

Simulation des Schwermetalltransports in ehemaligen Rieselfeldern unter Einfluß von pH- Änderungen

H. Stoffregen, C. Hoffmann & G. Wessolek *

Zusammenfassung. Zur Bewertung der Zink und Cadmiumverlagerungen auf den ehemaligen Rieselfeldflächen in Berlin-Buch und Berlin-Gatow wurden Simulationsrechnungen unter verschiedenen pH-Veränderungen vorgenommen. Dazu Sorptionsisothermen wurden in Desorptionsexperimenten bei unterschiedlichen pH-Stufen für die Oberböden gemessen. Die Desorptionisothermen von Cadmium und Zink konnten mit einer pH-abhängigen Freundlich-Isotherme gut beschrieben werden. Die Ergebnisse wurden anhand von Langzeit-Berechnungen an Säulen überprüft. Die Simulationen der Cadmium und Zinkverlagerung ergaben, daß auf den Intensivbeobachtungsflächen in Berlin-Buch (9x11m) noch langfristig mit einer erhöhten Verlagerung von Schwermetallen zu rechnen ist, insbesondere bei absinkenden pH-Werten. Die Lösungskonzentrationen im Untergrund bleiben über den Schadwerten der Berliner Liste für Grundwasser. Auf der untersuchten Fläche auf dem ehemaligen Rieselfeld in Berlin-Gatow sind zwar die Schwermetallgehalte sehr hoch, die Gesamtverlagerung ist aber vergleichsweise gering.

Summary. Numerical simulations of several variations in the pH-value were carried out to evaluate the transport of zinc and cadmium in former sewage farms in Berlin-Buch and Berlin-Gatow. Isotherms were measured in desorption experiments using varied pH-values for top soils. A good description of the desorption-isotherms of cadmium and zinc was achieved with the aid of a pH-dependent Freundlich-equation. The results were verified using long-term irrigation experiments of columns. The simulation of the transport of cadmium and zinc showed, that a long-term increased transport of heavy metals can be expected in the areas of intensive observation in Berlin-Buch (9x11 m), especially when the pH-values decrease. The concentration of the solution in the subsoil stays above the value of the Berlin-list for groundwater. Even though the sorbed amount of heavy metals in the sewage farm in Berlin-Gatow are very high, the overall shift transport is comparatively low.

* Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie & Biologie, FG Bodenkunde, Salzufer 11-12,
D-10587 Berlin

Einleitung

Flächen ehemaliger Rieselfelder weisen oft eine erhöhte Konzentration von Schwermetallen auf. Inwieweit diese zu einer erheblichen Verlagerung führt, hängt von den Eigenschaften des Standorts, insbesondere den Sorptionseigenschaften der Substrate ab. Diese werden stark durch physikochemische Bodeneigenschaften (pH-Wert, Humusgehalt, Tongehalt, KAK, Oxide) die Vegetation sowie die Mikroorganismen am Standort, geprägt ((FISCHER 1987, BERTHELIN et al. 1995). In Rahmen des IFP-Projekt " Bindung, Mobilität, Transport und Wirkung von organischen und anorganischen Schadstoffen sowie Abbau von Organika in Rieselfeldökosystemen" wurden ehemalige Rieselfeldflächen in Berlin-Buch und Berlin-Gatow untersucht. Es wurden Intensivbeobachtungsflächen von 9x11 m angelegt sowie Langzeit Beregnungsversuche in Säulenexperimenten durchgeführt. Da der pH-Wert einen erheblichen Einfluß auf die Sorptionseigenschaften wurden pH-abhängige Desorptionsisothermen der Oberböden erstellt.

Modellbeschreibung

Zur Berechnung des Schwermetalltransports wurde ein eindimensionales Konvektions-Dispersionsmodell von SWARTJES et al. (1991) verwendet. Das Modell wurde um pH-abhängige Sorptionsisothermen erweitert, so daß eine Veränderung der pH-Werte berücksichtigt werden konnte. Alle Modellstudien wurden unter stationären Bedingungen berechnet.

Die entscheidende Größe zur Berechnung des Transports ist die Sorptionsisotherme. Das Modell verwendet zur Anpassung der Sorption eine pH-abhängige Freundlich-Isotherme (VAN DER ZEE ,1992; STRECK ,1993):

$$S = k_1 * (\text{pH})^a C^{k_2}$$

S: Festphasengehalte [mg/kg]; pH: pH-Wert des Bodens; a: Parameter der Anpassung für den Einfluß des pH-Werts; k₁, k₂: Parameter der Freundlich-Isotherme; C: Lösungskonzentration [ppb].

In diesem Ansatz wird der Einfluß des pH-Werts durch eine Potenzfunktion beschrieben; die Löslichkeit steigt mit sinkenden pH-Werten. Die Steigung der Sorptionsisotherme ist dagegen unabhängig vom pH-Wert. Unterschiedliche Anteile an organischer Substanz und andere Einflußfaktoren wirken sich auf den Parameter k₁ aus (STRECK 1993). Da der Anteil der organischen Substanz variiert, wurde der Parameter k₁ angepaßt, wenn die Lösungskonzentrationen und die Festphasengehalte nicht übereinstimmen.

* Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie & Biologie, FG Bodenkunde, Salzufer 11-12, D-10587 Berlin

Folgende Prozesse sind im Modell unberücksichtigt:

- Veränderung des Anteils der organischen Bodensubstanz
- Veränderung des organischen Bodensubstanz
- Aufnahme von Schwermetallen durch die Pflanzen
- Biologische Aktivität (z.B. Regenwürmer).

Die Aufnahme von Schwermetallen durch Pflanzen sowie Verlagerung durch Regenwürmer führt in erster Linie zu einer Umverteilung der Schwermetalle im Oberboden. Eine Abnahme des Anteils der organischen Substanz würde, wie eine Versauerung, zu einem Anstieg der Lösungskonzentrationen und damit zu einer Veränderung des Freundlich Parameters k_1 führen.

Desorptionsisothermen

Da die Sorptionsisothermen entscheidend die Schwermetallverlagerung beeinflussen, wurden von den oberen Horizonten der Rieselfeldböden (YAh einer gekalkten und einer ungekalkten Fläche in Buch sowie Ap_1 und Ap_2 aus Gatow) Desorptionsisothermen bei verschiedenen pH-Stufen in Batch-Versuchen ermittelt. Dazu wurden 35g Boden bei einem Boden-Lösungsverhältnis von ca. 1:22 4h überkopf geschüttelt. Jeweils 6 pH-Stufen (3, 3.5, 4, 4.5, 5 und 5.5 für den Bucher Horizont bzw. 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5 und 6.5 für die Gatower Horizonte) wurden in 0.01M $Ca(NO_3)_2$ -Lösungen mit H_2SO_4 eingestellt. Die pH-Werte wurden vor jeder Desorptionsstufe überprüft und ggf. neu eingestellt. Die Desorption wurde in insgesamt 10 Stufen durchgeführt. Nach jeder Desorptionsstufe wurden die Bodenproben zentrifugiert und die Lösungskonzentration von Zn, Cd, Cu und Pb bestimmt. Danach wurde die Wassermenge wieder aufgefüllt und die nächste Desorptionsstufe durchgeführt. Die Versuchsdurchführung und die Ergebnisse sind ausführlich in VOGT (1997) beschrieben.

Die Ergebnisse wurden für jede pH-Stufe mit der Freundlich-Isotherme angepaßt sowie für alle pH-Stufen zusammen mit der oben beschriebenen pH-abhängigen Freundlich-Isotherme ausgewertet. Die Desorptionsisothermen der ungekalkten Fläche in Buch für Zink sind in Abb. 1 dargestellt. Die Lösungskonzentration und die desorbierte Gesamtmenge sind deutlich von dem pH-Werten abhängig. Für alle pH-Stufen konnten die Meßwerte gut durch eine Freundlich-Isotherme angepaßt werden, auch das pH-abhängige Modell kann die Meßdaten beschreiben. In Tab. 1 sind die Ergebnisse der pH-abhängigen Parametrisierung dargestellt. Für Zink und Cadmium konnten das pH-abhängige Modell die Desorptionsisothermen gut beschreiben. Bei Kupfer dagegen änderte sich die Steigung der Sorptionsisotherme mit dem pH-Werte; es ergab sich eine lineare pH-Abhängigkeit des Parameters k_2 der Freundlich-Isotherme. Daher konnten die Meßdaten nicht mit dem oben beschriebenen Modell angepaßt werden. Ein Grund könnte in der Bindung von Kupfer an die gelösten organischen Substanz bestehen. Bei Blei ergaben sich bei den höheren pH-

* Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie & Biologie, FG Bodenkunde, Salzufer 11-12, D-10587 Berlin

Werten nur sehr geringe Lösungskonzentrationen. Bei pH-Werten von 3 und 3.5 stiegen die Lösungskonzentrationen mit der Zeit an, es kam zu einem langsamen Lösungsprozessen bei denen Blei freigesetzt wurde. Die Modellierung beschränkt sich im weiteren auf Cadmium und Zink.

