



**Phytoremediation –  
Möglichkeiten,  
Kenntnislücken und  
Forschungsbedarf im  
Hinblick auf einen  
Praxiseinsatz**

**Ergebnisse und Schlussfolgerungen des Fachgespräches  
am 29./30. November 1999  
im Fraunhofer-Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie,  
Schmallenberg**

Zusammengestellt von

**Dr. Monika Herrchen  
Dr. Werner Kördel**

Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Diese TEXTE-Veröffentlichung kann bezogen werden bei  
**Vorauszahlung von DM 15,-- (7,67 Euro)**  
durch Post- bzw. Banküberweisung,  
Verrechnungsscheck oder Zahlkarte auf das

Konto Nummer 4327 65 - 104 bei der  
Postbank Berlin (BLZ 10010010)  
Fa. Werbung und Vertrieb,  
Ahornstraße 1-2,  
10787 Berlin

Parallel zur Überweisung richten Sie bitte  
eine schriftliche Bestellung mit Nennung  
der **Texte-Nummer** sowie des **Namens**  
und der **Anschrift des Bestellers** an die  
Firma Werbung und Vertrieb.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr  
für die Richtigkeit, die Genauigkeit und  
Vollständigkeit der Angaben sowie für  
die Beachtung privater Rechte Dritter.  
Die in dem Fachgespräch geäußerten Ansichten  
und Meinungen müssen nicht mit denen des  
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt  
Postfach 33 00 22  
14191 Berlin  
Tel.: 030/8903-0  
Telex: 183 756  
Telefax: 030/8903 2285  
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet II 5.1  
Prof. Dr. Dr. Konstantin Terytze

Berlin, März 2001

## **Inhaltsverzeichnis**

	Seite
Einführung	3
Ausgangspunkt	6
Diskussion im Verlauf des Fachgespräches	8
1. Mechanismen der Schadstoffaufnahme durch Pflanzen	8
1.1. Wesentliche Schadstoffe	8
1.2. Aufnahme und Transportprozesse	9
1.3. Pflanzenverfügbare Schadstoffanteile	10
1.4. Hyperakkumulierer, Excluder-Pflanzen	18
1.5. Sortenabhängigkeit	20
2. Einsatzfelder der Phytoremediation	23
2.1. Einsatzfelder diskutiert anhand von Fallbeispiele	23
2.2. Fruchfolge zwischen akkumulierenden und nicht akkumulierenden Pflanzen	25
2.3. Sonderstandorte / Sondereinsätze	26
2.4. Möglichkeiten der Verwertung / Entsorgung der geernteten Biomasse	27
3. Mögliche Gefahrenquellen und Minimierung	28
3.1. Eignung von Komplexbildnern und Lösungsvermittlern	28
3.2. Strategien zur Minimierung der Tiefenverlagerung von Schadstoffen (Fokussierung auf organische Stoffe)	30
4. Schlussfolgerungen	31
5. Forschungsbedarf im Hinblick auf einen Praxiseinsatz	38

Annex 1: Abbildungen aus den Originalbeiträgen der Teilnehmer

Annex 2: Teilnehmerliste



## **Einführung**

**Motivation: Phytoremediation als Beitrag zum Umgang mit belasteten landwirtschaftlichen Böden**

Von RDir Dr. Dietrich von Borries, BMU

Nachdem die BBodSchV, in der Prüf- bzw. Maßnahmenwerte für den Pfad Boden - Pflanze festgelegt werden, am 17.07.1999 in Kraft getreten ist, kommt der Frage, wie mit belasteten landwirtschaftlichen Böden umgegangen wird, erhöhte praktische Bedeutung zu.

Die zuständigen Bodenschutzbehörden der Länder müssen bei Überschreitung der im Anhang II Nr. 2 aufgeführten Prüf- und Maßnahmenwerte für Äcker und Nutzgärten einerseits und für Grünland andererseits prüfen, welche Auflagen sie erteilen. Nach § 10 Abs. 2 BBodSchG müssen die durch Beschränkungen der Bodennutzung erfolgenden wirtschaftlichen Nachteile - soweit sie eine besondere Härte bedeuten - nach Maßgabe des Landesrechtes angemessen ausgeglichen werden.

Die Bundesregierung hat den im Bundesrat erteilten Maßgaben, mit denen die Prüf- und Maßnahmenwerte für den Pfad Boden-Nutzpflanze erheblich ausgedehnt wurden, zugestimmt. Dadurch hat die praktische Bedeutung der Frage, welche Auflagen zu erteilen sind, wesentlich zugenommen. Es ist daher erforderlich, den Bodenschutzbehörden möglichst umfassende Informationen über kosteneffiziente Auflagen bereitzustellen.

Die Schadstoffbelastung von Pflanzen kann über den Boden, über Luft und über Regen- bzw. Bewässerungswasser erfolgen. Bei allen Pfaden folgt die Aufnahme durch aktive oder passive Vorgänge an der Pflanzenoberfläche und wird durch physikochemische Vorgänge in der Grenzschicht (Absorption, Diffusion, Gleichgewichtseinstellung) wesentlich modifiziert.

Die Aufnahme von Schadstoffen aus dem Boden erfolgt über die Wurzeln der Pflanzen durch aktive Aufnahme, durch Aufnahme mit dem Wasserstrom und durch Diffusion. Dabei ist der Chemismus und die Kinetik in der Rhizosphäre, die ihrerseits durch die Pflanzen gesteuert werden, von großer Bedeutung. Daneben erfolgt eine Schadstoffaufnahme in oberirdische Pflanzenteile über regenbedingte Anhaftung von Bodenteilchen, über Deposition aufgewirbelten Staubes und über Diffusion aus der bodennahen Luft und deren Austausch mit der Bodenluft. Welche Pfade jeweils relevant sich hängt von Eigenschaften des Schadstoffes, des Bodens und der Pflanze ab, ihr Zusammenwirken entscheidet darüber wie wirksam die Mechanismen auf den einzelnen Transferpfaden sind. Durch gezielte Experimente zur Unterbrechung einzelner Transferpfade hat die Kenntnis über die Details der Transfermechanismen in den letzten Jahren stark zugenommen (s. Delschen et al. UWSF. Z. Umweltchem. Ökotox. 11 (2) 79-87 (1999); Diese Kenntnisse können wesentlich dazu beitragen, angemessene Lösungen für den Umgang mit belasteten Böden zu erarbeiten.

Zum Umgang mit belasteten landwirtschaftlichen Böden bieten sich grundsätzlich folgende Strategien an:

- Dekontamination
- Sicherung
- Umwidmung / Nutzungsänderung
- Nutzungsanpassung

Rechtssystematisch sind die ersten beiden Strategien als Sanierung anzusehen, die letzteren als Schutz und Beschränkungsmaßnahmen.

Umwidmung bzw. Nutzungsänderung zu Siedlungs- oder Verkehrsflächen zur Aufforstung oder für den Naturschutz bedeuten den langfristigen Verzicht auf landwirtschaftliche Nutzung.

Nutzungsanpassung bedeutet den Verzicht auf solche Kulturen, die für den jeweiligen Schadstoff empfindlich sind und schränken damit die Fruchtfolge ein. In vielen Fällen könnte der Übergang zu Dauerkulturen oder nachwachsenden Rohstoffen mögliche Gefahren ausschließen; klimatische Voraussetzung und Imageprobleme könnten diese Möglichkeit jedoch einschränken.

Als Sicherungsmaßnahme kommt die Überdeckung mit unbelastetem Boden in Frage, bei Schadstoffen, die im wesentlichen durch anhaftende Bodenteilchen oder Diffusion aus bodennaher Luft im Austausch mit der Bodenluft in die Pflanzen übergehen, auch die Abdeckung des Bodens durch Mulchmaterial oder Mulchfolien. Eine weitere Form der Sicherung ist die Demobilisierung der pflanzenverfügbaren Schadstoffanteile, deren Nachhaltigkeit ist allerdings zu belegen (Fixierung von Schwermetallen durch Eisenverbindungen).

Als Dekontaminationsmaßnahmen kommen für landwirtschaftliche Böden aus Kostengründen nur Verfahren in Frage, die „in situ“ erfolgen können. Nur sofern neben Nutzpflanzen auch andere Schutzgüter unmittelbar betroffen sind können aufwendigere Lösungen geboten sein. Zu den „in-situ“-Verfahren gehört der stimulierte biologische Abbau organischer Stoffe durch Mikroorganismen (land farming) aber auch die Metabolisierung von Schadstoffen oder ihre Akkumulation in der Biomasse durch gezielt angebaute Pflanzen. Diese Phytoremediation genannte Methodik wird seit einigen Jahren international erforscht und teilweise in Modellvorhaben eingesetzt. Das dabei gesammelte Wissen soll zusammengefasst und für die Praxis verfügbar gemacht werden.

Die genannten Grundstrategien können auch miteinander kombiniert werden, z. B. indem Pflanzen angebaut werden, deren Produkte schadstoffarm sind, oder unempfindliche gegen Schadstoffgehalte, zugleich jedoch in anderen Pflanzenteilen Schadstoffe akkumulieren. Auch ein Wechsel von Fruchtarten, die zur Dekontamination und zur Ertragsbildung

angebaut werden, ist denkbar; auf diese Weise ließen sich Dekontamination und Schutzmaßnahmen miteinander verbinden.

Das Fachgespräch soll zusammentragen, welche Möglichkeiten bestehen, bei schädlichen Bodenveränderungen landwirtschaftlich genutzter Böden bestehende Gefahren durch gezielten Anbau geeigneter Pflanzen abzuwehren.

Folgenden Teilziele sollten angestrebt werden:

- Den Kenntnisstand zur Leistungsfähigkeit der Phytoremediation zusammenzufassen,
- die kritischen Bereiche herauszuarbeiten, die beim praktischen Einsatz besonderer Berücksichtigung bedürfen,
- Einsatzfelder aufzuzeigen, die möglicherweise wirtschaftlich realisierbar sind,
- offene, vorrangig abzuklärende Fragen und zugehörige Forschungsempfehlungen abzuleiten.

Der im Dezember 1997 in der Phase der fachlichen Vorbereitung der BBodSchV durchgeführte internationale Workshop „Pflanzenbelastung auf kontaminierten Standorten“ in dem auch die Phytoremediation als eine mögliche Verfahrensweise zur Gefahrenabwehr behandelt wurde, kann als Ausgangspunkt dienen. Folgenden Fragen sollten vertieft behandelt werden:

- Welche Kenntnisse liegen zur Dynamik des Gleichgewichtes zwischen Schadstoffgesamtgehalten und pflanzenverfügbarer Fraktion vor?
- Wie kann diese Dynamik beeinflusst werden und welche Gefahren entstehen dabei möglicherweise für das Grundwasser (Einsatz synthetischer Komplexbildner, Einsatz pflanzlicher Reststoffe, Einfluss der Standortverhältnisse auf Verlagerungsprozesse, Abbaubarkeit von Komplexbildnern)?
- Wie kann die Verwertung und Entsorgung der geernteten Biomasse erfolgen und welche Kosten und Erträge sind damit voraussichtlich verbunden?
- Lassen sich geeignete Fruchtfolgen aus akkumulierenden und nicht akkumulierenden Kulturpflanzen gestalten?
- Welche Methoden zur Untersuchung und Bewertung des Erfolges der Maßnahmen gibt es?
- Bestehen spezielle Engpässe und durch welche Forschungsaufgaben können sie behoben werden?

## Ausgangspunkt

Die Phytoremediation wird als eine aussichtsreiche Methode insbesondere zur Dekontamination großflächiger, schwächer belasteter Flächen diskutiert. Die Methode nutzt die Fähigkeit einer Reihe von Wild- und Kulturpflanzen - sogenannte Hyperakkumulatoren - größere Mengen an Schwermetallen in oberirdischen Pflanzenteilen aufzunehmen, wobei zwischen fünf grundlegend verschiedenen Prozessen unterschieden wird. Nur mit drei der fünf Phytosanierungstechniken, der Phytoextraktion, der Phytodegradation und der Phytovolatilisierung kann je nach Kontaminationstyp und Bodeneigenschaft ein echter Reinigungs-Effekt erzielt werden. Diese Prozesse führen zu einer Eliminierung von Schadstoffen aus dem Boden, während Phytoimmobilisierung und Phytostabilisierung eine Festlegung der Schadstoffe bewirken.

Pflanzen mit hyperakkumulierenden Eigenschaften wurden u.a. gefunden für Nickel, Zink, Blei, Cadmium, Kobalt, Kupfer, Arsen und Selen.

Bei der Phytoremediation von schwermetallbelasteten Flächen zeigt sich, dass die Pflanzenaufnahme in der Regel dann hoch ist, wenn die Metalle in einer bioverfügbarer, mobilen Form vorliegen. Die Fähigkeit von Pflanzen, Elemente und damit auch Schadstoffe aufzunehmen, steht in engem Zusammenhang mit dem Vermögen der Wurzeln, Veränderungen im umgebenden Medium Boden herbeizuführen, so zum Beispiel die Veränderung des pH-Wertes, der zu einer Mobilisierung führen kann. Darüber hinaus kann der pH-Wert selbstverständlich durch Zugabe von Dünger oder Kalk geändert werden.

Neben den Phytosiderophoren werden für die Metallmobilisierung synthetische (Beispiel: EDTA) oder aus Reststoffen (Beispiel: Hydrolysate) gewonnene Komplexbildner eingesetzt. Alle Schritte, die auf der einen Seite zur erhöhten Pflanzenaufnahme führen, resultieren jedoch auf der anderen Seite in einer Metallmobilisierung und damit – unter entsprechenden hydrologischen Bedingungen – in einer Grundwassergefährdung.

Aufgrund der genannten Fakten ist eine Stoffflussanalyse unter Durchführung einer Massenbilanz und Aufklärung der einzelnen Eliminierungspfade einschließlich der Berücksichtigung der hydraulischen Standortbedingungen erforderlich.

Diskussionsbasis und wissenschaftlichen Hintergrund für das vorliegende Fachgespräch bildet der Workshop „Pflanzenbelastung auf kontaminierten Standorten“, am 1./2. Dezember 1997 in Schmallenberg. Zusammenfassende Aussagen zur Phytoremediation von mit Schwermetallen respektive organischen Stoffen belasteten Böden konnten folgendermaßen getroffen werden:

## **Schwermetalle**

- Nennenswerte Pflanzenaufnahmen lassen sich nur erreichen, wenn zusätzlich lösungsvermittelnde Substanzen vorhanden sind. Sie können z. B. durch Zusatz von EDTA oder Pflanzenkombinationen erreicht werden, wobei die akkumulierende Pflanze zusammen mit einer Pflanzenart angebaut wird, die besonders viel Biotenside (Wurzelexsudate) ausscheidet.
- Der Unterschied der Metallaufnahme zwischen verschiedenen Pflanzen ist beträchtlich. Wesentlich ist der Entzug aus der Fläche, der sich aus Akkumulationspotential und Ertrag zusammensetzt. Somit müssen „Hyperakkumulierer“ mit hohem Biomasseertrag mithin die optimalen Pflanzen darstellen.
- Insgesamt dauert es mehrere Jahrzehnte bis ein Standort über die Pflanzenaufnahme gereinigt wird. Dies kann gegebenenfalls durch gentechnisch optimierte Pflanzen verbessert werden.
- Eine Reinigung findet nur in dem mit Feinwurzeln durchzogenen Boden statt; somit werden nur oberflächennahe Kontaminanten erfasst.
- Vorliegende Ergebnisse sollten durch eine exakte Bilanzierung überprüft werden, da bei bisherigen Versuchen oft eine Verlagerung (Austrag) der Schwermetalle, bedingt durch die chelatisierenden Zusatzstoffe, nicht mit erfasst wurde (Grundwassergefährdung).

## **Organische Schadstoffe**

- Die Aufnahme besonders von schwer löslichen Kontaminanten durch Pflanzen scheint gering. Damit ist eine flächenhafte Sanierung über Pflanzenaufnahme nicht möglich.
- Durch die Bodenbearbeitung und Pflanzenbewuchs können jedoch die Bedingungen für einen mikrobiologischen Abbau der Kontaminanten stark verbessert werden, z. B. Erhöhung der mikrobiellen Bioverfügbarkeit durch Wurzelexsudate.

## **Diskussion im Verlauf des Fachgespräches**

Vorbemerkung:

Im folgenden wird unter den im Fachgesprächs-Programm angegebenen Themenschwerpunkten die Diskussion in Form einer Ergebnisdarstellung wiedergegeben.

### **1. Mechanismen der Schadstoffaufnahme durch Pflanzen**

#### **1.1 Wesentliche Schadstoffe**

Die Identifizierung wesentlicher Schadstoffe, deren Eliminierung durch Einsatz der Phytoremediation erfolgen kann, lässt sich sowohl auf Basis vorhandener Erfahrungen mit Hauptkontaminanten auf bereits untersuchten Flächen oder Verdachtsflächen durchführen oder aber unter Nutzung von Stofflisten mit bodenrelevanten Stoffen, zum Beispiel:

- Liste der Klärschlammverordnung

Quelle: Klärschlammverordnung vom 15.4.92; BGBl. I S. 912, geändert am 6.3.97; BGBl. I S. 446 ,

- LAGA-Liste altlastenrelevanter Stoffe

- Stoffliste zur Ableitung von Prüfwerten für den Direktpfad Boden Mensch

Quelle: Bachmann et al., Ableitungsmaßstäbe für Maßnahme- und Prüfwerte gemäß § 8 des Gesetzes zum Schutz des Bodens (BBodSchG) vom 17.3.1998 sowie § 4 Abs. 1 der Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BodSChV) zur Veröffentlichung im Bundesanzeiger.

Zur Identifizierung von Schadstoffen, für die möglicherweise die Phytosanierung eine gut geeignete Sanierungsmethodik darstellt, bietet sich die erstgenannte Herangehensweise an, da auf diese Weise Erfahrungen mit der weniger universell als vielmehr gezielt einsetzbaren Methodik zum Tragen kommen. Es konnten folgende Schadstoffe identifiziert werden:

Metallverbindungen:

Cd, Cr, Cu, Zn, Ni, Pb, Tl

Metall-organische Verbindungen:

As, Hg, Sb, Sn, Ba (u.w.)

Organische Verbindungen:

MKWs, PAKs, HCH, Nitroaromaten, PCBs.

Nährstoffe werden absprachegemäß nicht berücksichtigt.

## 1.2 Aufnahme- und Transportprozesse

### Grundkenntnisse aus der Pflanzenphysiologie

Da eine Reihe von Metallverbindungen essentiell für Pflanzen sind, sind in der Pflanzenphysiologie Transferprozesse in die Pflanzenwurzel gut untersucht worden und weitgehend bekannt. Die Abbildungen 1 und 2 (siehe Annex 1, Beitrag von Prof. Metz) zeigen die grundsätzlichen Wechselwirkungen zwischen Bodensubstanz / Mikroorganismen – Bodenlösung – Pflanzenwurzel, die zu einer Aufnahme der Metallverbindungen führen, sowie im Detail den durch Rhizosphäreneffekt und Mykorrhiza beeinflussten Transfer in die Pflanzenwurzel. Die einzelnen Teilprozesse lassen sich methodisch gut differenzieren und sind von daher experimentell weitgehend abgesichert. Einzelaspekte, wie beispielsweise der Einfluss von Mykorrhiza, werden gegenläufig beobachtet und in der Literatur beschrieben: je nach Mykorrhiza-Stämmen können diese eine excludierende und mobilisierende, oder aber eine demobilisierende Funktion haben. Auch wenn der Einfluss der Mykorrhiza durch den Einfluss der Pflanzensorten überlagert zu werden scheint, können dennoch ausgeprägte Unterschiede bis zu +/- 50% in der Schwermetallaufnahme zwischen den verschiedenen Mykorrhiza-Stämmen beobachtet werden.

### Beeinflussende Variable

Grundsätzlich sind eine Vielzahl – zum Teil gegenläufiger – Variablen für den Schwermetalltransfer Boden – Pflanze und damit für die Effizienz der Phytosanierung verantwortlich. Eine gute Übersicht gibt folgende Tabelle (modifiziert nach einem Beitrag von Prof. Metz):

Ursachen des Schwermetalltransfers Boden – Pflanze:

Standort entscheidet über die Verfügbarkeit	Pflanze besitzt Aufnahmemechanismen
– Bodengesamtgehalte	– Excluderpflanzen
– Löslichkeitsbedingungen	– Indikatorpflanzen
– Sorptionseigenschaften	– Akkumulatorpflanzen
– Synergismen von Elementen und Verbindungen	– Transport in Pflanzenorgane
	– Sortenabhängigkeit

Neben der Beeinflussung der Metall-Verfügbarkeit durch die Bio-/Geochemie des Standortes hat dieser darüber hinaus einen Einfluss auf die optimalen Pflanzengesellschaften. Hyperakkumulierer (Definition und weitere Information siehe Kapitel 1.4) wachsen beispielsweise gut auf bio-/geogenen Anomalien, die schützenswerte Regionen sind und von daher

selbstverständlich nicht verändert werden dürfen. Diese Regionen stellen jedoch gute Forschungsflächen dar zur Erfassung der Eigenschaften und Aufnahmemechanismen von Hyperakkumulierern sowie zur Selektion derartiger Pflanzen. Diese Informationen können in Hinblick auf das Verhalten auf anthropogen belasteten Standorten genutzt und ggf. übertragen werden.

### **1.3 Pflanzenverfügbare Schadstoffanteile**

Ein ausgewiesenes Ziel der Phytosanierung ist es, unter Anwendung der Phytoextraktion, der Phytodegradation oder der Phytovolatilisierung eine möglichst große Menge einer Kontamination aus dem belasteten Boden zu eliminieren und so einen Reinigungseffekt zu erzielen. (Die durch Phytoimmobilisierung und Phytostabilisierung bewirkte Festlegung der Schadstoffe wird an dieser Stelle nicht diskutiert). Die genannten Techniken bedürfen jedoch einer möglichst effizienten Aufnahme der Schadstoffe durch die Pflanze, wobei selbstverständlich nur die pflanzenverfügbaren Schadstoffanteile aufgenommen werden können.

