

Verfahren zur regionalen Bewertung der Cadmiumeinträge in die Böden des Abwassererregungsgebietes Braunschweig

Joachim Ingwersen^{*}, Thilo Streck^{*} und Jörg Richter^{*}

Zusammenfassung Seit 1957 werden in die landwirtschaftlich genutzten Böden des Abwasserverbandes Braunschweig (3000 ha) über die Abwassererregung Schwermetalle eingetragen. Am Beispiel von Cadmium werden zwei Verfahren zur ökologischen Bewertung dieser nutzungsbedingten Immissionen vorgestellt und mit den Vorgaben der Klärschlammverordnung verglichen. Das Bewertungsziel des ersten Verfahrens ist der Schutz der Pufferfunktion des Bodens. Über Freundlich-Isothermen werden für eine Bodenlösungskonzentration von 5 µg/l (Trinkwassergrenzwert) die Grenz-Sorptionskapazitäten für die Böden der Region berechnet. Bei Überschreiten dieser Grenz-Sorptionskapazität wird die Pufferfunktion des Bodens unwirksam. Das Bewertungsziel des zweiten Verfahrens ist die Bewahrung des Bodens als Nahrungspflanzenstandort (Weizen). Durch eine Verknüpfung von Transpiration und Bodenlösungskonzentration werden Cd-Gehalte im Weizenkorn berechnet. Die geschätzten Cd-Gehalte werden nach dem Kriterium des doppelten Lebensmittelrichtwertes für Weizen (0.24 mg/kg) bewertet.

Summary Since 1957, heavy metals have been applied to the agriculturally used soils of the waste water irrigation area (3000 ha) of Braunschweig, Germany. Taking Cadmium as an example, we present two procedures to assess the ecological impact of heavy metal input and compare them with the criteria of the German regulations for the disposal of sewage sludge. One procedure aims at retaining the buffer function of the soil. By means of Freundlich sorption isotherms, the limiting sorption capacities of the soils in the wastewater region are calculated. If these are exceeded the buffer function of the soil becomes ineffective. The other procedure aims at preserving the soil as habitat for crops (wheat). By combining transpiration and soil solution phase concentration, Cd concentrations in wheat grain are calculated and compared with a German threshold value.

1. Einleitung

In seiner Multifunktionalität ist der Boden Puffer, Filter, Bioreaktor, Lebensraum und nicht zuletzt Grundlage der menschlichen Ernährung und Kultur. Zum Schutz dieser Bodenfunktionen wurden Bodenwerte, Grenz- und Richtwerte, wie wir sie bei Eikmann und Kloke (1993) oder in der Klärschlammverordnung (AbfKlärV, 1992) finden, definiert. Sie sollen den ökologischen Zustand eines Bodens charakterisieren und in der politisch-

administrativen Praxis eine Orientierungs- und Entscheidungshilfe geben. Diese Werte beziehen sich stets auf den Gesamt-Schwermetallgehalt (Königswasseraufschluß) eines Bodens. Über die ökologisch relevante tatsächliche Bioverfügbarkeit und Mobilität eines Schwermetalls gibt dieser Gehalt allerdings nur eine unbefriedigende Information (DELSCHEN & WERNER 1989; BRÜMMER et al. 1994; KÖNIG 1994). Hohe Gesamtgehalte sind nicht zwingend mit hohen Pflanzengehalten verbunden und umgekehrt. Aus diesem Grund wurden zur Abschätzung der Bioverfügbarkeit verschiedene andere Extraktionsverfahren entwickelt und getestet (KÖSTER & MERKEL 1982; PRÜESS 1992; RUDD et al. 1988; ZEIEN & BRÜMMER 1989). Zur Abschätzung der Mobilität liegen vergleichsweise wenige Untersuchungen vor. BLUME & BRÜMMER (1991) haben ein Verfahren zur Gefahren- und Risikoabschätzung vorgestellt, in dem, in Abhängigkeit von pH, Humusgehalt und Bodenart, Wertzahlen von 1 bis 5 für unterschiedlich starke Bindungsstärken vergeben werden.