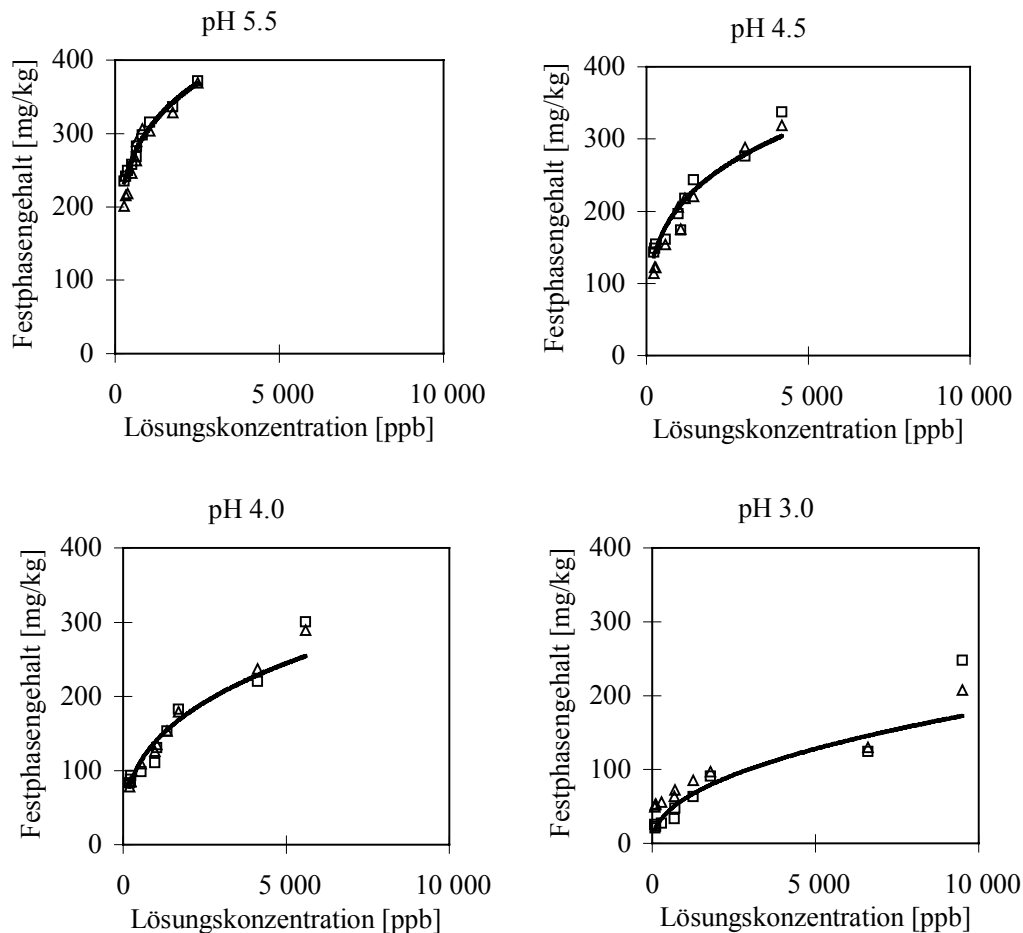


Abb. 1: Die Desorptionsisothermen des ungekalkten YAh-Horizonts in Buch für Zink bei unterschiedlichen pH-Stufen. Eingetragen sind die Meßwerte (□), die Anpassung mit einer Freundlich-Isotherme für jede pH-Stufe (durchgezogene Linie) und die Anpassung der pH-abhängigen Freundlich-Isotherme bei dem gemessenen pH-Wert (Δ).

Tab. 1: Die Parameter der pH-abhängigen Freundlich-Isotherme für Zink und Cadmium für die Oberböden aus Berlin-Buch und Berlin-Gatow. Der Parameter a drückt die pH-Abhängigkeit der Sorptionsisothermen aus.

	Zn				Cd			
	k1	k2	a	r ²	k1	k2	a	r ²
YAh (ungekalkt Buch)	0.76	0.35	2.05	0.93	0.23	0.33	1.72	0.94
YAh (kalkt Buch)	0.53	0.30	2.45	0.96	0.21	0.31	1.89	0.98
Ap ₁ (Gatow)	137.4	0.17	0.77	0.58	2.82	0.03	0.53	0.46
Ap ₂ (Gatow)	59.9	0.09	1.16	0.91	0.62	0.16	1.31	0.88

* Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie & Biologie, FG Bodenkunde, Salzufer 11-12, D-10587 Berlin

Simulation der Säulenexperimente.

Zur Untersuchung der langfristigen Verlagerung wurden Langzeit-Beregnungsversuche in Säulen (90 cm hoch und Ø 14 cm) mit Bodenmaterial aus Buch und Gatow durchgeführt. Für die Bucher Varianten waren die Säulen mit 20 cm Oberboden (YAh) und 70 cm Untergrundmaterial (C₁, C₂ und C₃) gefüllt, für Gatow mit 30 cm Oberboden (12 cm Ap₁ und 18 cm Ap₂), 20 cm rAh und 40 cm Unterboden (Bv und C(rGo)). Das Material wurde aus der Nähe der Intensivbeobachtungsflächen entnommen und die Horizontmächtigkeit entspricht der Mächtigkeit von der Entnahmestelle im Feld. In Tab. 1 ist der YAh-Horizont aus Buch sowie die Ap₁- und Ap₂-Horizonte aus Gatow näher beschrieben. Die Säulenexperimente dauerten insgesamt 2½ Jahre, in denen die Säulen zwei mal pro Woche mit ca. 20 mm beregnet wurden. Die gesamte Beregnungsmenge betrug am Versuchsende ca. 4500 mm. Es wurden mit vier unterschiedliche Varianten untersucht:

- Kontrollvariante, Beregnung mit Klarwasser,
- Beregnung mit Klarwasser aus dem Ablauf der Kläranlage Berlin-Ruhleben,
- Beregnung mit einer Säure (HCl, pH 3.0) und
- eine Beregnung mit destillierten Wasser auf eine gekalkte Säule.

Für jede Beregnungsart wurden 5 Meßsäulen verwendet, die nach einem ½, 1, 1½, 2 und 2½ Jahren in Schichten zerlegt wurden um die Festphasengehalte in der Tiefe zu messen. Dabei entspricht ein ½ Jahr ungefähr einer Beregnungsmenge von 900 mm. Aufgrund der unterschiedlichen Versuchsdauer konnte so ein zeitlicher Verlauf der Festphasengehalte bestimmt werden. Neben den Festphasengehalten wurde der Ausfluß aus den Meßsäulen jeden Monat untersucht. Der experimentelle Aufbau und Ergebnisse der Säulenexperimente sind ausführlich in HOFFMANN & RENGER (1996) dargestellt.

