

Hannes Kurz

---

**SCHWERMETALLAUFNAHME  
VERSCHIEDENER PFLANZENARTEN:  
Möglichkeiten zur Reduzierung der Schwermetall-  
belastung von Nahrungs- und Futterpflanzen und  
zur Phytoextraktion schwermetallbelasteter Böden**

---



**Cuvillier Verlag Göttingen**  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag





Institut für Kulturpflanzenwissenschaften  
Fachgebiet Rhizosphäre und Düngung  
Universität Hohenheim  
Prof. Dr. V. Römheld

***Schwermetallaufnahme verschiedener Pflanzenarten:  
Möglichkeiten zur Reduzierung der Schwermetallbelastung  
von Nahrungs- und Futterpflanzen  
und zur Phytoextraktion schwermetallbelasteter Böden***



Dissertationsschrift  
zur Erlangung des Doktorgrades der Agrarwissenschaften  
vorgelegt der Fakultät Agrarwissenschaften  
der Universität Hohenheim, Stuttgart

von  
Hannes Kurz  
aus Kusterdingen-Wankheim  
2011



## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2012  
Zugl.: Hohenheim, Univ., Diss., 2011

978-3-86955-994-0

D 100

1. Prodekan:	Prof. Dr. Andreas Fangmeier
1. berichtende Person und Prüfer:	Prof. Dr. Volker Römheld
2. berichtende Person und Prüfer:	Prof. Dr. Hans Schenkel
3. Prüfer:	Prof. Dr. Andreas Fangmeier
Eingereicht am:	13.01.2011
Tag der mündlichen Prüfung:	10.06.2011

Die vorliegende Arbeit wurde am 13.04.2011 von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als „Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Agrarwissenschaften“ angenommen.

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2012

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2012

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-994-0



## Unserem Mäusle

Eigentlich hätten wir vier,  
doch Du bist nicht mehr hier.  
Drei Wochen war Sonnenschein,  
doch mit dem Regen warst Du nicht mehr mein.  
Keinem wünsche ich diesen Schmerz,  
es reißt einem aus das Herz.  
Das Leben ist leer,  
Freude und Mut kommen nur langsam wieder daher.

*Unserer Tochter Emilia Francesca*

*geboren am 3.9.2004*

*gestorben am 23.9.2004*





# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>11</b>
<b>2. Literaturübersicht</b>	<b>15</b>
2.1. Cadmium-Entzüge verschiedener Pflanzenarten	17
2.2. Abschätzung der zeitlichen Dauer einer Biodekontamination von Cd-belasteten Böden	20
2.3. Zink-Entzüge verschiedener Pflanzenarten	23
2.4. Abschätzung der zeitlichen Dauer einer Biodekontamination von Zink-belasteten Böden	25
2.5. Thallium-Entzüge durch Pflanzen	26
2.6. Abschätzung der zeitlichen Dauer einer Biodekontamination von Tl-belasteten Böden	27
2.7. Schlussfolgerungen und Ausblick	28
<b>3. Versuchsfragen und Arbeitshypothesen</b>	<b>30</b>
3.1. Schwermetallaufnahme durch Nahrungs- und Futterpflanzen	30
3.2. Phytoextraktion von Schwermetallen:	30
<b>4. Versuchsansätze</b>	<b>32</b>
4.1. Versuch zur Reduzierung der Schwermetallaufnahme von Nahrungs- und Futterpflanzen	32
4.2. Versuche zur Phytoextraktion schwermetallbelasteter Böden	33
4.2.1. Versuch mit Neckarbaggergut (NBG-Versuch)	33
4.2.2. Klärschlammversuch	33
4.2.3. Gefäßversuche zur Tl-Aufnahme von Sommerraps und Grünkohl	33
4.2.4. Gefäßversuch zum wiederholten Anbau von Grünkohl	33
4.2.5. Aufnahme und Verlagerung von radioaktiv markiertem Tl durch verschiedene Brassicaceen in Nährlösungskultur	34
<b>5. Material und Methoden</b>	<b>35</b>
5.1. Material	35
5.1.1. Verwendete Sorten	35
5.1.2. Methoden	39
5.1.2.1. Bodenanalysen	39
5.1.2.2. Pflanzenanalysen	39
5.1.3. Düngung	40
5.1.3.1. Düngung der Feldversuche	40
5.1.3.2. Düngung der Gefäßversuche	42
5.1.3.2.1. Düngung der Gefäßversuche zur Tl-Aufnahme von Sommerraps und Grünkohl	42
5.1.3.2.2. Düngung des Gefäßversuches zur Überprüfung der Entwicklung der Tl-Aufnahme von Grünkohl nach wiederholtem Anbau	43
5.2. Feld- und Gefäßversuche	44
5.2.1. Feldversuche	44
5.2.1.1. Klärschlammversuch	44
5.2.1.1.1. Versuchsaufbau und Durchführung	44
5.2.1.1.2. Schwermetallgehalte im Boden des Klärschlamm-Versuches	46
5.2.1.2. Neckarbaggergut-(NBG-)Versuch	48
5.2.1.2.1. Versuchsaufbau und Durchführung	49
5.2.1.2.2. Schwermetallgehalte im Boden des Neckarbaggergut-Versuches	52
5.2.1.3. Thallium-Versuch	54
5.2.1.3.1. Versuchsaufbau und Durchführung	54
5.2.1.3.2. Schwermetallgehalte im Boden des Thallium-Versuchs	57



