

## Ein Modell zur Beschreibung des Transports der Schwermetalle Cd, Cu, Pb und Zn in der ungesättigten Bodenzone

Eckart Priesack, Andreas Schulte und Friedrich Beese

### Synopsis

A transport model for the heavy metals Cd, Cu, Pb and Zn in unsaturated soils is presented. The model is based on a numerical solution of an advection-diffusion equation enhanced by a non-linear adsorption term. This adsorption term is derived from general adsorption density isotherms which depend on the specific surface and the pH-value of the soil. Given the initial and input concentration of the heavy metal, the yearly net precipitation, the soil parameters bulk density, content of water, of clay, of organic matter and the pH-value the model describes the leaching of the heavy metal in unsaturated soils. The model therefore can be used to calculate the time a given limit concentration of the heavy metal has reached the groundwater level.

*transport model, heavy metal, adsorption density, specific soil surface, unsaturated soil*

### 1. Einleitung

Schwermetalleinträge durch Ausbringen von Abwasser, Dünger und Klärschlamm sowie durch Deposition aus der Atmosphäre führen zu entsprechenden Schwermetallanreicherungen im Ökosystemkompartiment Boden. Um die Mobilität dieser angereicherten Schwermetalle in der ungesättigten Bodenzone und damit auch die potentielle Grundwasserkontamination abzuschätzen, ist eine quantitative Beschreibung des Schwermetalltransports notwendig. Sie muß die Klimabedingungen, die Bodeneigenschaften und die Schwermetallbelastung der Böden durch Einträge und Akkumulation miteinander verknüpfen. Die Beschreibung sollte dabei von verhältnismäßig einfach zu ermittelnden Parametern (z. B. nach der bodenkundlichen Kartieranleitung, AG BODENKUNDE 1982) abhängen, um sie auch flächenhaft über Wassereinzugsgebiete hinaus auf größere Regionen anwenden zu können. Eine derartige Beschreibung für das Transportverhalten der Schwermetalle Cd, Cu, Pb und Zn zu geben, ist das Ziel des hier vorgestellten Simulationsmodells.

### 2. Modellgleichungen

Das Modell beschreibt den Transportprozeß in mittels einer um einen Adsorptionssenkenterm erweiterten Konvektions-Diffusions Transportgleichung:

$$\Theta \frac{\delta C}{\delta t} + \rho \frac{\delta S}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left( D \Theta \frac{\delta C}{\delta x} \right) + q \frac{\delta C}{\delta x} \quad (1)$$

wobei  $\Theta$  der volumetrische Wassergehalt ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ),  $C$  die Schwermetallkonzentration ( $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ ),  $\rho$  die Lagerungsdichte des Bodens ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ),  $S$  das adsorbierte Schwermetall pro Einheit Trockengewicht des Bodens ( $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ),  $x$  die Tiefe (cm),  $D$  der effektive Diffusionskoeffizient ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) und  $q$  die mittlere Sickerrate ( $\text{s}^{-1}$ ) sei. Diese partielle Differentialgleichung wird nach einem vollimpliziten finiten Differenzenverfahren mit extrapolierenden Koeffizienten gelöst (HORNUNG & MESSING 1984).

Die Senkenterme für die jeweiligen Schwermetalle sind durch Freundlich-Adsorptionisothermen

$$S = kC^N \quad (2)$$

mit dem Adsorptionskoeffizienten  $k$  ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ) und dem Adsorptionsexponenten  $N$  gegeben. Sie sind aus generalisierenden Adsorptionsdichteisothermen abgeleitet. Diese Adsorptionsdichteisothermen sind in Abhängigkeit vom pH-Wert des Bodens als Regressionsgleichungen zwischen der Bodenlösungskonzentration und der Adsorptionsdichte  $AD$  (Ionen  $\text{m}^{-2}$ ) ermittelt. Die Adsorptionsdichte bezieht die adsorbierte Menge des Schwermetalls auf die spezifische Oberfläche des Bodens (NAVROT & al. 1978):

$$AD = \frac{S N_L 10^{-6}}{M_g \text{SSA}} \quad (3)$$

wobei  $N_L$  die Lohschmidtsche Zahl,  $M_g$  das Molekulargewicht (g) und SSA die spezifische Oberfläche des Bodens ( $\text{m}^2$ ) ist (Tab. 1).

