



1. Einleitung

Böden enthalten natürlicherweise Schwermetalle. In vielen Ausgangsgesteinen, aus denen im Zuge der Verwitterung unsere Böden entstanden sind, sind Schwermetalle in unterschiedlichen Konzentrationen enthalten und damit auch in Böden vorzufinden. Sie können jedoch bei zu hohen Konzentrationen bei Pflanzen, Tier und Mensch zu Schädigungen führen.

Schwermetalle sind per Definition Elemente mit einer Dichte von mehr als $4,5 \text{ g cm}^{-3}$. Sie sind jedoch nicht grundsätzlich für Pflanzen, Tiere oder Menschen toxisch. Einige Schwermetalle sind in kleinen Mengen für Pflanzen, Tiere bzw. Mensch essenzielle Mineralstoffe (z.B. Eisen). In den letzten Jahren werden in der Fachliteratur mit dem Begriff Schwermetalle hauptsächlich diejenigen mit potenziell toxischer Wirkung bezeichnet. Potenziell toxische Wirkungen auf lebende Organismen sind für folgende Schwermetalle nachgewiesen oder werden in Abhängigkeit von der Menge vermutet: Antimon (Sb), Bismut (Bi), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kobalt (Co), Kupfer (Cu), Mangan (Mn), Molybdän (Mo), Nickel (Ni), Quecksilber (Hg), Thallium (Tl), Uran (U), Vanadium (V), Zink (Zn) und Zinn (Sn) (Kabata, 1984; Neumüller, 1977; Schoer, 1982).

Über die natürlichen Konzentrationen hinaus werden potenziell toxische Schwermetalle durch menschliche, hauptsächlich industrielle Aktivitäten, in Böden eingetragen. Schon seit Jahrhunderten wurden durch die Verhüttung von schwermetallhaltigen Erzen Schwermetalle in den natürlichen Lebensraum eingetragen. Durch die fortschreitende Industrialisierung und die damit verbundenen Produktionstechniken, die schwermetallhaltige Abfälle und Emissionen verursachen, wurden Böden, Wasser und Luft zunehmend mit Schwermetallen kontaminiert.

Da Schwermetalle als chemische Elemente in Böden nicht abgebaut werden und manche auch nur geringfügig in tiefere Bodenschichten verlagert werden (McGrath, 1987), können sie in Böden bis zu Konzentrationen angereichert sein, die eine Nutzung von Böden zur Nahrungsmittelproduktion verbieten oder zumindest einschränken.

Die Einstufung von mit Schwermetallen belasteten Böden wird durch das Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG; Anonym, 1998a) geregelt. Hierin werden Prüf- bzw. Belastungswerte formuliert, bei deren Überschreitung Anbau Richtlinien bis hin zu Anbauverboten für bestimmte Pflanzenarten bzw. Nutzungsformen in Kraft treten.



Bodenbelastungen sind Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Bodens, bei denen die Besorgnis besteht, dass Bodenfunktionen nachhaltig beeinträchtigt werden (§ 2 Bodenschutzgesetz (Anonym, 1998a)). Im Gegensatz dazu sind potenzielle Bodenbelastungen stoffliche Veränderungen des Bodens, bei denen Besorgnis besteht, dass eine Bodenfunktion infolge z.B. eines sich ändernden pH-Wertes oder der Mineralisierung der organischen Substanz entsteht (Prüess, 1992).

Bei belasteten Böden handelt es sich in der Mehrzahl um Böden, auf denen Hafen- und Flussschlickbaggergut seit Jahrzehnten abgelagert wurde (Herms und Tent, 1982), um Rieselfelder kommunaler Abwasseranlagen sowie um Überschwemmungsgebiete im Einzugsbereich ehemaliger Berg- bzw. Hüttenwerke und durch Haldenmaterial kontaminierte Böden. In der Vergangenheit führte auch die Anwendung von stark schwermetallhaltigen Klärschlämmen als Dünger zu einer Akkumulation von Schwermetallen in Böden. Darüber hinaus entstehen auch durch gasförmige Emissionen von Schwermetallen aus der Industrie Kontaminationen von Böden über den Luftpfad, aber auch durch Bergwerke (Schoer und Nagel, 1980).

Durch technischen Fortschritt und strengere gesetzliche Bestimmungen wurde in den letzten Jahrzehnten eine Verminderung der Schwermetalleinträge in die Umwelt erreicht. Für die derzeit als belastet eingestuften Böden gibt es zwei grundsätzliche Verfahrensweisen.

Zum einen wird der Status quo erhalten und es werden Möglichkeiten gesucht, um die Wirkungen der Bodenbelastung mit Schwermetallen auf die Nahrungskette zu minimieren. Bei gering mit Schwermetallen belasteten Böden kann dies durch Anbau Richtlinien und -verbote geschehen. Diese tragen dem derzeitigen Stand der Wissenschaft hinsichtlich der Aufnahme von Schwermetallen durch Pflanzen und der Wirkung von Schwermetallen im tierischen und menschlichen Organismus Rechnung (Anonym, 1998a).