5.2.2.	Gefäßversuche	59
5.2.2.1.	Gefäßversuche zur Ermittlung sortenspezifischer Unterschiede in der Tl-Aufnahme	59
5.2.2.2.	Gefäßversuch zur Überprüfung der Entwicklung der Tl-Aufnahme von Grünkohl nach wiederholtem Anbau	60
<b>6.</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>62</b>
6.1.	Thallium	62
6.1.1.	Genotypische Unterschiede in der Tl-Aufnahme ausgewählter Nahrungs- und Futterpflanzen	62
6.1.1.1.	Tl-Konzentrationen der von 1994-96 angebauten Pflanzenarten	62
6.1.1.2.	Tl-Transferfaktor für die angebauten Pflanzenarten	66
6.1.1.3.	Sortenunterschiede in der Tl-Aufnahme von Sommerraps und Grünkohl	67
6.1.2.	Phytoextraktion von Tl-belasteten Böden	70
6.1.2.1.	Überprüfung der Entwicklung der Tl-Aufnahme, TS-Produktion und Tl-Entzüge von Grünkohl nach wiederholtem Anbau	73
6.1.2.2.	Aufnahme und Verlagerung von radioaktiv markiertem Thallium durch verschiedene Brassicaceen	76
6.2.	Cadmium	78
6.2.1.	Genotypische Unterschiede in der Cd-Aufnahme	78
6.2.1.1.	Cd-Aufnahme in Nahrungs- und Futterpflanzen angebaut auf der Thallium-Versuchsfläche der Versuchsstation Hohenheim	78
6.2.1.2.	Cd-Aufnahme von Maislinien und –Hybriden angebaut auf der Neckarbaggergut-Versuchsfläche	84
6.2.1.3.	Steigerung der Cd-Entzüge von Mais durch zusätzliche Ernte der Wurzeln bzw. durch Anbau von Zwischenfrüchten auf der Klärschlammversuchsfläche	92
6.2.1.3.1.	Klärschlamm-Versuchsfläche	92
6.2.1.3.2.	Versuchsfläche „Neckarbaggergut“	93
6.3.	Zink	98
6.3.1.	Genotypische Unterschiede in der Zn-Aufnahme	98
6.3.1.1.	Zn-Aufnahme in Nahrungs- und Futterpflanzen angebaut auf der Thallium-Versuchsfläche der Versuchsstation Hohenheim	98
6.3.1.2.	Zn-Aufnahme von Maislinien und –Hybriden angebaut auf der Neckarbaggergut-Versuchsfläche	103
6.3.1.3.	Steigerung der Zn-Entzüge von Mais durch zusätzliche Ernte der Wurzeln bzw. durch Anbau von Zwischenfrüchten	110
6.3.1.3.1.	Versuchsfläche mit Neckarbaggergut	110
6.3.1.3.2.	Klärschlamm-Versuchsfläche	113
6.3.2.	Schwermetallgehalte und -Entzüge verschiedener Pflanzenarten auf der Neckarbaggergut-Versuchsfläche	124
<b>7.</b>	<b>Diskussion</b>	<b>126</b>
7.1.	Thallium	126
7.1.1.	Pflanzenartenunterschiede	126
7.1.2.	Sortenunterschiede:	127
7.1.3.	Reduzierung von Tl in der Nahrungskette	128
7.1.4.	Phytoextraktion auf Tl-belasteten Flächen	131
7.1.5.	Aufnahme von radioaktiv markiertem Thallium	131
7.2.	Cadmium	132
7.2.1.	Pflanzenartenunterschiede	132
7.2.2.	Sortenunterschiede	133
7.2.3.	Phytoextraktion	133