In dieser Arbeit sollen am Beispiel der Böden des Abwasserverregnungsgebietes Braunschweig zwei neue Verfahren zur ökologischen Bewertung von Schwermetall-Immissionen vorgestellt werden. Hierbei wird den ökologisch relevanten Aspekten der Bioverfügbarkeit und Mobilität besondere Beachtung geschenkt. Die methodischen Grundlagen sind

1) die Bestimmung der Grenz-Sorptionskapazität eines Bodens. Einträge über das Niveau dieser Grenz-Sorptionskapazität hinaus können durch die Pufferfunktion des Bodens nicht mehr kompensiert werden, so daß langfristig Cd-Sickerwasserkonzentrationen oberhalb des Trinkwassergrenzwertes ($5 \mu\text{g/L}$, TVO, 1986) zu erwarten sind. Basis dieses Konzeptes sind Freundlich-Isothermen. Über die Messung des EDTA-extrahierbaren Cd-Gehaltes und der Bodenlösungskonzentration wird der Freundlich-Koeffizient k für jede Bodenschicht abgeleitet. Für die Konzentration von $5 \mu\text{g/L}$ läßt sich hierüber für jedes Bodenprofil die Grenz-Sorptionskapazität berechnen, und

2) die Schätzung von Cd-Gehalten im Weizenkorn. Durch eine Verknüpfung von Transpiration und Bodenlösungskonzentration wird die Cd-Fracht in die Pflanze berechnet. Über ein einfaches Berechnungsverfahren wird die Translokation innerhalb der Pflanze zwischen Stroh und Korn berücksichtigt. Als Bewertungskriterium der geschätzten Cd-Gehalte im Weizenkorn wird der doppelte Lebensmittelrichtwert für Weizen (0.24 mg/kg , BGA, 1986) herangezogen

Die Ergebnisse dieser Verfahren werden mit den Vorgaben der Klärschlammverordnung verglichen und diskutiert.

2. Material und Methoden

2.1 Das Untersuchungsgebiet

Das Gebiet des Abwasserverbandes befindet sich ca. 10 km nordwestlich der Stadt Braunschweig und umfaßt heute eine Fläche von 4300 ha, wovon rund 3000 ha ackerbau-lich genutzt und beregnet werden. Das Verbandsgebiet ist in 4 ungefähr gleich große Areale, sogenannte Pumpwerkbezirke, unterteilt. 1957 wurde im Pumpwerkbezirk I, welcher sich im äußersten Süden des Gebietes befindet, mit der Verregung von Abwässern

begonnen. In einem Abstand von jeweils 3 Jahren erfolgte die Inbetriebnahme der weiteren 3 Bezirke. Mit der nun seit bis zu 40 Jahren andauernden Verregnung kommunaler Abwässer ist es zu einem Eintrag von Cadmium in die Böden dieser Region gekommen. Bis einschließlich 1984 lagen die Cd-Frachten zwischen 104 bis 573 kg/(3000 ha a). Nach 1984 konnten die Cd-Frachten durch eine forcierte Einleiterüberwachung und einen Ausbau der Kläranlage beträchtlich reduziert werden. Zwischen 1986 und 1994 betragen die Cd-Frachten 16 bis 57 kg/(3000 ha a) (BRAMM 1976; MÜHLNICKEL et al. 1989; STRECK 1993; ABWASSERVERBAND BRAUNSCHWEIG 1994).

Das Verregnungsgebiet befindet sich fast vollständig im Bereich einer weichselzeitlichen Niederterrasse zwischen den holozänen Talauen von Oker und Erse. Die vorherrschende Bodenart im über 30 m mächtigen Terrassenkörper ist Mittelsand. Im Westen treten inselhaft drenthezeitliche Schmelzwasser- und Flußablagerungen auf. Im Verregnungsgebiet haben sich aus diesen Ausgangssubstraten vor allem Braunerden und Gley-Braunerden gebildet. In Richtung Norden treten zunehmend podsolige Braunerden auf.

Die klimatische Wasserbilanz des Gebietes ist im langjährigen Mittel positiv. Der mittlere Niederschlag liegt zwischen 591-622 mm und die Verdunstung (n. HAUDE) bei 532 mm. Allerdings kommt es in der Hauptvegetationsperiode zu hohen Wasserdefiziten, die durch die Beregnung ausgeglichen werden. Von 1957-1980 wurden im Durchschnitt etwa 350 mm/a und ab 1981 etwa 550 mm/a beregnet. Der mittlere Grundwasserflurabstand (GFA) in der Region liegt bei 2 m. Es finden sich im Gebiet aber auch Standorte mit Grundwasserflurabständen unter 1 m. Die maximalen Grundwasserflurabstände liegen zwischen 4-5 m. Die mittlere jährliche Grundwasseramplitude ist ca. 30 cm.

