

Rechenmodelle zur Schwermetallbilanzierung in Böden

JULIUS BOR & JOHANNES KRZYZANOWSKI

Kurzfassung: In der vorliegenden Arbeit werden zwei Rechenmodelle zur Bilanzierung von Schwermetallen in Böden erläutert:

- Zur Bilanzierung der durch Pedogenese veränderten Gehalte in den Horizonten und im Solum homogener Bodenprofile
- Zur Ermittlung der pedogenen sowie der anthropogenen Anreicherung im homogenen bzw. geschichteten Profil gegenüber dem geogenen Gehalt.

Darüber hinaus wird eine Überlegung zur Regionalisierung der zu erwartenden geogenen und pedogenen Gehalte sowie der potentiellen Verträglichkeit der Böden gegenüber Schwermetallen angestellt.

Abstract: Two models to balance heavy metal contents in soils are described:

- One model to balance the horizon and solum contents altered by pedogenesis, assuming a homogenous soil profile
- One model to calculate the pedogenic and the anthropogenic accumulation in a homogenous or stratified soil profile compared with the average content of the parent material.

Beyond this, it is possible to predict with the second model the regional, expected geogenic and pedogenic contents, and the soil adsorption potential to heavy metals.

1. Einleitung

In den Gesteinen befinden sich für gewöhnlich nur sehr geringe, meist homogen verteilte Gehalte an Schwermetallen, die aber infolge natürlicher Anreicherungs Vorgänge konzentriert sein können. Durch Verwitterung der Gesteine im Laufe der Bodenbildung erfolgt die Verbreitung und der Eintrag der freigesetzten Schwermetalle in biologische Systeme. Die Wirkung der Schwermetalle ist in hohem Maße konzentrationsabhängig. Als enzymatisch aktive Elemente können die Schwermetalle im Boden wenig abgebaut werden. Dies kann zu Anreicherungen führen, die für den Stoffwechsel von Pflanzen und Tieren einschädigendes Potential darstellen.

Von großer Bedeutung ist die Frage, inwieweit der Boden verhindern kann, daß diese einschließlich der immittierten Schadstoffe durch Kulturpflanzen aufgenommen werden oder sonst für den Menschen umweltbelastend in den Biokreislauf gelangen. Ferner ist es wichtig zu erfahren, wie sich die Pedogenese sowie das Ausgangsmaterial auf die Konzentrationen und die Verteilung der Schwermetalle im Boden auswirken. Die Funktion des Bodens als Pflanzennährsubstrat und als Filterkörper hängt von der Bindungskapazität seiner organischen und mineralischen Komponenten für Schwermetalle ab.

2. Bilanzierung der durch Pedogenese veränderten Gehalte in den Horizonten und im Solum der homogenen Profile

Das erste Rechenmodell ermöglicht eine Quantifizierung der durch Bodenbildungsprozesse veränderten Gehalte an Schwermetallen oder an anderen Bodenbestandteilen gegenüber dem Ausgangssubstrat. Die Berechnung wird in den einzelnen Horizonten sowie im gesamten Bodenprofil durchgeführt. Die Voraussetzung für die Anwendung dieser Bilanzierung ist die Homogenität des Ausgangsmaterials im Profil. Eine Überprüfung erfolgt mit Hilfe verlagerungs- und verwitterungsresistenter Indexsubstanzen, wie z. B. Quarz, Zirkonium, Titan sowie Fein-, Mittel- und Grobsand, die auch für die Berechnung herangezogen werden. Für die Berechnung der Gehaltsveränderungen an verschiedenen Bodenbestandteilen bzw. an Schwermetallen wurde die folgende Formel aufgestellt:

$$\pm D = (E_{\text{Horizont}} \cdot \frac{I_{\text{Cn-Horizont}}}{I_{\text{Horizont}}}) - E_{\text{Cn-Horizont}}$$

$\pm D$ = Differenz, Gehaltsveränderung gegenüber dem Ausgangssubstrat in g/l bzw. mg/l

E_{Horizont} = Elementgehalt in den jeweiligen Horizonten (Einheiten/m²)

$I_{\text{Cn-Horizont}}$ = Indexsubstanz im Ausgangsmaterial (Einheiten/l)

I_{Horizont} = Indexsubstanz in den einzelnen Horizonten (Einheiten/m²)

$E_{\text{Cn-Horizont}}$ = Elementgehalt im Ausgangsmaterial (Einheiten/l)

Zunächst sollen die Gehalte, auf Mineralfeinboden bezogen, korrigiert werden. Dafür wird der Gehalt an organischer Substanz sowie der Kalkgehalt und der Skelettanteil rechnerisch mit dem Faktor f_1 eliminiert:

$$f_1 = \frac{100 - (\% \text{ organische Substanz} + \% \text{ Kalk} + \% \text{ Skelett})}{100}$$

Die Gehalte in den Horizonten werden anschließend in Einheiten/m² mit Hilfe des Raumgewichts und der Horizontmächtigkeit bzw. im Ausgangssubstrat in Einheiten/l mittels Raumgewicht umgerechnet.

– Umrechnung der Gehalte in den Horizonten auf volumenbezogene Einheiten (Einheiten/m²):

a) Gehalt in % · 10 · Raumgewicht in kg/dm³ · Horizontmächtigkeit in m
=> Gehalt in kg/m²

b) Gehalt in mmol/z/100 g Boden · 10 · Raumgewicht in kg/dm³ · Horizontmächtigkeit in m
=> Gehalt in mol/z/m²

c) Gehalt in ppm · Raumgewicht in kg/dm³ · Horizontmächtigkeit in m
=> Gehalt in g/m²

– Umrechnung der Gehalte im Substrat auf volumenbezogene Einheiten (Einheiten/l):

a) Gehalt in % · 10 · Raumgewicht in kg/dm³ => Gehalt in g/l

b) Gehalt in mmol/z/100 g Boden · 10 · Raumgewicht in kg/dm³ => Gehalt in mmol/z/l

c) Gehalt in ppm · Raumgewicht in kg/dm³ => Gehalt in mg/l

2.1. Rechenbeispiel

Mit Hilfe des Computerprogramms wird die Bilanzierung für ein stark entwickeltes Podsol-Profil aus Sandstein (Mittlerer Buntsandstein) vorgenommen.

Tab. 1: Eingabedaten zur Profilbilanzierung.