Für die prognostische Abschätzung des Sanierungsverlaufes und -erfolges sind eine Reihe wesentlicher Aspekte zu berücksichtigen:

1. Optimum zwischen zu minimierender Bodenkonzentration und phytotoxisch wirkender Bodenkonzentration ggf. unter Beachtung synergetischer Effekte bei Mischkontaminationen
2. Bestimmung der pflanzenverfügbaren Schadstoffanteile
3. Erfassung der Dynamik der Schadstofffreisetzung bei Phytosanierung

### **Beziehung zwischen Belastungsgrad und Pflanzenaufnahme/Pflanzengehalte**

Zur Optimierung des Verhältnisses zwischen Bodenbelastungsgrad und phytotoxischer Konzentration sollten entsprechende Voruntersuchungen durchgeführt werden. Deren Notwendigkeit zeigt folgende Tabelle (Beitrag Prof. Metz), die Cd-Gehalte in Sachalinknöterich mit dem Bodenbelastungsgrad in Beziehung setzt.

Schadstoffkonzentration	Cd-Gehalt im Blatt [mg/kg]	Cd-Gehalt im Stengel [mg/kg]
unbelastet	1,85	0,9
Cd-Gehalt im Boden = festgelegter Grenzwert für Cd	12,03	4,83
Cd-Gehalt = 5 facher Grenzwert	23,53	9,37
Cd-Gehalt = 10 facher Grenzwert	34,73	10,73
Cd-Gehalt = 20 facher Grenzwert	35,53	14,97
hochbelastet	34,26	14,97

Es wird deutlich, dass bei sehr hohen Bodenbelastungsgraden die Schadstoff-Aufnahme nicht weiter zunimmt, da an den Pflanzen phytotoxische Schäden auftreten, die deren Wachstum minimieren. So ist zwar nominell, d.h. absolut gesehen, der Schadstoffentzug bei hohen Bodenbelastungen beachtlich, jedoch verringert sich der prozentuale Anteil an phytoextrahierbarer Kontamination aufgrund der Pflanzenwachstumsreduzierung. Bei Versuchsinterpretation sind außerdem durch Mischkontaminationen möglicherweise hervorgerufene synergetische Effekte zu berücksichtigen.

Die Abbildung 3 im Annex 1 (Beitrag Prof. Metz) zeigt in eindrucksvoller Weise die Abhängigkeit des Optimums Bodenbelastung / maximale Pflanzenaufnahme in die Wurzel von der Pflanzenart selbst: während bei Knöterich-, Winterroggen- und Maiswurzeln eine Zunahme der Aufnahmekapazität selbst bei hochbelasteten Böden beobachtet werden kann, nimmt die Aufnahmerate in die Chinaschilfwurzel bei dem höchstbelasteten Boden ab. Bei Kupfer / Cadmium-Mischkontaminationen kann für die vier soeben genannten Pflanzenarten das Erreichen eines Plateaus für den Cadmium-Entzug bei sehr hohen Konzentrationen beobachtet werden (siehe Abb. 4, Annex 1, Beitrag Prof. Metz).

Gute Korrelationen zwischen Bodengehalt und Pflanzengehalt (Sonnenblumenblätter und -samen) werden für Cadmium beobachtet, während die entsprechende Beziehung für Zink erheblich schlechter ist. Allerdings ist zu beachten, dass im letztgenannten Beispiel durch die Wahl eines anderen Standortes eine weitere Variable eingeführt worden ist, die bei Interpretation ebenfalls berücksichtigt werden muss (Abb. 5 – 7, Annex 1, Beitrag Prof. Horak).

### Bestimmung pflanzenverfügbarer Schadstoffanteile

Es ist wissenschaftlich allgemein akzeptiert, den mobilen, im Porenwasser gelösten Anteil an Metallverbindungen und organischen Stoffen als den für **Organismen verfügbaren** Teil anzusehen.

Quellen:

- W.J.G.M. Peijnenburg et al.: Implementation of bioavailability for policy and environmental management purposes, in: Bioavailability as a key property in terrestrial ecotoxicity assessment and evaluation, M. Herrchen, R. Debus and R. Pramanik-Strehlow (eds.), Fraunhofer IRB, Stuttgart (1996);
- W. Kördel and K. Hund: Extraction concepts to determine the available fraction of sorbed substances, in: Bioavailability as a key property in terrestrial ecotoxicity assessment and evaluation, M. Herrchen, R. Debus and R. Pramanik-Strehlow (eds.), Fraunhofer IRB, Stuttgart (1996);
- I. Scheunert: Availability and transfer of substances in plant roots, in: Bioavailability as a key property in terrestrial ecotoxicity assessment and evaluation, M. Herrchen, R. Debus and R. Pramanik-Strehlow (eds.), Fraunhofer IRB, Stuttgart (1996);
- W. Hammel: exposure assessment under consideration of soil characteristics for ecotoxicological risk assessment, in: Ökotoxikologische Bewertungsmaßstäbe zur Beurteilung der stofflichen Belastung von Altlasten und Böden, Tagungsband, Fh-IUCT.

Aus umfangreichen Studien zur Mobilität der Metalle und dem Transfer in höhere Pflanzen ist weiterhin bekannt, dass für einige Elemente die mit Neutralsalz (Beispiel: 1 M  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) extrahierbare Fraktion mit dem Metallgehalt in Pflanzen korreliert. Von daher spiegelt diese Fraktion den **Pflanzen-verfügbaren Anteil** wieder. Er umfasst sowohl den löslichen als auch den leicht mobilisierbaren Teil (siehe hierzu auch die Tabelle auf Seite 14).

Quellen:

- T. Delschen und F. Rück: Eckpunkte zur Gefahrenbeurteilung von schwermetallbelasteten Böden im Hinblick auf den Pfad Boden-Pflanze. Bodenschutz 2, 4, 114-121, 1997;
- H. Knoche: Schadstoffe in Ökosystemen – Ableitung von Bodennormwertkonzepten aus vorliegenden Analysedaten, Dissertationsschrift, Wissenschaftsverlag Maraun, Frankfurt, 1996, ISBN 3-927548-82-0.
- H. Knoche, P. Brand, L. Viereck-Götte, H. Böken: Schwermetalltransfer Boden – Pflanze, UBA-Texte 11/99. Umweltbundesamt Berlin (Hrsg.)
- G. Welp, F. Liebe, und G. Brümmer, Mobilität von Schwermetallen in Böden und ihre Verfügbarkeit für Pflanzen, in: Pflanzenbelastung auf kontaminierten Standorten, UBA-Berichte 1/99, ESV Berlin

Auf Basis der Vielzahl vorhandener Daten zur Extraktion einer Reihe von Spurenmetallen konnten Korrelationsgleichungen aufgestellt werden, die die Gesamtgehalte mit den mobilen Fraktionen in Abhängigkeit vom pH-Wert des Bodens verknüpfen. Unter Nutzung dieser Gleichungen können Aussagen zum verfügbaren Anteil bei Kenntnis des Gesamtgehaltes im Boden gemacht werden respektive die Verteilung eines Metalls zwischen bioverfügbarer Fraktion und gebundener, nicht extrahierbarer Fraktion prognostiziert werden:

Tabelle: Korrelation ( $r^2 > 0,5$  bei  $p=0,0001$ ) des Gesamtgehaltes und der mobilen Fraktion von Spurenelementen im Boden in Abhängigkeit des pH-Wertes

Element	pH > 6,5			pH < 6,5	
	a	b	c	a	b
Beryllium	10,1	-2,91	0,19	5,66	-1,03
Cadmium	5,54	-0,97	0,04	4,64	-0,57
Cobalt	8,59	-2,48	0,18	4,02	-0,65
Blei	10,0	-2,85	0,17	5,87	-1,14
Zink	4,96	-0,89	0,02	4,80	-0,77
Nickel	5,63	-1,47	0,10	2,95	-0,40

pH-Wert im Boden > 6,5:  $C_{mobil} = 10^{a + b \cdot pH + c \cdot pH \exp 2 + \log(C_{total})}$

pH-Wert im Boden < 6,5:  $C_{mobil} = 10^{a + b \cdot pH + \log(C_{total})}$

$C_{mobile}$  = mobile Fraktion ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -Extraktion);

$C_{total}$  = Gesamtgehalt (Königswasser)

Quelle:

- Prüß: Vorsorgewerte und Prüfwerte für mobile und mobilisierbare, potentiell ökotoxische Spurenelemente in Böden, Verlag Ulrich E. Grauer Wendlingen (1992)

In analoger Weise können unter Nutzung entsprechender Gleichungen Stoffgehalte in **Sickerwässern** von Böden **abgeschätzt** werden, aus denen die jeweiligen **Konzentrationen** im **Grundwasser** prognostiziert werden. Hier werden für verschiedene Stoffklassen unterschiedliche Verfahren vorgegeben. Die Stoffklassen unterscheiden sich vor allem in Hinblick auf die Kinetik bei der Einstellung des Gleichgewichtes eines Stoffes zwischen Boden und Elutionsmittel und damit indirekt auch im Hinblick auf ihre Mobilität und Mobilisierbarkeit im Untergrund. Die angegebenen experimentellen Verfahren zur Bestimmung der Eluatkonzentrationen oder der Elutionsraten beruhen auf normierten Anleitungen (DIN 38414 T.4 und DIN 19730), die problemorientiert, d.h. für die verschiedenen Stoffklassen, modifiziert worden sind. Damit verknüpft sind mathematische Gleichungen, die die Berechnung der prognostizierten Sickerwasserkonzentrationen ermöglichen. Diese beruhen beispielsweise für Metalle und Metalloide auf Beziehungen zwischen Stoffgehalt im Bodeneluat und dem Stoffgehalt im Bodensättigungsextrakt.

Sollen Mobilität und Bindung sehr exakt erfasst werden, sind entsprechend aufwendige Methoden auszuwählen, wobei gegenwärtig vordringlich sequentielle Extraktionsverfahren eingesetzt werden. Beispielsweise wurde von Zeien und Brümmer (1989) haben auf der Basis veröffentlichter Methoden ein solches Verfahren vorgeschlagen. Es handelt sich um

ein 7-stufiges Verfahren, in dem zunächst eine mobile und eine leicht nachlieferbare Fraktion ausgewiesen wird. In den folgenden fünf Schritten werden die Schwermetalle Bindungspartnern zugeordnet. Aufgrund der Aufwendigkeit der sequentiellen Extraktion wird als Alternative die Nutzung von etwa zwei Extraktionsschritten diskutiert, welche die mobile und die mobilisierbare Fraktion oder aber – statt der mobilisierbaren Fraktion – den Gesamtgehalt bestimmen. Folgende Tabelle gibt einen Überblick über Methoden zur Bestimmung des mobilen, des mobilisierbaren und des Gesamtgehaltes:

Fraktion		Extraktions-, Aufschlussmittel (Quelle, Norm, Land)
mobil	wasserlöslich	Saugkerzen
		Bodensättigungsextrakt (DIN V 19735)
		Wässrige Extrakte bei weiten Boden: Lösungs-Verhältnissen (DEV S4, NL)
	Mit ungepufferten Salzlösungen extrahierbar	0,01 M CaCl <sub>2</sub> (Houba, ISO)
		0,1 M CaCl <sub>2</sub> (Köster & Merkel)
		0,1 M NaNO <sub>3</sub> (CH)
		0,5 M NaCl (NL)
		1 M NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (DIN 19730)
	mobilisierbar	
gesamt	DTPA (F, I, E DIN ISO 14870-1)	
	EDTA (F, I)	
	EDTA + NH <sub>4</sub> NOAc + NH <sub>2</sub> OH-HCl ("EDTA-Cocktail", Liebe et al.)	
gesamt		Königswasseraufschluss (DIN ISO 11466)
		HF/HClO <sub>4</sub> /HNO <sub>3</sub> -Aufschluss
		HNO <sub>3</sub> -Aufschluss

Quelle: Welp, G., Liebe, F. und G. Brümmer, Mobilität von Schwermetallen in Böden und ihre Verfügbarkeit für Pflanzen, in: Pflanzenbelastung auf kontaminierten Standorten, UBA-Berichte 1/99, ESV Berlin

Als Beispiele für die weiter oben genannten sequentiellen Extraktionsverfahren sind zu erwähnen:

Quellen:

- Davidson, C.M., A.L. Duncan, D. Littlejohn, A.M. Ure and L.M. Garden: A critical evaluation of the three-stage BCR sequential extraction procedure to assess the potential mobility and toxicity of heavy metals in industrially-contaminated land. *Anal. Chim. Acta* 363, 45-55 (1998);

- Zhang, T., S. Xianoquan and L. Fuliang: Comparison of two sequential extraction procedures for speciation analysis of metals in soils and plant availability. Commun. Soil Sci Plant Anal. 29, 1023 – 1034.

### **Erfassung der Dynamik der Schadstofffreisetzung bei Phytosanierung zur Prognose des Sanierungsverlaufs und Sanierungserfolgskontrolle**

Das dargestellte  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  - Extraktionsverfahren (analog:  $\text{NH}_4\text{OAc}$ -Extraktion) ist eine statische Messmethode, die den aktuell verfügbaren Anteil der Metallverbindungen gut beschreibt. Sie ist von daher geeignet, den Ist-Zustand eines Bodens in Hinblick auf durch Pflanzen grundsätzlich extrahierbare Mengen einer Kontaminanten – im Sinne eines “Durchschnittswertes” – zu erfassen. Des Weiteren eignen sich die beiden genannten Extraktionsmittel gut zur Begleitanalytik während der Sanierung und der Sanierungserfolgskontrolle. Die Methoden sind jedoch nicht in der Lage, langfristig verfügbare Anteile zu bestimmen, da durch die Verfahren selbst die Eigenschaften des Bodens und damit der verfügbaren Anteile verändert werden. Präzisere, detailliertere Aussagen sowohl zum Ist-Zustand als auch zur Sanierungserfolgskontrolle liefern sequentielle Extraktionsverfahren. Allerdings werden diese aus Kostengründen als Begleitanalytik kaum zum Einsatz kommen.

Die exakte Dynamik der Prozesse im Boden kann messmethodisch jedoch kaum erfasst werden, da die anzuwendenden Messgrößen voneinander abhängige Variable sind. So ist der durch Pflanzen aufnehmbare Anteil und dessen Änderung im Verlauf der Sanierung beispielsweise abhängig von Bodeneigenschaften und vom jahreszeitlichen Klimaverlauf, der seinerseits Änderungen im Wachstumsverlauf der Pflanzen, in den mikrobiellen Aktivitäten und damit verbunden im aktiven Aufnahmevermögen der Pflanzen bedingt.

Die Zeitabhängigkeit des Verhältnisses Gesamtgehalte/gelöste Anteile über den Gesamtverlauf der Sanierung wird in folgender Tabelle deutlich, die gleichzeitig einen Eindruck über mögliche Zeiträume vermittelt:

Cadmium-Akkumulation in Pflanzen auf einem cadmiumbelasteten Boden  
(Feldversuch in Ziefen)

Pflanzen	Anzahl der Parzellen	Versuchs-jahr	Ernte-ertrag (Trocken-gewicht) (t/ha)	Cd-Gehalt der Pflanzen (pro kg TG) (mg/kg)	extrahiertes Cd pro ha und Jahr (g/ha)	Jahre bis Cd-Gehalt 0,8 mg/kg (Jahre)*
<b>Hyperakkumulierende Wildpflanzen:</b>						
<i>Alyssum murale</i> (Mauer-Steinkraut; erstes Wuchsjahr)	3	1993	0,8 ± 0,1	28 ± 6	22	777
<i>Alyssum murale</i> (Mauer-Steinkraut; zweites Jahr)	6	1995	1,3 ± 0,3	34 ± 12	44	389
<i>Alyssum murale</i> (Mauer-Steinkraut; zweites Jahr)	1	1996	1,5	23,00	30	570
<i>Thlaspi caerulescens</i> (Bläuliches Täschelkraut; erstes Jahr)	3	1993	14 ± 2	6,6 ± 1,6	92	186
<i>Thlaspi caerulescens</i> (Bläuliches Täschelkraut; zweites Jahr)	6	1995	16 ± 2	12 ± 4	192	89
<i>Thlaspi caerulescens</i> (Bläuliches Täschelkraut; zweites Jahr)	6	1996	8,7 ± 1,2	6,1 ± 2,9	98	175
<b>Hyperakkumulierende Nutzpflanzen:</b>						
<i>Nicotiana tabacum</i> (Tabak):						
Bad Geudertheimer	4	1994	9,2 ± 2,4	10 ± 3	92	186
Fo-Pereg	2	1994	13,3	8,6	115	149
<i>Zea mays</i> (Mais):						
Mo17 (Zuchtlinie)	3	1994	11,1 ± 1,9	3,4 ± 1,9	38	450
B37 (Zuchtlinie)	3	1994	9,9 ± 2,4	7,5 ± 4,2	74	231
	3	1995	11,1 ± 1,1	1,0 ± 0,1	11	1555
MBS 6681/2681 (Hybrid)	6	1995	15,3 ± 1,2	1,2 ± 0,5	18	950
<i>Brassica juncea</i> (Indischer Senf)	1	1995	24,0	3,5	80	214
	12	1996	21 ± 3	2,6 ± 1,3	59	288
<i>Salix viminalis</i> (Hybrid 78198; Weide)	3	1995	10 ± 1	22,2 ± 2,7	222	77
<i>S. viminalis</i> (zweites Jahr, gleicher Standort)	3	1996	16 ± 1	8,3 ± 1,8	83	206
<b>andere Pflanzen:</b>						
<i>Miscanthus sinensis</i> (Chinaschilf)	6	1994	5,6 ± 0,2	0,83 ± 0,1	4,6	3717
<i>Raphanus sativus</i> (Rettich)	3	1993	8,3 ± 1,1	0,60 ± 0,16	5,0	3420
<i>Brassica napus</i> (Rapssamen)	3	1993	28 ± 2	0,83 ± 0,23	23,0	743
<i>Chenopodium album</i> (Gem. weißer Gänsefuß)	3	1993	6,3 ± 0,7	0,32 ± 0,08	2,0	8550
	3	1994	6,0 ± 0,5	0,36 ± 0,02	2,2	7773

\*in der oberen 20 cm Bodenschicht; 1 m<sup>3</sup> Boden entspricht 1500 kg; mittlerer Cd-Gehalt = 6,6 mg/kg; dies entspricht insgesamt 20 kg Cd/ha minus 2,9 kg/ha (auf Basis des Richtwerts von 0,8 mg/kg) = 17,1 kg/ha zu entfernen

Quelle: A. Kayser, R. Schulin und H. Felix: Feldversuche zur Phytoremediation schwermetallbelasteter Böden, in: Pflanzenbelastung auf kontaminierten Standorten, S. 176, UBA-Berichte 1/99, ESV Berlin

Die Berücksichtigung von Zeitabhängigkeiten während der Sanierung bedeutet auch eine Berücksichtigung des Einflusses der Pflanzen selbst auf die extrahierbare Fraktion: so kann beispielsweise eine Pflanze mit mäßigem Entzug den Boden in einer solchen Form hinterlassen, dass die Bodengehalte für eine Folgefrucht mit hohem Entzug nicht mehr phytotoxisch wirken, während dies bei einem Soforteinsatz der Pflanze mit hohem Entzug der Fall gewesen wäre.

Zur Quantifizierung nicht nur des mobilen, sondern auch des mobilisierbaren Anteils an Schwermetall-Kontamination sind retrospektive Bilanzrechnungen unumgänglich. Abbildung 19 (Annex 1, Beitrag Prof. Horak) zeigt ein Beispiel für eine Bilanzierung zur Verfolgung des Schwermetallstroms.

Es liegen jedoch keine geeigneten Methoden und Verfahren vor, die Dynamik der Verfügbarkeit – und damit auch den „nachlieferbaren“, mobilisierbaren Anteil – respektive den erreichbaren Sanierungserfolg mit ausreichender Genauigkeit prognostisch abschätzen zu können. Folgende Tabelle zeigt die Zeitabhängigkeit von Thallium-Entzügen, die den Rückgang des mobilen und mobilisierbaren Anteils deutlich wiedergibt, wobei die Fruchfolge in diesem Beispiel nur eine untergeordnete Rolle zu spielen scheint (Beitrag Dr. Schulz):

#### TI-Entzüge durch Sommerraps und Grünkohl auf einem TI-belasteten Boden

Fruchfolge	TI-Entzug [g / ha]	% des TI-Gesamtgehaltes (Königswasser-Extrakt)
Sommerraps nach Brache	298	5,5
Sommerraps nach Sommerraps	136	2,5
Grünkohl nach Sommerraps und Brache	135	2,5
Grünkohl nach 2 x Sommerraps	60	1,1

#### 1.4 Hyperakkumulierer, Excluder-Pflanzen

Eine Reihe von Wild- und Kulturpflanzen – sogenannte Hyperakkumulierer – besitzen die Eigenschaft, größere Mengen an Schwermetallen in die oberirdischen Pflanzenteile aufzunehmen, so dass sie sich zur Reinigung von belasteten Flächen anbieten. Pflanzen mit diesen Eigenschaften wurden u.a. gefunden für die folgenden Schwermetalle:

Pflanze	Schwermetall
Brassicaceae (Alyssum und Thlaspi)	Nickel
Eupobiaceae (Phyllanthus, Leucocroton)	
Asteraceae (Senecio, Pentacalia)	
Brassicaceae (Thlaspi)	Zink
Alyssum murale, Thlaspi caerulescens, Salix viminalis	Zink und Cadmium
Nicotiana tabacum	Cadmium
Lamiaceae und Scrophulariaceae	Kobalt und Kupfer
Reynoutria sachalinensis (Sachalin-Knöterich) und Chlamydomonas spec. (Mikroalge)	Arsen und organische Arsen-Verbindungen, Zink, Blei, Cadmium (Sachalin-Knöterich)
Leguminosae	Selen

Weitere Anwendungsbeispiele für verschiedene Hyperakkumulatoren, deren Aufnahmemechanismen und Effizienz sind in folgenden Literaturzitaten aufgeführt:

- J.L. Morel et al.: Phytoextraction of metals from contaminated soils, Proc. 5<sup>th</sup> Intern. Conf. On The Biogeochem. Of Trace Elements; Vienna 99, p. 4-5
- J.A.C. Smith et al.: Comparative analysis of metal uptake, transport and sequestration in hyperaccumulator plants, Proc. 5<sup>th</sup> Intern. Conf. On The Biogeochem. Of Trace Elements; Vienna 99, p. 22-23
- D.E. Salt: Progress towards a molecular understanding of metal hyperaccumulation in plants, Proc. 5<sup>th</sup> Intern. Conf. On The Biogeochem. Of Trace Elements; Vienna 99, p. 26-27
- M. Greger: Salix as phytoextractor, Proc. 5<sup>th</sup> Intern. Conf. On The Biogeochem. Of Trace Elements; Vienna 99, p. 872-873
- L. Simon: heavy metal phytoextraction capacity of several agricultural crop plant species, Proc. 5<sup>th</sup> Intern. Conf. On The Biogeochem. Of Trace Elements; Vienna 99, p. 892-893

Hyperakkumulierer stehen häufig auf geologisch anormalen Regionen, wobei diese Regionen jedoch sind schützenswerte Zonen sind und selbstverständlich nicht saniert werden. Jedoch sind sie als Forschungsflächen für Aufnahmemechanismen und Züchtungsversuch gut geeignet, so dass die Ergebnisse für „Normalstandorte“ mit anthropogener Belastung genutzt werden können. Untersuchungen zum signifikanten Wachstum von Hyperakkumulierern auf „Normalstandorten“ werden zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch durchgeführt.