7.3. Zink	135
7.3.1. Pflanzenartenunterschiede	135
7.3.2. Sortenunterschiede	135
7.3.3. Phytoextraktion	136
<b>8. Schlussbetrachtung</b>	<b>137</b>
<b>9. Zusammenfassung</b>	<b>139</b>
<b>10. Summary</b>	<b>142</b>
<b>11. Literatur</b>	<b>145</b>
<b>12. Lebenslauf</b>	<b>154</b>
<b>13. Danksagungen</b>	<b>155</b>
<b>14. Erklärung</b>	<b>156</b>



## Abbildungsverzeichnis:

<b>Abb. 2.1:</b> Schematische Darstellung des Zeitverlaufs der Biodekontamination von Böden mit hoher Belastung von Cd und anderen Schwermetallen:.....	22
<b>Abb. 5.1:</b> Feldplan des Klärschlammversuchs.....	45
<b>Abb. 5.1:</b> Feldplan NBG-Versuch 1994. ....	50
<b>Abb. 5.2:</b> Feldplan NBG-Versuch 1995. ....	51
<b>Abb. 5.3:</b> Feldplan TI-Versuch 1994. ....	55
<b>Abb. 5.4:</b> Feldplan TI-Versuch 1995. ....	56
<b>Abb. 5.5:</b> Variantenplan Gefäßversuch zur Überprüfung der Entwicklung der TI-Aufnahme von Grünkohl nach wiederholtem Anbau .....	61
<b>Abb. 6.1:</b> TI- Konzentrationen im Spross von 28 Sommerrapsgenotypen (Gefäßversuch mit TI-belastetem Boden 1997). ....	67
<b>Abb. 6.2:</b> TI- Konzentrationen im Spross von 8 Sommerrapsgenotypen (Feldversuch auf dem TI-belastetem Boden 1997). ....	68
<b>Abb. 6.3:</b> TI- Konzentrationen im Spross von 15 Grünkohlgenotypen (Gefäßversuch mit TI-belastetem Boden 1997). ....	69
<b>Abb. 6.4:</b> TI- Konzentrationen im Spross von 8 Grünkohlgenotypen (Feldversuch auf dem TI-belastetem Boden 1997). ....	70
<b>Abb. 6.5:</b> Schematische Darstellung des Zeitverlaufs der Biodekontamination von Böden mit hoher Belastung an TI und anderen Schwermetallen. ....	72
<b>Abb. 6.6:</b> Entwicklung der TI-Aufnahme, TS-Produktion und TI-Entzüge von Grünkohl nach wiederholtem Anbau (Gefäßversuch 1997) .....	74
<b>Abb. 6.7:</b> Entwicklung der TI-Aufnahme, TS-Produktion und TI-Entzüge von Grünkohl nach wiederholtem Anbau (Gefäßversuch 1997) .....	75
<b>Abb. 6.8:</b> Entwicklung der TI-Aufnahme, TS-Produktion und TI-Entzüge von Grünkohl nach wiederholtem Anbau (Gefäßversuch 1997) .....	76
<b>Abb. 6.9:</b> Cd-Konzentrationen von Maislinien; NBG-Versuch 1994. ....	85
<b>Abb. 6.10:</b> Beziehung zwischen den Cd-Konzentrationen im Restspross und in den Wurzeln von Maislinien; NBG-Versuch 1994.....	86
<b>Abb. 6.11:</b> Cd-Konzentrationen von Maislinien und Maishybriden; NBG-Versuch 1995. ....	87
<b>Abb. 6.12:</b> Cd-Entzüge von Maislinien und Maishybriden; NBG-Versuch 1995.....	88
<b>Abb. 6.13:</b> Cd-Konzentrationen der 1996 auf dem NBG-Versuch angebauten Maislinien und Maishybriden .....	89
<b>Abb. 6.14:</b> Cd-Entzüge durch Maislinien und Maishybriden NBG-Versuch 1996.....	90
<b>Abb. 6.15:</b> Cd-Konzentrationen verschiedener Pflanzenarten 1996.....	96
<b>Abb. 6.16:</b> Cd-Entzüge verschiedener Pflanzenarten 1996. ....	97
<b>Abb. 6.17:</b> Zn-Konzentrationen von Maislinien, NBG-Versuch 1994.....	104
<b>Abb. 6.18:</b> Beziehung zwischen den Zn-Konzentrationen im Restspross und in den Wurzeln von Maislinien; NBG-Versuch 1994.....	105
<b>Abb. 6.19:</b> Zn-Konzentrationen von Maislinien und Maishybriden; NBG-Versuch 1995. ..	106
<b>Abb. 6.20:</b> Zn-Entzüge von Maislinien und Maishybriden; NBG-Versuch 1995. ....	107
<b>Abb. 6.21:</b> Zn-Konzentrationen von Maislinien und Maishybriden; NBG-Versuch 1996. ..	108
<b>Abb. 6.22:</b> Zn-Entzüge von Maislinien und Maishybriden; NBG-Versuch 1996. ....	109
<b>Abb. 6.23:</b> Zn-Konzentrationen verschiedener Pflanzenarten 1996.....	124
<b>Abb. 6.24:</b> Zn-Entzüge verschiedener Pflanzenarten 1996. ....	125