Ausgangssubstrat: Sandstein (Mittlerer Buntsandstein)

Bodentyp: Podsol

Eingabedaten: Bodenparameter

Horizont	Volumen- gewicht [g/cm ³]	Mächtigkeit [cm]	organ. Substanz [%]	Kalkgehalt [%]	Skelettanteil [%]
Ah	1,10	20	14,7	0,0	0,0
Ae	1,40	20	0,8	0,0	20,0
Bh	1,20	24	6,7	0,0	5,0
Bhs	1,20	6	3,2	0,0	19,0
Ausgangssubstrat	1,50	-	0,0	0,0	6,0

Eingabedaten: Indexsubstanzen

Horizont	fS [%]	Zirkon [ppm]	Titan [%]
Ah	43,6	225	0,07
Ae	52,2	272	0,06
Bh	55,2	165	0,06
Bhs	53,3	214	0,07
Ausgangssubstrat	64,0	175	0,09

Eingabedaten: Bilanzsubstanzen (in ppm)

Horizont	Pb	Cu	Zn	Cd	Co	Ni	Mn
Ah	23	4,0	42	0,6	0,7	3,3	10,1
Ae	10	1,5	6	0,3	0,5	2,0	4,5
Bh	18	2,0	9	0,4	1,0	4,5	6,4
Bhs	24	2,9	9	0,3	3,6	9,0	12,2
Ausgangssubstrat	15	1,9	10	0,3	1,9	4,8	15,6

Tab. 2: Rechenergebnisse (Podsol/Sandstein).

Quotienten der Indexsubstanzen aus: fS, Zirkon, Titan

Horizont	fS	Zirkon	Titan	Durchschnitt*
Ah	11,03	5,84	9,66	8,84
Ae	7,80	4,09	9,54	7,14
Bh	6,43	5,88	8,32	6,88
Bhs	30,22	20,58	32,36	27,72

* Bei Einbeziehung mehrerer Indexsubstanzen in die Berechnung werden die Durchschnittsquotienten

$$\frac{I_{\text{Cn-Horizont}}}{I_{\text{Horizont}}}$$

gebildet und dadurch die Genauigkeit erhöht.

Profilbilanzierung in mg/l; Indexsubstanzen: fS, Zirkon, Titan

Horizont	Pb	Cu	Zn	Cd	Co	Ni	Mn
Ah	+ 17,0	+ 3,9	+ 55,6	+ 0,57	- 1,5	- 1,2	- 5,2
Ae	- 5,3	- 0,3	- 4,6	0,05	- 1,8	- 3,6	- 14,8
Bh	+ 10,3	+ 0,8	+ 1,6	+ 0,28	- 0,9	+ 1,1	- 10,8
Bhs	+ 16,1	+ 1,8	- 0,1	0,04	+ 2,9	+ 7,2	- 3,0
Solum	+ 9,5	+ 1,5	+ 13,1	+ 0,24	- 0,3	+ 0,8	- 8,4

Die Bilanzierung der durch die Pedogenese veränderten Gehalte an Schwermetallen im Vergleich zum Ausgangssubstrat deutet auf eine Anreicherung im Solum, in erster Linie bei den Elementen mit Affinität zur organischen Substanz wie Pb, Cu, Zn, Cd (Abb. 1-4) hin. Demgegenüber verzeichnet, auf das Gesamtsolum bezogen, sowohl Co (Abb. 5) als auch der von Co bevorzugte Ligand Mn eine Abnahme.

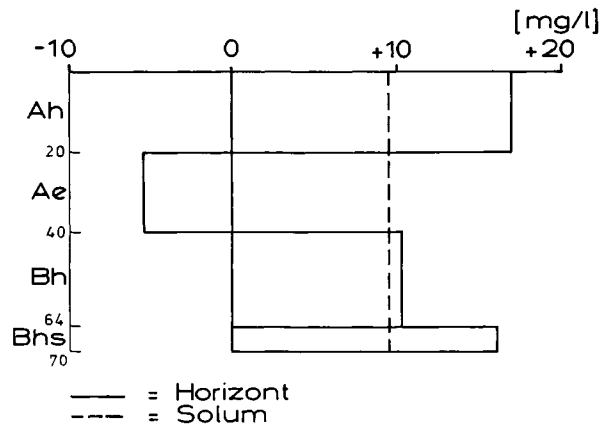


Abb. 1: Pb-Bilanzierung (Podsol/Sandstein).

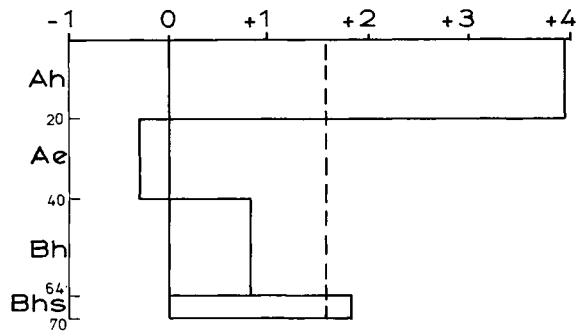


Abb. 2: Cu-Bilanzierung (Podsol/Sandstein).

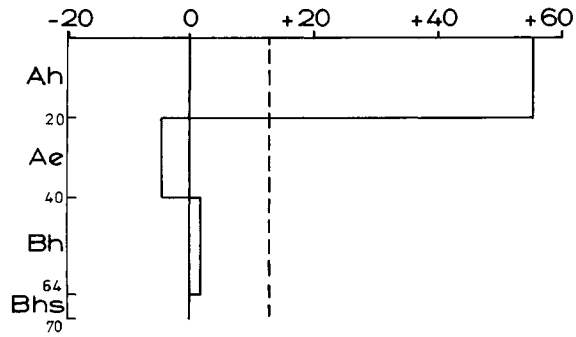


Abb. 3: Zn-Bilanzierung (Podsol/Sandstein).

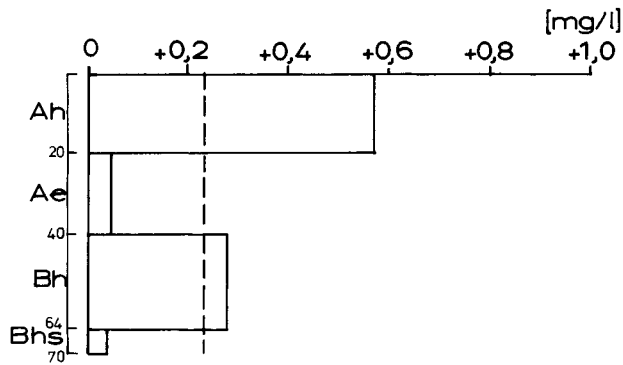


Abb. 4: Cd-Bilanzierung (Podsol/Sandstein).

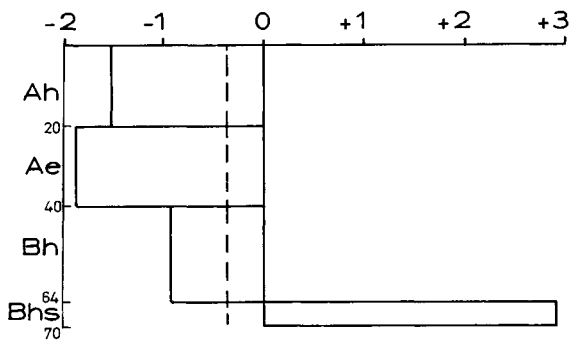


Abb. 5: Co-Bilanzierung (Podsol/Sandstein).