„Die Aufnahmeraten an Schwermetallen können durch die Verbesserung pflanzlicher Eigenschaften, bodenverbessernde Maßnahmen und Bodenbewirtschaftungspraktiken unterstützt werden. Je nach Art der Kontamination und gewählter Sanierungstechnik können zur Verbesserung pflanzlicher Eigenschaften die Erhöhung der oberirdischen Biomasse

(z. B. für die Phytoextraktion) und/oder Veränderung des Wurzel/Rhizosphärensystems (z. B. Morphologie, Oberfläche, Vergesellschaftung mit Mikroben, Exsudaten) angestrebt werden. Veränderungen pflanzlicher Eigenschaften können durch Züchtung oder genetische Veränderung herbeigeführt werden. Dabei sind die Erfolgsaussichten traditioneller Züchtung begrenzt, da lediglich die genetische Variabilität einer pflanzlichen Spezies zur Verfügung steht. Erfolgversprechender für die Herstellung der gewünschten Eigenschaften ... sind biotechnologische Verfahren..., die erhöhte Toleranz gegenüber Schadstoffen, erhöhte Akkumulation, Abbau oder Volatilisierung bewirken“.

(Zitat aus: E. Lonzi und W. Wenzel: Phytosanierung: Grundlegende Prozesse und künftige Verbesserungen. In: Pflanzenbelastung auf kontaminierten Standorten, UBA-Berichte 1/99, ESV, Berlin 1999, ISBN 3-503-04810-3).

Folgender Katalog von Excluder- und Akkumulatorpflanzen kann präsentiert werden (Anmerkungen Prof. Metz):

#### Biomassereiche und stärker Schwermetall-akkumulierende Pflanzenarten:

- Sachalinknöterich (ohne landwirtschaftliche Verwertung).
- Grünmais mit geringeren Gehalten, aber höheren Erträgen.
- Kohlarten (Marktstammkohl, Grünkohl, Rosenkohl) sind bis zur Höhe der Maßnahmewerte als Viehfutter zu verwenden.
- Sonnenblumen reagieren empfindlich auf erhöhte Bodengehalte. Das Erntegut ist zur Ölgewinnung geeignet.
- Raps, Sonnenblumen und Roggen können auf Stilllegungsflächen mit Anbau nachwachsender Rohstoffe eingesetzt werden.
- Wurzelreiche Fruchtarten, deren Wurzelstücke ausschließlich zum Zweck der Sanierung gerodet werden sind Miscanthus, Gräser und Mais.
- Faserhanf und Topinambur sind biomassereich, phytopathologisch unempfindlich, reagieren jedoch empfindlich auf erhöhte Schwermetallgehalte.

#### Excluderpflanze, die auf belasteten Flächen in Höhe der Prüfwerte gemäß BBodSchV anzubauen und zu verwerten sind:

- Kartoffelknollen (Kraut ist angereichert),
- Zuckerrübenwurzeln (Kraut ist angereichert),
- Getreidekorn (in Rangfolge: Roggen > Gerste > Weizen),
- Futterpflanzen (kolbenreicher Silomais > Klee und Luzerne > Gräser),
- Großkörnige Leguminosen als Eiweißlieferant (Erbse, Bohne, Lupinie und Linse).

## 1.5 Sortenabhängigkeit

Die Strategie einer Optimierung des Phytosanierungserfolges durch Wahl geeigneter Sorten ist sehr differenziert zu betrachten. Die Aufnahmekapazität und das Akkumulationspotential sind nicht nur sortenabhängig, sondern mit einer Reihe weiterer Variablen verknüpft, zum Beispiel:

- Pflanzenart,
- Bodengehalt,
- Schwermetall-Verbindung,
- Akkumulationsorgan der Pflanze,
- Witterung und Erntezeitpunkt,
- Hygieneverhalten und Verzehrgewohnheiten.

Wird beispielsweise bei Winterweizen respektive Winterroggen ausschließlich die Sorte variiert (Cadmium-Gehalte in Winterweizensorten, Abb. 8, Annex 1; Cd-Gehalte in Winterroggenkorn, Abb. 9., Annex 1, Beiträge Prof. Metz), so liegt zwischen den Extremen des höchsten und niedrigsten Gehaltes ein Faktor  $f \approx 2$ . Analoges ist für die Aufnahme von Zink in Winterroggen (Abb. 14, Annex 1, Beitrag Prof. Metz) und Thallium in Sommerraps-Spross (Abb. 15, Annex 1, Beitrag Dr. Schulz) zu beobachten.

Zwischen der minimalen und maximalen Konzentration von Cadmium im Spross verschiedener Maisinzuchtrlinien (Abb. 12, Annex 1, Beitrag Dr. Schulz) und von Thallium im Spross verschiedener Grünkohlsorten (Abb. 16, Annex 1, Beitrag Dr. Schulz) dahingegen liegt ein Faktor von  $f \approx 20$ . Hier wird die Abhängigkeit des Gehaltes sowohl von der Pflanzenart als auch dem Akkumulationsorgan, aber auch vom Bodengehalt deutlich. Ähnliche Abhängigkeiten des Schwermetall-Gehaltes von der Pflanzenart (Excluder-, Indikator- und Akkumulatorpflanzen) und dem Pflanzenorgan wurden für Cadmium beobachtet bei Bodengehalten im Höhe der Abfall- und Klärschlamm-Verordnung (Abb. 18, Annex 1, Beitrag Prof. Metz).

Abbildung 15, Annex 1 zeigt deutlich die unterschiedlichen Verteilungen in die verschiedenen Pflanzenorgane. In Hinblick auf die Nutzung zum Verzehr wurden für einige Fruchtarten Grenzwertüberschreitungen bei den zum Verzehr genutzten Pflanzenteilen festgestellt. Es wird jedoch deutlich, dass auf mäßig kontaminierten Böden wachsende Früchte durchaus zum Verzehr geeignet sein können. Auch Differenzierungen zwischen hoch- und niedrigakkumulierenden Sorten zeigen zwar Unterschiede in der absoluten Schwermetallaufnahme, jedoch liegt diese in beiden Fällen im Bereich der durch die WHO festgelegten tolerierbaren Menge (Abb. 17, Annex 1).

Signifikant beeinflusst wird der Schwermetallgehalt in der Pflanze selbstverständlich durch den Belastungsgrad des Bodens, wie bereits in Kapitel 1.3 ausführlich dargestellt und in den Abbildungen 10 und 11 (Annex 1, Beitrag Prof. Metz) bestätigt. Ähnliche Beobachtungen wurden für Cd-Gehalte in küchenfertigem Rosenkohl (Abb. 13, Annex 1, Beitrag Prof. Metz) gemacht. Folgende Tabelle zeigt ebenfalls ähnliche Abhängigkeiten, wobei neben den Bodengehalten die Schwermetalle variiert wurden, was zu einer bivariaten Abhängigkeit führt

**Schwermetallgehalte in vier Maissorten (Ganzpflanzen, mg/kg TS)**

Sorte	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
1	8	8	4	2	353
2	11	11	6	8	298
3	12	12	0	0	319
4	22	14	2	0	394
Bodengehalt	1,1	48	13	98	170

(Beitrag Prof. Metz)

Folgende Tabelle zeigt zusätzliche Abhängigkeiten vom Akkumulationsorgan:

**Schwermetallgehalte in verschiedenen Zuckerrübensorten (mg/kg TS; Rübenblatt und Körper)**

Sorte	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
<b>Rübenblatt</b>					
1	6,9	7,6	5,9	6,4	1113
2	6,6	7,2	6,1	9,7	1106
3	5,4	6,9	5,3	5,4	882
<b>Rübenkörper</b>					
1	1,2	6,4	2,2	0,14	2,57
2	1,1	6,1	2,1	0,9	2,42
3	1,1	5,5	2,0	0,16	2,44

(Beitrag Prof. Metz)

Ausgehend von dieser Zusammenstellung können folgende **Handlungsempfehlungen** ausgesprochen werden:

- Da eine Vielzahl von Parametern die Schwermetallaufnahme in die Pflanze stärker beeinflussen als die Pflanzensorte, sollte zunächst ein Optimum in Hinblick auf diese Variablen eingestellt werden. Eine “Fein-Optimierung” kann ggf. bei Bedarf über die Sortenauswahl gesteuert werden. (Wenn alle zur Verfügung stehenden Maßnahmen ausgeschöpft sind, ist es möglich, durch die Sortenwahl zum Beispiel den Cd-Transfer nochmals um 50 % zu senken).
- Grundsätzlich sollten zunächst die Arten- und nachfolgend die Sortenspezifika geklärt werden.
- Ein grundsätzliches Anbau-Verbot von hochakkumulierenden Pflanzen(sorten) mit dem Ziel einer Vermarktung und Verzehr erscheint u.a. deshalb als nicht sinnvoll, da neben den Pflanzensorten eine Vielzahl von Variablen die Schwermetallaufnahme stärker beeinflussen als diese.
- Die von einer Fläche ausgehende Gefahr kann zwar durch eine geeignete Sortenauswahl gesteuert, d.h. aktuell minimiert werden. Jedoch sollte durch anderweitige Sanierungsmaßnahmen (Beispiel: Austausch der Bodenkrume bei landwirtschaftlich wertvollen Flächen) die Gefahr nachhaltig reduziert werden.
- Erkenntnisse zur differenzierten Schadstoffaufnahme von Pflanzensorten berechtigen nicht zu höherem Schadstoffeintrag in den Boden.
- Bei städt nahen, d.h. wertvollen Flächen zum Gemüseanbau sollten Anbauempfehlungen ausgesprochen werden. Bei notwendigen Stilllegungen sollten entsprechende Ausgleichszahlungen geleistet werden.
- Werden Pflanzen zu bestimmten Zwecken eingesetzt (zum Beispiel Kinder- oder Diätnahrungsmittel), sollte der Anbau auf unbelasteten Flächen bevorzugt werden. Die Wahl von Excludersorten wäre darüber hinaus eine vorbeugende Maßnahme zur Gefahrenabwehr.

## **2. Einsatzfelder der Phytoremediation**

Allgemein werden die Erfahrungen mit der Phytosanierung in Europa im Vergleich zu den USA als wenig umfangreich eingeschätzt. Insbesondere fehlen gut dokumentierte – d.h. multifaktoriell interpretierte – Feldversuche, die nach entsprechend langen Laufzeiten Schlussfolgerungen in Hinblick auf potentielle Einsatzbereiche sowie deren Möglichkeiten und Grenzen zulassen. In umfangreicher Form liegen dahingegen sowohl Monitoring-Daten für Schwermetalle als auch Ergebnisse von Laborstudien vor, die sich jedoch in der Regel mit Teilespekten befassen. Sowohl die Grundlagen- als auch die Anwendungs-orientierte Analyse ist kaum möglich und durchgeführt worden. Informationen liegen möglicherweise in der „grauen“ Literatur vor.

### **2.1 Einsatzfelder diskutiert anhand von Fallbeispielen**

Im folgenden werden „schlaglichtartig“ einige Einsatzfelder und Schlussfolgerungen exemplarisch ohne weitere Bewertung vorgestellt:

- A. Die Bepflanzung belasteter Flächen kann – in der Terminologie des BBodSchG – sowohl zur Sanierung, d.h. zur Gefahrenabwehr durch Dekontamination oder Sicherung, als auch als Schutzmaßnahme, d.h. als Festlegung durch Wahl geeigneter Pflanzen, angesehen werden.
- B. Die Phytosanierung kann unter bestimmten Bedingungen in Entwicklungsländern, bei denen aus Kosten-, Logistik- oder technischen Gründen keine anderen Varianten möglich sind, eine sinnvolle – und oft einzige Alternative – darstellen (Beispiel: Anbau von Gummibäumen, die akkumulieren und gleichzeitig als nachwachsende Rohstoffe genutzt werden können).
- C. Der Anbau von nicht-hyperakkumulierenden Zuckerrüben hat sich auf großen Flächen (Harz) als sinnvoll erwiesen. Die nicht verwertbaren Teile werden nach Ernte untergepflügt und stellen eine wichtige Kohlenstoff-Quelle dar. Kontaminanten werden „im Kreis“ geführt, ohne dass Schäden auftreten. Dieses Beispiel zeigt die Sinnhaftigkeit der Nutzung unbelasteter Pflanzenteile und die Recyclierung belasteter Pflanzenteile.
- D. Nutzungsziele bestimmen den Grad der Abreicherung damit die Dauer des Sanierungsverfahrens. Kenntnisse über den für bestimmte Abreicherungsgrade benötigten Zeitrahmen in Abhängigkeit von der Kontamination (Einzelkontamination, Mischung) sind rudimentär und unter Umständen prinzipiell kaum prospektiv zu erfassen.
- E. Die Phytosanierung kann auf leicht oder mäßig belasteten Flächen, bei denen die Dauer der Sanierung keine vordringliche Rolle spielt, eine sinnvolle Alternative zu anderen Sanierungsverfahren sein.

- F. „Leicht bis mäßig belastete Flächen“ sollten – per definitionem – Konzentrationen im Bereich des Prüfwertes aufweisen; die Definition „leicht bis mäßig belastet“ ist durch Bezug auf den Prüfwert unmittelbar mit einer aktuellen oder zukünftigen Nutzung verknüpft, wie bereits in Punkt D dargestellt. Die Nutzungsabhängigkeit sollte stets Berücksichtigung finden.
- G. „Leicht bis mäßig belastete“ Flächen könnten als Grünlandflächen (Weideland, Viehhaltung möglich, da dieses nicht belastet wird), landwirtschaftliche Nutzflächen zum Anbau von Futterpflanzen und nachwachsenden Rohstoffen und als Kleingärten (hauptsächlich: Ziergärten) genutzt werden. Von einer Nutzung als Kinderspielplatz oder intensiv genutzte Kleingärten (hauptsächlich: Nutzgärten) ist abzuraten. (Weitere Beispiele siehe Abb. 24, Annex 1, Beitrag Prof. Metz)
- H. Eine Klassifizierung in nicht, schwach und hoch belasteten Böden unter Zuordnung zu verschiedenen Nutzungsformen scheint ein zielführender Umgang mit kontaminierten Böden zu sein. Ein entsprechendes Beispiel ist für Nutzungsvarianten für schadstoffbelastete Rieselfeldböden durchgeführt worden Rieselfelder (Abb. 22, Annex 1, Beitrag Prof. Metz).
- I. Für Landwirte sollten integrierte Nutzungsempfehlungen (Nutzungsform, phytosanitär abgesicherte Fruchtfolgen unter Vermeidung der Ausbreitung von Pflanzenerkrankungen) ausgesprochen werden.
- J. Bei der Empfehlung von Nutzungen und/oder Nutzungsänderungen sollte die Sozialstruktur der Region (Erhalt von Arbeitsplätzen) berücksichtigt werden.
- K. Bei Bepflanzung von mittel- bis hochbelasteten Flächen kann je nach Pflanzenart der Grundwasserschutz weiterhin gewährleistet sein oder aber es kommt zu einer Pflanzeninduzierten Remobilisierung von Schadstoffen und anschließenden Belastungen in der Grundwasserneubildung.
- L. Die unterschiedlichen Belastungen untereinander liegender Grundwasserleiter durch die Bewirtschaftung der Krume (Verbesserung des Abbaus organischer Kontaminanten und Festlegung weiterer Kontaminanten) wird am Beispiel der Rieselfelder (Abb. 20, Annex 1, Beitrag Prof. Metz) deutlich. Der tiefergelegene Grundwasserleiter kann als Trinkwasser-Reservoir genutzt werden.
- M. Das Beispiel der Sanierung von Rieselfeldern durch Pflanzenanbau (Abb. 21, Annex 1, Beitrag Prof. Metz) zeigt die Notwendigkeit einer Fall-zu-Fall Diskussion zur Entscheidung bezüglich der Effizienz der Phytosanierung.
- N. Die kontrollierte Bewirtschaftung scheint aufgrund des Stofftransfers in die Pflanze – und trotz möglicher Remobilisierungen – eine bessere Alternative im Vergleich zur Brache zu sein.

Die Autoren der Veröffentlichungen einiger weiterer Anwendungsbeispiele aus Europa und den USA, die sich sowohl auf die Phytosanierung als auch die Phytostabilisierung beziehen, kommen im allgemeinen zu einer Positiveinschätzung der Anwendbarkeit der Phyto-

sanierungstechniken bei leicht bis mäßig belasteten Böden (zur Definition "leicht bis mäßig belastet" siehe oben):

- P.M. Bleker et al.: Remediation of the Jales Minespoil by inactivation and phytostabilization: on site experiments, Proc. 5<sup>th</sup> Intern. Conf. On The Biogeochem. Of Trace Elements; Vienna 99, p. 866-867
- W.L. Daniels et al.: Selection of grass species and amendments for revegetation of Pb/Zn smelter wastes, Proc. 5<sup>th</sup> Intern. Conf. On The Biogeochem. Of Trace Elements; Vienna 99, p. 868-869
- S. Lambrecht et al.: Phytoextraction : The use of Indian Mustard and rape to remove Tl, Cd and Zn from contaminated sites, Proc. 5<sup>th</sup> Intern. Conf. On The Biogeochem. Of Trace Elements; Vienna 99, p. 876-877

## 2.2 Fruchfolge zwischen akkumulierenden und nicht akkumulierenden Pflanzen

Die geeignete Fruchfolgen-Gestaltung, bei der hyperakkumulierende und nicht akkumulierende Pflanzenarten kombiniert werden, bietet eine elegante und effiziente Möglichkeit der Nutzung großflächiger Areale mit mäßiger Belastung. Bei jeder der aufeinanderfolgenden Früchte muss für jede Kontamination separat der "break-even point" zwischen Aufnahme / Anreicherung auf der einen Seite und Phytotoxizität auf der anderen Seite berücksichtigt werden.

Folgende Anwendungsmöglichkeiten sind praktikabel, wobei verschiedene Zielrichtungen verfolgt werden:

- Werden Fruchtarten angebaut, deren akkumulierende Pflanzenorgane nicht verwertet werden, so können diese einschließlich der Schwermetallgehalte auf der Fläche verbleiben, ohne zu negativen Auswirkungen einschließlich einer Bodenverarmung durch Entzug organischen Materials zu führen (siehe auch Kapitel 2.1, Punkt C als funktionierendes Anwendungsbeispiel).
- Ein anderes Beispiel bildet die Akkumulation von Zink in verschiedenen Roggensorten, wobei die Verteilung auf die Pflanzenorgane Korn, Stroh und Wurzel für alle Sorten ähnlich ist. Hauptakkumulationsorgan für Zink ist die Wurzel. Werden die Wurzeln von Stroh und zum Verzehr genutzten Korn getrennt und entsorgt, käme es zu einer effizienten Reinigung der Fläche bei gleichzeitiger Nutzung (praktische Umsetzung – wenn überhaupt – nur für Sandböden möglich).
- Durch Erstellung von Konzentrationsreihen vom Cadmium im Boden und einer Bilanzierung des Schwermetall-Stoffstroms kann eindeutig gezeigt werden, dass für diese Metallverbindung ebenfalls die Hauptakkumulation in der Roggenwurzel stattfindet und

die soeben für Zink beschriebene Lösung auch bei Cadmium-Kontaminationen genutzt werden könnte. Allerdings ist – im Gegensatz zu Zink-Verbindungen – der Sorteneinfluss auf die Verteilung von Cadmium in den verschiedenen Pflanzenorganen nicht vernachlässigbar.

- Die Wurzel- und Blattentfernung zur Reinigung kontaminiert Flächen kann nicht systematisch über einen Zeitraum von mehreren Jahren eingesetzt werden, da eine Humus- und Nährstoffverarmung des Bodens die Folge wäre. Hier ist der Einsatz von Fruchtfolgen angezeigt, bei denen nicht kontinuierlich organisches Material entfernt wird.

Die Beispiele zeigen, dass exemplarische, auf Teilprozesse bezogene, überzeugende Daten zur Effizienz der Phytosanierung vorliegen. Allerdings ist keine bewertende Darstellung der Effizienz hinsichtlich der benötigten Zeit zur Reinigung einer Fläche vorhanden.

Ein zukünftiger Schwerpunkt sollte auf der bewertenden Darstellung vorhandener Erfahrungen (Ergebnisse, Schlussfolgerungen) liegen, so dass Entscheidungen getroffen werden können, in welcher Situation eine Anwendung möglich und sinnvoll ist. Dabei schließen „vorhandene Erfahrungen“ sowohl Labor (Topf)- als auch Feldversuche ein. Zur Verbesserung der Interpretation von Labordaten in Hinblick auf eine Umsetzung im Feld sollte die Extrapolation „Labor“ – „Freiland“ vertieft bearbeitet werden mit dem Ziel der Ableitung eines (semi)-quantifizierenden Faktors.

## 2.3 Sonderstandorte / Sondereinsätze

Unter Sonderstandorten können entweder außergewöhnliche Nutzungen verstanden werden oder aber Standorte, die kontinuierlich belastet werden, wie beispielsweise:

- Halden
- Rieselfelder
- Auen und Sedimente
- Flächen in Hafennähe
- Truppenübungsplätze
- Baggergut-Spülflächen
- Fahrbahnbegrenzungen
- Deponien.