**Tab. 1:** Parameter der generalisierenden Adsorptionsdichteisothermen für die Böden des Aluminium- (Al-), Silikat- (Si-) und Carbonat- (Ca-) Pufferbereichs ( $x = \log C$ ,  $y = \log AD$ )

| Schwermetall | Pufferber. | $\log k + N$           | r     | n  | Böden |
|--------------|------------|------------------------|-------|----|-------|
| Cadmium      | Al         | $y = 0,0032 + 0,7702x$ | 0,964 | 54 | 6     |
|              | Si         | $y = 0,7735 + 0,7667x$ | 0,942 | 52 | 5     |
|              | Ca         | $y = 1,9367 + 0,5625x$ | 0,901 | 56 | 5     |
| Kupfer       | Al         | $y = 1,5139 + 0,6258x$ | 0,877 | 61 | 6     |
|              | Si         | $y = 1,8614 + 0,6419x$ | 0,871 | 60 | 5     |
|              | Ca         | $y = 2,0542 + 0,8110x$ | 0,927 | 89 | 6     |
| Blei         | Al         | $y = 1,8504 + 0,5939x$ | 0,949 | 56 | 5     |
|              | Si         | $y = 2,1985 + 0,5718x$ | 0,728 | 60 | 5     |
|              | Ca         | $y = 2,5839 + 0,6951x$ | 0,790 | 46 | 5     |
| Zink         | Al         | $y = 1,1689 + 0,5423x$ | 0,899 | 64 | 6     |
|              | Si         | $y = 1,3743 + 0,6313x$ | 0,931 | 57 | 5     |
|              | Ca         | $y = 1,2969 + 0,7896x$ | 0,901 | 24 | 2     |

Die Abhängigkeit vom pH-Wert geht dabei ein über die Zugehörigkeit des betrachteten Bodens zu einer der drei Bodengruppen (Tab. 2), die sich in dem die Pufferkapazität für Schwermetalle bestimmenden Stoffbestand (Ton-, Humus-, Oxidgehalt) unterscheiden (ULRICH 1983, SCHULTE 1988).

Tab. 2: Klassifikation der Böden nach Kennwerten des gelösten bzw. mobilisierbaren Ionenpools und Zuordnung zu Pufferbereichen nach ULRICH (1983). (Prozentuale Anteile der Kationen an der AKe, % CaCO<sub>3</sub> im Feinboden sowie das molare Ca/Al- bzw. Mg/Al-Verhältnis in der Gleichgewichtsbodenlösung GBL)

| pH (GBL) | Fe+H % | Al+Mn % | Ca+Mn K+Na % | CaCO <sub>3</sub> % | Ca/Al bzw. Mg/Al | Pufferber. |
|----------|--------|---------|--------------|---------------------|------------------|------------|
| 4,5      | < 5    | > 80    | < 20         | 0                   | 0,05-5           | Al         |
| 4,6-6,2  | < 5    | 10-80   | > 20         | 0-0,5               | 5-500            | Si         |
| 6,2      | < 1    | < 10    | > 90         | > 0,5               | > 500            | Ca         |

Die spezifische Oberfläche SSA des Bodens läßt sich aus dem Ton- bzw. Ton- und Humusgehalt des Bodens mit Hilfe von Regressionsgleichungen berechnen:

$$SSA = 13,53 + 1,34 (\% \text{ Ton}) + 0,03 (\% \text{ Ton})^2, r = 0,966 \quad (4)$$