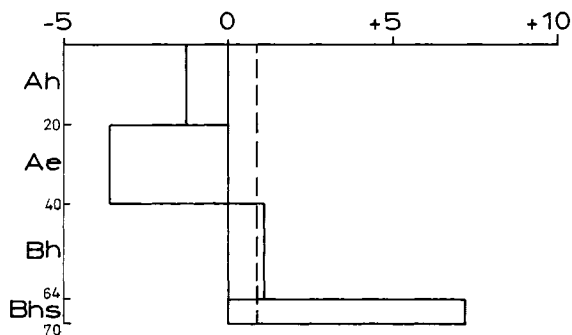


Abb. 6: Ni-Bilanzierung (Podsol/Sandstein).

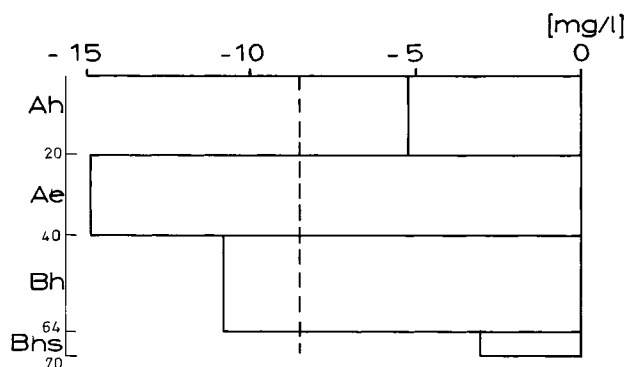


Abb. 7: Mn-Bilanzierung (Podsol/Sandstein).

Die Gewinne bzw. die Verluste in den einzelnen Horizonten hängen mit dem Verhalten der jeweiligen Liganden zusammen und sind in diesem Fall eine Funktion der Podsolierungsprozesse.

Die Durchführung dieser Bilanzierungsart an ausgewählten homogenen Bodenprofilen liefert brauchbare Informationen über die Auswirkung der Pedogenese auf das Verhalten von Schwermetallen in den entsprechenden Bodentypen.

3. Ermittlung der pedogenen sowie der anthropogenen Anreicherung im Boden gegenüber dem geogenen Gehalt

Das zweite Rechenmodell soll eine Abgrenzung der pedogenen Anreicherung und der eventuellen anthropogenen Anteile von den geogenen Gehalten im Profil ermöglichen. Als erster Schritt ist die Ermittlung der geogenen Durchschnittswerte im jeweiligen Substrat durchzuführen. Mit Hilfe der Häufigkeitsverteilung der Schwermetallgehalte (Abb. 8) ist die Homogenität innerhalb des Substrates zu überprüfen und die Mittelwerte durch Fehlerrechnung statistisch abzusichern (Tab. 3). Bei inhomogenen Substraten, die zwei oder mehrere Populationen in der Häufigkeitsverteilung aufweisen, empfiehlt sich die Unterteilung in entsprechende Gruppen. So werden z. B. für das Substrat „Sandstein“ Gruppen gebildet, die nach der Stratigraphie getrennt werden.

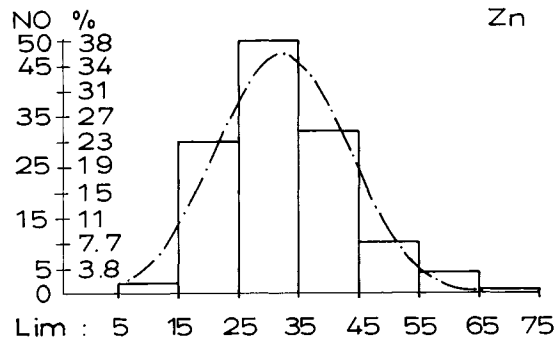
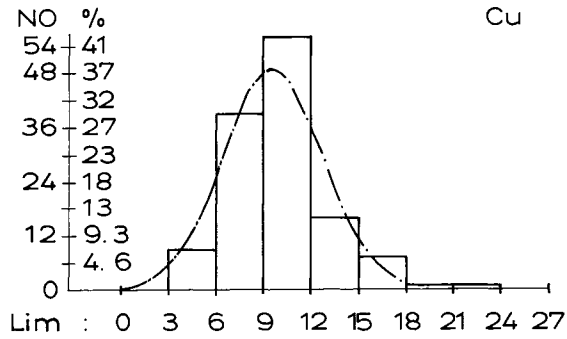
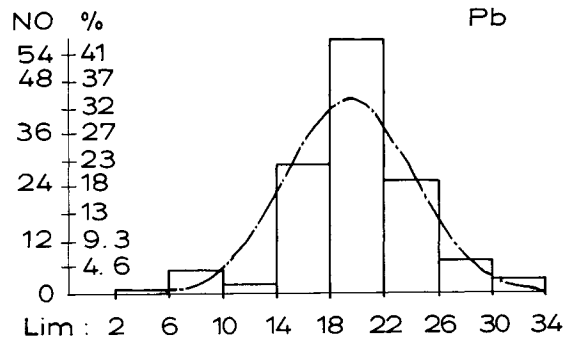


Abb. 8 a: Häufigkeitsverteilung der Schwermetalle im Löß (Gehalte in ppm).

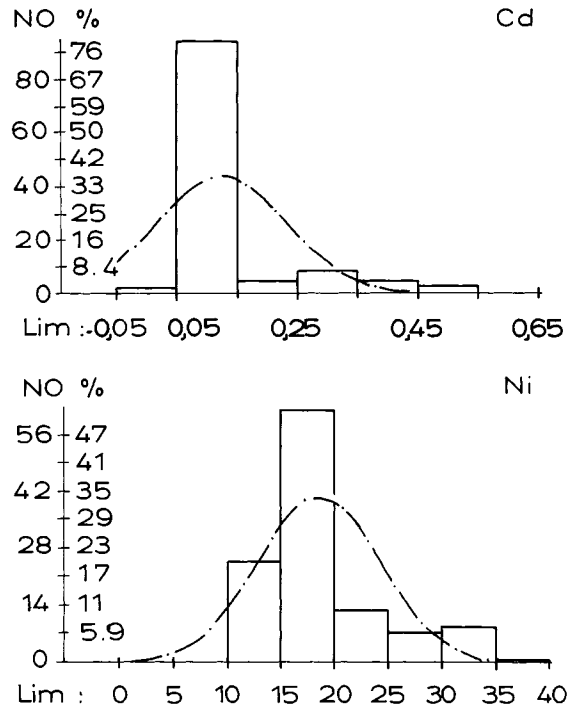


Abb. 8 b: Häufigkeitsverteilung der Schwermetalle im Löß (Gehalte in ppm).

