaren Anteils)	Phytostabilisierung (auch unterstützte / verstärkte Phytostabilisierung)	In situ Immobilisierung / Phytoexklusion
Arsen		✓✓*	✓**	✓**
Cadmium		✓✓	✓✓	✓✓
Chrom		-	✓	✓✓
Kupfer		✓✓	✓	✓✓
Blei		✓	✓	✓✓
Nickel		✓✓	✓✓	✓✓
Zink		✓✓	✓	✓

Die Anzahl der der Häkchen steht für die Aussagesicherheit, abgeleitet aus Daten der Freilandversuche des Greenland-Netzwerks. Weitere Informationen finden sich in den einzelnen Beschreibungen der Standorte (Anlage 7).

Für Arsen: * teilweise Einschränkungen, falls auch durch Cu belastet; ** Bei unterstützter Phytostabilisierung & in situ Immobilisierung durch Zufuhr von organischer Substanz kann die As-Fixierung reversibel sein (im Zuge der Alterung und des Abbaus der organischen Substanz).

Auf der GREENLAND-Homepage unter <http://www.greenland-project.eu> finden Sie den Link zum detaillierten, auf MS Excel-basierten GREENLAND Entscheidungshilfeinstrument (EHI) mit Aussagen zu den standortspezifischen Einsatzmöglichkeiten von SBV (Phytoextraktion, Phytostabilisierung und Immobilisierung/Phytoexklusion)

6. Ausgewählte weitere Informationsquellen (in Englisch).

- Sanfte Sanierung für schwermetall- und spurenelementbelastete Flächen: das Greenland-Projekt <http://www.greenland-project.eu/>
- ITRC Anleitung für Phytotechnologien <http://www.itrcweb.org/Guidance/GetDocument?documentID=64>
- USEPA Faktensammlung zu Phytotechnologien (einschließlich Verlinkungen zu Erfolgsbeispielen) <http://www.epa.gov/tio/download/remed/phytotechnologies-factsheet.pdf>
- Anwendungsbeispiele auf US Entschädigungsfond-Flächen (USEPA, 2014) <http://www.epa.gov/superfund/accomp/news/phyto.htm>
- CLU-IN Überblick über Phytotechnologien <https://www.clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/Phytotechnologies/cat/Overview/>
- Weitere Beispiele großflächiger Anwendung von Phytotechnologien http://www.clu-in.org/products/phyto/search/phyto_list.cfm
- Phytoremediation kontaminierter Böden und Grundwässer auf Standorten mit gefährlichen Abfällen/Sondermülldeponien http://www.clu-in.org/download/remed/epa_540_s01_500.pdf
- Phytoremediation kontaminierter Böden und Grundwässer: Lektionen aus der Praxis <http://www.au-plovdiv.bg/cntnr/fiziologia/statii/Vassilev/23.pdf>
- Weiden für energetische Nutzung und Phytoremediation in Schweden <http://www.fao.org/docrep/008/a0026e/a0026e11.htm>
- Leitfaden für die Beteiligung von Interessengruppen an SBV und Fallbeispiele <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23973957>, <http://www.greenland-project.eu/>