2.2 Probenahme

Das Untersuchungsgebiet wurde in 500 m x 500 m große Rasterflächen unterteilt. In jeder Rasterfläche wurde ein Bodenprofil beprobt. Insgesamt wurden 161 Bodenmonolithe (0-120 cm) erbohrt. Durch den großen Durchmesser der eingesetzten Bodensonde (\varnothing 6 cm) konnte ausschließlich Probenmaterial aus dem Zentrum des Bohrkerns entnommen werden, d.h. der Randbereich blieb unberührt. Dieses Verfahren ermöglichte eine verschleppungsfreie Probenahme. Jeder Monolith wurde in 10 Bodenschichten (0-30, 30-40, 40-50, ..., 110-120 cm) beprobt. 7 Standorte befanden sich außerhalb des Verregnungsgebietes.

2.3 Berechnung der Grenz-Sorptionskapazität

Die Freundlich-Isotherme beschreibt für sorptive Stoffe die Gleichgewichtsbeziehung zwischen der Bodenlösungskonzentration c ($\mu\text{g/L}$) und dem Festphasengehalt s ($\mu\text{g/kg}$).

$$(1) \quad s = kc^m,$$

wobei m (1) der Freundlich-Exponent und k ($\mu\text{g}^{1-m} \text{L}^m \text{kg}^{-1}$) der Freundlich-Koeffizient ist. Für den Freundlich-Exponenten m wurde für Cadmium in verschiedenen Arbeiten ein annähernd gleicher Wert von 0.85 gefunden (CHARDON 1984, STRECK & RICHTER

1997). Dieser Wert wurde für die Berechnung der Grenz-Sorptionskapazität übernommen. Der Parameter k ist von verschiedenen Bodeneigenschaften, wie pH, C_{org} -Gehalt, Gehalt an Sesquioxiden etc., abhängig. In dieser Arbeit wurde der Freundlich-Koeffizient direkt über die Messung der Bodenlösungskonzentration c ($\mu\text{g/L}$) und dem EDTA-extrahierbaren Cd-Gehalt c_{EDTA} ($\mu\text{g/kg}$) bestimmt. Die Bodenlösungskonzentration wird durch die Lösungskonzentration im Gleichgewicht mit 0.0025 M CaCl_2 angenähert. Die Ionenstärke dieser Lösung entspricht der mittleren Ionenstärke des verregneten Abwassers, dessen Hauptanion zudem Chlorid ist. Durch die Extraktion mit 0.025 M $(\text{NH}_4)_2\text{-EDTA}$ wird der Gesamtgehalt der an Sorptions- und Desorptionsreaktionen teilnehmenden Schwermetalle erfaßt. Die Methodik ist näher beschrieben bei STRECK (1993) und STRECK & RICHTER (1997).

Durch Gleichung (2) erhalten wir den Freundlich-Koeffizienten k

$$(2) \quad k = \frac{s}{c^m} = \frac{c_{\text{EDTA}} - \frac{\theta}{\rho} c}{c^m},$$

wobei θ/ρ (L/kg) das bei der Bestimmung der Lösungskonzentration im Gleichgewicht mit 0.0025 M CaCl_2 eingesetzte Bodenlösungsverhältnis (1 L/kg) ist.

Zum Schutz des Grundwassers sollte die Cd-Konzentration im Sickerwasser in keinem Fall den Trinkwassergrenzwert von 5 $\mu\text{g/l}$ überschreiten. Für diese definierte Cd-Konzentration c_{Cd} läßt sich für jedes Bodenprofil über seine schichtspezifischen Freundlich-Isotermen die Grenz-Sorptionskapazität GSK (g/m^2)

$$(3) \quad GSK = \sum_{i=1}^n h_i \rho_i k_i c_{\text{Cd}}^m$$

berechnen, wobei h_i die Mächtigkeit und ρ_i die Lagerungsdichte der i -ten Schicht bezeichnen (Annahme: 0-30 cm = 1.47 g/cm^3 , >30 cm = 1.57 g/cm^3). Schwermetalleinträge über dieses Niveau hinaus können durch die Pufferfunktion des Bodens nicht weiter kompensiert werden. Für Grundwasserflurabstände größer als die Beprobungstiefe wird angenommen, daß tiefere Schichten die gleichen Sorptionseigenschaften aufweisen wie die unterste beprobte Schicht. Eine Grundwasserflurabstandskarte wurde auf der Basis des Digitalen Geländemodells DGM5 (Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen, Hannover) und einer durch Universal Kriging zweiter Art (ArcView, Spatial Analyst, ESRI Inc., USA) interpolierten Grundwasseroberfläche für die gesamte Region erzeugt. Zur Interpolation der Grundwasseroberfläche standen langjährige Mittelwerte von 26 Beobachtungspiegeln zur Verfügung.

Zur Beschreibung des Belastungszustandes eines Bödens wird der Grenz-Sorptionskapazität GSK der prozentuale Auffüllungsgrad als Index angehängt. Zum Beispiel bedeutet GSK_{50} , daß die zur Zeit im Boden sorbierte Cd-Menge $\geq 50\%$ der Grenz-Sorptionskapazität beträgt.