3.1. Ermittlung der geogenen Gehalte im Ausgangssubstrat

Als Rechenbeispiel dient hier das Ausgangssubstrat Löß (Tab. 3). Eine größere Anzahl von Analysendaten könnte die Aussagekraft der ermittelten Durchschnittswerte als geogene Gehalte verbessern. Der hohe Variationskoeffizient (relative Standardabweichung) für Cd ist auf die Mobilität dieses Elements (Durchsickerung im Cv-Bereich) zurückzuführen und deutet auf eine notwendige Korrektur des Mittelwertes durch zusätzliche Analysendaten hin.

Tab. 3: Geogene Durchschnittsgehalte im Löß, berechnet als Mittelwerte im Ausgangssubstrat.

	Anzahl der Proben	Mittelwert	Standardabweichung	Mittlerer Fehler des Mittelwertes	Variationskoeffizient	Vertrauensintervall bei 95%iger Sicherheit
	n	\bar{x}	fm	Fm	V%	
Pb	129	19,43	4,69	0,41	24,11	18,62–20,25
Cu	129	9,59	3,10	0,27	32,27	9,05–10,13
Zn	129	32,31	10,69	0,94	33,08	30,45–34,17
Cd	118	0,125	0,107	0,01	85,14	0,106–0,145
Ni	118	18,58	5,67	0,52	30,48	17,55–19,62

$$f_m = \pm \sqrt{\frac{\sum(d^2)}{n-1}}, d = x_i - \bar{x} = \text{Abweichung des Einzelwertes } (x_i) \text{ vom Mittelwert } (\bar{x})$$

$$F_m = \pm \frac{f_m}{\sqrt{n}}$$

$$V\% = \frac{f_m \cdot 100}{\bar{x}} = \text{relative Standardabweichung oder Variationskoeffizient}$$

3.2. Errechnung der Regressionsgleichungen

Bei Berücksichtigung der Bindungsformen wird unter Einbeziehung der Liganden mit statistisch gesicherter Affinität die multiple Regressionsgleichung für das jeweilige Substrat und die einzelnen Schwermetalle errechnet. Die Regressionsgleichungen werden für das Gesamtsolum oder besser für A- bzw. B-Horizonte mit anthropogen unbelastetem Probenmaterial getrennt ermittelt. Je nach pH-Wert und Zusammensetzung des jeweiligen Liganden zeichnen sich folgende Affinitäten im Boden ab:

Pb	- organische Substanz*** - Tonminerale* - Sesquioxide*
Cu	- organische Substanz*** - Tonminerale** - Sesquioxide**
Zn	- organische Substanz*** - Tonminerale*** - Sesquioxide**
Cd	- organische Substanz** - Carbonate**
Co	- Manganoxide*** - Eisenoxide*** - Tonminerale**
Ni	- Eisenoxide*** - Tonminerale**
Cr	- Eisenoxide*** - Tonminerale**

* bis *** = signifikant bis sehr hoch signifikant

Die Abhängigkeit der Schwermetallgehalte im Boden (SM) von den Gehalten an Liganden wie organische Substanz (x_1), Ton (x_2), Eisenoxide (x_3), Manganoxide (x_4), Carbonate (x_5) u. a. ergibt sich aus der multiplen Regressionsgleichung:

$$SM = a + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5 + \dots + b_n \cdot x_n$$

Die Konstante a zeigt die Höhe des Einflusses anderer in die Berechnung nicht einbezogener Faktoren auf die Schwermetallgehalte. Die Regressionskoeffizienten b geben an, daß sich die Schwermetallgehalte im Mittel um b_1, b_2, \dots, b_n mg/kg Boden ändern, wenn die organische Substanz, der Ton bzw. die anderen Liganden um je eine Einheit (z. B. %) zunehmen.

Die Bindungsfähigkeit der erwähnten Liganden für Schwermetalle, besonders die der organischen Substanz, wird in erster Linie vom pH-Wert, aber auch von der Höhe des Gehaltes an Liganden selbst, bei organischer Substanz z. B. durch den Humifizierungsgrad, beeinflusst. In einer erweiterten Regressionsgleichung wäre es möglich, die Höhe des Einflusses dieser Faktoren ebenfalls zu erfassen, z. B.:

$$SM = a + b_1 \cdot \% \text{org. Subst.} + b_{11} \cdot \% \text{org. Subst.} \cdot \text{pH} + b_{12} \cdot \% \text{org. Subst.} \cdot \% \text{org. Subst.} + b_2 \cdot \% \text{Ton} + b_{21} \cdot \% \text{Ton} \cdot \text{pH} + b_{22} \cdot \% \text{Ton} \cdot \% \text{Ton} + b_3 \cdot \% \text{Fe}_2\text{O}_3 + b_{31} \cdot \% \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{pH}$$

Zumindest ist die Einbeziehung der Bodenreaktion bei kalkfreien Böden empfehlenswert. Die mit Hilfe der Regressionsgleichungen in Abhängigkeit von Ligandengehalten ermittelten Durchschnittswerte werden für eine bestimmte Kombination Boden/Substrat als Erwartungswert für den geogenen Schwermetallgehalt mit pedogener Veränderung betrachtet und sind für die Schätzung der potentiellen Belastbarkeit der Böden mit Schwermetallen von Bedeutung.

3.3. Rechenbeispiele

Die in den Rechenbeispielen angewandten Regressionsgleichungen wurden wegen der ungenügenden Probenanzahl lediglich für das Gesamtsolum ermittelt.

Tab. 4: Eingabedaten zur Profilbilanzierung.

Ausgangssubstrat: Sandstein (Mittlerer Buntsandstein)

Bodentyp: Podsol-Braunerde

Eingabewerte: Liganden (in %)

Horizont	organ. Subst.	Kalk	Ton	Fe ₂ O ₃ dith.
Ah	4,8	0,0	2,7	0,19
Aeh	1,4	0,0	5,1	0,32
Bv	0,5	0,0	3,1	0,37
Cv	0,1	0,0	3,0	0,10

Eingabewerte: Schwermetalle (in ppm)

Horizont	Pb	Cu	Zn	Cd	Ni
Ah	18,0	3,7	16,0	0,73	3,0
Aeh	7,0	2,8	12,5	0,45	6,0
Bv	12,0	3,1	19,5	0,42	7,5
Cv	10,2	2,0	12,0	0,17	5,4

Tab. 5: Profilbilanzierung (Podsol-Braunerde/Sandstein). Angaben in ppm.