Nicht nur die notwendige Minimierung der Schwermetallbelastung der Nahrungskette, sondern auch die Gefahr einer Auswaschung von mobilen Schwermetallfraktionen ins Grundwasser erfordert eine Sanierung der belasteten Böden. Zwar ist die Aufbereitung von mit Schwermetallen belastetem Rohwasser durch technische Maßnahmen kein Problem (Prüess, 1992), jedoch treibt der erforderliche Aufwand für die Wasseraufbereitung die Kosten für die Bereitstellung von qualitativ einwandfreiem Trinkwasser in enorme Höhen (Groth, 1989). Sogenannte Bodensicherungsmaßnahmen wie Aufforstung oder Aufkalkung etc. (Kloke, 1982) können angewandt werden, um die Gefahr einer Verschlechterung der Grund- und Oberflächenwasserqualität zu vermindern.



Eine Abdeckung des belasteten Bodens mit unbelastetem Boden bringt zwar eine Reduzierung der Schwermetallgehalte in den darauf angebauten Pflanzen mit sich (van Driel et al., 1995), vermindert jedoch nur die Oberflächenerosion von belastetem Bodenmaterial.

Alternative Nutzungsformen, wie die Überbauung und Versiegelung der belasteten Böden oder die Deponierung des kontaminierten Bodenmaterials als Sondermüll sind in der Regel nicht praktikabel. Zusätzlich bleibt die Schwermetallbelastung der Böden sowohl durch Überbauung als auch durch Versiegelung in vollem Umfang erhalten.

Die zweite Vorgehensweise bei der Sanierung von mit Schwermetallen belasteten Böden ist die Dekontamination, also grundsätzlich die Entfernung der Schwermetalle aus den belasteten Böden. Durch die Dekontamination soll kurzfristig den Belangen des Grundwasserschutzes Rechnung getragen werden, indem das Risiko der Auswaschung von Schwermetallen wie Cadmium und Zink vermindert wird; langfristig soll wieder eine eingeschränkte bzw. uneingeschränkte Nutzung der Böden (z.B. zur Nahrungsmittelproduktion) ermöglicht werden.

Zurzeit stehen zur Dekontamination von schwermetallbelasteten Böden hauptsächlich technische Methoden wie z.B. die Waschung und die Säureextraktion zur Verfügung. Darüber hinaus werden sog. Bodensicherungsmaßnahmen wie z.B. die Aufforstung, Aufkalkung etc. in der Literatur diskutiert (Kloke, 1982).

Die Anwendung von technischen Dekontaminationsverfahren hat entscheidende ökonomische und auch ökologische Nachteile. Die Waschung bzw. die Säurebehandlung von belastetem Bodenmaterial stellen einen nicht rückgängig zu machenden Eingriff in die Ökologie der Standorte dar. Bei diesen Methoden wird das belastete Bodenmaterial mit großem technischem und finanziellem Aufwand dem Standort entnommen und entsprechend dem angewandten Verfahren behandelt. Die danach vorhandenen unbelasteten Rückstände der Böden können nicht mehr in der Landwirtschaft eingesetzt werden, sondern werden teilweise als Baumaterial verwendet (Krebs und Gupta, 1994). Schadstoffreiche Rückstände werden im Allgemeinen deponiert und sind so von einer weiteren Verwendung, wie etwa der Rückgewinnung der Schwermetalle, ausgeschlossen.

Diese Nachteile der technischen Dekontaminationsverfahren können durch die Anwendung einer biologischen Dekontamination schwermetallbelasteter Böden mittels Pflanzen umgangen werden. Die Vorteile einer Biodekontamination mittels Pflanzen (Phytoextraktion) sind: Entzug der Schwermetalle an Ort und Stelle ohne Beeinträchtigung der Bodenstruktur bzw. -



fruchtbarkeit, Wahrung der natürlichen Boden- bzw. Standortverhältnisse, Einsparung kostenintensiver technischer Verfahren der Bodenbehandlung, Einsparung von Ressourcen durch die Rückgewinnung der Schwermetalle und nachfolgender Zuführung zu industriellen Produktionsprozessen. Als Nachteil dieses Biodekontaminationsverfahrens ist jedoch die Dauer über mehrere Jahrzehnte zu nennen.

