

KfK 4028
Februar 1986

Verteilung von Schadstoffen durch Regenwürmer (*Lumbricus terrestris*)

Teil I:

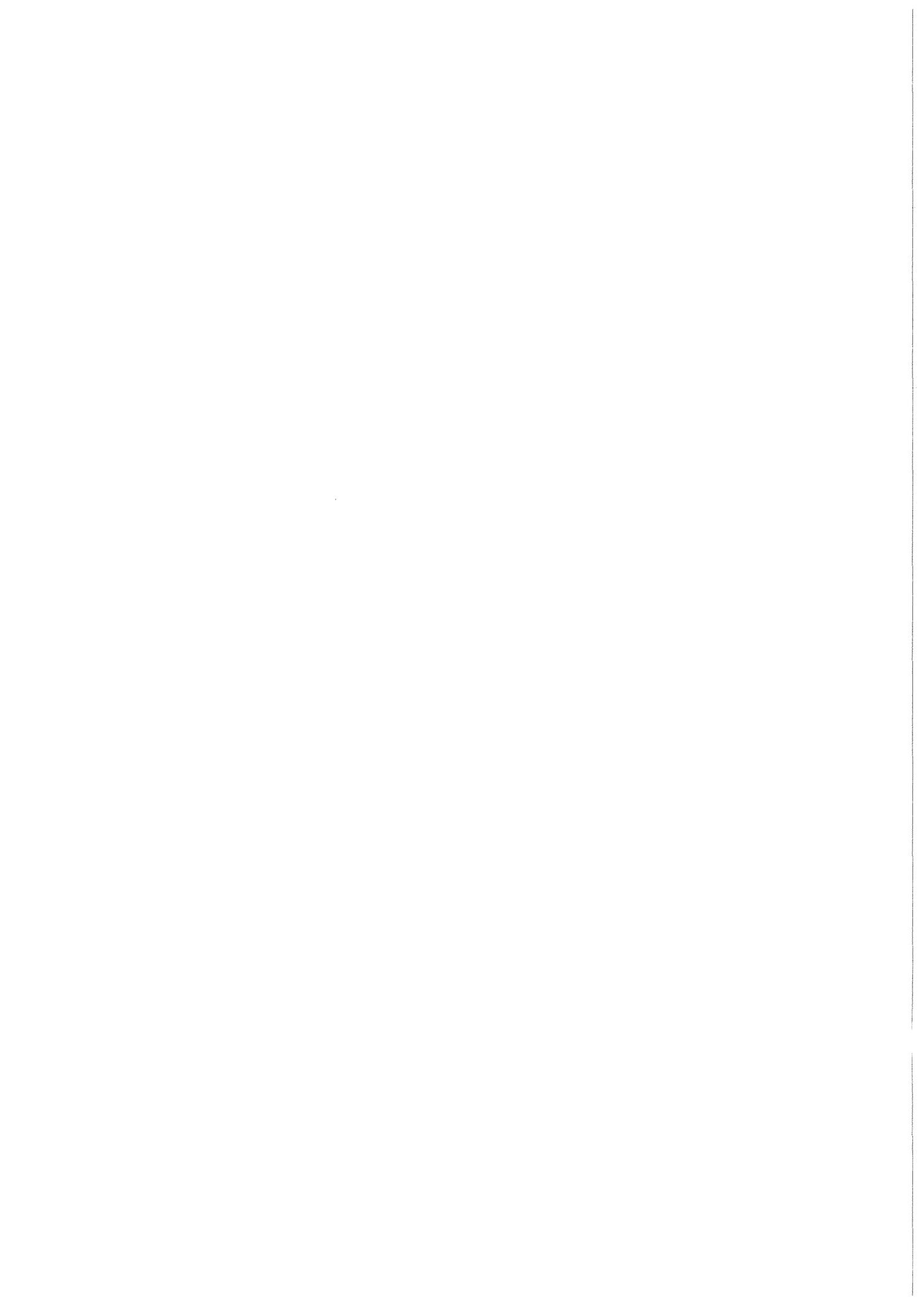
**Anreicherung von Blei, Chrom, Cobalt,
Nickel und Cadmium in Wurmaggagaten
und Wurmgewebe**