Tab. 2: Die verwendeten Materialien der Oberböden in den Meßsäulen.

	Bodenart	Ld [g/cm ³]	pH	Ct [%]	Nt [%]	Zn [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Cu [mg/kg]
Buch									
YAh	fsmS	1.21	4.8	2.97	0.29	304	13.4	251	142
Gatow									
Ap₁	Sl3	1.08	6.4	4.71	0.49	589	7.5	619	101
Ap₂	Sl3	1.31	6.4	2.58	0.24	455	9.1	739	86

Bei den Gatower Säulen nahm der Festphasengehalt nur geringfügig ab. Lediglich der Zinkgehalt in der Säurevariante sank deutlich. Dies erklärt sich aus den Desorptions-

* Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie & Biologie, FG Bodenkunde, Salzufer 11-12, D-10587 Berlin

isothermen der Materialien. Im folgenden wird näher auf die Ergebnisse der Säure und der Kontrollvariante für Buch eingegangen. Die anderen Varianten zeigten ähnliche Ergebnisse wie die Kontrollvariante.

Zu Beginn der Experimente kommt es in allen Bucher Säulen zu einer erhöhten Schwermetallkonzentration im Ausfluß. So sanken die Zinkkonzentrationen im Mittel von 27 000 ppb im ersten Monat (ca. 15 cm Berechnungsmenge) auf 12 000 ppm im 2. Monat (ca. 30 cm Berechnungsmenge). Der Grund liegt in den hohen Lösungskonzentrationen im Untergrundmaterial liegen, die schnell ausgewaschen werden (s. auch Kap. 5). Bei der Säurevariante kam es zu einem deutlichen Absinken der pH-Werte im YAh-Horizont. Die Werte sanken innerhalb des ersten halben Jahres (ca. 90 cm Berechnung) von 4.8 auf Werte zwischen 3.3 und 4.1, während die pH-Werte im Unterboden zwischen 4.0 und 4.4 blieben. Das Absinken des pH-Werts des Oberbodens führte zu einer höheren Lösungskonzentration von Schwermetallen und zu einem deutlichen Peak der Schwermetallkonzentrationen im Ausfluß. Die Konzentrationen im Abfluß der Kontrollvariante ändern sich dagegen im weiteren Verlauf der Experimente nicht deutlich. Probleme gab es bei der Berechnung der Massenbilanzen. Ein Grund dafür liegt darin, daß der zeitliche Verlauf der Festphasengehalte nicht von einer Meßsäule, sondern aus unterschiedlichen Meßsäulen stammt.

Abb. 3 zeigt die Zinkgehalte in der Festphase und im Ausfluß für die Säure- und die Kontrollvariante. Die gemessenen Desorptionsisothermen führen in der Simulation zu einer geringeren Abnahme der Zinkgehalte im YAh-Horizont als in der Messung. Bei der Simulation ist dabei zu berücksichtigen, daß das Bodenmaterial nicht identisch war. Die Zinkgehalte in dem Material zur Bestimmung der Desorptionsisothermen lag bei 510 mg/kg, in den Bodensäulen nur bei 304 mg/kg. Eine bessere Übereinstimmung zwischen den Meßdaten und der Simulation ergibt sich, wenn der Parameter k_1 der Freundlich-Isotherme von 0.53 auf 0.4 gesenkt wird. In diesem Fall stimmen die Simulationsergebnisse im Rahmen der Meßgenauigkeit für die Säurevariante gut mit den Meßdaten überein. Für die Kontrollvariante wird die Konzentration im Ausfluß überschätzt. Etwas besser wird die Anpassung mit einem etwas höherem Wert für den Parameter a , was gleichbedeutend mit einer größeren pH-Abhängigkeit der Sorptionsisotherme ist. Zur Parameteridentifikation lassen sich die Experimente allerdings nicht verwenden, da das Gesamtproblem aufgrund der vielen Parameter und der vergleichsweise geringen Meßdatendichte nicht eindeutig bestimmt ist.

Für Cadmium ergaben sich ähnliche Ergebnisse wie für Zink. Allerdings war die Massenbilanz der Meßergebnisse für Cadmium deutlich schlechter als für Zink, so daß keine gute Übereinstimmung zwischen den Festphasengehalten und den Ausflußkonzentrationen erhalten werden konnte.

* Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie & Biologie, FG Bodenkunde, Salzufer 11-12, D-10587 Berlin

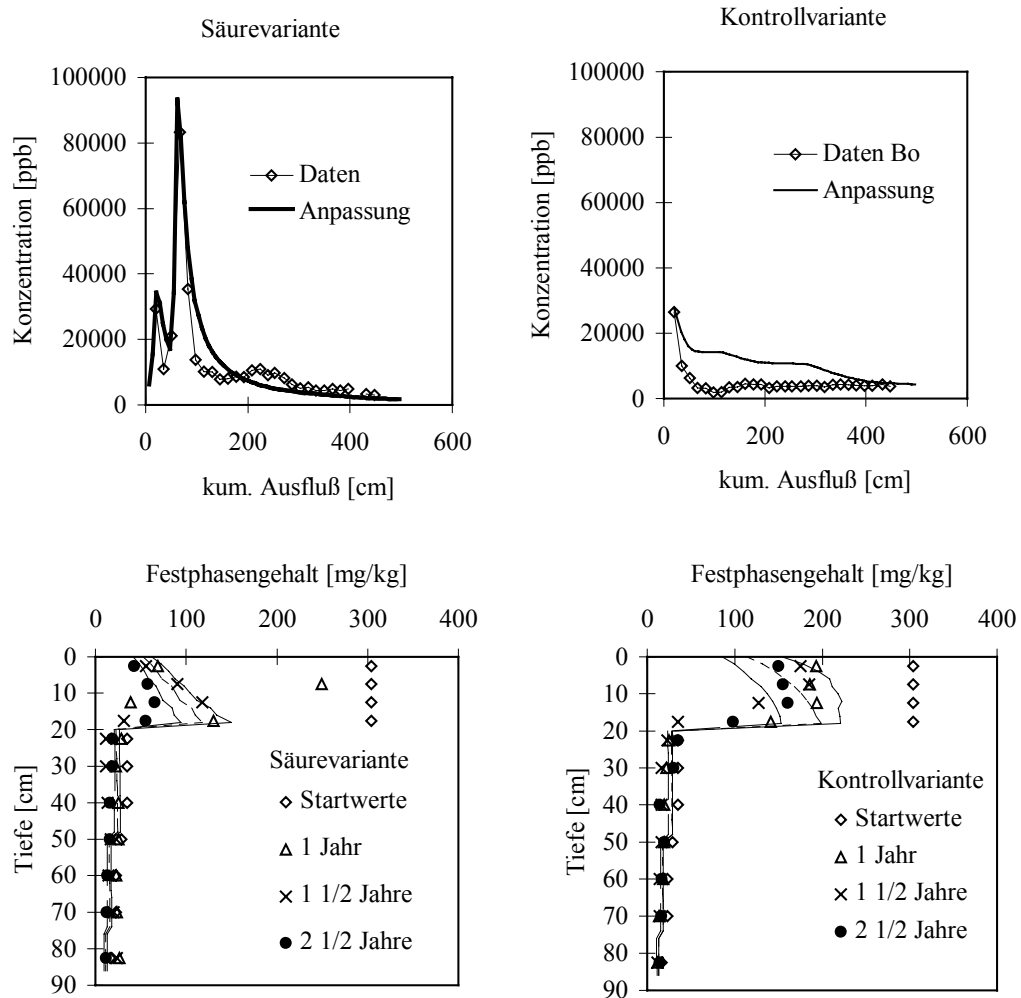


Abb. 2: Die Lösungskonzentrationen im Ausfluß (oben) und Festphasengehalte (unten) für Zink. Dargestellt sind die Ergebnisse für die Säurevariante (links) und die Kontrollvariante (rechts) für eine Meßsäule mit Boden aus Berlin-Buch.

Simulation für Feldbedingungen

Zusätzlich zu den Säulenversuchen wurden 3 Intensivbeobachtungsflächen eingerichtet, eine gekalkte und eine ungekalkte Fläche in Berlin-Buch sowie eine Fläche in Berlin-Gatow. Die Flächen sind 9x11 m groß und mit jeweils 12 Saugkerzen in 50, 100 und 180 cm bestückt. Auf der ungekalkten Fläche in Berlin-Buch liegt die Mächtigkeit des YAh-Horizonts im Mittel bei 50 cm (Max. 1 m, Min 15 cm). Die Grundwasserneubildung für Grünlandnutzung wurde nach RENGER & WESSOLEK (1996) berechnet und ist für das langjährige Mittel der Klimadaten 92 mm/a (Max. 135 mm/a, Min. 55 mm/a). Die Schwermetallgehalte im Oberboden lagen 1993 bei 670 mg/kg Zink (Max. 1150 mg/kg, Min. 330 mg/kg) und 28 mg/kg Cadmium (Max. 51 mg/kg, Min. 17 mg/kg), die Gesamtvorräte an Zink bis 1.80 Tiefe lagen bei 230 g/m². Die Ergebnisse der

* Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie & Biologie, FG Bodenkunde, Salzufer 11-12, D-10587 Berlin

Festphasengehalte sind in SCHIRMEIER (1996) näher beschrieben. Insgesamt zeigt sich auf den Flächen eine hohe Variabilität (s. HOFFMANN & RENGER in diesem Band).

Die Untersuchung der Saugkerzenlösungen ergab, daß die Zinkkonzentrationen in 180 und 100 cm höher waren als die Konzentrationen in 50 cm. Sie lagen im Mittel über alle Saugkerzen und Zeiten bei 19 000 bzw. 22 000 ppb in 100 und 180 cm im Vergleich zu 4 900 ppb in 50 cm Tiefe. Grund hierfür könnte eine höhere Belastung dieser Fläche vor der Umgestaltung der Flächen (1985) sein. Bei Cadmium waren die Änderungen mit der Tiefe mit 90 ppb bei 50 cm, 100 ppb bei 100 cm und 90 ppb bei 180 cm dagegen nur gering.