## Tabellenverzeichnis:

<b>Tab. 2.1:</b> Literaturzitate zur Biodekontamination von mit Schwermetallen belasteten Böden	16
<b>Tab. 2.2:</b> Übersicht über Cd-Entzüge durch verschiedene Pflanzenarten.	19
<b>Tab. 2.3:</b> Modellrechnung der zeitlichen Dauer einer Biodekontamination von Cd-belasteten Böden mit <i>Polygonum sachalinense</i> L. bzw. <i>Thlaspi caerulescens</i> L.	21
<b>Tab. 2.4:</b> Übersicht über Zn-Entzüge durch verschiedene Pflanzenarten.	24
<b>Tab. 2.5:</b> Modellrechnung der zeitlichen Dauer einer Biodekontamination von Zn-belasteten Böden mit <i>Thlaspi caerulescens</i> L. und <i>Cardaminopsis halleri</i> L.	25
<b>Tab. 2.6:</b> Tl-Entzüge durch verschiedene Pflanzenarten	26
<b>Tab. 2.7:</b> Modellrechnung der zeitlichen Dauer einer Biodekontamination von Tl-belastetem Boden mit <i>Brassica napus</i> L.	27
<b>Tab. 5.1:</b> Auf der Tl-belasteten Versuchsfläche von 1994-1996 angebaute Pflanzenarten mit botanischen Namen und Sorten	36
<b>Tab. 5.2:</b> Übersicht der angebauten Pflanzenarten in den Jahren 1994 bis 1996	37
<b>Tab. 5.3:</b> Hauptnährstoffgehalte der Feldversuchsböden	40
<b>Tab. 5.4:</b> Nmin-Werte der Feldversuchsböden	41
<b>Tab. 5.5:</b> Nmin-Sollwerte der einzelnen Pflanzenarten	42
<b>Tab. 5.6:</b> Düngung der Gefäßversuche	43
<b>Tab. 5.7:</b> Düngung des Gefäßversuches Wiederholter Anbau von Grünkohl	43
<b>Tab. 5.8:</b> Schwermetallgehalte (Königswasserextrakte) der Klärschlamm-Versuchsfläche	47
<b>Tab. 5.9:</b> NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> -extrahierbare (mobile) Schwermetallgehalte der Klärschlamm-Versuchsfläche	48
<b>Tab. 5.10:</b> Schwermetallgehalte (Königswasserextrakte) der NBG-Versuchsfläche	53
<b>Tab. 5.11:</b> Mobile (NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> -extrahierbare) Schwermetallgehalte der NBG-Versuchsfläche	53
<b>Tab. 5.12:</b> Schwermetallgehalte (Königswasserextrakt) der Thallium-Versuchsflächen	58
<b>Tab. 5.13:</b> Mobile (NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> -extrahierbare) Schwermetallgehalte der Thallium-Versuchsflächen.	58
<b>Tab. 6.1:</b> Tl-Konzentrationen der 1994 -1996 auf dem Kontrollboden und dem Tl-belasteten Boden angebauten Pflanzenarten	63
<b>Tab. 6.2:</b> Tl-Transferfaktoren der verzehrbaren Pflanzenteile der 1995-1996 angebauten Pflanzenarten.	66
<b>Tab. 6.4:</b> Tl-Entzüge von Sommerraps und Grünkohl und erforderliche Zeit für die Absenkung der Tl-Konzentration	71
<b>Tab. 6.5:</b> Tl-Konzentrationen, TS-Erträge und Tl-Entzüge von Sommerraps und Grünkohl nach unterschiedlichen Vorfrüchten und prozentualer Anteil am Tl-Gesamtvorrat im Boden	73
<b>Tab. 6.6:</b> Aufnahme und Verlagerung von radioaktiv markiertem <sup>201</sup> Tl bei Rotkohl, Weißkohl, <i>Brassica juncea</i> und Grünkohl	77
<b>Tab. 6.7:</b> Cd-Konzentrationen der 1994 auf dem Kontrollboden und dem Tl-Boden angebauten Pflanzenarten	79
<b>Tab. 6.8:</b> Cd-Konzentrationen der 1995 auf dem Kontrollboden und dem Tl-Boden angebauten Pflanzenarten	80
<b>Tab. 6.9:</b> Cd-Konzentrationen der 1996 auf dem Kontrollboden und dem Tl-Boden angebauten Pflanzenarten	82