Die exakte Begrifflichkeit „Sonderstandort“ – die noch zu definieren ist – sollte entweder konform mit dem BBodSchG und der BBodSchV sein oder aber nicht genutzt werden.

Einige Erfahrungen mit der Phytosanierung von Sonderstandorten (Berlin, Buna, Bitterfeld) liegen vor. Jedoch steht eine Akzeptanz-bezogene Bewertung aus, die die Frage beantwortet, welche Sanierungstechnik einschließlich Sanierungsdauer für welche Standorte unter Beachtung einer geplanten Nutzung akzeptabel ist. Beispielsweise können Sonderstandorte zum Standort für die Produktion von Non-Food Pflanzen und nachwachsenden Rohstoffen zur Energiebereitstellung saniert werden.

## **2.4 Möglichkeit der Verwertung / Entsorgung der geernteten Biomasse**

Die Verwertungs- respektive Entsorgungswege der geernteten Biomasse sind von entscheidender Bedeutung für die Anwendung eines Phytosanierungsverfahrens. Verwertungswege sind beispielsweise die Nutzung der Biomasse als interessanten chemischen Rohstoff (Öl-Nutzung, Methan-Gewinnung durch Vergärung) oder als Energieträger. Einige Varianten werden aktuell geprüft, wie zum Beispiel die feuchte oder trockene Entsorgung/Verwertung. Bei Verbrennung können die Elemente aus der Asche zurückgewonnen werden, während die verbleibende Asche auf der Fläche zur Bodenverbesserung ausgebracht wird.

Aktuell ist die Lagerung von feuchter Biomasse (Silierung) mit erheblichem Aufwand verbunden, da aufgrund der Aggressivität von Gäräften, die zusätzlich zu einer Anreicherung der Metalle führen können, Spezialbehälter notwendig sind. Von daher ist die Verbrennung der geernteten Biomasse, sofern sie in trockener, verpresster Form (Beispiel: Stroh und Heuballen) vorliegt, mit deutlich geringerem technischen Aufwand verbunden, was zu ihrer Akzeptanzerhöhung führt.

Abschließend kann jedoch festgestellt werden, dass ausreichende ökonomische Bewertungen der Varianten liegen noch nicht vorliegen. Abschließende Gesamtbewertungen sind nur im Rahmen eines ganzheitlichen Konzeptes möglich, das die Aspekte: Art der kontaminierten Fläche/der Kontamination – genutzte Pflanzen – Nutzung des Bodens (Beispiel: nachwachsende Rohstoffe) – Entsorgung (feucht/trocken) ökologisch und ökonomisch bewertet.

### 3. Mögliche Gefahrenquellen und Minimierung

#### 3.1 Eignung von Komplexbildnern und Lösungsvermittlern

Durch den Einsatz organischer Komplexbildner und Lösungsvermittler wird auf der einen Seite die Schwermetall-Mobilität erhöht, auf der anderen Seite jedoch die Bioverfügbarkeit aufgrund zunehmender Komplexierung verringert. Die folgende Tabelle zeigt deutlich die Steigerung der gesamt-verfügbaren Menge und die Reduzierung des bioverfügbaren Anteils: Im Vergleich zur Kontrolle erhöht sich der lösliche Pb-Gehalt im Boden nach EDTA-Zugabe um etwa den Faktor 100 (erste Spalte), während die Eliminierungsrate von Pb nur etwa um einen Faktor 5 ansteigt (letzte Spalte). Bei Zugabe von EDTA und Herbizid können im ersten Behandlungsjahr gute Erfolge erzielt werden, während im Folgejahr keine weitere Aufnahme der Kontamination in die Pflanzen zu beobachten ist.

Art des Versuches	Pb-Gehalt im Boden löslicher Gehalt [mg/kg]	Gesamt-gehalt [mg/kg]	Pb-Gehalt in Pflanzen (1. Versuch) [mg/kg]	kg Pb extrahiert pro ha (1. Versuch) (Ertrag 20 t/ha)	Pb-Gehalt in Pflanzen (2. Versuch) [mg/kg]	Jahre bis Pb-Gehalt im 1. Versuch von 500 auf 50 mg/kg abgesenkt (Jahre)*)
Kontrolle	1,9	8033	112	2,2	77	603
NTA	17	8800	156	3,1	68	433
EDTA	201	6833	599	12,0	90	113
NTA + Herbizid	34	7733	282	5,6	-	239
EDTA + Herbizid	161	8700	1670	33,4	-	40

\*) in der oberen 20 cm Bodenschicht: 1 m<sup>3</sup> Boden entspricht 1500 kg: mittlerer Pb-Gehalt auf 500 mg/kg geschätzt (mäßige Kontamination): dies entspricht insg. 1500 kg Pb/ha minus 150 kg/ha (Basis: Richtwert von 50 mg/kg) = 1350 kg/ha zu entfernen

Quellen:

- A. Kayser, R. Schulin und H. Felix: Feldversuche zur Phytoremediation schwermetallbelasteter Böden. In: Pflanzenbelastung auf kontaminierten Standorten, UBA-Berichte 1/99, ESV, Berlin 1999, ISBN 3-503-04810-3
- H.R. Felix et al.: Phytoremediation, field trials in the years 1993-1998, Proc. 5<sup>th</sup> Intern. Conf. On The Biogeochem. Of Trace Elements; Vienna 99, p. 8-9

Eine Verbesserung der Pflanzenaufnahme kann von daher für die Fälle erreicht werden, in denen die Schwermetall-Mobilität der begrenzende Faktor ist und beispielsweise die Pflanzenwurzel durch ihre Protonenabgabe keine ausreichende Mobilisierung erzielen kann.

Der Einsatz von Komplexbildnern wird jedoch grundsätzlich kontrovers diskutiert, da er mit einer Reihe von **Nachteilen** verbunden ist:

- Im Boden liegt nicht länger nur der aktuell mobile Schwermetall-Pool vor, sondern es werden sehr große Mengen mobilisierbaren Materials freigesetzt, dessen Bewegung kontrolliert werden sollte. Dabei ist sowohl eine überproportional hohe Pflanzenaufnahme (beispielsweise in Nahrungspflanzen) als auch eine Grundwasserkontamination sowie mögliche Einflüsse auf die Mikroflora zu überprüfen.
- Graduell kann zwar der Anteil an in die Pflanze aufnehmbarem Schwermetall erhöht werden, da die lösliche Fraktion vergrößert wird, jedoch sind der Aufnahmekapazität aufgrund der Komplexgröße Grenzen gesetzt.
- Bilanzierung zeigen eine 100fach erhöhte Löslichkeit für Pb im Vergleich zu einer 5fach erhöhten Pflanzenaufnahme, was sowohl die Effizienz als auch das Kosten / Nutzen / Risikoverhältnis dieser Methodik zu einem Diskussionspunkt macht.

Da Komplexbildner und Lösungsvermittler auf der anderen jedoch unbestritten prinzipiell zur Erhöhung des Sanierungserfolges **geeignet** sein können, werden Möglichkeiten und Bedingungen für ihren Einsatz gezielt überprüft:

- Durch Düngergabe wird die Protonenabgabe durch die Pflanzenwurzel zusätzlich erhöht, so dass die Pflanzenaufnahme verbessert und die Gefahr einer Kontaminationsverbreitung vermindert wird.
- Durch die kombinierte Anwendung von Komplexbildner und systemischem Pflanzenschutzmittel, Wuchsstoff, kann sowohl die Schwermetallmobilität (durch den Komplexbildner) als auch die Transpiration (durch den Wuchsstoff) verbunden mit einer verbesserten Pflanzenaufnahme erhöht werden. Eine Grundwasserbelastung bei Einsatz persistenter Komplexbildner bleibt bestehen.
- Einsatz von Komplexbildnern, die innerhalb einer Vegetationsperiode abgebaut werden, so dass die Gefahr eines Schwermetalltransports in das Grundwasser bei Regenperioden (Winterhalbjahr) verringert wird.
- Einsatz von Abfallprodukten aus der Industrie, die als umweltverträglich eingestuft werden, wie zum Beispiel: Gärabfälle, Abfälle aus der Papierindustrie. Es ist zu überprüfen, inwieweit diese Produkte in bodenähnliche Stoffe umgesetzt werden. Des Weiteren sind die Kosten bei Ausbringung zu berücksichtigen.
- Komplexbildner sollten ausschließlich bei Schwermetallgehalten im Bereich der Klärschlammverordnung eingesetzt werden. Auf hochkontaminierten Flächen sollte man von dieser Möglichkeit Abstand nehmen.

- Mögliche Risiken einer Umweltbelastung durch Komplexbildner und damit verbundene Mengen mobiler Schwermetalle sollten durch analytische Überwachungen oder prospektive Untersuchungsstrategien (Beispiel: Lysimeterversuche) abschätzbar werden.

Die erfolgversprechenden Kombinationen von abbaubarem Komplexbildner/Dünger und/oder Pflanzenschutzmittel sollten weiter geprüft werden, wozu sowohl Topfversuche als auch Studien auf Kleinflächen durchzuführen sind. Des Weiteren sollte das Kosten/Nutzen/Effizienz-Verhältnis überprüft werden.

Zu ähnlich vorsichtigen Einschätzungen – insbesondere zum Einsatz von EDTA – kommen eine Reihe von Autoren, von denen einige Beiträge exemplarisch zitiert sind:

- Phytotech Inc.: Critical factors for the application of phytoremediation in metal contaminated soils, Proc. 5<sup>th</sup> Intern. Conf. On The Biogeochem. Of Trace Elements; Vienna 99, p. 6-7
- S. Fröhlich et al.: Chemical elution and phytoremediation of soils containing heavy metals, Proc. 5<sup>th</sup> Intern. Conf. On The Biogeochem. Of Trace Elements; Vienna 99, p. 904-905
- R.R. Galiulina and R.V. Galiulin: Assessment of ecological risk at intensive phytoextraction of soil contaminated by heavy metals, Proc. 5<sup>th</sup> Intern. Conf. On The Biogeochem. Of Trace Elements; Vienna 99, p. 906-907

### **3.2 Strategien zur Minimierung der Tiefenverlagerung von Schadstoffen (Fokussierung auf organische Stoffe)**

Bei organischen Stoffen ist zwischen einer Ausgasung verbunden mit der Aufnahme von bodennahen Schadstoffen über die Blattoberfläche und einer Aufnahme aus der Bodenlösung über die Wurzel zu unterscheiden. Erstgenannter Fall trifft auf die leicht-flüchtigen organischen Stoffe zu, während schwerflüchtige Stoffe nach Staubverwirbelung und Resuspension aufgenommen werden können.

Zur Minimierung einer Tiefenverlagerung organischer Schadstoffe durch den Einsatz der Phytosanierung scheint eine „indirekte Phytoremediation“ erfolgreich zu sein: durch die Rhizosphäre – beispielsweise bei Gräsern und Luzerne – wird die mikrobielle Aktivität (methanogene Mikroorganismen) unterstützt, wodurch es zu einer Verbesserung des Bioabbaus kommt.

Als experimentelle Methoden zur Erfassung der Tiefenverlagerung sind neben den traditionellen Gefäßversuchen auch Lysimeterversuche und Untersuchungen in abgedichteten Kleinpoldern zu diskutieren.

#### **4. Schlussfolgerungen**

Die wesentlichen Schlussfolgerungen in Hinblick auf Möglichkeiten und Grenzen der Phytoremediation im Praxiseinsatz können wie folgt zusammengefasst werden. Die Reihenfolge orientiert sich dabei am Diskussionsverlauf.

#### **Wesentliche Schadstoffe:**

Die Identifizierung wesentlicher Schadstoffe, deren Eliminierung durch Einsatz der Phytoremediation erfolgen kann, erfolgte auf Basis vorhandener Ergebnisse auf bereits untersuchten Flächen oder Verdachtsflächen. Diese Herangehensweise bietet sich an, da auf diese Weise das Know-How mit der weniger universell als vielmehr gezielt einsetzbaren Methodik zum Tragen kommen.

Als wesentliche Schadstoffe wurden definiert:

Metallverbindungen : Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Tl, Zn,

Metall-organische Verbindungen: As, Hg, Sb, Sn, Ba (u.a.)

Organische Verbindungen: MKWs, PAKs, HCH, Nitroaromaten, PCBs

#### **Aufnahme und Transportprozesse:**

- Die wesentlichen Aufnahme- und Transportprozesse in der Pflanze sind für Schwermetallverbindungen bekannt und lassen sich methodisch gut differenzieren.
- Die Funktion von Mycorrhiza wird kontrovers diskutiert: es kann sowohl eine Stimulation der Schwermetall-Aufnahme als auch eine Exclusion erfolgen. Der Einfluss der Pflanzensorten überwiegt die Mycorrhiza-Effekte jedoch in den meisten Fällen.
- Grenze bei hohen Belastungen, die zu phytotoxischen Reaktionen führen.
- Die Aufnahmemechanismen der Pflanzen sind auf die Aufnahme energetisch wertloser Ionenspezies ausgerichtet. Demzufolge kann – zur Einschätzung von Erfolgsaussichten bei der Phytoremediation – eine Unterscheidung von Schadstoffen in ionogene Stoffe (Schwermetalle und weitere dissoziierende Stoffe) und nicht-ionogene Stoffe sinnvoll sein.

### **Pflanzenverfügbare Schadstoffanteile:**

Ein ausgewiesenes Ziel der Phytosanierung ist es, unter Anwendung der Phytoextraktion, der Phytodegradation oder der Phytovolatilisierung eine möglichst große Menge einer Kontamination aus dem belasteten Boden zu eliminieren und so einen Reinigungseffekt zu erzielen. Die genannten Techniken bedürfen jedoch einer möglichst effizienten Aufnahme der Schadstoffe durch die Pflanze, wobei selbstverständlich nur die pflanzenverfügbaren Schadstoffanteile aufgenommen werden können.

Für die prognostische Abschätzung des Sanierungsverlaufes und -erfolges sind eine Reihe wesentlicher Aspekte zu berücksichtigen:

- a) Optimum zwischen zu minimierender Bodenkonzentration und phytotoxisch wirkender Bodenkonzentration ggf. unter Beachtung synergetischer Effekte bei Mischkontaminationen.
- b) Bestimmung der pflanzenverfügbaren Schadstoffanteile.
- c) Erfassung der Dynamik der Schadstofffreisetzung bei Phytosanierung.

Schlussfolgerungen für diese Aspekte sind:

*ad a)*

- Das Optimum zwischen Bodenbelastungsgrad und phytotoxisch wirkender Bodenkonzentration sollte in entsprechenden Vorversuchen eindeutig geklärt werden, um Fehlentscheidungen und falsches Sanierungsdesign zu vermeiden. Die Notwendigkeit kann anhand von Beispielen eindrucksvoll demonstriert werden.

*ad b)*

- Es ist wissenschaftlich allgemein akzeptiert, den mobilen, im Porenwasser gelösten Anteil an Metallverbindungen und organischen Stoffen als den für **Organismen verfügbaren** Teil anzusehen. Aus umfangreichen Studien zur Mobilität der Metalle und dem Transfer in höhere Pflanzen ist weiterhin bekannt, dass für einige Elemente die mit Neutralsalz (Beispiel: 1 M  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) extrahierbare Fraktion mit dem Metallgehalt in Pflanzen korreliert. Von daher spiegelt diese Fraktion den **Pflanzen-verfügbaren Anteil** wieder. Er umfasst sowohl den löslichen als auch den leicht mobilisierbaren Teil. Gesamtgehalte an Kontaminanten spielen nur insofern eine Rolle als sie das Potential, aus dem heraus die pflanzenverfügbare Fraktion nachgeliefert werden kann, abbilden.
- Auf Basis der Vielzahl vorhandener Daten zur Extraktion einer Reihe von Spurenmetallen konnten Korrelationsgleichungen aufgestellt werden, welche die Gesamtgehalte mit den mobilen Fraktionen in Abhängigkeit vom pH-Wert des Bodens verknüpfen. Unter Nutzung dieser Gleichungen können Aussagen zum verfügbaren Anteil bei Kenntnis des Gesamtgehaltes im Boden gemacht werden respektive die Verteilung eines Metalls

zwischen bioverfügbarer Fraktion und gebundener, nicht extrahierbarer Fraktion prognostiziert werden.

- Die experimentellen Verfahren zur Bestimmung der Eluatkonzentrationen oder der Elutionsraten beruhen auf normierten Anleitungen (DIN 38414 T.4 und DIN 19730).
- Neben diesen statischen Verfahren sind sequentielle Extraktionsverfahren entwickelt worden, die besser zwischen mobiler und potentiell mobilisierbarer Fraktion unterscheiden.

ad c)

- Sequentielle Extraktionsverfahren sind gut geeignet zur Prognose sowie zur Erhebung des Ist-Zustandes vor Sanierung, wohingegen die Verfahren als begleitende Analytik während der Sanierung zu kostenintensiv sind.
- $\text{NH}_4\text{NO}_3$  oder  $\text{NH}_4\text{OAc}$ -Extraktionen eignen sich gut zur Begleitanalytik und Sanierungs erfolgskontrolle; diese Verfahren sind jedoch zu ungenau für eine zeitabhängige Prognose, da die  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -extrahierbaren Anteile lediglich einen „Durchschnittswert“ im Sinne eines Ist-Zustandes bilden.
- Die Dynamik der Prozesse im Boden kann messmethodisch nur schwer erfasst werden, da die anzuwendenden Messgrößen voneinander abhängige Variablen sind.
- Variable sind beispielsweise: Boden, jahreszeitlicher Klimaverlauf, Änderung des aktiven Aufnahmevermögens, Einfluss von Mykorrhiza und assoziativen Bakterien.
- Es gibt keine geeigneten Verfahren, die Dynamik der Verfügbarkeit (und damit den „nachlieferbaren Anteil“) sowie damit verbunden prognostisch den Sanierungserfolg exakt abzuschätzen; hier liegt Forschungsbedarf vor, deren Ergebnisse in Handlungsempfehlungen münden sollten.
- Zur Quantifizierung der „nachlieferbaren Anteile“ sind Bilanzrechnungen unumgänglich.

### **Hyperakkumulierer:**

Eine Reihe von Wild- und Kulturpflanzen – sogenannte Hyperakkumulierer – besitzen die Eigenschaft, größere Mengen an Schwermetallen in die oberirdischen Pflanzenteile aufzunehmen, so dass sie sich zur Reinigung von belasteten Flächen anbieten. Für die Hyperakkumulierer gilt:

- Hyperakkumulierer stehen häufig in geologisch anormalen Regionen; diese Regionen sind schützenswerte Zonen und werden hier nicht betrachtet; jedoch sind sie als Forschungsflächen für Aufnahmemechanismen und Züchtungsversuch gut geeignet.
- Ergebnisse können für „Normalstandorte“ mit anthropogener Belastung genutzt werden.
- Untersuchungen zum signifikanten Wachstum von Hyperakkumulierern auf „Normalstandorten“ werden zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch durchgeführt.

### **Sortenabhängigkeit:**

Die Strategie einer Optimierung des Phytosanierungserfolges durch Wahl geeigneter Sorten ist sehr differenziert zu betrachten. Die Aufnahmekapazität und das Akkumulationspotential sind nicht nur sortenabhängig, sondern mit einer Reihe weiterer Variablen verknüpft, zum Beispiel:

- Pflanzenart
- Bodengehalt
- Schwermetall-Verbindung
- Akkumulationsorgan der Pflanze
- Witterung und Erntezeitpunkt
- Hygieneverhalten und Verzehrgewohnheiten.

Ausgehend von vorliegenden Erfahrungen können folgende Handlungsempfehlungen ausgesprochen werden:

- Da eine Vielzahl von Parametern die Schwermetallaufnahme in die Pflanze stärker beeinflussen als die Pflanzensorte, sollte zunächst ein Optimum in Hinblick auf diese Variablen eingestellt werden. Eine "Fein-Optimierung" kann ggf. bei Bedarf über die Sortenauswahl gesteuert werden.
- Die von einer Fläche ausgehende Gefahr kann zwar durch eine geeignete Sortenauswahl gesteuert, d.h. aktuell minimiert werden. Jedoch sollte durch anderweitige Sicherungsmaßnahmen (Beispiel: Kalkung, Eisenoxide bei sehr sandigen Böden (Lehmuntermischung)) die Gefahr nachhaltig reduziert werden.
- Bei städt nahen, d.h. wertvollen Flächen zum Gemüseanbau sollten Anbauempfehlungen ausgesprochen werden. Bei einer notwendigen Herausnahme der Fläche aus dem Gemüseanbau sollten entsprechende Ausgleichszahlungen geleistet werden.
- Werden Pflanzen zu bestimmten Zwecken eingesetzt (zum Beispiel Kinder- oder Diätnahrungsmittel), sollten in jedem Fall die niedrig-akkumulierenden Sorten angebaut werden. Hierzu wären Sortenkennzeichnungen sinnvoll.

### **Wechsel der Fruchtarten - akkumulierenden und nicht-akkumulierenden Pflanzen:**

Die geeignete Fruchfolgen-Gestaltung, bei der hyperakkumulierende und nicht akkumulierende Pflanzenarten kombiniert werden, bietet eine elegante und effiziente Möglichkeit der Nutzung großflächiger Areale mit mäßiger Belastung. Bei jeder der aufeinanderfolgenden Früchte muss für jede Kontamination separat der "break-even point" zwischen Aufnahme / Anreicherung auf der einen Seite und Phytotoxizität auf der anderen Seite berücksichtigt werden.

Folgende Schlussfolgerungen geben den aktuellen Stand wieder:

- Es liegen überzeugende Daten zur Effizienz der Phytosanierung vor (Beispiel: Sonnenblumen; Cd, Zn, Ni).
- Nicht vorhanden ist eine bewertende Darstellung der Effizienz des Schadstoffentzugs aus der Fläche pro Jahr.
- Nicht vorhanden sind Korrelationen zwischen Effizienz – Boden – Pflanze – Kontamination.
- Ein zukünftiger Schwerpunkt sollte auf der bewertenden Darstellung vorhandener Erfahrungen (Ergebnisse, Schlussfolgerungen) liegen, so dass Entscheidungen getroffen werden können, in welcher Situation eine Anwendung möglich und sinnvoll ist.
- „Vorhandene Erfahrungen“ schließen sowohl Topf- als auch Feldversuche ein.
- Die Extrapolation „Labor“ – „Freiland“ muss vertieft bearbeitet werden, so dass ggf. ein (semi)-quantifizierender Faktor abgeleitet werden kann.