Um die Schwermetallverlagerung abzuschätzen wurden mehrere Szenarien bei unterschiedlichem zeitlichem Verlauf der pH-Werte im Oberboden berechnet. In einem Fall wurden die pH-Werte unverändert gelassen, im zweiten Fall eine Versauerung des Oberbodens von 6.0 im Jahr 1993 auf 4.5 nach 40 Jahren angenommen. In Abb. 3 und Abb. 4 sind Ergebnisse eines 2 m mächtigen Bodenprofil mit 30 cm YAh-Horizont für Zink dargestellt. Als Anfangsgehalte wurden die Mittelwerte der gemessenen Festphasengehalte und Lösungskonzentrationen verwendet, der Gesamtgehalt im Profil liegt etwas über dem Mittelwert. Die Parameter k_1 der Freundlich-Isotherme wurde so gewählt, daß die Festphasengehalte und Lösungskonzentrationen den Meßwerten entsprachen, die Versickerung betrug 100 mm/a.

Für beide pH-Szenarien kommt es zunächst zu einer Angleichung der Zinkkonzentrationen in der Bodenlösung von Untergrund und Oberboden, was zu einem Absinken der Lösungskonzentrationen im Untergrund führt. Ohne Veränderung der pH-Werte im Oberboden ist dieser Prozeß nach einigen Jahren bis Jahrzehnten abgeschlossen und die Lösungskonzentrationen im Oberboden sinkt langsam weiter ab. Allerdings liegen die Zinkkonzentrationen in 1.80 m Tiefe immer noch bei 5 000 ppb und damit weit über dem Schadwert der Berliner Liste für Grundwasser von 500 ppb. Insgesamt werden in 50 Jahren ca. 50 g/m² in Tiefen unterhalb von 2 m verlagert. Die Zinkgehalte in den obersten 20 cm sinken von 670 mg/kg auf 310 mg/kg. Die Cadmiumgehalte sinken in diesem Fall von 28.0 mg/m² auf 26.3 mg/m², die Lösungskonzentrationen in 180 cm Tiefe bleiben mit 89 ppb hoch.

Bei einer Absenkung der pH-Werte im Oberboden auf 4.5 steigen die Lösungskonzentrationen im 20 cm dagegen deutlich an, solange die Versauerung fortschreitet. Die Lösungskonzentrationen im Untergrund sinken zunächst ab, steigen danach aber wieder deutlich an und liegen mit 25 000 ppb bis 30 000 ppb sogar teilweise über ihrem Ausgangswert. Die verlagerte Gesamtmenge an Schwermetallen ist deutlich größer. In 50 Jahren werden über 100 g/m² in Tiefen unter 2 m verlagert. Die Zinkgehalte in den obersten 20 cm sinken von 670 mg/kg auf 260 mg/kg. Die Cadmiumkonzentrationen in 180 cm steigen bis auf 430 ppb an, es wird ca. 1g/m² in größere Tiefen verlagert. In Tab. 3 sind die Gehalte und Lösungskonzentrationen der Verlagerung dargestellt.

* Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie & Biologie, FG Bodenkunde, Salzufer 11-12, D-10587 Berlin

Berücksichtigt man die Heterogenität der Intensivbeobachtungsfläche, kommt es in Abhängigkeit von Ah-Mächtigkeiten, Schwermetallgehalten und -konzentrationen sowohl zu deutlich höheren als auch zu geringeren Verlagerungen auf Teilen der Fläche. Insgesamt ist die Belastung der untersuchten Flächen höher als in anderen Bereichen der ehemaligen Rieselfelder. Messungen von SCHLENTHER et al. (1991) zeigten bei zwei von 12 Messungen Zinkkonzentrationen im obersten Grundwasser von über 5000 ppb, während die übrigen unterhalb von 200 ppb lagen. Die Verlagerung für die gesamte ehemalige Rieselfeldfläche von 1 300 ha kann daher aus den vorhandenen Daten noch nicht abgeschätzt werden.