<b>Tab. 6.10:</b> Gegenüberstellung der Cd-Entzüge durch die Maishybriden und der Mengen an mobilem ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -extrahierbarem) bzw. gesamtem Cadmium im Boden (Königswasserextraktion).....	92
<b>Tab. 6.11:</b> Cd-Konzentrationen und -Entzüge durch die oberirdische Sprossmasse und Wurzeln von Mais (NBG-Versuch, 1994). ....	94
<b>Tab. 6.12:</b> Cd-Konzentrationen und -Entzüge durch die oberirdische Masse von Winterzwischenfrüchten (NBG-Versuch, 1995).....	95
<b>Tab. 6.13:</b> Cd-Entzüge durch die oberirdische Sprossmasse von Mais nach Winterzwischenfruchtanbau (NBG-Versuch, 1995). ....	95
<b>Tab. 6.14:</b> Anteil der Cd-Entzüge verschiedener Pflanzenarten am mobilem ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -extrahierbarem) bzw. gesamtem Cadmium (KW-Extraktion) im Boden. ....	97
<b>Tab. 6.16:</b> Zn-Konzentrationen der 1995 auf dem Kontrollboden und dem TI-Boden angebauten Pflanzenarten.....	100
<b>Tab. 6.17:</b> Zn-Konzentrationen der 1996 auf dem Kontrollboden und dem TI-Boden angebauten Pflanzenarten.....	102
<b>Tab. 6.18:</b> Gegenüberstellung der Zn-Entzüge der Maishybriden und den mobilen ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -extrahierbaren) bzw. gesamten Mengen an Zink im Boden (Königswasser-Extraktion). ....	110
<b>Tab. 6.19:</b> Zn-Konzentrationen und -Entzüge durch die oberirdische Sprossmasse und Wurzeln von Mais (NBG-Versuch, 1994). ....	111
<b>Tab. 6.20:</b> Zn-Konzentrationen und -Entzüge durch die oberirdische Masse von Winterzwischenfrüchten (NBG-Versuch, 1995).....	112
<b>Tab. 6.21:</b> Zn-Entzüge durch die oberirdische Sprossmasse von Mais nach Winterzwischenfruchtanbau (NBG-Versuch, 1995). ....	112
<b>Tab. 6.22:</b> Zn-Konzentrationen und Zn-Entzüge von Winterrübsen 1994/95.....	113
<b>Tab. 6.23:</b> Gegenüberstellung der Zn-Entzüge durch Winterrübsen und der Menge an mobilem ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -extrahierbarem) und gesamtem Zink (Königswasserextrakt) im Boden (0-60 cm) 1994/95.....	114
<b>Tab. 6.24:</b> Zn-Konzentrationen von Mais 1995 .....	115
<b>Tab. 6.25:</b> Relativer Anteil der Entzüge durch Wurzeln am gesamten Zn-Entzug von Mais 1995.....	116
<b>Tab. 6.26:</b> Gegenüberstellung der Zn-Entzüge durch Mais und der gesamten Menge an Zink im Boden (Königswasserextraktion) 1995.....	117
<b>Tab. 6.27:</b> Gegenüberstellung der Zn-Entzüge durch Mais und der Menge an mobilem ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -extrahierbarem) Zink im Boden 1995. ....	118
<b>Tab. 6.28:</b> Zn-Entzüge von Winterrübsen und Mais und relative Erhöhung durch Zwischenfruchtanbau 1995. ....	119
<b>Tab. 6.29:</b> Zn-Konzentrationen und -Entzüge von Sommerrübsen 1996.....	120
<b>Tab. 6.30:</b> Gegenüberstellung der Zn-Entzüge durch Sommerrübsen und den Mengen an mobilem ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -extrahierbarem) und gesamtem Zink (Königswasserextrakt) im Boden 1996.....	120
<b>Tab. 6.31:</b> Zn-Konzentrationen von Mais 1996. ....	121
<b>Tab. 6.32:</b> Relativer Anteil der Wurzel-Entzüge am gesamten Zn-Entzug von Mais 1996..	122
<b>Tab. 6.33:</b> Gegenüberstellung der Zn-Entzüge durch Mais und den Mengen an gesamtem (Königswasserextraktion) Zink im Boden 1996. ....	122
<b>Tab. 6.34:</b> Gegenüberstellung der Zn-Entzüge durch Mais und den Mengen an mobilem ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -extrahierbarem) Zink im Boden 1996. ....	123
<b>Tab. 6.35:</b> Zn-Entzüge von Sommerrübsen und Mais 1996.....	123