2.4 Berechnung der Cd-Gehalte im Weizenkorn

Verschiedene Autoren weisen daraufhin, daß hohe Cd-Gehalte in Pflanzen häufig an Orten intensiver Transpiration gefunden werden. (CARLSON et al., 1975; HARDIMAN & JACOBY 1984). Diese Beobachtung wird dahingehend gedeutet, daß der Schwermetalltransport innerhalb der Pflanze über den Transpirationsstrom erfolgt. In dieser Arbeit wird ein Ansatz von CHRISTENSEN & TJELL (1983) aufgegriffen und modifiziert. Unter der Annahme einer ausschließlich passiven Aufnahme von Cadmium über den Transpirationsstrom kann der mittlere Cd-Gehalt in der Pflanze, \bar{c} , nach Gleichung (4) berechnet werden.

$$(4) \quad \bar{c} = \frac{1}{TS_{Ges}} \sum_{i=1}^n T_i c_i = \frac{TK}{T} \sum_{i=1}^n T_i c_i,$$

Hierbei ist TS_{Ges} die Gesamt-Trockensubstanz (kg/m^2), T_i der Transpirationsstrom aus der i -ten Schicht (L/m^2), T die gesamte Transpiration (L/m^2), TK der Transpirationskoeffizient (L/kg) und c_i die Cd-Bodenlösungskonzentration ($\mu\text{g/L}$) in der i -ten Schicht. Auch hier wird die Bodenlösungskonzentration über die Lösungskonzentration im Gleichgewicht mit 0.0025 M CaCl_2 angenähert. Zur Charakterisierung der Translokation innerhalb der Pflanze werden die Quotienten

$$(5) \quad Q_{SM} = \frac{c_{Stroh}}{c_{Korn}}$$

und

$$(6) \quad Q_{TS} = \frac{TS_{Stroh}}{TS_{Korn}}$$

eingeführt, wobei c_{Stroh} der Cd-Gehalt im Stroh (mg/kg), c_{Korn} der Cd-Gehalt im Korn (mg/kg), TS_{Stroh} die Trockensubstanz des Strohs (kg/m^2) und TS_{Korn} die Trockensubstanz des Korns (kg/m^2) bezeichnen. Für den Cd-Gehalt im Korn ergibt sich

$$(7) \quad c_{Korn} = \frac{\bar{c}(1 + Q_{TS})}{1 + Q_{TS}Q_{SM}}$$

Die Transpirationsströme aus den einzelnen Schichten wurden auf der Basis von Klimadaten der Jahre 1995 und 1996 mit Hilfe des auf der Richards-Gleichung basierenden Modells SIMULAT (DIEKKRÜGER 1996) berechnet. Aufgrund der hohen Berechnungsmengen ist der Einfluß der Bodenart (S, IS, uS) auf die Transpiration gering (5-10%) und wurde daher vernachlässigt. Die Simulation wurde mit der im Gebiet dominierenden Bodenart mS durchgeführt.

2.5 Abschätzung des Cd-Gesamtgehalts

Der in der Klärschlammverordnung für Cd festgelegte Grenzwert bezieht sich auf den Gesamtgehalt c_{Ges} des Bodens. Zur Zeit liegen noch keine eigenen Messungen des Ge-

samtgehaltenes vor, so daß in dieser Arbeit der Gesamtgehalt über den EDTA-extrahierbaren Cd-Gehalt geschätzt werden mußte. Zur Abschätzung wurde eine von HORNBURG (1991, S.38) bei der Untersuchung schleswig-holsteinischer Böden gefundene lineare Beziehung zwischen dem EDTA-extrahierbaren Cd-Gehalt ($\mu\text{g}/\text{kg}$) und dem Cd-Gesamtgehalt ($\mu\text{g}/\text{kg}$) verwendet:

$$(8) \quad c_{Ges} = \frac{c_{EDTA} + 89}{0.87}$$

3. Ergebnisse

3.1 EDTA-extrahierbare Cd-Gehalte

In den Ap-Horizonten des Verregnungsgebietes variieren die EDTA-extrahierbaren Cd-Gehalte in einem Bereich von 33 bis 1219 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Innerhalb des Verregnungsgebietes sind sie signifikant höher als außerhalb. Trotz der unterschiedlichen Betriebszeiten wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Pumpwerkbezirken festgestellt (vgl. Tab. 1). 2% der Böden überschreiten den Grenzwert von 1 mg/kg Cd-Gesamtgehalt.