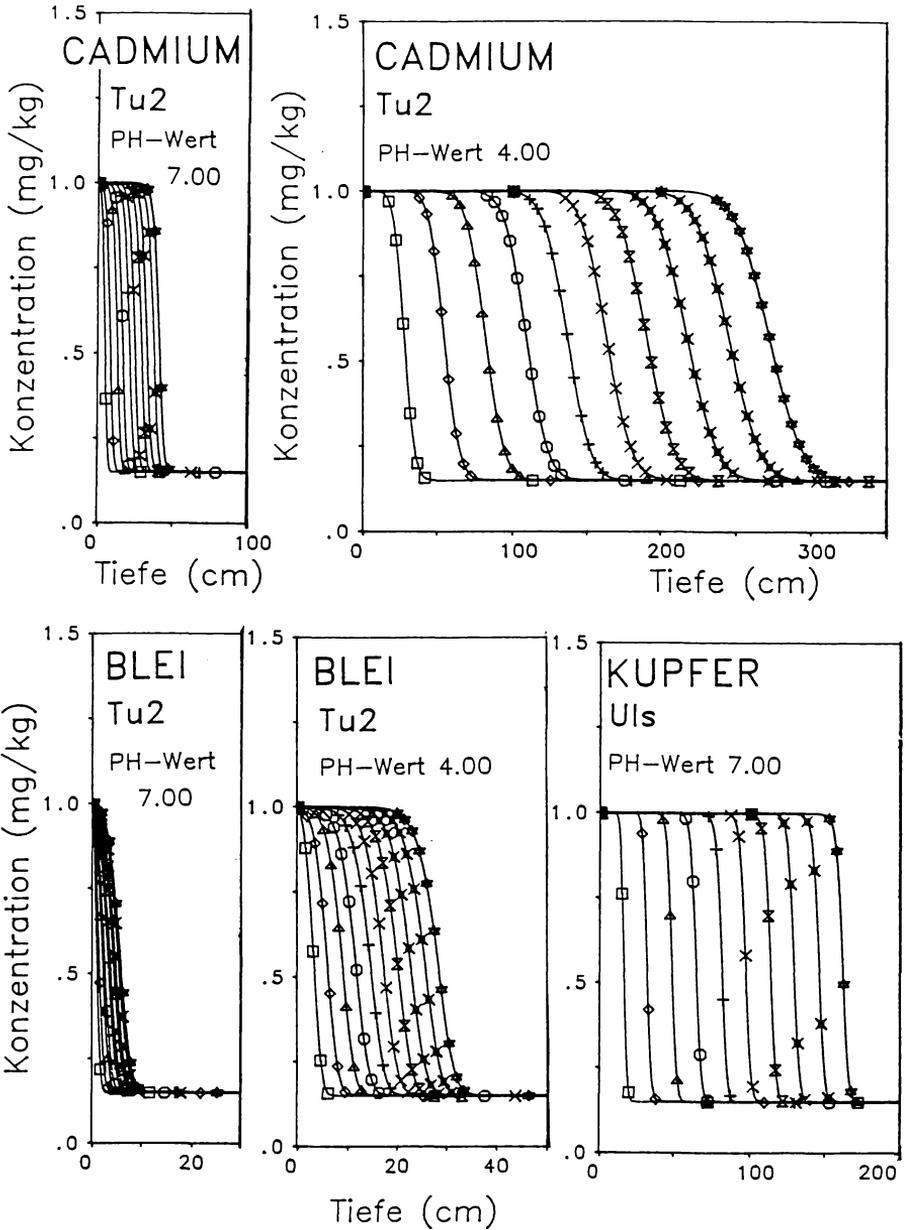
bzw.:

$$SSA = -7,34 + 3,14 (\% \text{ Ton}) + 1,48 (\% \text{ C}), r = 0,948 \quad (5)$$

Diese Gleichungen konnten über die Adsorption von Äthylenglycolmonoethyläther (nach RATNER-ZOHAR & al. 1983) an 71 verschiedenen repräsentativ ausgewählten Böden erstellt werden (SCHULTE 1988).