**Tab. 6.35:** Anteil der Zn-Entzüge verschiedener Pflanzenarten am mobilem (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-extrahierbarem) und gesamtem Zink (KW-Extraktion) im Boden. .... 125

**Tab. 7.1:** Gegenüberstellung der Anbauempfehlungen und -verbote des zu Projektbeginn gültigen Bodenschutzgesetzes von Baden-Württemberg für Tl-belastete Flächen und der Tl-Konzentrationen auf Frischsubstanzbasis in den zum Verzehr geeigneten Pflanzenteilen der angebauten Pflanzenarten (1994-1996)..... 129

**Liste von häufig benutzten Abkürzungen und Begriffen in alphabetischer Reihenfolge:**

BgVV	Bundesinstitut für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin (bis 2001 seit 2002 BfR Bundesinstitut für Risikobewertung)
Bl	Blätter
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
CaCl <sub>2</sub>	Calciumchlorid-Extraktion
CAL	Calcium-Acetat-Lactat Extraktionsmethode
Cd	Cadmium
k	berechnet aus Angaben der Autoren bzw. eigene Annahmen
k.E.	keine Ernte möglich
KS	Klärschlamm
KW	Königswasser
NBG	Neckarbaggergut
Restspross	restliche oberirdische Sprosssteile abzüglich den getrennt geernteten/beprobten Pflanzenteilen
Sp	Spross, wenn allein verwendet gesamte oberirdische Sprossmasse
Tl	Thallium
TS	Trockensubstanz
VwV	Verwaltungsvorschrift
Wu	Wurzeln
Zn	Zink





## 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.