Tab 1: EDTA-extrahierbare Cd-Gehalte ($\mu\text{g}/\text{kg}$) in den Ap-Horizonten der vier Pumpwerkbezirke und außerhalb des Gebietes

	<i>Pumpwerkbezirk</i>				<i>außerhalb des Verregnungsgebietes</i>
	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	
\bar{x}	278	238	324	286	156
<i>s</i>	131	108	219	149	109
<i>min</i>	95	52	33	97	52
<i>max</i>	701	598	1219	914	420
<i>N</i>	35	40	45	34	7

3.2 Grenz-Sorptionskapazitäten

Die Grenz-Sorptionskapazitäten konnten bisher nur für die Böden der Pumpwerkbezirke I und II (N=75) berechnet werden. Für die Pumpwerkbezirke III und IV steht zur Zeit noch kein vollständiger Datensatz zur Verfügung.

Die Grenz-Sorptionskapazitäten der untersuchten Böden weisen eine sehr hohe Variationsbreite auf (155-2584 mg/m^2). Nur bei einem der 72 Bodenprofile ist der Belastungszustand GSK_{100} erreicht, d.h. die Grenz-Sorptionskapazität des Bodens ist überschritten und die Belastungsgrenze erreicht. 19% der Böden weisen den Belastungszustand GSK_{50} auf (siehe 2.3).

Zum Vergleich dieses Verfahrens mit den Vorgaben der Klärschlammverordnung sei hier folgendes Gedankenexperiment angeführt: Würde die Ackerkrume im gesamten Verregnungsgebiet Cd-Gesamtgehalte von 1 mg/kg aufweisen und wären hiervon ungefähr 0.78 mg/kg EDTA-extrahierbar (vgl. Gleichung 8), so betrüge bei einer Lagerungsdichte von 1.47 kg/L die sorbierte Cd-Menge 344 mg/m^2 . Nur diese Fraktion ist an Sorptionspro-

zessen beteiligt. Die Cd-Gehalte im Unterboden werden an dieser Stelle vernachlässigt. Berechnet man für diese sorbierte Cd-Menge die entsprechenden Belastungszustände der einzelnen Bodenprofile, so wäre bereits bei 24% der Böden der Belastungszustand GSK_{100} erreicht und 78% der Böden würden den Belastungszustand GSK_{50} aufweisen. Einen Überblick über die verschiedenen Belastungszustände gibt Tabelle 2.

Tab. 2: Cd-Belastungszustände: Aktuell (1996) und bei Cd-Gesamtgehalten im Ap-Horizont von 1 mg/kg für die Pumpwerkbezirke I und II

Cd-Belastungszustand	Flächenanteile	
	gemessen 1996 (N=75)	Annahme: $c_{ges} = 1 \text{ mg/kg}$ $= 344 \text{ mg/m}^2$ sorbiertes Cd
GSK ₂₅	75%	96%
GSK ₅₀	19%	78%
GSK ₇₅	10%	43%
GSK ₁₀₀	<1%	24%

3.3 Cd-Gehalte im Weizenkorn

Zur Berechnung der Cd-Gehalte im Weizenkorn wurde auf verschiedene Literaturwerte zurückgegriffen. Eine Übersicht über die verwendeten Größen gibt Tabelle 3.

Tab. 3: Zusammenstellung der für die Berechnung des Cd-Gehaltes im Weizenkorn benutzten Parameter

Parameter	Wert	Quelle
TK	575 L/kg	Lerch, 1991, S.343
Q_{TS}	1.17	Ruhr-Stickstoff, 1985, S. 307
Q_{SM}	1.9	Lübben, 1993, Tab. 56c, S. 143

Die mit dem Modell SIMULAT berechneten Transpirationsströme aus den einzelnen Schichten sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tab. 4: Übersicht über die simulierten Transpirationsströme T_i aus den verschiedenen Tiefen

Tiefe (cm)	0-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	0-80
$T \text{ (L/m}^2\text{)}$	187	44	36	30	25	20	342

Auf der Basis dieser Daten kann für jedes Bodenprofil ein beim Anbau von Weizen zu erwartender Cd-Gehalt im Korn geschätzt werden (siehe Gleichung 4 und 7). Die Schätzung erfolgt auch hier zunächst nur für die Pumpwerkbezirke I und II (vgl. 3.2). Die gemessenen Cd-Gehalte beziehen sich dagegen auf ein Probenkollektiv aus allen vier Pumpwerkbezirken (ABWASSERVERBAND 1997). Der relativ einfache mechanistische Ansatz der rein passiven Aufnahme von Cadmium über den Transpirationsstrom der Pflanze liefert eine überraschend gute Übereinstimmung zwischen den geschätzten und gemessenen mittleren Cd-Gehalten im Weizenkorn. Auch die Variationsbreite der ge-

geschätzten Cd-Gehalte im Korn trifft den gemessenen Bereich gut (vgl. Tab. 5). Da für die gemessenen Cd-Gehalte im Korn keine Gauß-Krüger Koordinaten vorliegen, ist allerdings auf der jetzigen Datengrundlage keine Aussage über die räumliche Übereinstimmung zwischen den gemessenen und geschätzten Cd-Gehalten im Korn möglich.