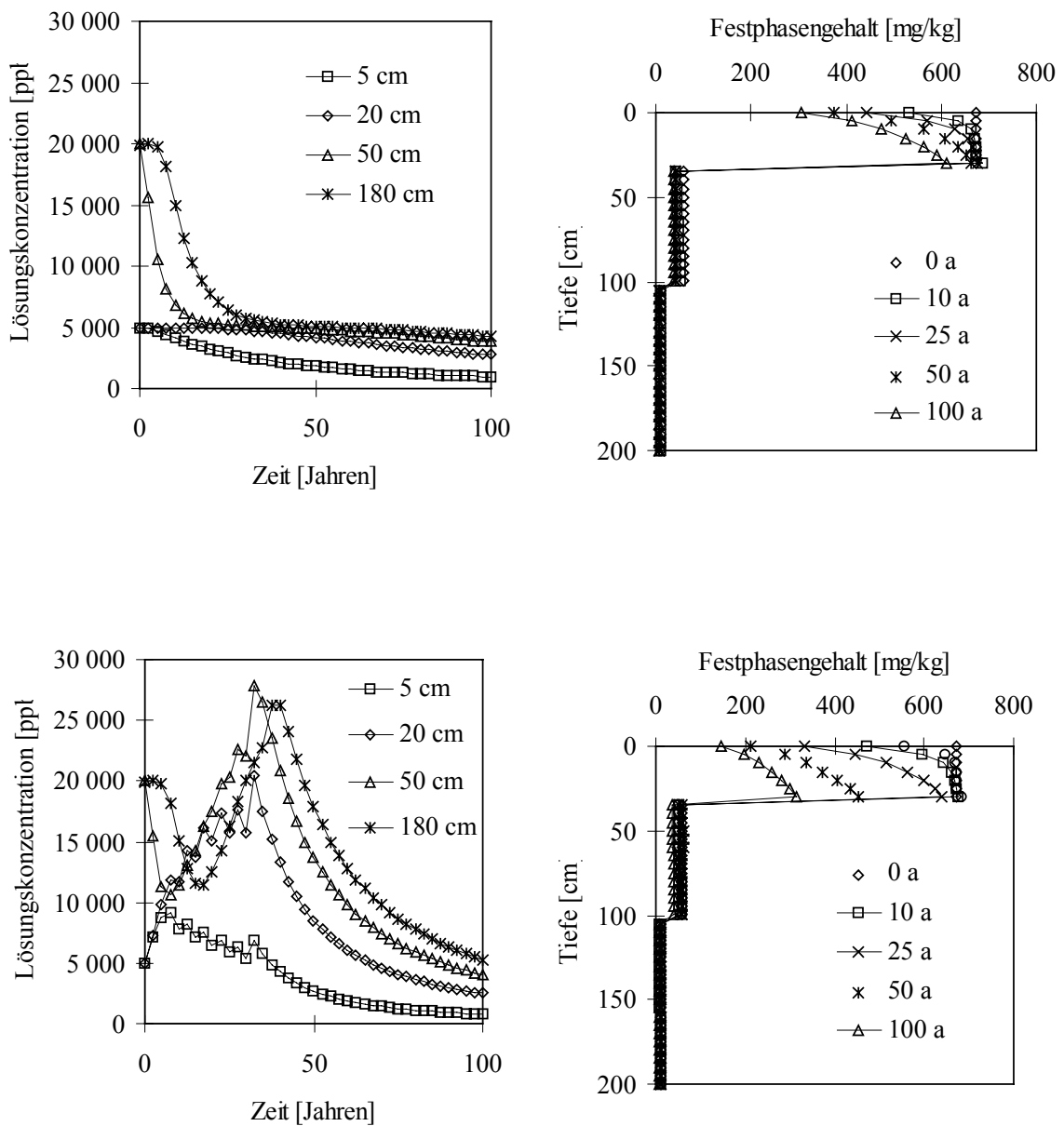


Abb. 4: Der zeitliche Verlauf der Zinkkonzentrationen und die Festphasengehalte im Profil unter Berücksichtigung einer Versauerung auf pH-Werte von 4.5 im Oberboden.

* Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie & Biologie, FG Bodenkunde, Salzufer 11-12, D-10587 Berlin

Auf der Fläche in Gatow konnten dagegen nur geringere Zinkkonzentrationen in den Saugkerzen gemessen werden. Sie lagen im Mittel bei 70 ppm in 50 cm Tiefe und 50 ppm in 100 und 180 Tiefe. Die Cadmiumkonzentrationen lagen unterhalb von 20 ppm. Die Simulationsrechnung wurde mit den Horizontmächtigkeiten und Schwermetallgehalten aus den Säulenexperimenten (s.o.) durchgeführt. Aufgrund der größeren Menge von pflanzenverfügbarem Wasser im Profil wurde mit einer Versickerung von nur 50 mm/a gerechnet. Aufgrund der wesentlich höheren Retardation der Untergrundmaterialien kommt es in Berlin-Gatow nur zu einer sehr geringen Auswaschung von Zink aus dem Profil. Bei einem Absinken der pH-Werte von 6.4 auf 5.0 innerhalb von 40 Jahren steigen die Lösungskonzentrationen zwar im Oberboden bis auf Werte von über 1 000 ppb an. Im Vergleich zu den Werten in Berlin-Buch bleiben sie allerdings gering. Insgesamt kommt es nur zu einer Verlagerung innerhalb des Profils. Die Lösungskonzentrationen im Untergrund bleiben bei 70 ppb, der Austrag von Zink in Bereiche unterhalb von 1 m beträgt nur 0.2 g/m² in 50 Jahren.

Abschließend kann gesagt werden, daß sich die untersuchten Flächen in Buch und Gatow erheblich unterscheiden. Zwar weisen beide Flächen ähnliche Festphasengehalte auf die Löslichkeit der Schwermetalle ist aber sehr unterschiedlich. In Gatow sind Zink und Cadmium sehr festgelegt und selbst bei einer Versauerung kommt es nur zu geringen Abnahmen der Gehalte im Oberboden und damit nur zu geringen Einträgen ins Grundwasser kommt. In Buch ist dagegen die Löslichkeit hoch und daher kommt es zu einer deutlichen Verlagerung von Zink und Cadmium.