Pb

Gleichung der multiplen Regression:

$$Pb = 3,50 + 1,58 \cdot \text{organische Substanz} + 0,84 \cdot \text{Ton} + 2,23 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Horizont	geogen. Gehalt	erwart. Gehalt	gemess. Gehalt	Anreicherung pedog.	Anreicherung anthr.
Ah	6,00	13,78	18,00	7,78	4,22
Aeh	6,00	10,71	7,00	1,00	-
Bv	6,00	7,72	12,00	1,72	4,28
Cv	6,00	6,40	10,20	0,40	3,80

Cu

Gleichung der multiplen Regression:

$$\text{Cu} = 1,21 + 0,15 \cdot \text{organische Substanz} + 0,06 \cdot \text{Ton} + 1,25 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Horizont	geogen. Gehalt	erwart. Gehalt	gemess. Gehalt	Anreicherung	
				pedog.	anthr.
Ah	2,00	2,33	3,70	0,33	1,37
Aeh	2,00	2,13	2,80	0,13	0,67
Bv	2,00	1,93	3,10	-	1,10
Cv	2,00	1,53	2,00	-	0,00

Zn

Gleichung der multiplen Regression:

$$\text{Zn} = 3,65 + 0,88 \cdot \text{organische Substanz} + 0,50 \cdot \text{Ton} + 3,12 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Horizont	geogen. Gehalt	erwart. Gehalt	gemess. Gehalt	Anreicherung	
				pedog.	anthr.
Ah	7,00	9,82	16,00	2,82	6,18
Aeh	7,00	8,43	12,50	1,43	4,07
Bv	7,00	6,79	19,50	-	12,50
Cv	7,00	5,55	12,00	-	5,00

Cd

Gleichung der multiplen Regression:

$$\text{Cd} = 0,04 + 0,01 \cdot \text{organische Substanz} + 0,004 \cdot \text{Ton} + 0,03 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Horizont	geogen. Gehalt	erwart. Gehalt	gemess. Gehalt	Anreicherung	
				pedog.	anthr.
Ah	0,08	0,10	0,73	0,02	0,63
Aeh	0,08	0,08	0,45	0,00	0,37
Bv	0,08	0,07	0,42	-	0,34
Cv	0,08	0,06	0,17	-	0,09

Ni

Gleichung der multiplen Regression:

$$\text{Ni} = 3,21 + 0,02 \cdot \text{organische Substanz} + 0,07 \cdot \text{Ton} + 1,30 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Horizont	geogen. Gehalt	erwart. Gehalt	gemess. Gehalt	Anreicherung	
				pedog.	anthr.
Ah	3,00	3,74	3,00	0,00	-
Aeh	3,00	4,01	6,00	1,01	1,99
Bv	3,00	3,92	7,50	0,92	3,58
Cv	3,00	3,55	5,40	0,55	1,85

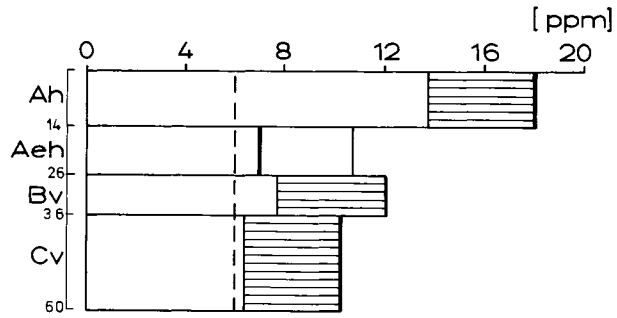


Abb. 9: Pb-Bilanzierung (Podsol-Braunerde/Sandstein).

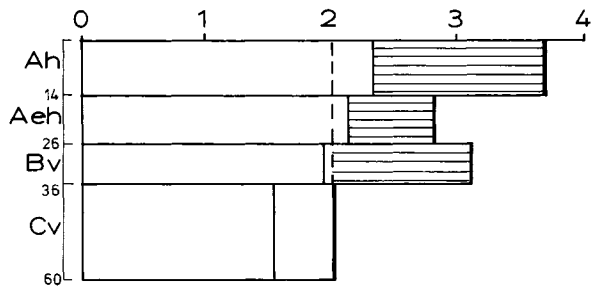


Abb. 10: Cu-Bilanzierung (Podsol-Braunerde/Sandstein).

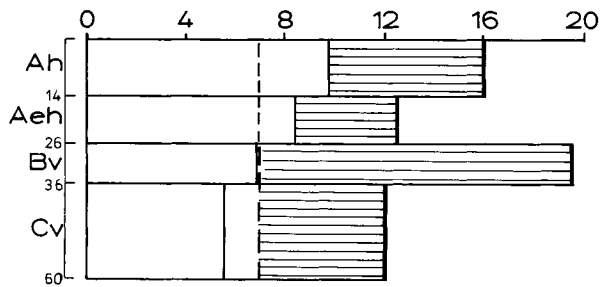


Abb. 11: Zn-Bilanzierung (Podsol-Braunerde/Sandstein).

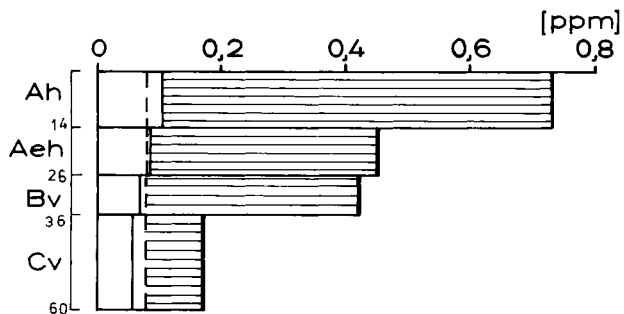


Abb. 12: Cd-Bilanzierung (Podsol-Braunerde/Sandstein).

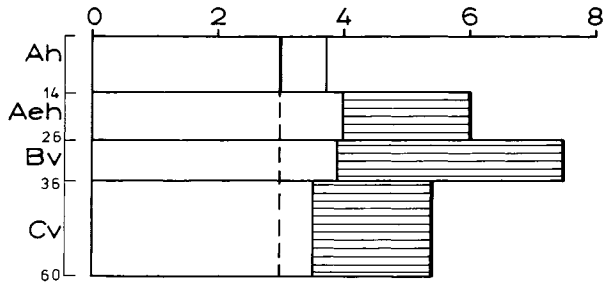


Abb. 13: Ni-Bilanzierung (Podsol-Braunerde/Sandstein).

Tab. 6: Eingabedaten zur Profilbilanzierung.

Ausgangssubstrat: Löß

Bodentyp: Tschernosem-Kolluvium

Eingabewerte: Liganden (in %)

Horizont	organ. Subst.	Kalk	Ton	Fe ₂ O ₃ dith.
Ap	3,0	16,1	18,7	1,06
M	1,3	16,9	22,5	0,74
fAh	2,0	5,9	27,4	1,23
AhC	0,0	24,3	26,4	0,57
Cc	0,0	29,0	19,3	0,57

Eingabewerte: Schwermetalle (in ppm)

Horizont	Pb	Cu	Zn	Cd	Ni
Ap	219,0	19,0	81,0	0,04	28,0
M	40,0	34,0	60,0	0,20	26,0
fAh	24,0	12,0	65,0	0,40	28,0
AhC	24,0	8,0	42,0	0,03	23,0
Cc	23,0	10,0	50,0	0,03	24,0

Tab. 7: Profilbilanzierung (Tschernosem-Kolluvium/Löß). Angaben in ppm.