#### **Sonderstandorte / Sondereinsätze:**

Unter Sonderstandorten können entweder außergewöhnliche Nutzungen verstanden werden oder aber Standorte, die kontinuierlich belastet werden. Aus Differenzen in der Definition kann geschlossen werden:

- Die Begrifflichkeiten sollen konform mit BBodSchG und BBodSchV sein.
- Unter „Sonderstandorten“ sind z. B. zu verstehen: Halden, Rieselfelder, Auen, Sedimente, Fahrbahnbegrenzungen usw.
- Die „Sonderstandorte“ sind entweder genau zusammenzustellen und zu definieren oder aber es sollte auf den Begriff verzichtet werden, insbesondere da sich die Phytoremediation zukünftig vordringlich mit diesen Standorten auseinander setzt, wodurch die „Sonderstandorte“ zu „Standorten“ werden.
- Einige Erfahrungen mit der Phytosanierung von „Sonderstandorten“ (Berlin, Buna, Bitterfeld) liegen vor.
- Eine Akzeptanz-bezogene Bewertung steht aus, d.h. die Beantwortung der Frage: welche Sanierungstechnik einschließlich Sanierungsdauer ist für welche Standorte unter Beachtung einer geplanten Nutzung akzeptabel.
- Beispiele sind: Sanierung zum Standort für die Produktion von Non-Food Pflanzen, nachwachsende Rohstoffe.

### **Verwertung / Entsorgung der geernteten Biomasse:**

Die Verwertungs- und Entsorgungswege sind von entscheidender Bedeutung für die Anwendung eines Phytosanierungsverfahrens. Verwertungswege sind beispielsweise die Nutzung der Biomasse als chemischen Rohstoff oder als Energieträger; Entsorgungswege sind selbstverständlich beispielsweise die Verbrennung und Rückgewinnung der Metalle aus der entstehenden Asche.

- Einige Varianten werden aktuell geprüft (Beispiel: feuchte oder trockene Entsorgung/ Verwertung).
- Ökonomische Bewertungen der Varianten liegen noch nicht vor.
- Im Rahmen eines Pilotprojektes sollte ein Gesamtkonzept erarbeitet werden, das die Aspekte: Art der kontaminierten Fläche/der Kontamination – genutzte Pflanzen – Nutzung des Bodens (Beispiel: nachwachsende Rohstoffe) – Entsorgung (feucht/trocken) ökologisch und ökonomisch bewertet.

### **Minimierung möglicher Gefahrenquellen:**

Durch den Einsatz organischer Komplexbildner und Lösungsvermittler wird auf der einen Seite die Schwermetall-Mobilität erhöht, auf der anderen Seite jedoch die Bioverfügbarkeit aufgrund zunehmender Komplexierung verringert. Eine Verbesserung der Pflanzenaufnahme kann von daher für die Fälle erreicht werden, in denen die Schwermetall-Mobilität der begrenzende Faktor ist und beispielsweise die Pflanzenwurzel durch ihre Protonenabgabe keine ausreichende Mobilisierung erzielen kann. Der Einsatz von Komplexbildnern wird jedoch grundsätzlich kontrovers diskutiert, da er mit einer Reihe von **Nachteilen** verbunden ist, auf der anderen Seite jedoch unbestritten Sanierungserfolge erhöhen kann.

Es kann schlussfolgernd zusammengefasst werden:

- Komplexbildner und Lösungsvermittler sind prinzipiell geeignet zur Erhöhung des Sanierungserfolges.
- Der Einsatz von EDTA wird als nicht zielführend angesehen.
- Forschungsbedarf zur Optimierung der Anwendung insbesondere von abbaubaren Komplexbildnern liegt vor; hierbei sind in jedem Fall Bilanzierungen durchzuführen.
- Das Kosten/Nutzen/Effizienz-Verhältnis muss überprüft werden.
- Der kombinierte Einsatz von Komplexbildnern/Lösungsvermittlern und systemischen Pflanzenschutzmitteln (Erhöhung des gelösten Anteils gefolgt von der Erhöhung der Aufnahmerate durch Wuchsverbesserung) wird als erfolgversprechend angesehen und sollte weiter geprüft werden; dies ist sowohl in Topfversuchen als auch auf Kleinflächen abzuklären.

### **Minimierung der Tiefenverlagerung von organischen (!) Schadstoffen:**

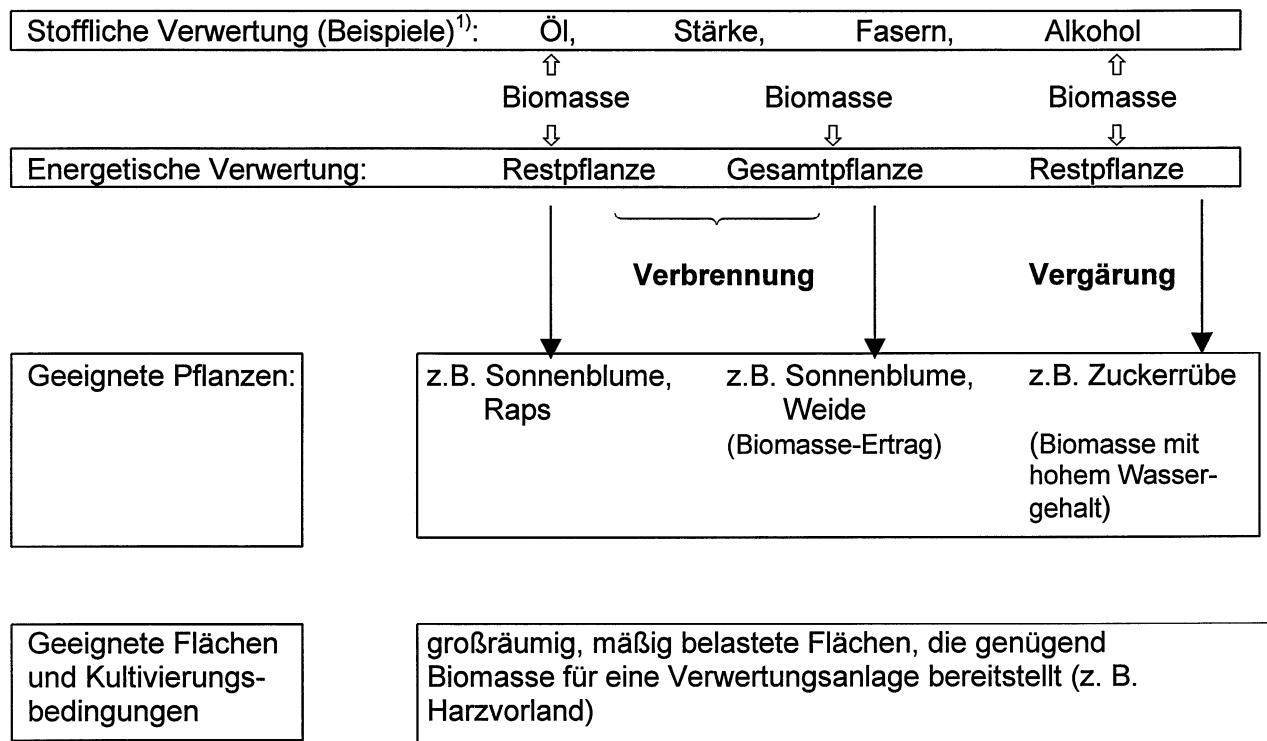
Zur Minimierung der Tiefenverlagerung organischer Stoffe während der Phytosanierung ist folgendes zu beachten:

- Die „indirekte Phytosanierung“ (Unterstützung der mikrobiellen Aktivität durch Rhizosphäre) scheint ein erfolgversprechender Ansatz zu sein.
- Es kann auf Erfahrung im Bereich der Deponieabdeckung zurückgegriffen werden.
- Es sollte ein Pilotprojekt durchgeführt werden zur Klärung der Fragen nach: Art der Böden – der Flächennutzung – der abbaubaren Stoffe.
- Untersuchungen zum Mechanismus der Aufnahme organischer Chemikalien in die Pflanze liegen bereits vor (Beispiele: Sandermann, Harms, Scheunert...).
- Das Pilotprojekt sollte sich weniger mit mechanistischen Fragestellungen als vielmehr mit den pragmatischen, technisch umsetzbaren Ansätzen befassen.

## 5. Forschungsbedarf im Hinblick auf einen Praxiseinsatz

Die Workshop-Ergebnisse können in Hinblick auf möglichen Forschungsbedarf unter der übergeordneten Thematik des produktionsintegrierten Umweltschutzes zusammengefasst werden. Folgendes Schema versucht eine Systematisierung:

Produktionsintegrierter Ansatz zum Einsatz der Phytosanierung



<sup>1)</sup> ergänzende Darstellung siehe Abb. 23 (Beitrag Prof. Metz)

### Wesentliche Fragestellungen:

- Technische Realisierung
- Größe der Anlage und damit verknüpft der (Sanierungs)fläche
- Geeignete Pflanzen
- Geeignete Kultivierungsbedingungen (z. B. pH-Wert Regulation, Kombination: Komplexbildner/systemische Pflanzenschutzmittel)
- Dauer der Phytosanierung bzw. Integration von Phytosanierung in Fruchtwechsel
- Bestimmung des remobilisierbaren Schadstoff-Anteils
- Kosten/Nutzen/ökologische Risikoanalyse
- Soziales Umfeld und Akzeptanz

**Vorteil:**

Geschlossenes Konzept unter optimierten

- Ökologischen (⇒ belasteter Boden wird saniert)
- Ökonomischen (⇒ produzierte Biomasse wird der gezielten Verwertung zugeführt)
- Sozialen (⇒ Landwirt bleibt Produzent; ihm wird die belastete Fläche nicht durch Stilllegung entzogen)



## **Annex 1**

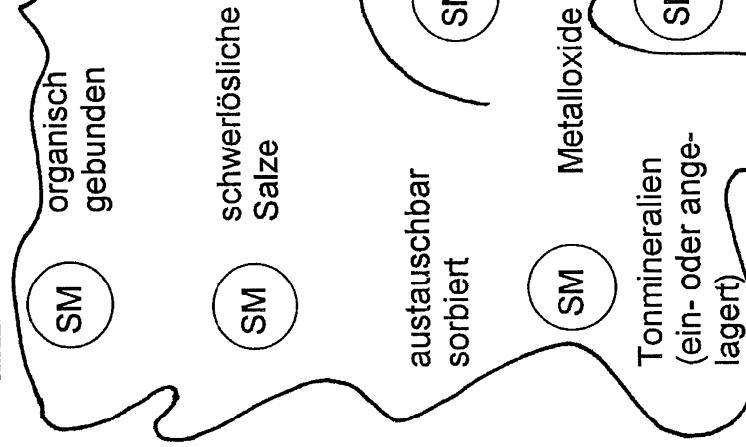
### **Originalbeiträge der Teilnehmer**



# Schwermetalle im Boden-Pflanzen-Transfer

Vorliegen im Boden:

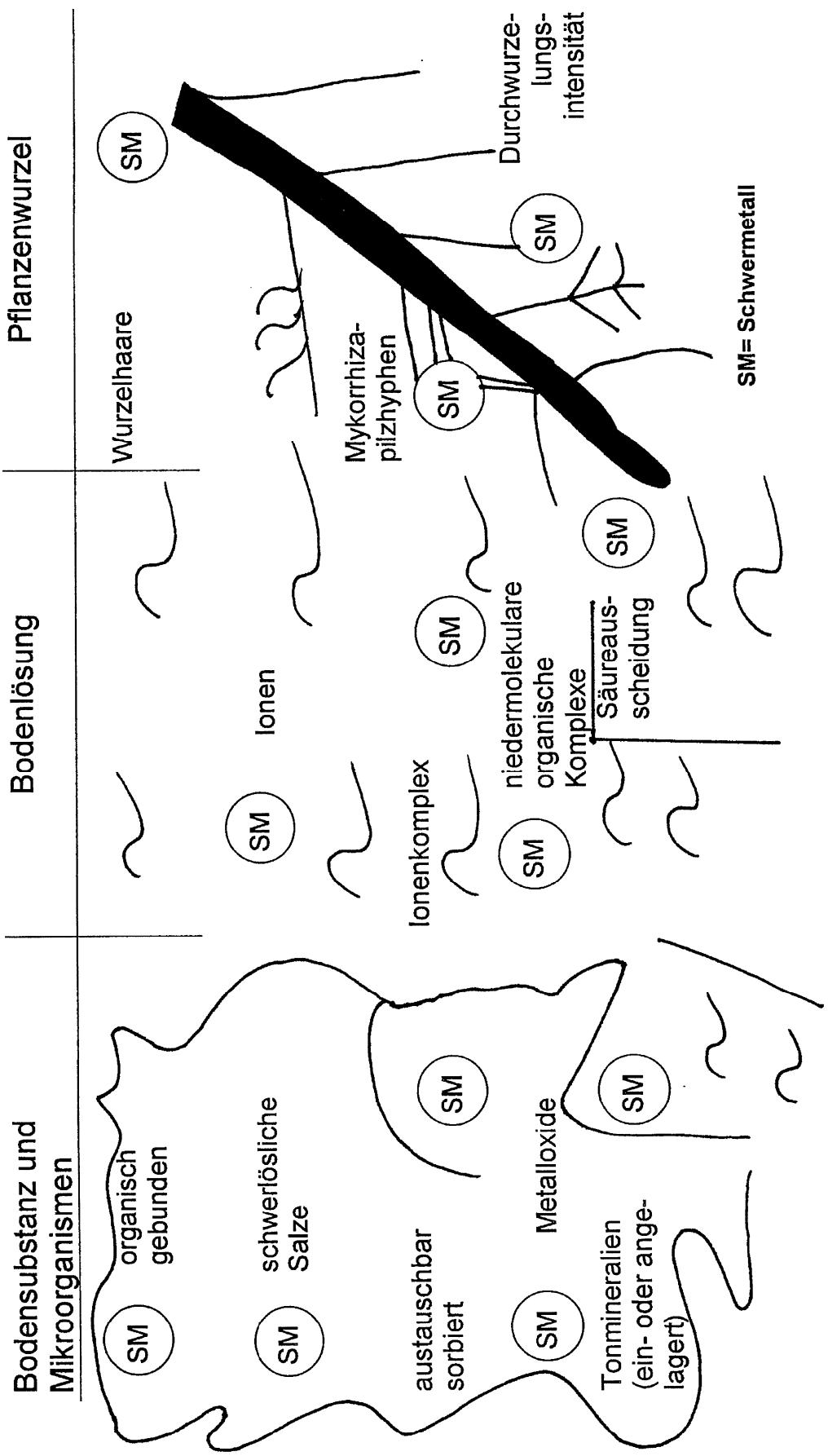
Bodensubstanz und Mikroorganismen



Bodenlösung

Pflanzenwurzel

Abb. 1



## Schwermetalltransfer in die Pflanzenwurzel

Abb. 2

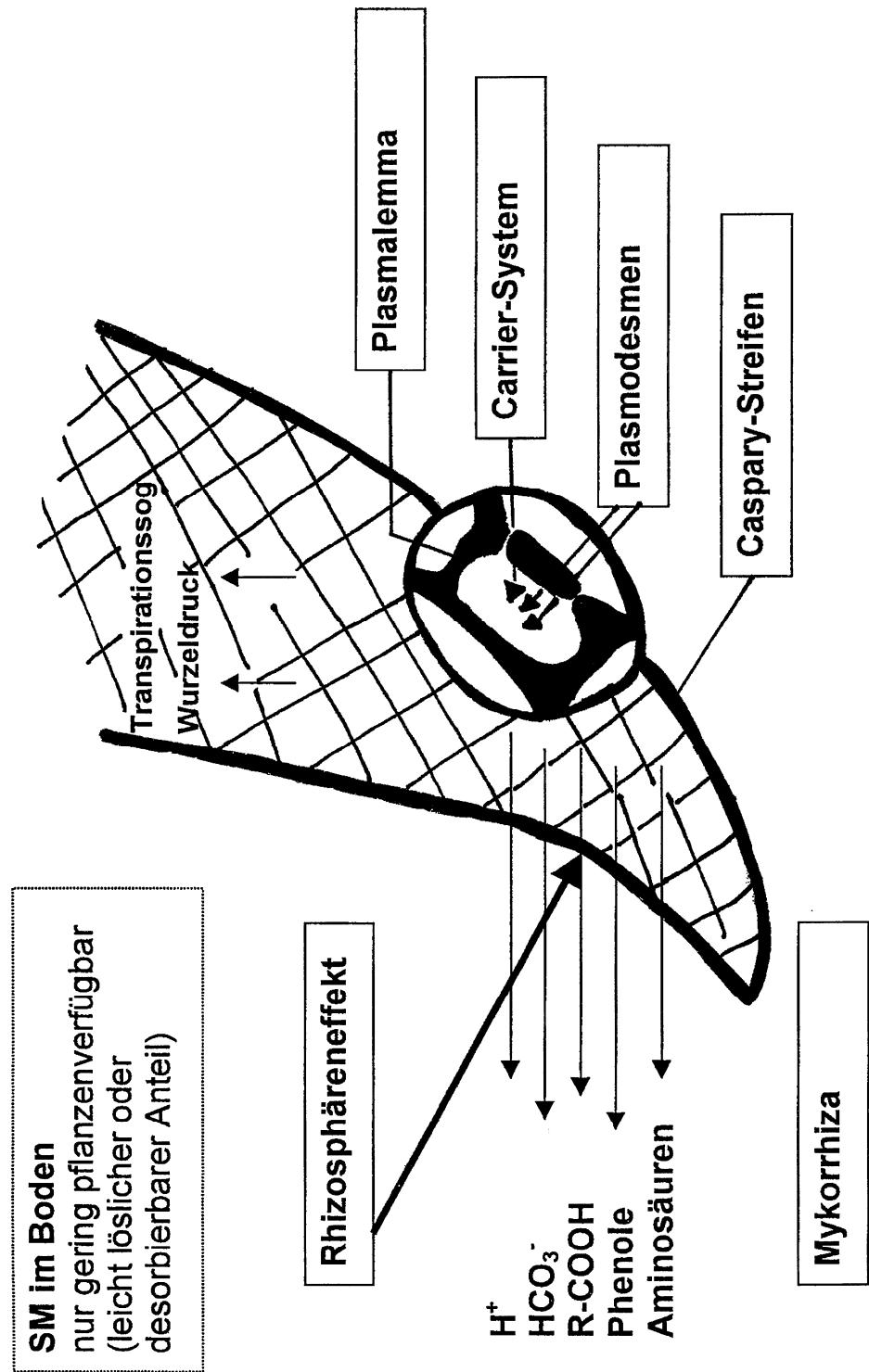


Abb. 3

Cd-Gehalte v. Chinashilf-, Mais-, Sachalinknöterich- u.  
W.Roggenwurzeln in Abhängigkeit v. Belastungsgrad d.  
Bodens