Die mittleren geschätzten Cd-Gehalte im Weizenkorn bewegen sich an der oberen Grenze des doppelten Lebensmittelrichtwertes (0.24 mg/kg). In 25% der Fälle wird diese Grenze überschritten. Von den gemessenen Cd-Gehalten im Weizenkorn überschreiten 22% den doppelten Lebensmittelrichtwert.

Tab. 5: Vergleich von gemessenen und geschätzten Cd-Gehalten im Weizenkorn

Jahr	1995*	1996*	Schätzung (Mittel aus 1995 und 1996)
\bar{x}	0.165	0.233	0.228
Variationsbreite	0.08-0.32	0.063-0.633	0.022-0.903
N	10	13	75

* Abwasserverband, 1997

Für den Ap-Horizont läßt sich eine Bodenlösungskonzentration c_G berechnen, bei der der doppelte Lebensmittelrichtwert für den Cd-Gehalt im Weizenkorn erreicht wird. Für diesen Cd-Gehalt im Weizenkorn kann über Gleichung 7 der dazugehörige mittlere Cd-Gehalt in der Weizenpflanze berechnet werden. Im Mittel stammten etwa 80% des von der Pflanze aufgenommenen Cadmiums aus dem Ap-Horizont. Es ergibt sich somit die Gleichung

$$(9) \quad c_G = 0.8 \frac{\bar{c} (c_{Korn} = 0.24) TS_{Ges}}{T_1} = 1.96 \approx 2 \mu\text{g} / \text{L},$$

wobei T_1 der Transpirationsstrom (L/m^2) aus dem Ap-Horizont ist. Soll gewährleistet sein, daß der Cd-Gehalt im Weizenkorn den doppelten Lebensmittelrichtwert nicht überschreitet, darf nach diesen Berechnungen die Bodenlösungskonzentration den Grenzwert von $2 \mu\text{g}/\text{L}$ nicht übersteigen. Diesem Grenzwert der Bodenlösungskonzentration kann über die Freundlich-Isotherme jedem Ap-Horizont ein spezifischer EDTA-extrahierbarer Cd-Gehalt zugeordnet werden (siehe 2.3). Wird auch hier der Cd-Gesamtgehalt über Gleichung 8 abgeschätzt, ergibt sich für das Verregnungsgebiet ein tolerierbarer mittlerer Cd-Gesamtgehalt von $0.44 \text{ mg}/\text{kg}$, bei einer Variationsbreite von $0.15\text{-}1.03 \text{ mg}/\text{kg}$.

4. Diskussion und Schlußfolgerungen

Am Beispiel der Grenz-Sorptionskapazität der Böden des Abwasserverregnungsgebietes Braunschweig wird deutlich, daß ein einzelner Grenzwert den ökologischen Zustand verschiedener Böden nur eingeschränkt charakterisieren kann. Trotz der relativ homogenen pedogenetischen Bedingungen innerhalb des Verregnungsgebietes variieren die Grenz-Sorptionskapazitäten der untersuchten Böden mehr als eine Größenordnung (155-

2584 mg/m²). Insgesamt kann festgestellt werden, daß in bezug auf die Verlagerung von Cd ins Grundwasser die Pufferfunktion der Böden zur Zeit intakt ist. Weniger als 1% der untersuchten Böden sind aktuell über ihre Grenz-Sorptionskapazität hinaus mit Cadmium gefüllt. Käme es zu einer Auffüllung der Ap-Horizonte bis zum Grenzwert von 1 mg/kg, bliebe im Gebietsmittel die Pufferfunktion des Bodens insgesamt erhalten. Allerdings wären in diesem Belastungszustand bei 24% der Böden die Grenz-Sorptionskapazität bereits überschritten. Unter dem Gesichtspunkt des Grundwasserschutzes kann zusammenfassend festgestellt werden, daß der in der Klärschlammverordnung vorgeschriebene Grenzwert nach den Kriterien dieses Bewertungsverfahrens geeignet sein sollte, die Qualität des Grundwassers zu sichern. Weitergehende Aussagen, unter anderem auch über die langfristige Dynamik der Cd-Konzentration im Sickerwasser, sollen in zukünftigen Arbeiten mittels regionaler Simulationen erarbeitet werden.