Pb

Gleichung der multiplen Regression:

$$Pb = 10,0 + 3,5 \cdot \text{organische Substanz} + 0,1 \cdot \text{Ton} + 0,2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Horizont	geogen.	erwart.	gemess.	Anreicherung	
	Gehalt	Gehalt		pedog.	anthr.
Ap	19,43	22,69	219,00	3,26	196,31
M	19,43	17,09	40,00	–	20,57
fAh	19,43	19,92	24,00	0,49	4,08
AhC	19,43	12,75	24,00	–	4,57
Cc	19,43	12,04	23,00	–	3,57

Cu

Gleichung der multiplen Regression:

$$\text{Cu} = 2,0 + 1,5 \cdot \text{organische Substanz} + 0,3 \cdot \text{Ton} + 6,0 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Horizont	geogen. Gehalt	erwart. Gehalt	gemess. Gehalt	Anreicherung	
				pedog.	anthr.
Ap	9,59	18,52	19,00	8,93	0,48
M	9,59	15,20	34,00	5,61	18,80
fAh	9,59	20,57	12,00	2,41	-
AhC	9,59	13,34	8,00	-	-
Cc	9,59	11,21	10,00	0,41	-

Zn

Gleichung der multiplen Regression:

$$\text{Zn} = 15,8 + 8,3 \cdot \text{organische Substanz} + 0,4 \cdot \text{Ton} + 4,4 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Horizont	geogen. Gehalt	erwart. Gehalt	gemess. Gehalt	Anreicherung	
				pedog.	anthr.
Ap	32,31	53,09	81,00	20,78	27,91
M	32,31	39,18	60,00	6,87	20,82
fAh	32,31	48,61	65,00	16,30	16,39
AhC	32,31	28,87	42,00	-	9,69
Cc	32,31	26,03	50,00	-	17,69

Cd

Gleichung der multiplen Regression:

$$\text{Cd} = -0,211 + 0,227 \cdot \text{organische Substanz} + 0,01 \cdot \text{Carbonate} + 0,003 \cdot \text{Ton} + 0,001 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Horizont	geogen. Gehalt	erwart. Gehalt	gemess. Gehalt	Anreicherung	
				pedog.	anthr.
Ap	0,13	0,69	0,04	-	-
M	0,13	0,33	0,20	0,08	-
fAh	0,13	0,38	0,40	0,26	0,02
AhC	0,13	0,11	0,03	-	-
Cc	0,13	0,14	0,03	-	-

Ni

Gleichung der multiplen Regression:

$$\text{Ni} = 10,9 + 0,4 \cdot \text{organische Substanz} + 0,03 \cdot \text{Ton} + 7,1 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

Horizont	geogen. Gehalt	erwart. Gehalt	gemess. Gehalt	Anreicherung	
				pedog.	anthr.
Ap	18,58	20,20	28,00	1,62	7,80
M	18,58	17,36	26,00	-	7,42
fAh	18,58	21,25	28,00	2,67	6,75
AhC	18,58	15,74	23,00	-	4,42
Cc	18,58	15,53	24,00	-	5,42

Im Laufe der Podsolierung können anthropogene Pb-Anteile mit der organischen Substanz in die Tiefe verlagert werden (Abb. 9). Dabei spielen die Fulvosäuren, aber auch der niedrige pH-Wert durch Erhöhung der Mobilität der Pb-Humate eine wichtige Rolle (BOR 1984). In den kalkhaltigen Böden aus Löß wird der anthropogene Pb-Anteil hauptsächlich im Oberboden akkumuliert. Bei dem Beispiel Abb. 14 handelt es sich um ein mit Pb belastetes Bodenprofil.

Eine Verlagerung der anthropogenen Cu-Anteile ist im sauren pH-Bereich bei Podsolierungsprozessen zu erwarten. Diese ist allerdings weniger ausgeprägt, als es bei Pb der Fall ist (Abb. 10) und erfolgt hauptsächlich als Cu-Fulvate, da die Cu-Humate wesentlich stabiler sind (BOR 1984). Die Zunahme des anthropogenen Cu-Anteils im M-Horizont des Tschernosem-Kolluvium-Profiles (Abb. 15) ist durch Verlagerung des humosen Bodenmaterials von Hängen zustande gekommen.

Beim Zn, wo selbst die Zn-Humate relativ mobiler sind, ist auch bei höheren pH-Werten mit Verlagerung der anthropogenen Anteile zu rechnen (Abb. 11 und 16). Eine wichtigere Rolle bei der Zn-Festlegung im neutralen pH-Bereich des Bodens spielen allerdings die Tonminerale.

Das Cd ist, abgesehen von der Carbonatbindung, wegen der Labilität seiner Verbindungen ein sehr mobiles Element. Deshalb können auch die anthropogenen Cd-Anteile leicht verlagert werden (Abb. 12 und 17).

Das Ni reichert sich bevorzugt mit den pedogenen Oxiden, z. B. Fe-Oxiden, an. Im sauren pH-Bereich findet eine aktive Ni-Verlagerung statt (Abb. 13), sonst kann Ni wie die Fe-Oxide mit dem Ton passiv in die Tiefe verlagert werden. Abb. 18 zeigt, daß auch anthropogene Ni-Anteile im Unterboden akkumuliert werden können.

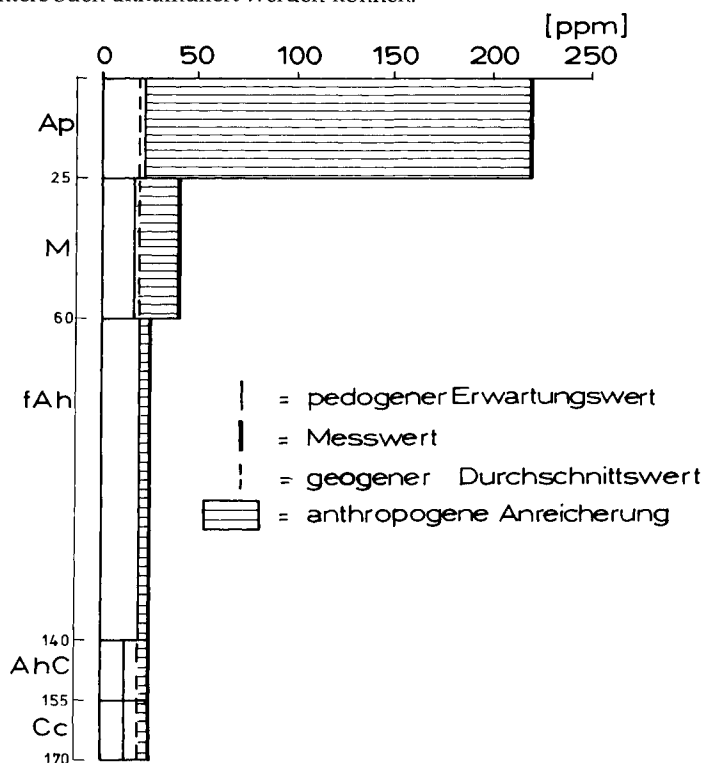


Abb. 14: Pb-Bilanzierung (Tschernosem-Kolluvium/Löß).