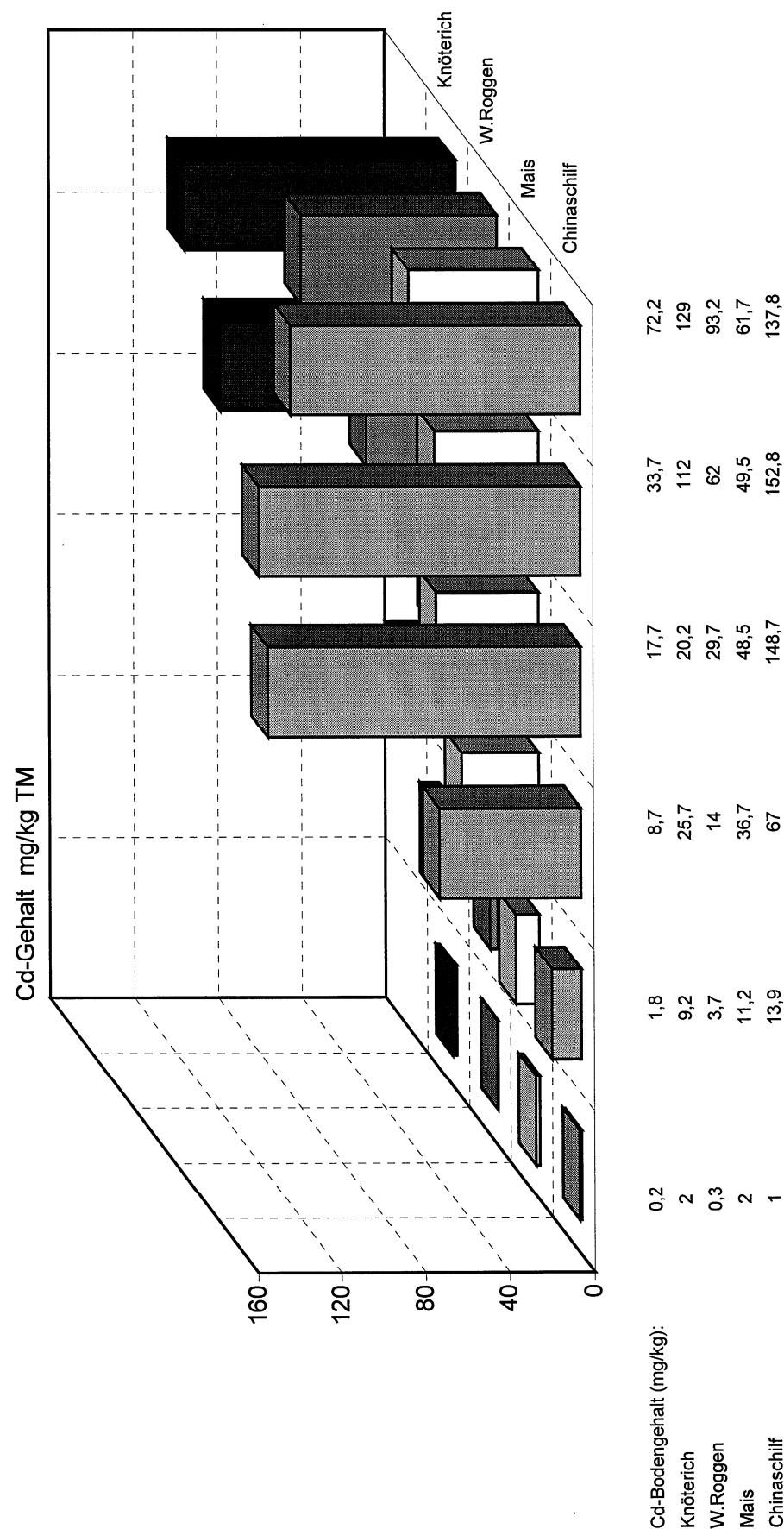
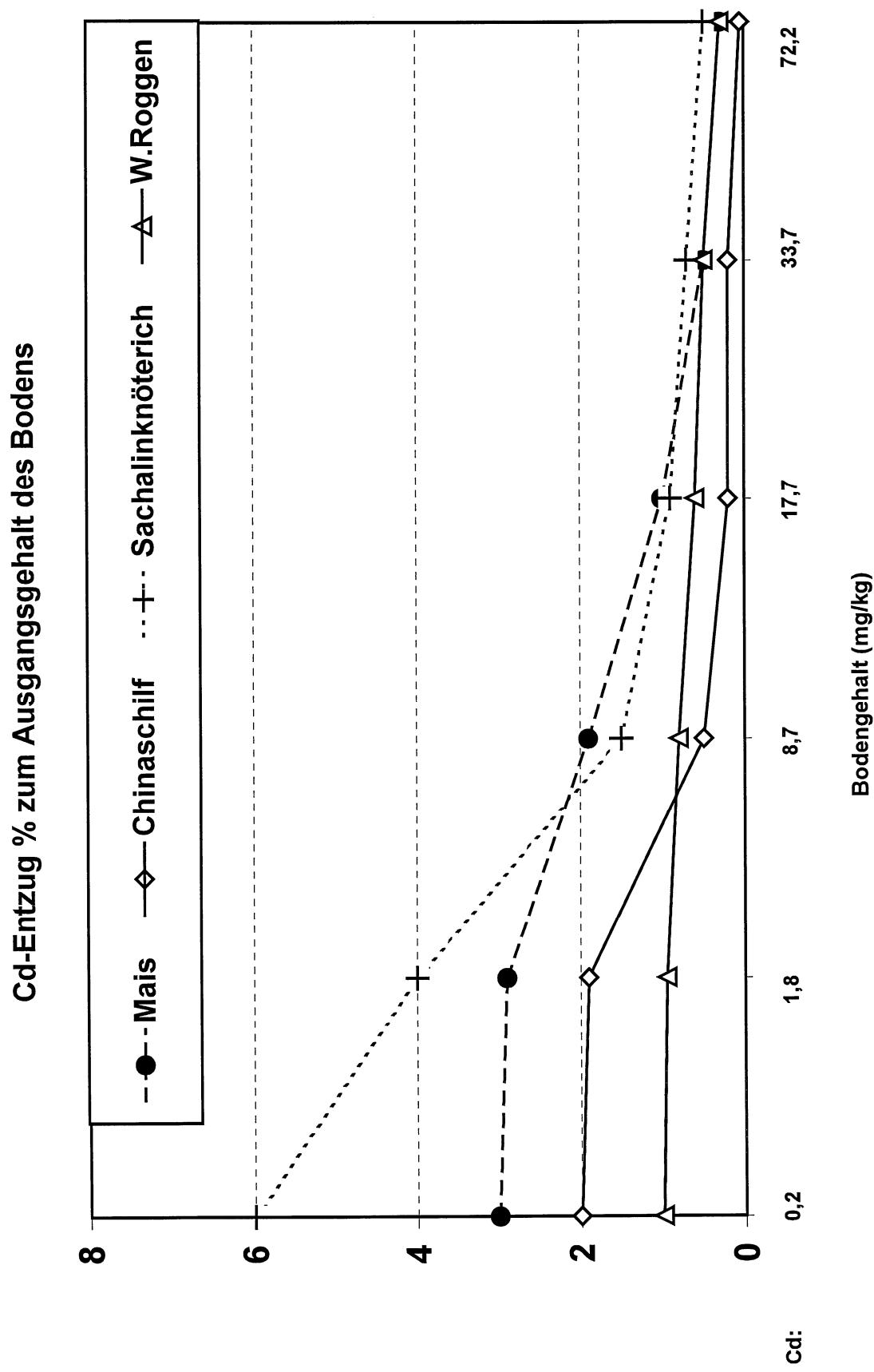


Abb. 4



**Cd-Entzug (%) aus dem Boden durch Mais, Chinaschilf, Sachalinknöterich und W.Roggen**

Abb. 5

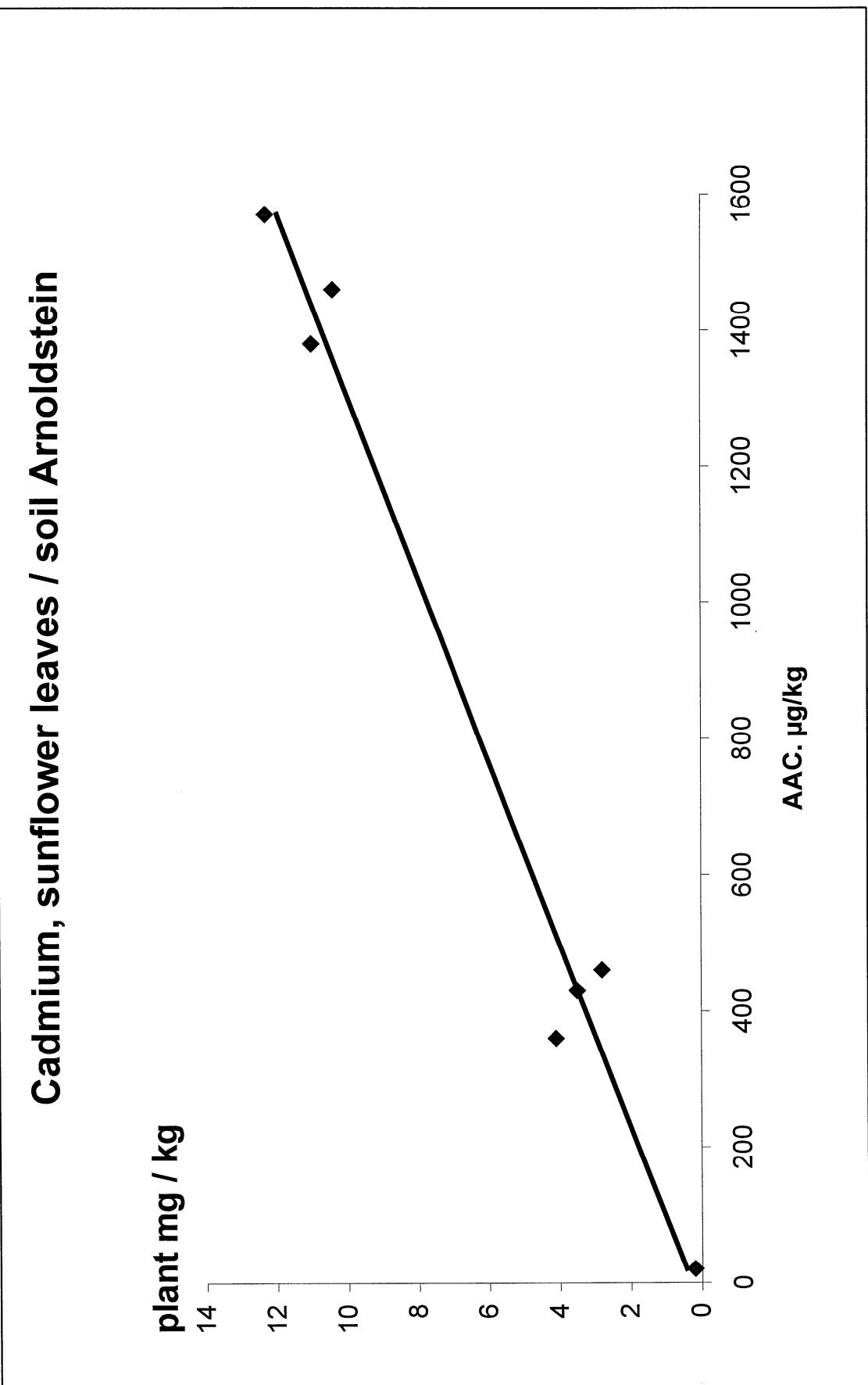
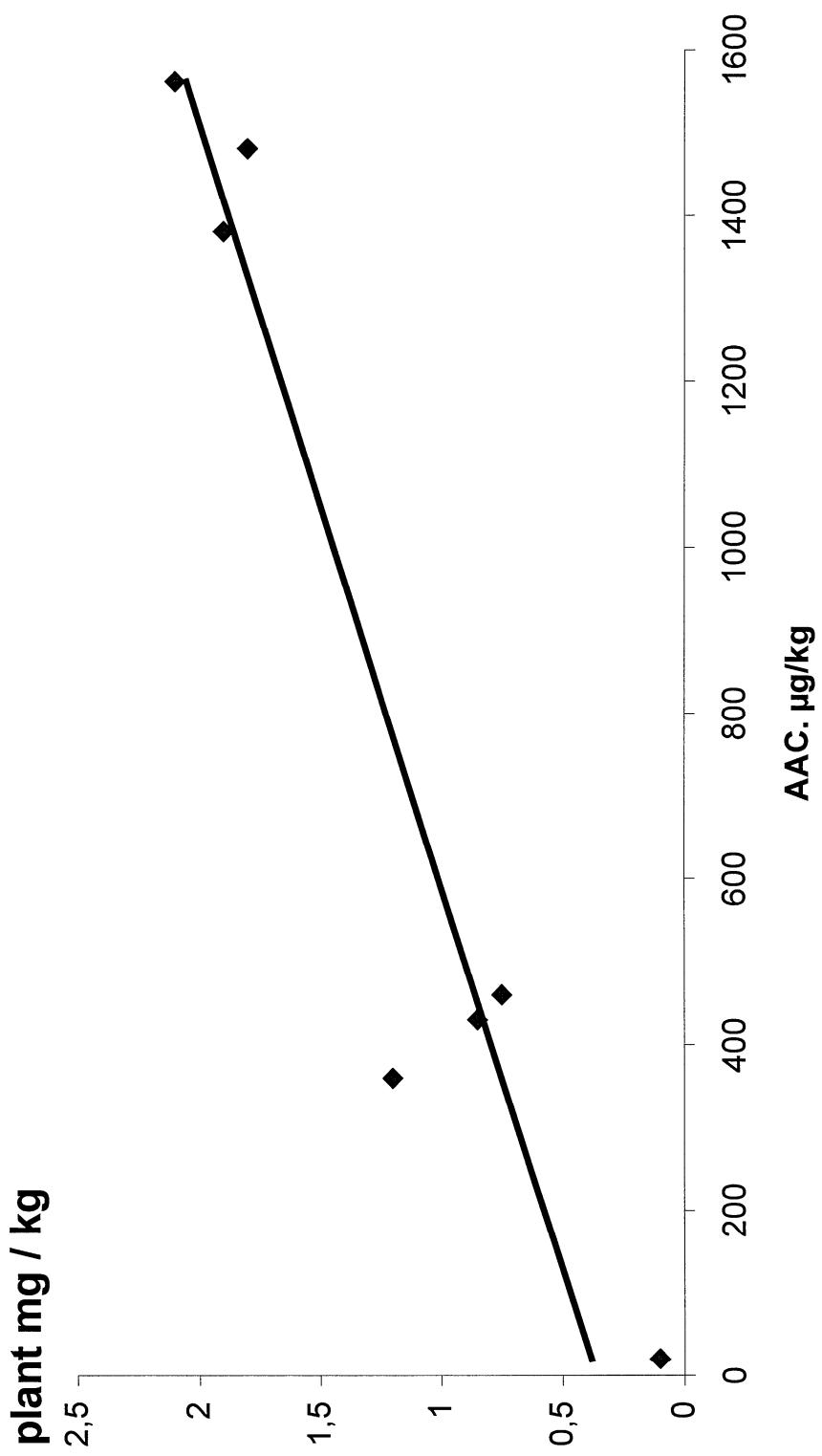


Abb. 6

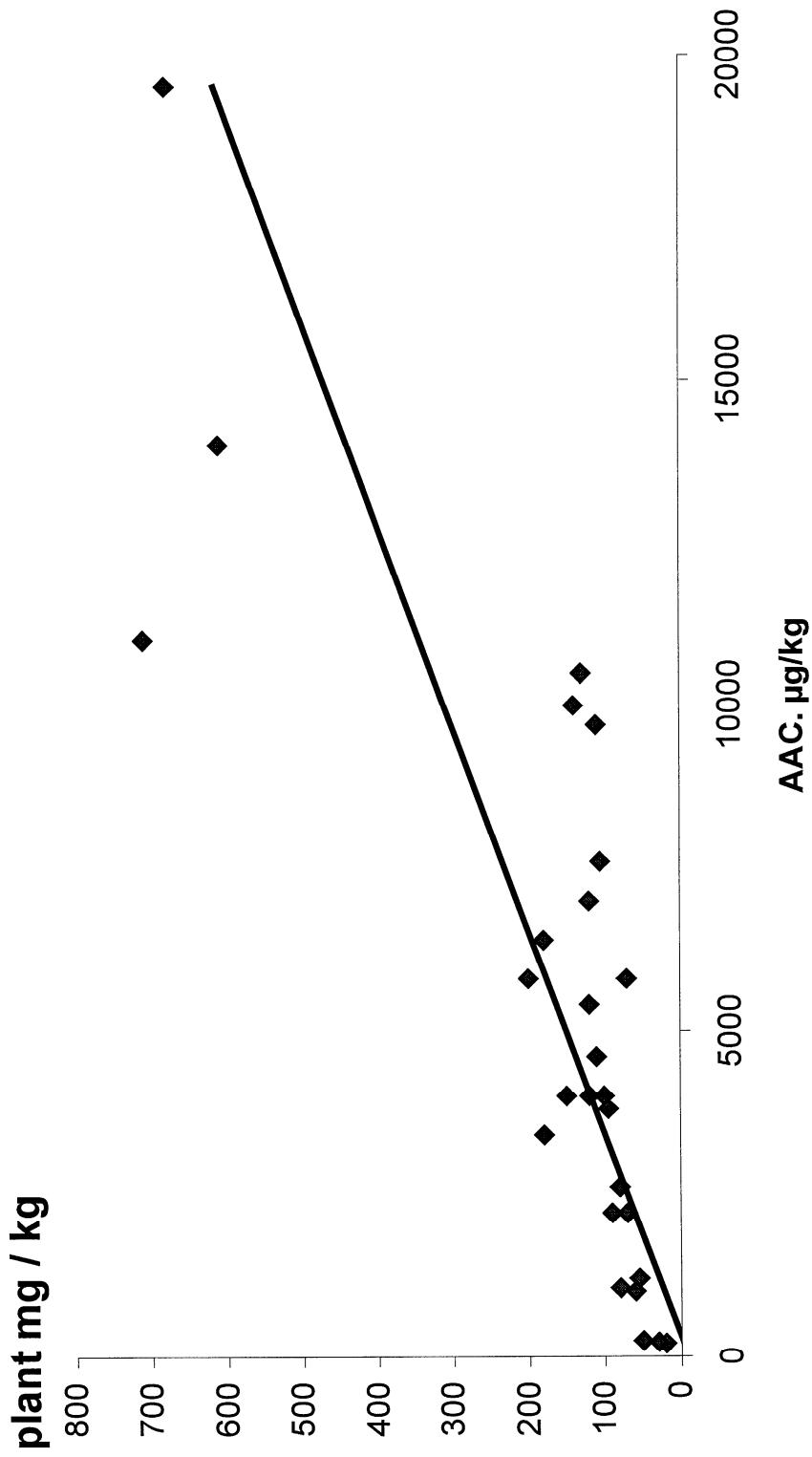
**Cadmium, sunflower seeds / soil Arnoldstein**



**Cd-Anreicherung in Sonnenblumensamen**

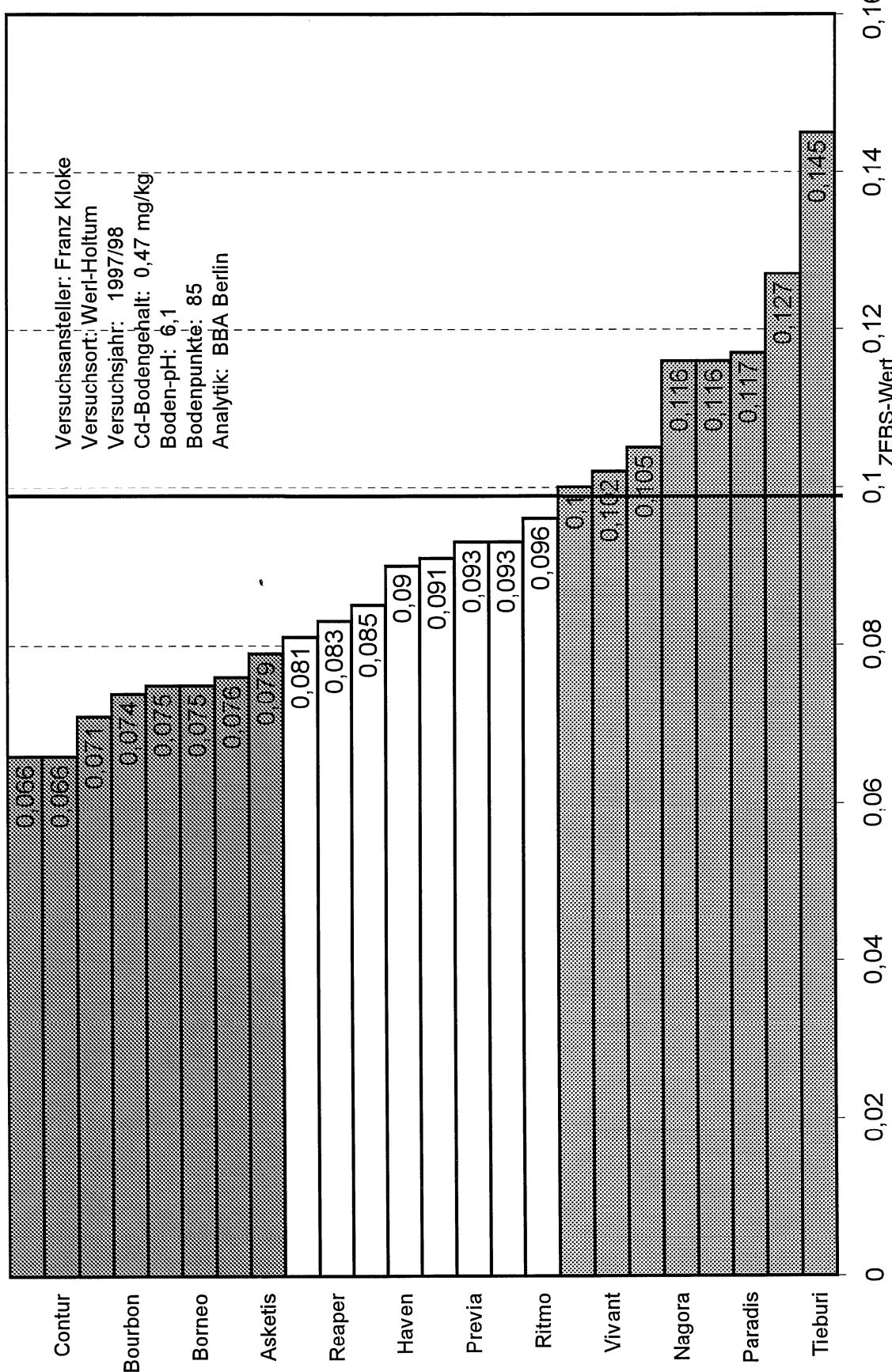
Abb. 7

Zinc, sunflower leaves /soils Untert. Weyersd. Reisenb.