Das Konzept der Grenz-Sorptionskapazität soll keinesfalls dazu ermuntern, die Böden tatsächlich bis zu ihrer Grenz-Sorptionskapazität aufzufüllen. Nach dem Vorsorgeprinzip des deutschen Umweltrechts muß, wie auch seit den 80er Jahren vom Abwasserverband Braunschweig erfolgreich umgesetzt, der Minimierung der Cd-Einträge Priorität eingeräumt werden. Grundsätzlich bleibt zu fragen, ob wirklich der Trinkwassergrenzwert von 5 µg/L als Bewertungskriterium oder, ob nicht dem Vorsorgeprinzip folgend, der halbe Trinkwassergrenzwert (Richtwert) als Kriterium genutzt werden sollte. Diese Entscheidung fällt jedoch in den Bereich von ethischen und politischen Wertvorstellungen.

Der in dieser Arbeit vorgestellte einfache mechanistische Ansatz, den mittleren Cd-Gehalt in der Pflanze über eine direkte Verknüpfung von Transpirationsstrom und Bodenlösungskonzentration abzuschätzen, hat gute erste Ergebnisse geliefert. Sowohl die Mittelwerte als auch die Variationsbreite der gemessenen und geschätzten Cd-Gehalte im Weizenkorn zeigten eine hohe Übereinstimmung. In zukünftigen Untersuchungen muß allerdings nachgeprüft werden, inwieweit dieses Ergebnis auf einer tatsächlichen räumlichen Übereinstimmung von gemessenen und geschätzten Cd-Gehalten im Weizenkorn beruht. Weiterhin ist zu überprüfen, inwieweit dieser Ansatz auf andere Pflanzenarten und Schwermetalle übertragbar ist.

Sollten sich unsere Ergebnisse bei zukünftigen Untersuchungen bestätigen, würde dies bedeuten, daß der in der Klärschlammverordnung festgesetzte Grenzwert von 1 mg/kg für die Böden des Abwassererregungsgebietes nicht geeignet ist, die Cd-Gehalte im Weizenkorn unterhalb des doppelten Lebensmittelrichtwertes zu halten. Um dieses Kriterium erfüllen zu können, dürfte die Bodenlösungskonzentration im Oberboden den Grenzwert von 2 µg/L nicht überschreiten. Bei den derzeitigen Sorptionseigenschaften der Böden entspricht dies einem mittleren Gesamtgehalt von 0.44 mg/kg, bei einer Variationsbreite von 0.15 bis 1.03 mg/kg. Auch hier wird erneut deutlich, daß der Boden im Abwassererregungsgebiet sehr heterogen ist. Die hoch variable Belastungsfähigkeit des Bodeninventars muß von einer nachhaltigen Abwassererregung berücksichtigt werden.

Danksagung

Die Studie wird im Rahmen des Projektes „Messung und Modellierung der Schwermetallverlagerung im regionalen Maßstab“ von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziell gefördert.

Literatur

- AbfKlärV (1992): Klärschlammverordnung vom 15. April 1992 - Bundesgesetzblatt Teil I, Nr.21: 912-934.
- Abwasserverband Braunschweig (Hrsg.) (1994): 40 Jahre Abwasserverband Braunschweig. 1954-1994. Wendeburg.
- Abwasserverband Braunschweig (1997): Persönliche Mitteilung.
- BGA (1986): Bundesgesundheitsamt: Richtwerte 1986 für Blei, Cadmium und Quecksilber in und auf Lebensmitteln. Bundesgesundheitsblatt **29**: 338-349.
- Bramm, A. (1976): Einflüsse der Abwasserlandbehandlung auf oberflächennahes Grundwasser - Untersuchungen im Abwasserverband Braunschweig, Dissertation Uni Kiel.
- Brümmer, G.W.; Zeien, H.; Hiller, D.A. & Hornburg, V. (1994): Bindungsformen und Mobilität von Cadmium und Blei in Böden .In: Kreysa, G. & Wiesner, J. (Hrsg.), Beurteilung von Schwermetallen in Böden von Ballungsgebieten: Arsen, Blei und Cadmium: 197-217. Dechema, Frankfurt a.M..
- Carlson, R.W., Bazzas, F.A. & Rolfe, G.L. (1975): The effect of heavy metals on plants. II. Net photosynthesis and transpiration of whole corn and sunflower plants treated with Pb, Cd, Ni and Tl - Environ. Res. **10**: 113-120.
- Chardon. W.J. (1984): Mobiliteit van cadmium in de bodem. Dissertation, Wageningen, Niederlande.
- Christensen, T. & Tjell, J. (1983): Interpretation of experiment results on Cadmium Crop Uptake from Sewage Sludge amended Soil . - In L'Hermite, P. & Ott, H. (Hrsg.), Processing and Use of Sewage Sludge. 358-369.
- Delschen, T. & Werner, W. (1989): Zur Aussagekraft der Schwermetallgrenzwerte in klärschlammgedüngten Böden. I. Einfluß verschiedener Bodenparameter auf die "tolerierbaren", königswasserlöslichen Gesamtgehalte - Landwirtschaftliche Forschung **42/1**: 29-39.
- Dieckrüger, B. (1996): SIMULAT - Ein Modellsystem zur Berechnung der Wasser- und Stoffdynamik landwirtschaftlich genutzter Standorte . - In Richter, O., Söndgerath, D. & Dieckrüger, B. (Hrsg.), Abschlußbericht des SFB 179 "Wasser- und Stoffdynamik in Agrarökosystemen", Band **24/1**: 30-47, Braunschweig.
- Eikmann, T. & Kloke, A. (1993): Nutzungs- und schutzgutbezogene Orientierungswerte für (Schad-) Stoffe in Böden - Eikmann-Kloke-Werte- . - In Rosenkranz, D., Bachmann, G., Einsele, G. & Harreß, H.-M. (Hrsg.), Bodenschutz: Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser , Band **3590**: 1-26. E. Schmidt Verlag, Berlin.