### 3. Beispiele und Folgerungen

Um den Einfluß von Bodenart und pH-Wert auf den Transport als auch Unterschiede zwischen den Schwermetallen zu veranschaulichen, wurde die Sprungantwort des Systems ungesättigte Bodenzone auf eine Erhöhung des kontinuierlichen atmosphärischen Schwermetalleintrags in die Bodenlösung von 0,15 auf 1,0 mg·kg<sup>-1</sup> für einen schwach-schluffigen Ton (Tu2) und einen sandig-lehmigen Schluff (Uls) bei pH-Werten von 4,0 und 7,0 simuliert (Abb. 1). Dabei wurde eine Anfangskonzentration von 0,15 mg·kg<sup>-1</sup> des betreffenden Schwermetalls in der Bodenlösung des in seinen Bodeneigenschaften homogen vorausgesetzten Bodenprofils angenommen. Die ersten Ergebnisse zeigen, daß das Modell geeignet ist, in Hinblick auf die zu vermeidende Grundwasserkontamination Grenzwerte zu ermitteln, die die bedeutendsten Einflußgrößen des Schwermetalltransports (von Cd, Cu, Pb und Zn) berücksichtigen. Insbesondere durch die Möglichkeit der direkten Berücksichtigung der Schwermetalleinträge und der Vorbelastung der Böden sowie der expliziten Berechnung des Transportprozesses ist das Modell eine gute Alternative zu der von BLUME & BRÜMMER (1987) vorgeschlagenen Methode die Mobilität von Metallionen in Böden zu diagnostizieren.



Zeit (Jahre)

|   |     |   |      |   |      |   |      |   |      |
|---|-----|---|------|---|------|---|------|---|------|
| □ | .27 | △ | .82  | + | 1.37 | ⊠ | 1.92 | × | 2.47 |
| ◇ | .55 | ○ | 1.10 | × | 1.64 | × | 2.19 | * | 2.74 |

**Abb. 1:** Transport verschiedener Schwermetalle in verschiedenen Böden unterschiedlichen pH-Werts bei einer Sickerrate von 1,5 mm/Tag, einer Lagerungsdichte von 1,5 g/cm<sup>3</sup>, einem Wassergehalt von 35,0 % und einem Humusgehalt von 2,0 %

## Literatur

- AG BODENKUNDE, 1982: Bodenkundliche Kartieranleitung. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- BLUME, H.-P. & G. BRÜMMER, 1987: Prognose des Verhaltens von Schwermetallen in Böden mit einfachen Feldmethoden. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl.* 53: 111-117.
- HORNUNG, U. & W. MESSING, 1984: Poröse Medien - Methoden und Simulation. Verlag Beiträge zur Hydrologie, Kirchzarten: 160 S.
- NAVROT, J., SINGER, A. & A. BANIN, 1978: Adsorption of cadmium and its exchange characteristics in some Israeli soils. *J. Soil Sci. Soc.* 29: 505-511.
- RATNER-ZOHAR, Y., BANIN, A. & Y. CHEN, 1983: Oven drying as a pretreatment for surface area determinations of soils and clays. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1056-1058.
- SCHULTE, A., 1988: Adsorption von Schwermetallen in repräsentativen Böden Israels und Nordwestdeutschlands in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Göttingen, A*, 46: 1-166.
- ULRICH, B., 1983: A concept of forest ecosystems stability and of acid decomposition as driving force for destabilization. In: ULRICH, B.: *Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems*. D. Reidel Publ. Comp.

## Adressen

Dr. Eckart Priesack  
Dr. Friedrich Beese  
GSF Institut für Bodenökologie  
Ingolstädter Landstr. 1

Dr. Andreas Schulte  
Institut für Bodenkunde und Waldernährung  
Georg-August-Universität  
Buesgenweg 2

W - 8042 Neuherberg

W - 3400 Göttingen

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie](#)

Jahr/Year: 1991

Band/Volume: [20\\_2\\_1991](#)

Autor(en)/Author(s): Priesack Eckart, Beese Friedrich, Schulte Andreas

Artikel/Article: [Ein Modell zur Beschreibung des Transports der Schwermetalle Cd, Cu, Pb und Zn in der ungesättigten Bodenzone 859-863](#)