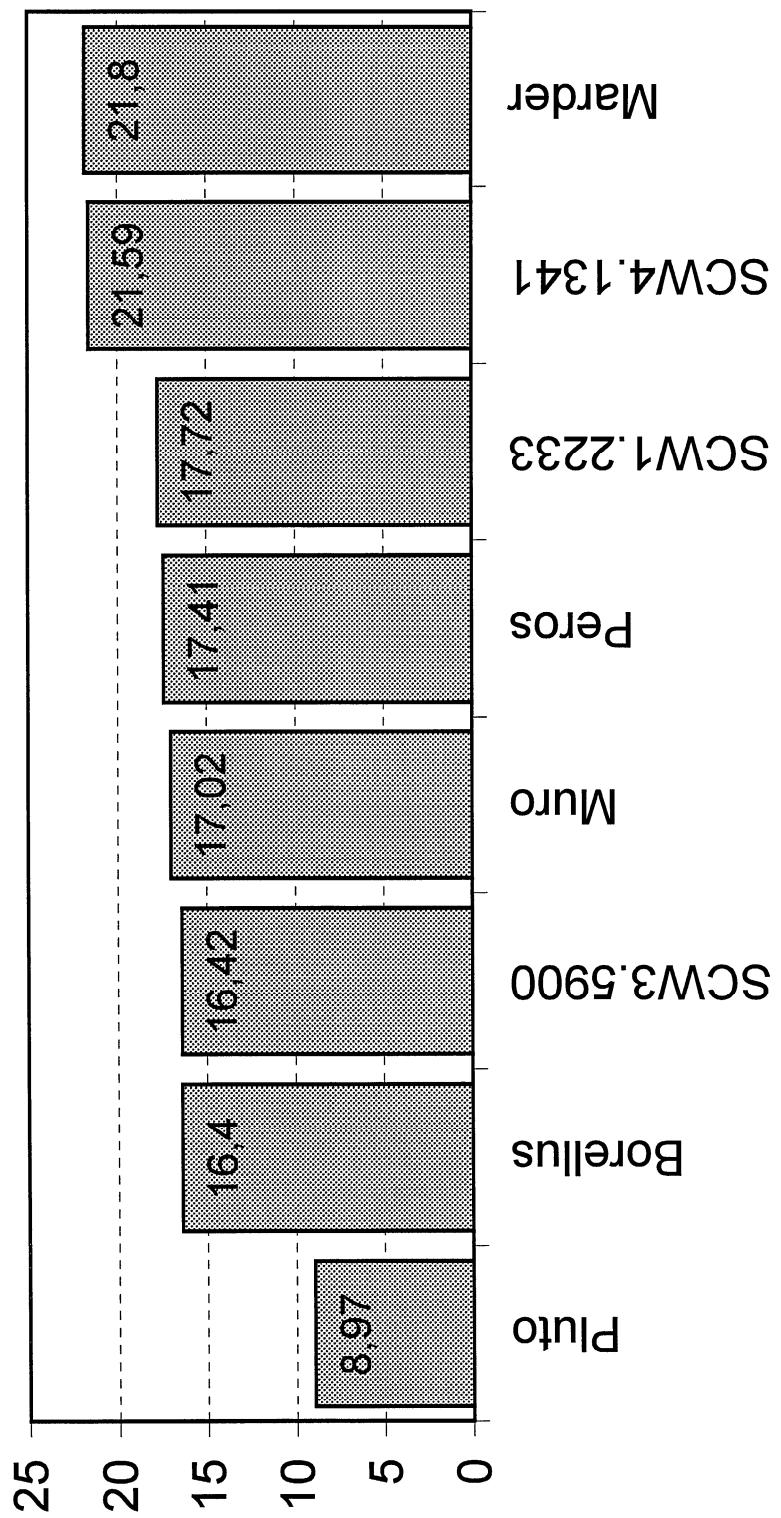
Zn-Anreicherung in Sonnenblumenblättern

## Cadmium-Gehalte in Winterweizensorten (mg/kg TS)

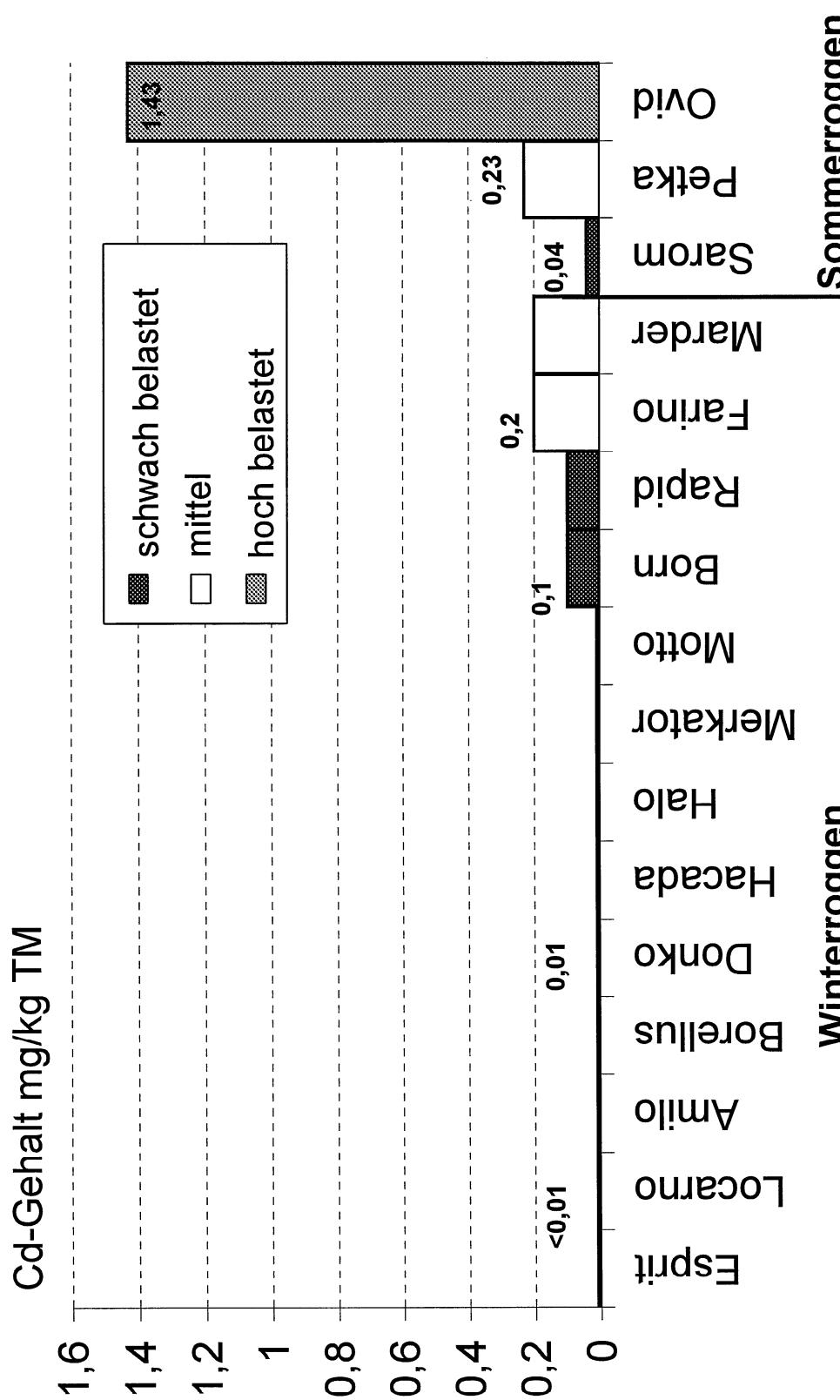


# Cadmiumgehalte im Winterroggenkorn

Cd-Geh. (µg/kg-TS)



- auf unbelastetem Boden (< 0,2 mg/kg Cd)
- Versuchstandort Thyrow / Kr. Zossen



## Cadmiumgehalte im Roggengkorn

(Sortenvergleich Berlin-Dahlem 1998)  
(Cd-Bodengehalt (KWA): <0,02 - 0,1 mg/kg)

Abb. 11

## Cd-Gehalte bei Roggen

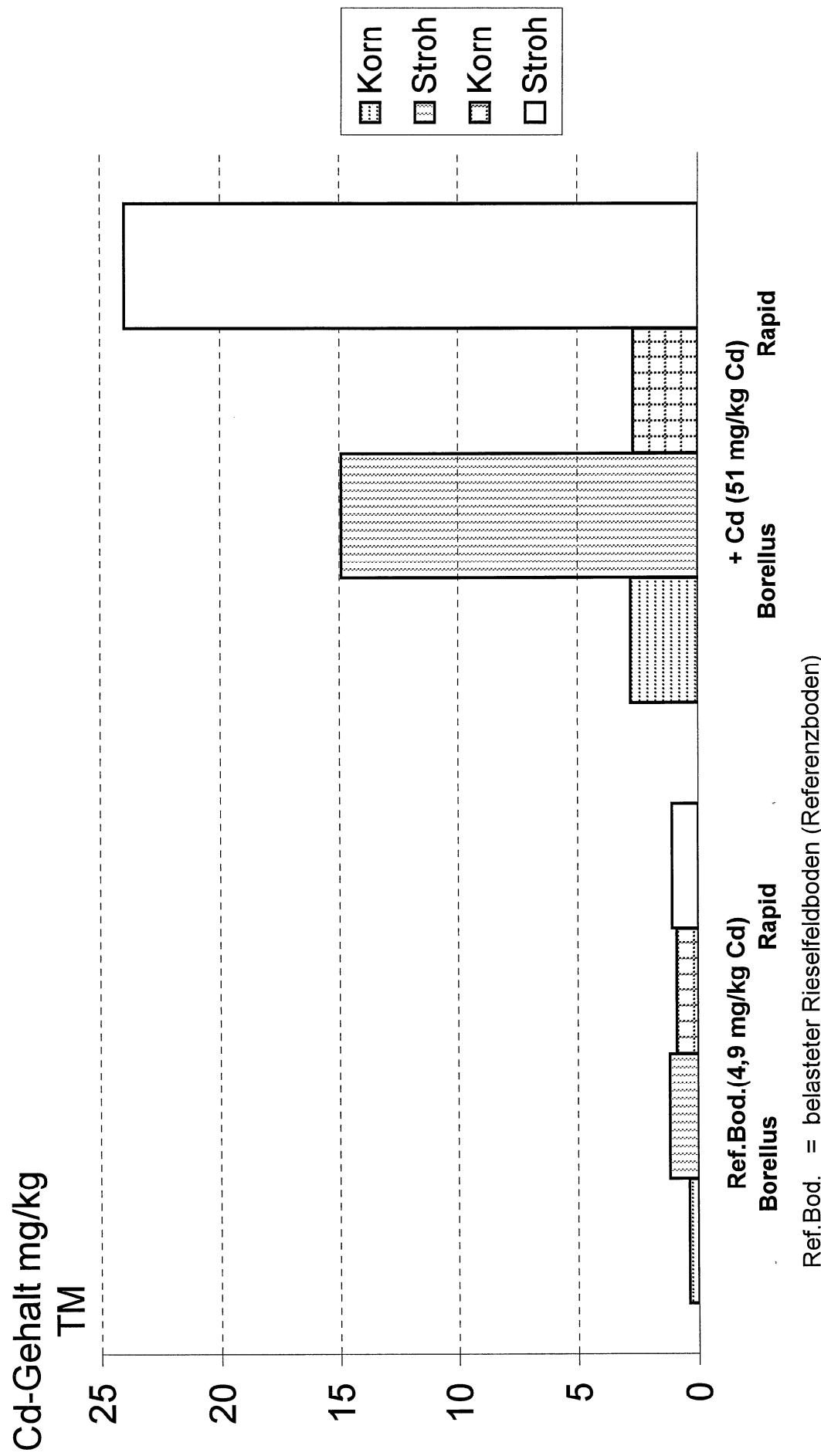
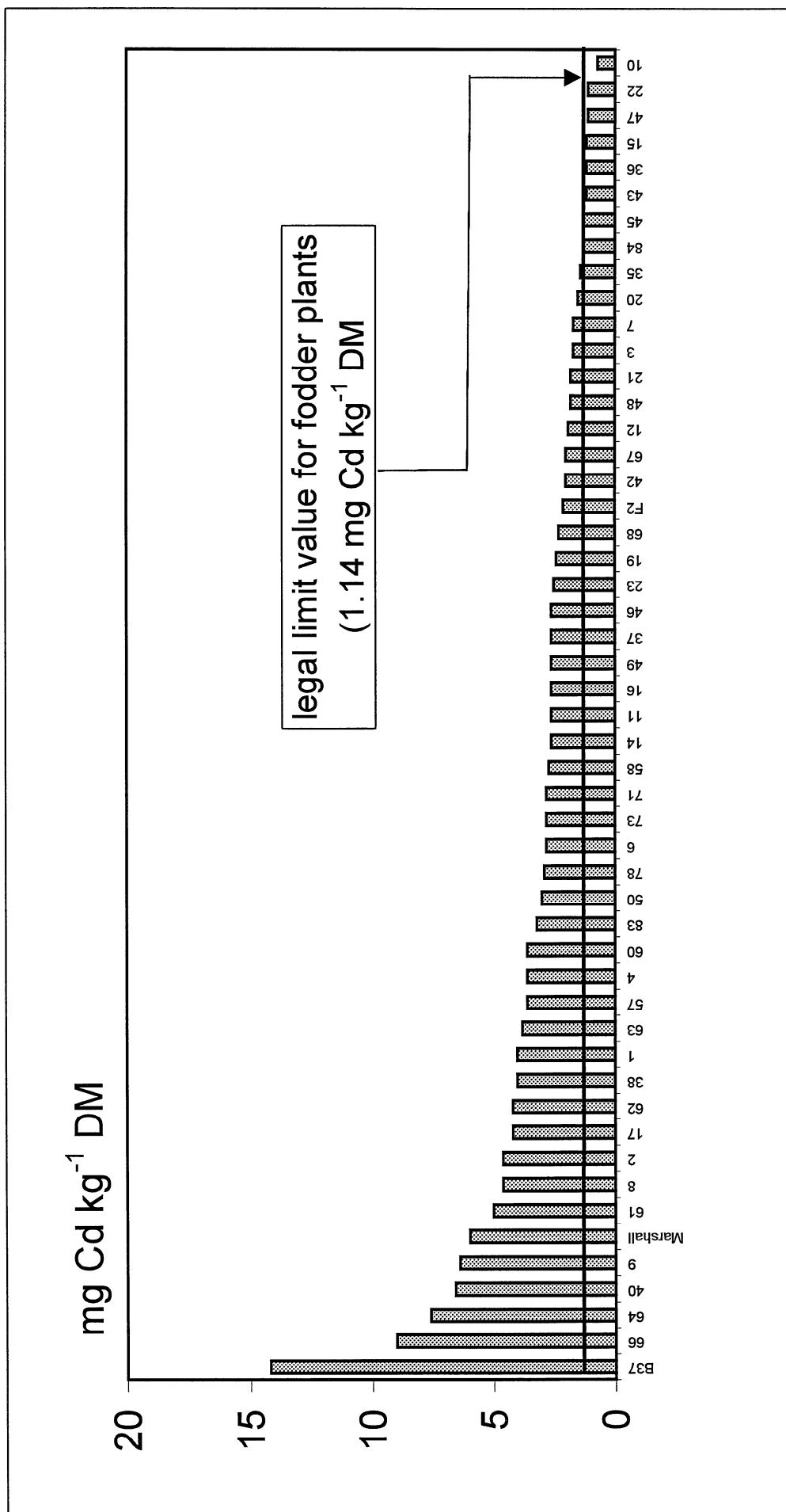
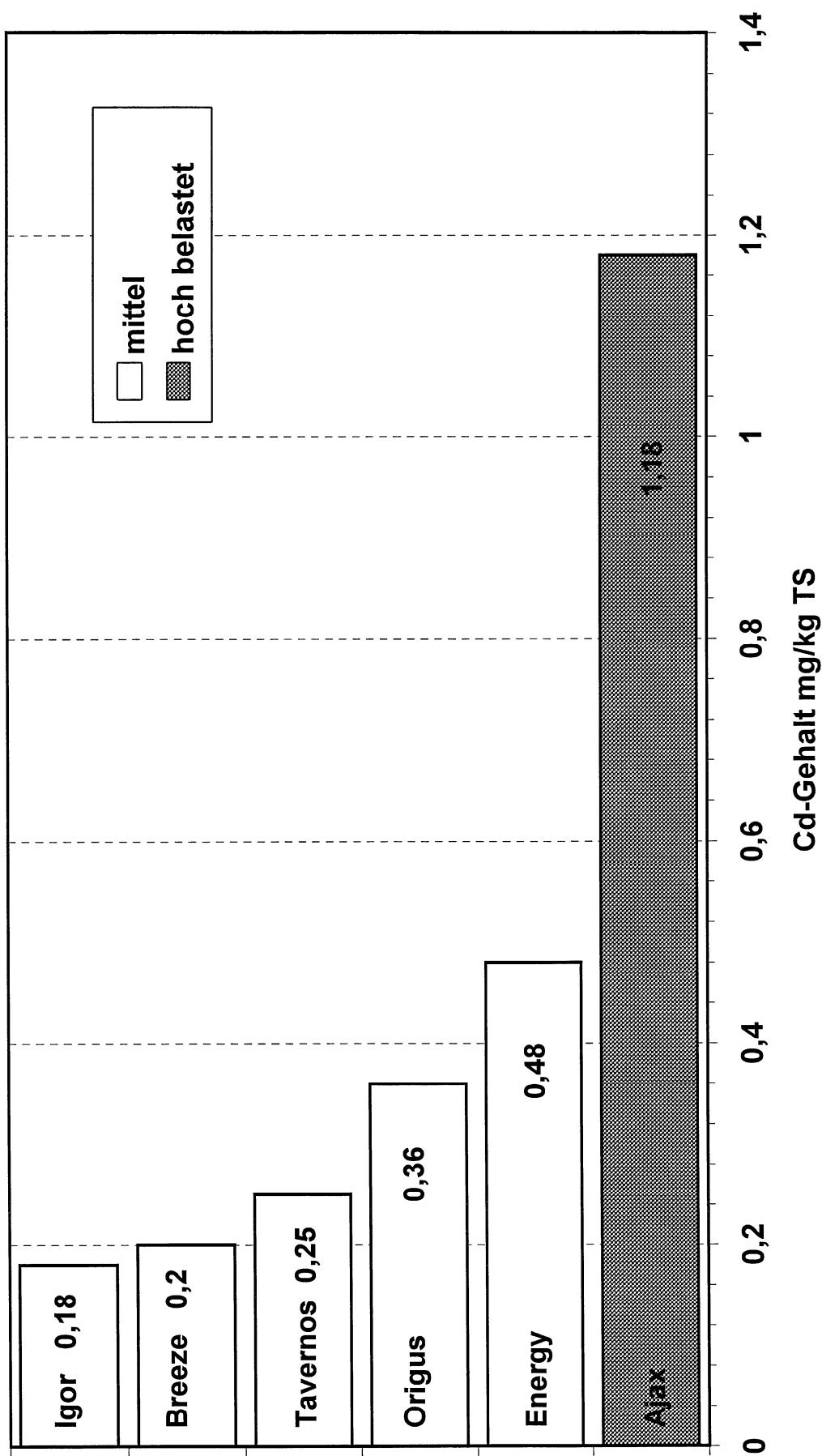


Abb. 12



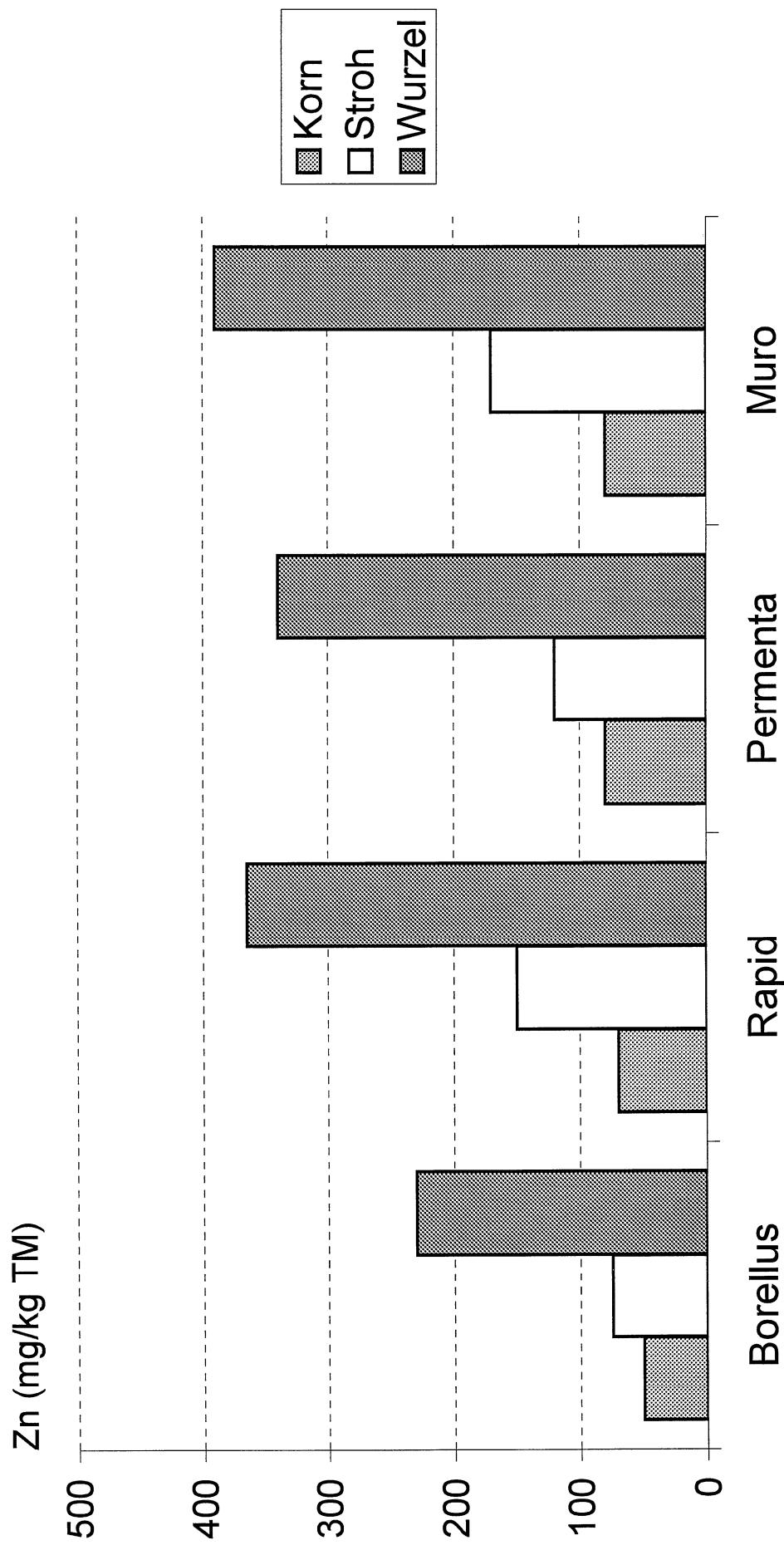
Cd-Konzentration im Sproß von Maiszuchtlinien bei Kornreife  
(Cd-belasteter Boden; Feldversuch 1994).