Tab. 3: Lösungskonzentrationen im Untergrund, Gesamtgehalte in einem 2 m mächtigem Profil und die Festphasengehalte in den obersten 20 cm nach 50 und 100 Jahren

	Lösungskonzentration 180 cm [ppb]			Gesamtgehalt im Profil [g/m ²]			Festphasengehalt der obersten 20 cm [mg/kg]		
	0	50	100	0	50	100	0	50	100
Zeit [Jahren]	0	50	100	0	50	100	0	50	100
Zink:									
Buch, mit Versauerung	20000	27000	9000	363	260	190	672	390	280
Buch, ohne Versauerung	20000	5600	4900	363	310	290	672	580	520
Gatow mit Versauerung	70	70	70	263	263	263	529	528	523
Cadmium:									
Buch, mit Versauerung	76	430	328	12.8	11.8	10	28	22.6	18.2
Buch, ohne Versauerung	76	89	89	12.8	12.4	12	28	26.3	24.7

* Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie & Biologie, FG Bodenkunde, Salzufer 11-12, D-10587 Berlin

Schlußfolgerungen

Auf den untersuchten Intensivbeobachtungsflächen in Berlin-Buch führt eine Versauerung des Oberbodens zu einer deutlich höheren Schwermetallverlagerung. Aber auch wenn eine Versauerung z.B. durch Kalkung verhindert wird, ist auf absehbare Zeit in 10-50 Jahren mit einem hohen Austrag von Zink und Cadmium aus dem Oberboden zu rechnen. Allerdings lassen sich die Ergebnisse der Intensivflächen nicht auf die gesamte Fläche der ehemaligen Rieselfelder übertragen. Hier sind weitere Arbeiten zur Regionalisierung der Schwermetallverlagerung unter hoher räumlicher Heterogenität erforderlich. Für die Felder in Berlin-Gatow ist die Verlagerung von Schwermetallen auch bei einem absinken der pH-Werte vergleichsweise gering, obwohl die Schwermetallgehalte ähnlich hoch wie in Berlin-Buch sind. Die Schwermetalle sind in Gatow überwiegend stabil an die Festphase gebunden.

Danksagung

Die Arbeit wurde im Rahmen des IFP 7/21: "Bindung, Mobilität, Transport und Wirkung von organischen und anorganischen Schadstoffen sowie Abbau von Organika in Rieselfeldökosystemen" erstellt; wir danken der TU-Berlin für die Finanzierung. Ein besonderer Dank gilt Sabine Vogt für die Messung der Desorptionsisothermen im Rahmen ihrer Diplomarbeit (Vogt 1997).

Literatur

- Fischer, W.R. (1987): Das Verhalten von Spurenelementen in Böden. *Naturwissenschaften* 74: 63-70.
- Berthelin, J., Munier-Lamy, C. & Leyval, C. (1995): Effect of Microorganisms on Mobility of Heavy Metals in Soils. In: Huang, P.M.; Berthelin, J.; Bollag, J.-M.; Mc Gill, W.B. & Page, A.L. [Eds.]: *Environmental Impact of Soil Component Interactions Vol. II: Metals, Other Inorganics and Microbial Activities*. Lewis Publ.: Boca Raton, London. 3-17.
- Hoffmann, C. & Renger, M. (1996): Säulenversuche zur Schwermetallmobilität in Rieselfeldböden. *Landschaftsentw. u. Umweltforschung* 101: 67-74.
- Hoffmann, C.; Schlenker, L. & Renger, M. (1995): Zur Schwermetallbelastung und -dynamik auf einem ehemaligen Rieselfeld. *Mitt. Dt. Bodkd. Ges.* 76/I: 293-296.
- Renger, M. & Wessolek, G. (1996) in: Ermittlung der Verdunstung von Land und Wasserflächen. *DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft* 238 / 1996: 135 pp.
- Schlenker, L.; Eggert, T.; Hoffmann, C. & Renger, M. (1992): *Bodenökologische Untersuchung auf den Rieselfeldflächen Buch*. Forschungsbericht im Auftrag der Berliner Forsten. 1-215.
- Schirmeier, A. (1996): *Schwermetall-Untersuchungen auf einem anthropogen beeinflussten Standort (Rieselfeld Buch)*. Diplomarbeit, FG Bodenkunde TU-Berlin.

* Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie & Biologie, FG Bodenkunde, Salzufer 11-12, D-10587 Berlin

- Streck, T (1993): Schwermetallverlagerung in einem Sandboden im Feldmaßstab - Messung und Modellierung-. Dissertation TU Braunschweig.
- Swartjes, F.A., Fahrenhorst, C. & Renger, M. (1991): Entwicklung und Erprobung eines Simulationsmodells für die Verlagerung von Schwermetallen in wassergesättigten Böden. Texte UBA 47/91
- Van der Zee, S.E.A.T.M. & van Riemsdijk, W.H. (1987): Transport of reactive solute in spacially variable soil systems. Wat. Res. Res. 23, 2059-2069.
- Voigt, S. (1997): Desorptionsisothermen ausgewählter Schwermetalle von Bodenproben ehemaliger Rieselfeder. Diplomarbeit, FG Bodenkunde TU-Berlin.

* Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie & Biologie, FG Bodenkunde, Salzufer 11-12, D-10587 Berlin