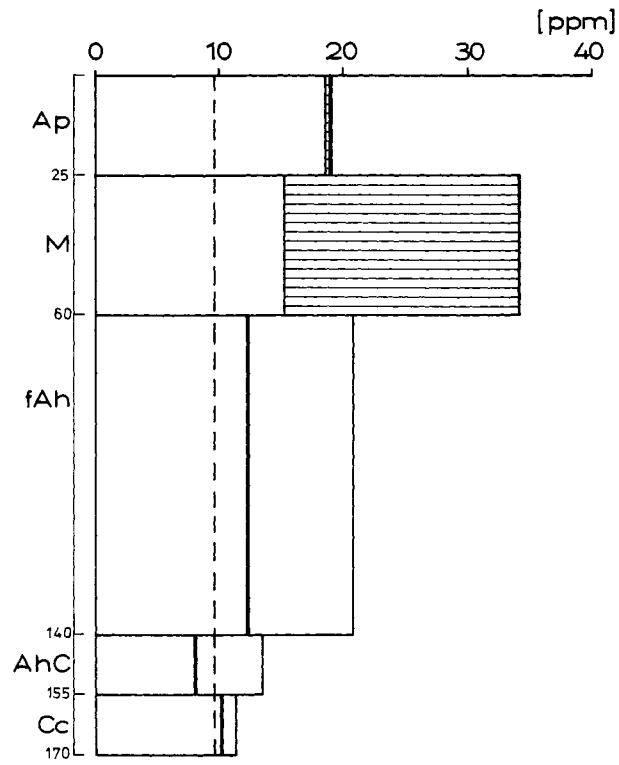


Abb. 15: Cu-Bilanzierung (Tschernosem-Kolluvium/Löß).

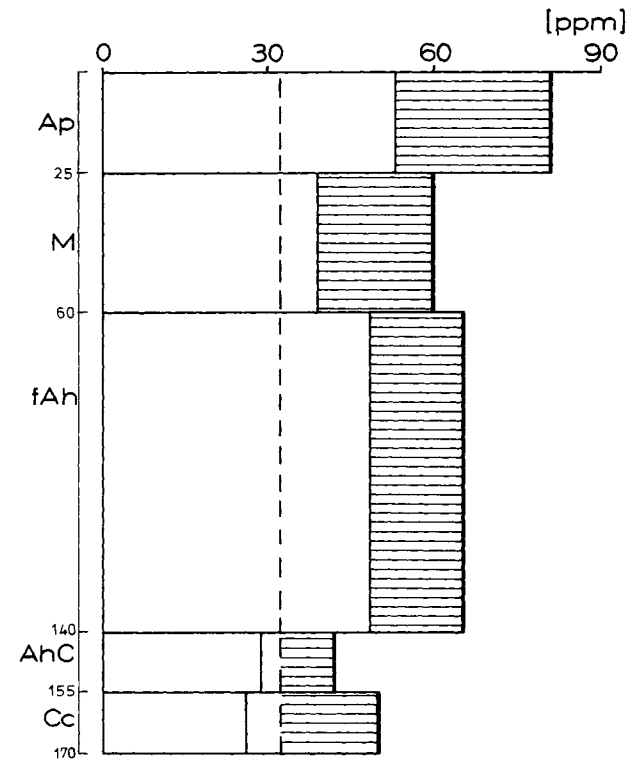


Abb. 16: Zn-Bilanzierung (Tschernosem-Kolluvium/Löß).

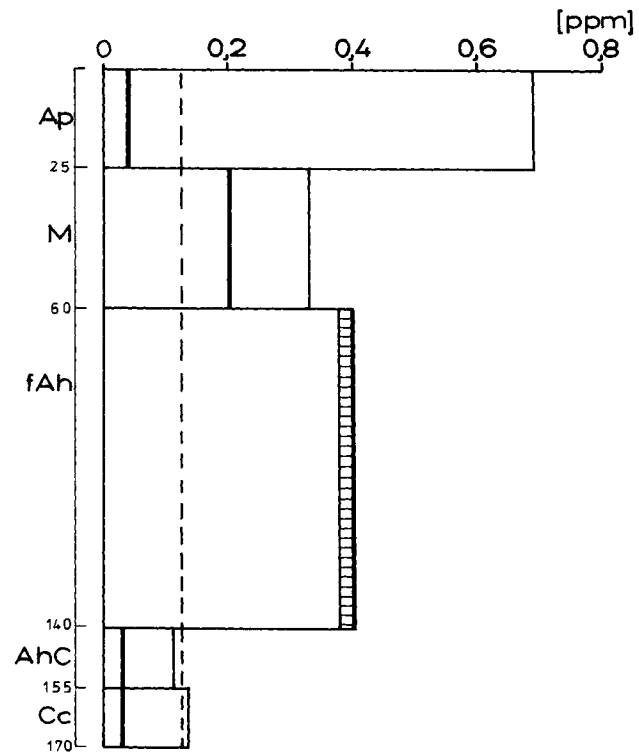


Abb. 17: Cd-Bilanzierung (Tschernosem-Kolluvium/Löß).

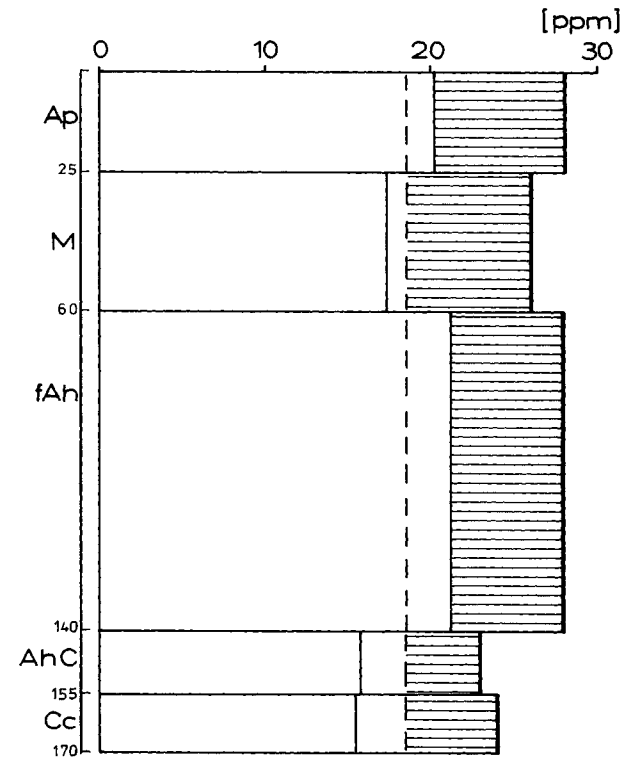


Abb. 18: Ni-Bilanzierung (Tschernosem-Kolluvium/Löß).