Da die Möglichkeiten einer Dekontamination von mit Schwermetallen (insbesondere Tl, Cd und Zn) belasteten Flächen durch Pflanzen vielfach nur anhand von Gefäßversuchen untersucht wurden, sollte in der vorliegenden Promotionsarbeit mit Hilfe einer Literaturrecherche sowie mehreren Feld- und Gefäßversuchen die Aufnahme der Schwermetalle Tl, Cd und Zn durch Pflanzen im Hinblick auf die Möglichkeiten zur Reduzierung der Schwermetallbelastung von Nahrungs- und Futterpflanzen und zur Phytoextraktion schwermetallbelasteter Böden untersucht werden. Besonderes Augenmerk sollte auch auf die praktische Durchführbarkeit einer Phytoextraktion gelegt werden. Bei wiederholtem Anbau der gleichen Pflanzenarten sind Ertragsdepression durch Nachbaukrankheiten bzw. gehäuften Schädlingsbefall zu erwarten.



2. Literaturübersicht

In der Literatur sind erst in den letzten Jahren wenige Arbeiten zur Fragestellung der Phytoextraktion erschienen. Dagegen sind Veröffentlichungen zur Schwermetallaufnahme verschiedener Pflanzenarten sehr zahlreich. Allerdings handelt es sich hierbei hauptsächlich um Versuche in Nährlösungen und in Gefäßen mit Böden, wobei die Pflanzen in der Regel bereits im Jugendstadium geerntet werden. Aus diesen Veröffentlichungen können nur begrenzt Daten für Modellrechnungen zum Schwermetallentzug gewonnen werden.

Tab. 2.1 zeigt eine Übersicht von Publikationen, die sich mit Biodekontamination durch Pflanzen bzw. mit Schwermetallkonzentrationen verschiedener Pflanzenarten beschäftigen. Nicht in allen Arbeiten wurden konkrete Angaben zu Entzügen einzelner Schwermetalle gemacht, so dass teilweise eine Berechnung aufgrund der in den Veröffentlichungen dargestellten Schwermetallkonzentrationen und Trockensubstanzerträge erfolgte (siehe Tab. 2.2). Da nur mit sehr wenigen Pflanzenarten Feldversuche durchgeführt wurden, mussten zusätzlich Daten aus Gefäßversuchen berücksichtigt werden.

Nicht berücksichtigt wurden Veröffentlichungen von Versuchen, bei denen die Schwermetallbelastung des Bodens durch Schwermetallzugabe in Salzform durchgeführt wurde. Durch Schwermetallzugabe in Salzform nehmen Pflanzen sowohl in Gefäßversuchen (Verloo et al., 1982; Korcak und Fanning, 1985) als auch unter Feldversuchsbedingungen wegen der höheren Pflanzenverfügbarkeit (Bell et al., 1991) deutlich höhere Mengen an Cd und Zn auf als z.B. nach langjähriger Klärschlammdüngung.

Tab. 2.1: Literaturzitate zur Biodekontamination von mit Schwermetallen belasteten Böden

Literaturzitat:	Pflanzenart:	Schwermetalle		
		Cd	Zn	Tl
Baker et al. (1994)	<i>Thlaspi caerulescens</i> L.		X	
Böhm et al. (1992)	<i>Polygonum sachalinense</i> L. <i>Linum usitatissimum</i>	X		
Crößmann (1984)	<i>Brassica napus</i> L.			X
Haase (1992)	<i>Polygonum sachalinense</i> L.	X	X	
Haase (1988)	<i>Polygonum sachalinense</i> L.	X	X	
Herms u. Tent (1982)	<i>Zea mays</i> L.	X		
Hoffmann et al. (1982)	Versch. Pflanzenarten			X
Horak et al. (1994)	<i>Triticum aestivum</i> L.	X	X	
	<i>Trifolium pratense</i> L.	X	X	
	<i>Beta vulgaris</i> L.	X	X	
Krämer u. König (1982)	<i>Triticum aestivum</i> L.	X		
	Grünland	X		
Marquard et al. (1995)	<i>Polygonum</i> -Arten	X	X	
	<i>Fagopyrum</i> -Arten	X	X	
	<i>Rumex</i> -Arten	X	X	
McGrath (1995)	<i>Thlaspi caerulescens</i> L.		X	
	<i>Thlaspi ochroleucum</i> L.		X	
	<i>Cardaminopsis halleri</i> L.		X	
	<i>Alyssum tenium</i> L.		X	
	<i>Alyssum lebiacum</i> L.		X	
	<i>Alyssum murale</i> L. <i>Brassica napus</i> L.		X X	
Metz u. Wilke (1994)	<i>Polygonum sachalinense</i> L.	X	X	
Metz u. Wilke (1993)	<i>Polygonum sachalinense</i> L.	X	X	
	<i>Miscanthus sinensis</i> L.	X		
	<i>Zea mays</i> L.	X	X	
Metz u. Wilke (1992)	<i>Polygonum sachalinense</i> L.	X		
	<i>Zea mays</i> L.	X		