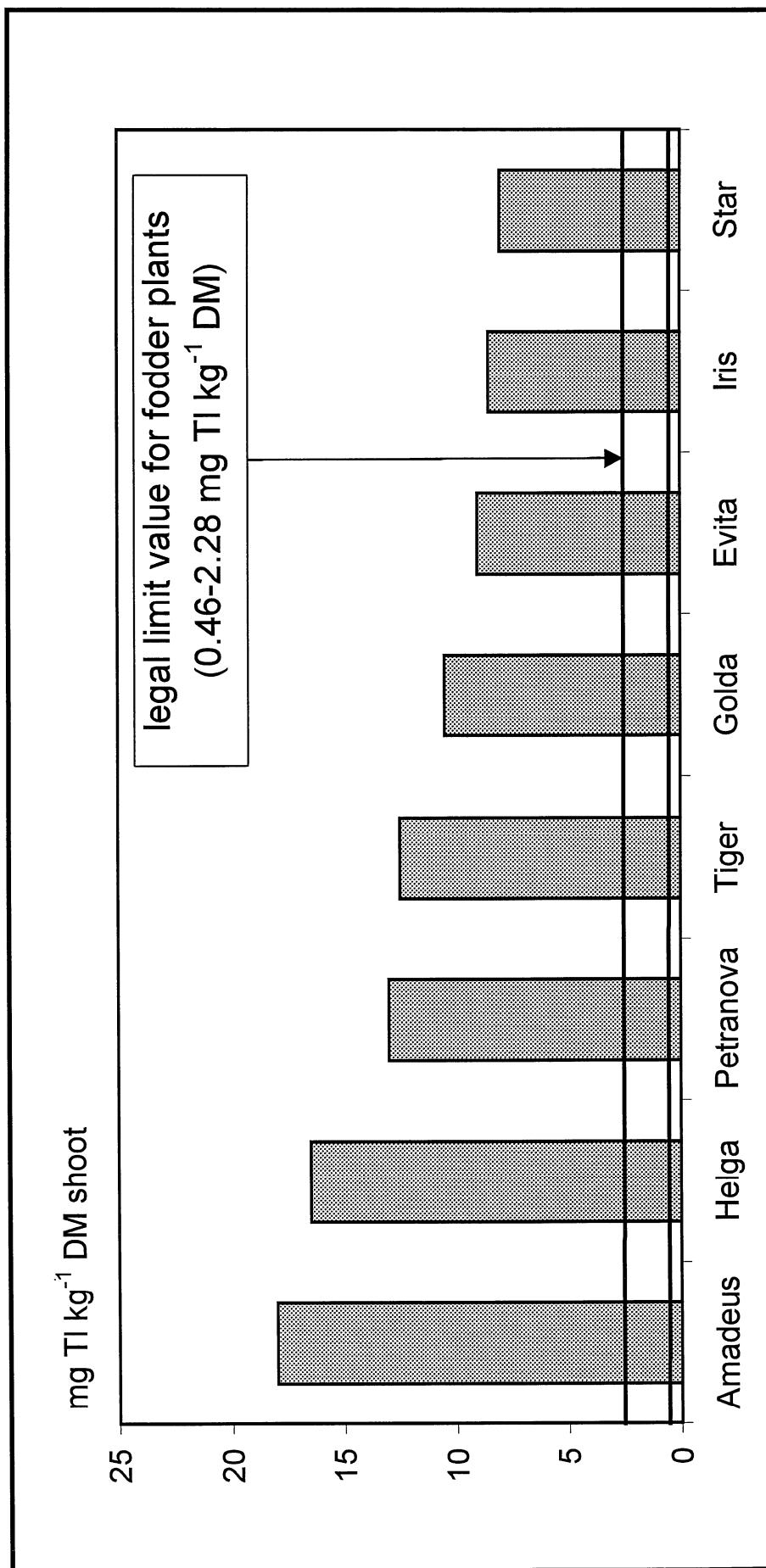


## Cadmiumgehalte im Rosenkohl (küchenfertig)

Sortenvergleich Berlin-Zepenick 1997  
Cd-Bodengehalt: 3,4 mg/kg

## Zn-Gehalte von vier Winterroggensorten bei gleicher Bodenbelastung (250 mg/kg Zn)





Tl-Konzentration im Sproß von verschiedenen Sommerrapssorten,  
geerntet vor der Blüte (Tl-belasteter Boden; Feldversuch 1997).

## Verteilung von Cadmium in verschiedenen Pflanzenorganen (ppm/TM)

Fruchtart	Pflanzenorgane mit Grenzwertüberschreitung	nutzbare Pflanzenorgane
Kartoffel	3,05 Kraut	0,40 Schale 0,25 Knolle mit Schale
Möhre	2,45 Kraut 1,23 Wurzel (gewaschen)	0,66 Rübe
Futterrübe	6,13 Kraut	0,23 Kolben
Silomais	1,03 Stroh	0,20 Korn
W.Roggen	1,18 Stroh	
Hafer	1,54 Stroh 1,44 Korn und Spelze	0,21 Kopf
Weißkohl	1,45 Hüllblätter	
		Grenzwert für Futtermittel: 1,00
		Grenzwert für Nahrungsmittel: 0,50
		Bodengehalt an Cd - 2,0 mg/kg

## Pro-Kopf-Verbrauch an pflanzlichen Produkten (kg/E/a) und sortenabhängige Aufnahme (mg/E/a) - berechnet nach vorläufig vorliegender Datenbasis -

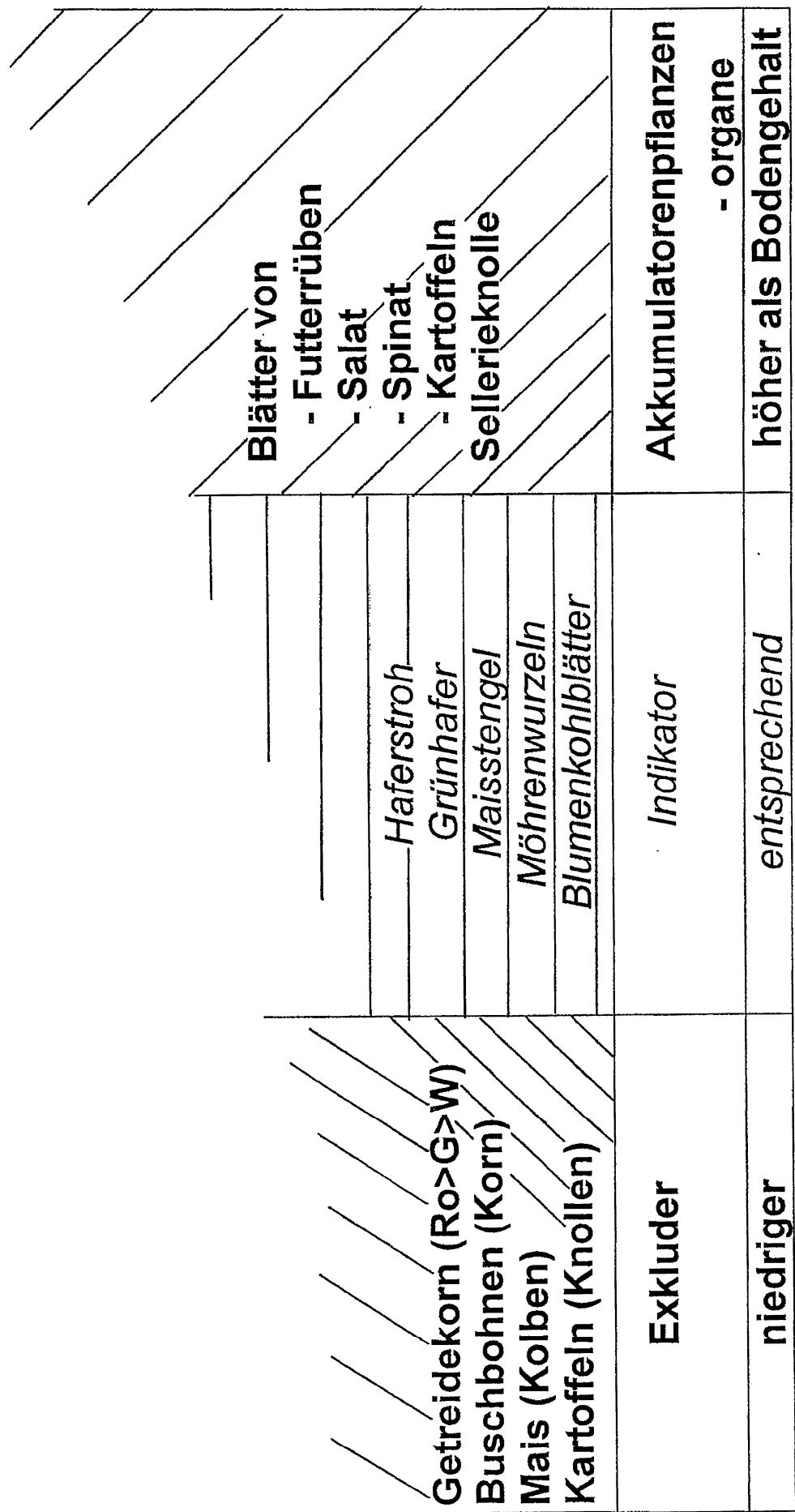
Produkt	mg/E/a bei Sortengehalten	
	kg/E/a	hoch
<b>Kartoffeln</b>	<b>75</b>	<b>12</b>
<b>Getreide</b>	<b>70</b>	<b>(14)</b>
<b>Gemüse</b>	<b>90</b>	<b>0,5</b>
<b>Frischobst</b>	<b>120</b>	<b>n.b.</b>
<b>Gesamt</b>	<b>-</b>	<b>14,3</b>
<b>Tolerierbare Menge (WHO)</b>	<b>-</b>	<b>25</b>

<sup>1)</sup>davon 50 % Frucht- und Zwiebelgemüse (niedrige Anreicherung)

50 % Blatt- und Wurzelgemüse (mittlere bzw. hohe Anreicherung)

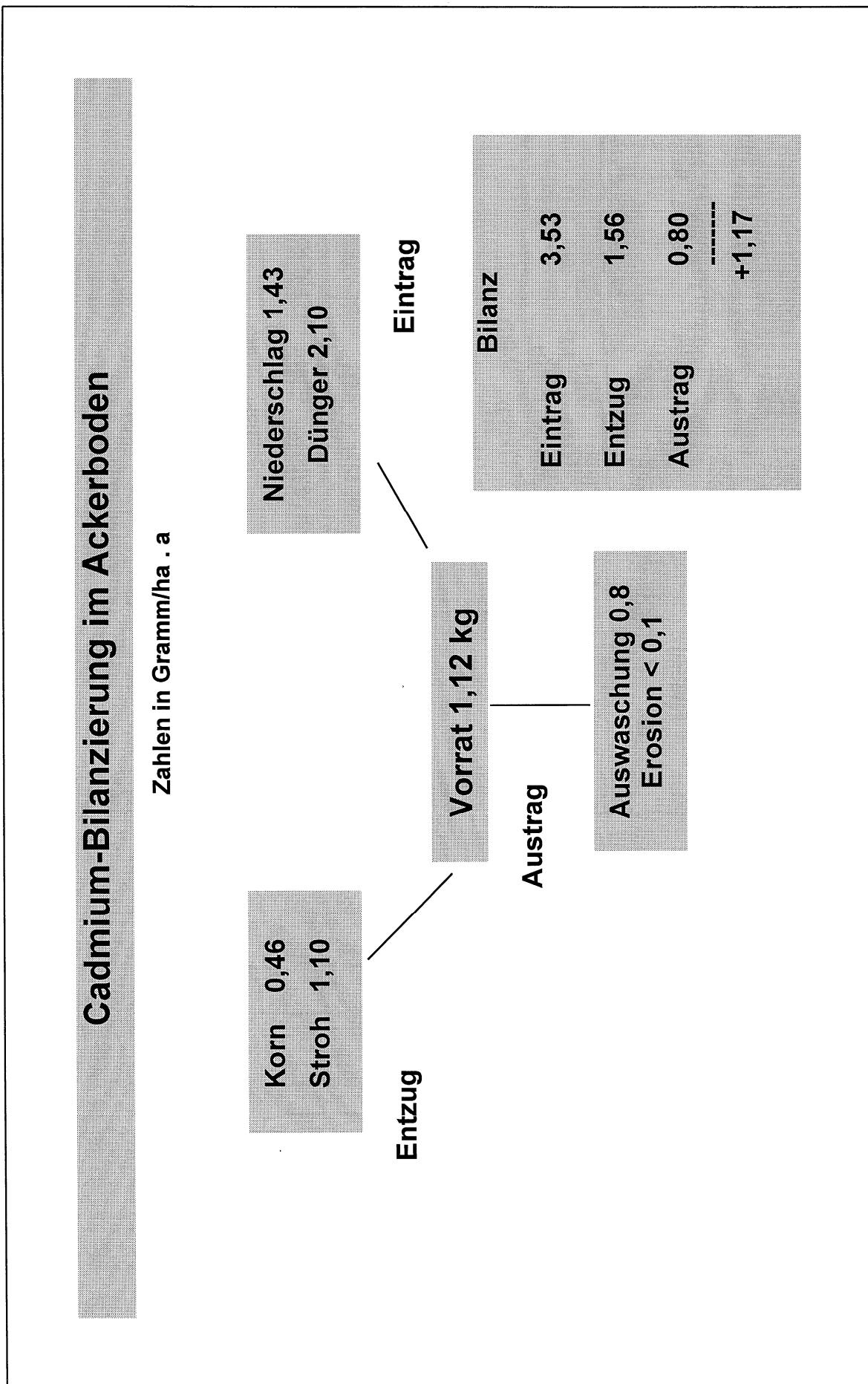
<sup>2)</sup>ungünstige Datenbasis (relativ geringe Anreicherung)

Abb. 18



## **Cd-Gehalt und Pflanzenart, / -organ (bei Bodengehalten in Höhe Abf/Klärv)**

Abb. 19



## Beschaffenheit des Grundwassers unter Rieselfeldern

Ackerkrume	*hohe Sorption für Nähr- und Schadstoffe
25-30 cm	*Erhöhte C- und N-Gehalte *pH-Werte bewirtschaftungsbedingt (niedrig)
	*Erosionsabhängig in Senken und Gewässer
	*bei Brache rasche Mineralisierung und Versauerung

Geschiebelehm	*Sorption von Schwermetallen
-mergel	*Reduktion von $\text{NO}_3$ zu $\text{N}_2\text{O}$ und $\text{N}_2$
-sand	*Immobilisierung von Orthophosphat
<2 - > 20 m	

1. Grundwasserleiter	* $\text{PO}_4$ : 20 - 60 mg/l * $\text{NO}_3$ : 150 - 400 mg/l *Erhöhte DOC-Gehalte *Erhöhte (unbedenkliche) Schwermetallgehalte *Salzfracht erheblich über TVO-Grenzwerten
----------------------	--

Geschiebemergel	
5 - 15 m	*weitere Reduktion der Frachten

2. Grundwasserleiter	*Salzfracht überhöht *Chlorierte Kohlenwasserstoffe *keine erhöhten Schadstoffbelastungen *Trinkwassergewinnung
----------------------	--

darunter keine unnatürliche Kontamination

# Sanierung der Rieselfelder durch Pflanzenanbau?

## Bodenausgangsgehalt

### Referenzboden (R)

4,9 mg Cd/kg TS  
61,6 mg Cu/kg TS  
0,02 mg PCB 52/kg TS  
0,12 mg BaP/kg TS

### belasteter Rieselfeldboden (GB)

51,5 mg Cd/kg TS  
526 mg Cu/kg TS  
0,3 mg PCB 52/kg TS  
0,9 mg BaP/kg TS

nach zweijähriger  
von Roggen, Mais

Vegetation  
und Kartoffeln



### im Referenzboden (R)

keine Cd-Abnahme  
keine Cu-Abnahme  
20 %-ige PCB 52-Abnahme  
40 %-ige BaP-Abnahme

### im Rieselfeldboden (GB)

keine Cd-Abnahme  
geringe Cu-Abnahme  
30 %-ige PCB 52-Abnahme  
keine BaP-Abnahme

### bei den Anreicherungen von R auf GB-Werte

keine Cd-Abnahme  
geringe Cu-Abnahme  
30 %-ige PCB 52-Abnahme  
30 %-ige BaP-Abnahme

## Schlußfolgerungen

für Cd und Cu: nein  
für PCB 52: ja  
für BaP: ja, aber nur bei niedrigem Boden-C<sub>org</sub>

## Nutzungsvarianten für schadstoffbelastete Rieselfeldböden

Nutzung	Produkte	Belastungsgrad und Heterogenität		
		ohne	schwach	hoch
<u>Gartenbau</u>	Gemüse, Beerenobst	+	-	-
	Baumobst, Zierpflanzen	+	+	-
	Sport-, Zierrasen	+	+	mit Bodendecke
<u>Landwirtschaft</u>	Nahrungsfrüchte/Futterpflanzen	+		-
	Rohstoff-/Energiepflanzen	+	+	- (I)
	Fleisch, Milch, Eier	+	+	- (I)
	Innereien	+	-	-
<u>Forst, Park</u>	Gehölze	+	+	+
	Beerenfrüchte	+		-
	Pilze	+	-	-
	Wildfleisch	+	+	-

ohne = Vorsorgewert  
 schwach = Prüfwert  
 hoch = Maßnahmenwert

+: geeignet  
 |: kontrolliert möglich  
 -: nicht möglich

## Nutzungsmöglichkeiten verschiedener Fruchtarten für die Produktion industrieller Rohstoffe

Rohstoff	Fruchtart	industrielle Produkte
Öl und Fett	Raps Lein	Wasch- und Reinigungsmittel, Kosmetika Kunststoffe, Lacke, Schmier- und Treibstoffe Tierfutter mit hohem Energie- gehalt
Stärke (Zellulose)	Kartoffel Getreide	Papier, Textilien, Chemikalien Pharmazeutika Tierfutter mit hohem Stärke- gehalt
Alkohol	Kartoffel Getreide	Industrialkohol Treibstoff
Fasern	Lein Hanf	Langfasern für die Textil- industrie
Zucker	Zuckerrübe	Weißzucker; Raffinade
Hopfen	Hopfen	Bier

Abb. 24

## Nutzung belasteter Standorte

### Altlastenstandorte

≥ Vorsorgewert bis Prüfwert		≥ Prüfwert bis Maßnahmenwert	≥ Maßnahmenwert Nutzungsbeschränkung	Alternative Nutzung:	
nicht legume Futterpflanzen		Industr. Rohstoffe	Spezialkulturen	Kraftstoffe	außerhalb Landwirtschaft
• CCM-Mais	• Zuckerrüben	• Baumschulen	• Ölfrüchte	• Forst	
• Getreide	• Kartoffeln	• Saatgutprod.	• stärkehaltige Fruchtarten	• Industrie- und Gewerbeanlagen	
• Kartoffeln	• Getreide	• Stauden	• Energiepflanzen	• Lager- und Deponieflächen	
• Baumobst	• Raps	• Zierpflanzen	• Früchte und Samen von Drogen-, Heil- und Gewürzpflanzen	• Baugelände	
- kein Gemüse	• Flachs			• Friedhöfe	
- kein Tabak	• Hopfen				
	• Hanf				

## **Annex 2**

### **Teilnehmerliste**



**Dr. Dietrich F. W. von Borries**  
Bundeministerium für Umwelt,  
und Reaktorsicherheit  
AG-WA III 2  
Postfach 12 06 29

53048 Bonn

phone 02 28-30 5 26 83  
fax 02 28-30 5 23 96

**Dr. Klaus A. Feller**  
Wehrwissenschaftliches Institut  
für Schutztechnologien – ABC-Schutz  
Postfach 11 42

29623 Munster

phone 051 92-13 63 60/36 1  
fax 051 92-13 63 55

**Dr. Kurt-Dieter Fibian**  
Universität Rostock  
Fachbereich Agrarökologie  
FG Pflanzenernährung  
J.v. Liebig-Weg 8

18059 Rostock

phone 03 81 – 498 21 34  
fax 03 81 – 498  
[kurt-dieter.fibian@agrarfak.uni-rostock.de](mailto:kurt-dieter.fibian@agrarfak.uni-rostock.de)

**Prof. Dr. Othmar Horak**  
Austrian Research Centers,  
Forschungszentrum Seibersdorf  
Bereich Lebenswissenschaften

A-2444 Seibersdorf

phone ++43 22 54 78 0 - 35 02  
fax ++43 22 54 78 0 - 36 53  
[othmar.horak@arcs.ac.at](mailto:othmar.horak@arcs.ac.at)

**Dipl.-Geol. Sabine Huck**  
Umweltbundesamt  
Bismarckplatz 1

14193 Berlin

phone 03 0-89 03 23 25  
fax 03 0-89 03 21 03

[sabine.huck@uba.de](mailto:sabine.huck@uba.de)

**Dr. Peter Kuschk**  
UFZ Umweltforschungszentrum Leipzig-  
Halle GmbH  
Permoserstr. 15

04318 Leipzig

phone 03 41 – 23 5 28 21  
fax 03 41 – 23 5 24 92  
[kuschk@san.ufz.de](mailto:kuschk@san.ufz.de)

**Prof. Dr. Reinhart Metz**  
Humboldt-Universität zu Berlin  
Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät  
Institut für Pflanzenbauwissenschaften  
Fachgebiet Ackerbausysteme  
Dorstr. 9

13051 Berlin

phone 03 0-96 27 55 10  
fax 03 0-96 27 55 50

**Dipl.-Ing. Ingo Müller**  
Landesumweltamt NRW  
Wallneyer Str. 6

45133 Essen

phone 02 01-79 95 11 57  
Fax: 02 01-79 95 15 74  
[ingo.mueller@essen.lua.nrw.de](mailto:ingo.mueller@essen.lua.nrw.de)

**Dr. Erich Pluquet**  
Niedersächsisches Landesamt für  
Bodenforschung  
Bodentechnologisches Institut Bremen  
Friedrich-Mißler-Straße 46/50

28211 Bremen

phone 0421 – 20 34 6 22  
fax 0421 – 20 34 6 10  
[erich.pluquet@bgr.de](mailto:erich.pluquet@bgr.de)

**Dr. Ulrich Schmidt**  
Universität Hohenheim  
Institut für Bodenkunde  
Abt. Bodenchemie  
Emil-Wolff-Str. 27

70593 Stuttgart

phone 0711-45 93 11 7  
fax 0711-45 93 76 5/3383  
[uschmidt@uni-hohenheim.de](mailto:uschmidt@uni-hohenheim.de)

**Dr. Rudolf Schulz**  
Universität Hohenheim  
Institut für Pflanzenernährung (330)

70593 Stuttgart

phone 0711-45 9 23 49  
fax 0711-45 9 32 95  
[schulzru@uni-hohenheim.de](mailto:schulzru@uni-hohenheim.de)

**Prof. Dr. Konstantin Terytze**  
Umweltbundesamt  
Bismarckplatz 1

14191 Berlin

phone 030-89 03 23 51  
fax 030-89 03 21 03  
[konstantin.terytze@uba.de](mailto:konstantin.terytze@uba.de)

Fraunhofer-Institut für  
Umweltchemie und Ökotoxikologie  
Auf dem Aberg 1

57392 Schmallenberg

phone 02 97 2 – 302 0  
fax 02 97 2 – 302 31 9

**Dr. Monika Herrchen** 302 215  
[herrchen@iuct.fhg.de](mailto:herrchen@iuct.fhg.de)

**Dr. Kerstin Hund-Rinke** 302 266  
[hund@iuct.fhg.de](mailto:hund@iuct.fhg.de)

**Dr. Werner Kördel** 302 217  
[koerdel@iuct.fhg.de](mailto:koerdel@iuct.fhg.de)