3.4. Bilanzierung im geschichteten Profil

Falls eine Schwermetallbilanzierung in einem Profil mit zwei oder mehreren geologischen Schichten durchgeführt werden soll, werden die Daten unter Zugrundelegung der substratweise errechneten geogenen Gehalte (Tab. 3) für jedes Substrat wie in Kap. 3.2. ermittelt. Das Ausmaß der gegenseitigen Beeinflussung der benachbarten Substrate durch bodenbildende Prozesse kann dabei nur geschätzt werden.

Tab 8: Eingabedaten zur Profibilanzierung.

Ausgangssubstrat: Löß über Sandstein (Rotliegendes)

Bodentyp: Rigosol-Braunerde

Eingabewerte: Liganden (in %)

Horizont	organ. Subst.	Ton	Fe ₂ O ₃ dith.
R	1,6	20,7	0,69
IIBv	0,0	16,4	0,65
IICv	0,0	14,8	0,63

Eingabewerte: Schwermetalle (in ppm)

Horizont	Pb	Cu	Zn	Cd	Ni
R	10,0	39,6	26,6	0,10	13,9
IIBv	2,7	3,8	7,3	0,07	4,2
IICv	1,6	3,3	8,6	0,07	4,7

Tab. 9: Profibilanzierung (Rigosol-Braunerde/Löß über Sandstein). Angaben in ppm.

Cu

Gleichung der multiplen Regression:

1. Schicht

$$Cu = 2,0 + 1,5 \cdot \text{organische Substanz} + 0,3 \cdot \text{Ton} + 6,0 \cdot Fe_2O_3$$

2. Schicht

$$Cu = 1,2 + 0,17 \cdot \text{organische Substanz} + 0,06 \cdot \text{Ton} + 1,3 \cdot Fe_2O_3$$

Horizont	geogen. Gehalt	erwart. Gehalt	gemess. Gehalt	Anreicherung	
				pedog.	anthr.
R	9,59	14,72	39,60	5,13	24,88
IIBv	4,00	3,03	3,80	-	-
IICv	4,00	2,91	3,30	-	-

4. Regionalisierung der potentiellen Schwermetallgehalte in Böden

Die ermittelten Regressionsgleichungen können außer zur Bilanzierung im Profil auch zur Regionalisierung der Verträglichkeit der Böden gegenüber Schwermetallen angewandt werden. Unter Auswertung geowissenschaftlicher Kartenwerke werden substratweise die Durchschnittswerte für die Gehalte an Liganden sowie für andere bodenchemische Parameter, wie pH-Wert, jeweils für Ober- und Unterboden berechnet. Dabei ist auch eine Trennung nach Nutzungsarten, z. B. Wald- und Ackerstandorte, sinnvoll. Mittels Regressionsgleichungen können dann für diese Parameter die erwarteten pedogenen Durchschnittsgehalte an Schwermetallen in Böden substratspezifisch berechnet werden.

Tab. 10: Rechenbeispiel für Löß.

Durchschnittswerte für Parameter in Böden aus Löß

	organische Substanz [%]	Ton [%]	Fe ₂ O ₃ dith. [%]	Kalk [%]	pH
Oberboden n = 20	2,73	20,9	0,66	8,4	7,0
Unterboden n = 25	1,08	23,0	0,68	16,1	7,1

Pedogene Erwartungswerte an Schwermetallen in Böden aus Löß

[in ppm]	Pb	Cu	Zn	Cd	Ni
Oberboden	21,8	16,3	49,7	0,55	17,3
Unterboden	16,2	14,6	37,0	0,27	16,9

[in kg/ha]	Pb	Cu	Zn	Cd	Ni
Oberboden TRG = 1,35; Mächtigkeit 25 cm	73,6	55,0	167,7	1,86	58,4
Unterboden TRG = 1,40; Mächtigkeit 50 cm	113,4	102,2	259,0	1,89	118,3

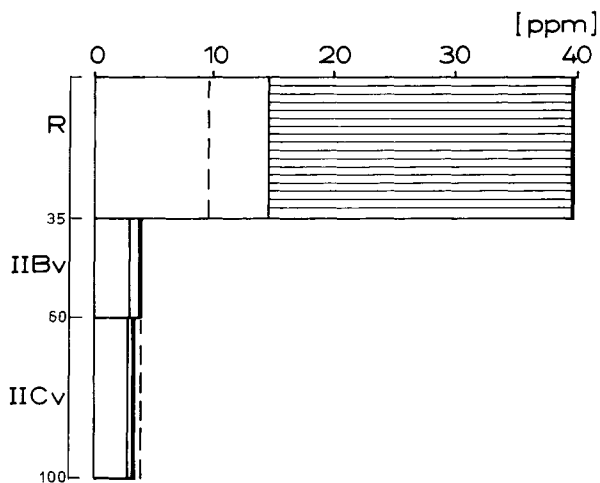


Abb. 19: Cu-Bilanzierung (Rigosol-Braunerde/Löß über Sandstein).

5. Zusammenfassung

Zwei Rechenmodelle für die Schwermetallbilanzierung im Boden wurden vorgestellt. Ein entsprechendes Computerprogramm wurde im Geologischen Landesamt Rheinland-Pfalz ausgearbeitet. Ziel der Arbeit war es, eine Auswertungsmöglichkeit von Analysendaten anzubieten. Dabei sollen Informationen über den Einfluß der Pedogenese auf die Menge und Verteilung der Schwermetalle im Solum sowie über die Herkunft verschiedener im Boden akkumulierter Anteile gewonnen werden. In der praktischen Anwendung sollen die Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Bodenparametern und dem Verhalten der Schwermetalle im Boden mit Hilfe von geowissenschaftlichen Kartenwerken eine Regionalisierung der zu erwartenden Schwermetallgehalte ermöglichen.

Schriften

- BOR, J. (1984): Untersuchungen zur Pedogenese und zum Chemismus von Sandböden in Rheinland-Pfalz. – Geol. Jb., **F18**, 141 S., 39 Abb., 19 Tab., Hannover.
- KUNDLER, P. (1959): Zur Methode der Bilanzierung der Ergebnisse von Bodenbildungsprozessen (Profilbilanzierung), dargestellt am Beispiel eines Texturprofils auf Geschiebemergel in Norddeutschland. – Z. Pflanzenern., Düng., Bodenkde., **86**, S. 215-222, Weinheim.
- SCHLICHTING, E. & BLUME, H. P. (1966): Bodenkundliches Praktikum. 209 S., 35 Abb., 1 Farbtaf., 38 Tab., Hamburg, Berlin (Parey).

Anschriften der Autoren:

Dipl.-Ing. Dr. JULIUS BOR, Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz,
Emmeransstraße 36, D-6500 Mainz.

Dipl.-Geogr. JOHANNES KRZYZANOWSKI, Glückstraße 36, D-6000 Frankfurt am Main.

Manuskript eingegangen am 22. 10. 1986