Literaturzitat:	Pflanzenart:	Schwermetalle		
		Cd	Zn	Tl
Sauerbeck u. Lübben (1991)	Fruchtfolge (Modellrechnung)	X	X	
Scholl u. Metzger (1981)	<i>Brassica napus</i> L.			X
Schweder et al. (1994)	<i>Polygonum sachalinense</i> L.	X		

2.1. Cadmium-Entzüge verschiedener Pflanzenarten

Die Cadmiumentzüge der in Tab. 2.1 aufgeführten Arbeiten sind in Tab. 2.2 zusammengefasst. Die berechneten Cd-Entzüge wurden in der Tabelle mit (k) gekennzeichnet. Um die Ergebnisse der einzelnen Versuche vergleichen zu können, wurden die Entzüge pro ha berechnet; zusätzlich wurde der relative Cd-Entzug zum gesamten Cd-Bodenvorrat (Königswasserextraktion; KW-Extraktion) dargestellt.

Die Tiefe des belasteten Bodenhorizontes wurde mit 30 cm, die Lagerungsdichte des Bodens mit $1,3 \text{ kg dm}^{-3}$ den Berechnungen zugrunde gelegt. Auch die Ergebnisse der Gefäßversuche wurden so auf Entzüge umgerechnet, um die Unterschiede zwischen den in Feldversuchen und Gefäßversuchen ermittelten Schwermetallentzügen aufzuzeigen.

Wurden in den Veröffentlichungen keine Angaben zum Zeitpunkt des Beginns der Belastung gemacht, sind die einzelnen Versuchsergebnisse nur eingeschränkt vergleichbar. Die durch z.B. Klärschlammdüngung dem Boden zugeführten Schwermetalle altern im Laufe der Zeit (Brümmer et al., 1988; Fischer und Brümmer, 1993), wodurch die Pflanzenverfügbarkeit in der Regel mit der Zeit abnimmt.

In Feldversuchen wurden die höchsten Cd-Entzüge mit sog. Hyperakkumulatorpflanzen (*Thlaspi caerulescens* und *Polygonum sachalinense*) erreicht (Baker et al., 1994; Marquard et al., 1995; Schweder et al., 1994). Insgesamt wurden relative Entzüge von nicht mehr als 0,3 % des gesamten Cd-Bodenvorrates im Feldversuch bzw. 4,5 % im Gefäßversuch erzielt. Schweder et al. (1994) erreichten bei ca. zweifach höheren Cd-Konzentrationen im Boden zwar doppelt so hohe Cd-Entzüge wie Marquard et al. (1995), aber nur durch die zusätzliche Ernte der schwermetallreichen Wurzeln.



Dies deutet auf eine unterschiedliche Pflanzenverfügbarkeit der Schwermetalle in den Versuchsböden hin. Die von Pflanzen aufgenommenen Schwermetallmengen werden sowohl durch den Gesamtgehalt als auch den pH-Wert, den Stoffbestand (C_{Org} , Tongehalt), das Redoxpotential sowie die Nährstoffversorgung des Bodens beeinflusst (Delschen und Werner, 1989; Hornburg und Brümmer, 1990; Sauerbeck und Styperek, 1987; Sommer und Marschner, 1986). Zusätzlich sind Schwermetalle im Boden in unterschiedlichen Bindungsformen gebunden (Brümmer, 1986), deren Pflanzenverfügbarkeit mit abnehmender Stabilität zunimmt. In Feldversuchen wurde nachgewiesen, dass zwischen den Cd- und Zn-Konzentrationen in den Pflanzen und den mit Neutralsalzlösungen (NH_4NO_3 ; CaCl_2) extrahierten Konzentrationen in den Böden enge Korrelationen bestehen (Prüess, 1992; Hornburg et al., 1993).

Wesentlich höhere Cd-Entzüge als in Feldversuchen wurden mit der gleichen Pflanzenart *Polygonum sachalinense* in Gefäßversuchen erzielt (Tab. 2.2). In Gefäßversuchen erreichen in der Regel Pflanzen durch die intensive Durchwurzelung des gesamten Bodenvolumens und die damit verbundenen stärkeren Rhizosphäreneffekte deutlich höhere Schwermetallgehalte als in Feldversuchen. Beeinflusst durch die Nährstoffversorgung der Pflanzen und die Pufferkapazität der Böden kann es zur Mobilisierung von z.B. Zn kommen, das dadurch vermehrt pflanzenverfügbar wird (Marschner und Römheld, 1996; Marschner, 1995). Durch die besseren Wachstumsbedingungen (gute Struktureigenschaften, gleichbleibende Wasserversorgung, höhere Bodentemperaturen etc.) kann die Schwermetallaufnahme der Pflanzen bei Gefäßversuchen deutlich höher liegen als in Feldversuchen. Daher sind die Ergebnisse von Gefäßversuchen nicht unmittelbar auf Feldversuchsbedingungen übertragbar.