- Hardiman, R.T. & Jacoby, B. (1984): Absorption and translocation of Cd by bush beans (*Phaseolus vulgaris*) - *Physiol. Plant* (**61**): 670-674.
- Hornburg, V. (1991): Untersuchungen zur Mobilität und Verfügbarkeit von Cadmium, Zink, Mangan, Blei und Kupfer in Böden .In: Brümmer, G.W., Skowronek, A. & Zakosek, H. (Hrsg.), *Bonner Bodenkundliche Abhandlungen*, Band 2: 38, Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität Bonn.
- König, W. (1994): Kriterien für die Ableitung von Bodennormwerten . - In Kreysa, G. & Wiesner, J. (Hrsg.), *Beurteilung von Schwermetallen in Böden von Ballungsgebieten: Arsen, Blei und Cadmium*: 369-378. Dechema, Frankfurt a.M..
- Köster, W. & Merkel, D. (1982): Beziehungen zwischen den Gehalten an Zink, Cadmium, Blei und Kupfer in Böden und Pflanzen bei Anwendung unterschiedlicher Bodenuntersuchungsmethoden - *Landwirtschaftliche Forschung* (**39**): 245-254.
- Lerch, G. (1991): *Pflanzenökologie*. Akademie Verlag, Berlin
- Lübbers, S. (1993): Vergleichende Untersuchungen zur Schwermetallaufnahme verschiedener Kulturpflanzen aus klärschlammgedüngten Böden und deren Prognose durch Bodenextraktion. *Landbauforschung Völkenrode*. Sonderheft 140.
- Mühlnickel, R., Sänglerlaub, G. & Gebhardt, H. (1989): Schwermetallanreicherung in den Böden des Abwasserbehandlungsgebietes Braunschweig - *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*(**152**): 93-97.
- Prüß, A. (1994): Einstufung mobiler Spurenelemente in Böden . - In Rosenkranz, D., Einsele, H. & Harress, H.N. (Hrsg.), *Bodenschutz. Ergänzbares Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser*, Band **3600**: 1-59. E. Schmidt Verlag, Berlin.
- Rudd, T., Lake, D.L., Mehrotra, I., Sterritt, R.M., Kirk, P.W.W., Campbell, J.A. & Lester, J.N. (1988): Characterisation of metal forms in sewage sludge by chemical extraction and progressive acidification - *The Science of the Total Environment* **74**: 149-175.
- Ruhr-Stickstoff (HRSG.) (1985): *Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau*. Verlagsunion Agrar, Münster-Hiltrup, 10. Aufl.
- Streck, T. (1993): *Schwermetallverlagerung in einem Sandboden im Feldmaßstab - Messung und Modellierung*, Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Streck, T. & Richter, J. (1997): Heavy Metal Displacement in a Sandy Soil at the Field Scale: I. Measurements and Parameterization of Sorption - *J. Environ. Qual.* **26**: 49-56.
- TVO (1986): *Trinkwasserverordnung der BRD*
- Zeien, H. & Brümmer, G.W. (1989): Chemische Extraktionen zur Bestimmung von Schwermetallbindungsformen in Böden - *Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges.* **59/I**: 505-509.