Teil II:

**Vertikaler Transport der Elemente Blei,
Chrom, Cobalt, Nickel und Cadmium
durch Regenwürmer**

**W. Schmidt, Th. Liese, Th. Sollich
Hauptabteilung Sicherheit**

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Hauptabteilung Sicherheit

KfK 4028

VERTEILUNG VON SCHADSTOFFEN DURCH REGENWÜRMER

(*Lumbricus terrestris*)

Teil I: Anreicherung von Blei, Chrom, Cobalt, Nickel
und Cadmium in Wurmaggagaten und Wurmgewebe

Teil II: Vertikaler Transport der Elemente Blei, Chrom,
Cobalt, Nickel und Cadmium durch Regenwürmer

W. Schmidt, Th. Liese und Th. Sollich

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

VERTEILUNG VON SCHADSTOFFEN DURCH REGENWÜRMER
(*Lumbricus terrestris*)

Teil I: Anreicherung von Blei, Chrom, Cobalt, Nickel und Cadmium in Wurmaggregaten und Wurmgewebe

Zusammenfassung

In einem zehn Monate dauernden Versuch wurde der Gehalt an Cd, Co, Cr, Ni und Pb in Regenwürmern der Art *Lumbricus terrestris* und ihren Ausscheidungen gemessen. Als Lebensraum der Würmer dienten Bodensäulen mit einem Löss-Unterboden, der arm an organischer Substanz war. Der kontaminierte Rindermist war jeweils in einer dünnen Schicht entweder oben oder in der Mitte oder unten ausgelegt worden.

Gegenüber dem kontaminierten Rindermist reichern die Würmer Cd um den Faktor 1,4 an. Gegenüber dem nicht kontaminierten Boden betragen die Anreicherungen im Mittel 85, 24, 26, 5 und 2,4 für Cd, Co, Cr, Ni und Pb. Bei den Ausscheidungen der Würmer liegen die Mittelwerte bei 14, 11, 66, 17 und 14.

Die Anreicherung von Schwermetallen in Regenwürmern ist indirekt auch für die Nahrungskette des Menschen von Bedeutung: Wenn diese Würmer im Boden absterben, hinterlassen sie in ihrem Gewebe gebunden kleinräumig höhere Schwermetallkonzentrationen im Boden, die in diesem Bereich bei einigen Elementen zu einer höheren Pflanzenverfügbarkeit führen können.

POLLUTANT DISTRIBUTION IN THE SOIL BY EARTHWORMS
(*Lumbricus terrestris*)

Section I: Lead, Chromium, Cobalt, Nickel and Cadmium
Enrichment in Earthworm Casts and Earthworm Tissues

Abstract

In an experiment of ten months duration the Cd, Co, Cr, Ni and Pb contents were measured both in earthworms of the *lumbricus terrestris* species and in their casts. The living space for the earthworms were soil columns with a loess subsoil depleted in organic matter. The contaminated cattle dung had been applied on top or in the center or on the bottom as thin layers each.

Compared with the contaminated cattle dung the earthworms enrich Cd by the factor 1.4. Compared with the non-contaminated soil the enrichments on an average were 85, 24, 26, 5 and 2.4 for Cd, Co, Cr, Ni and Pb, respectively. In the earthworm casts the the average attained values of 14, 11, 66, 17 and 14.

The enrichment of heavy metals in earthworms is indirectly of importance to the food chain of man too. When these earthworms die in the soil, they leave in restricted spaces elevated heavy metal concentrations bound in the worm tissues. In the said spaces they may enhance the availability to plants of some elements.

Teil II: Vertikaler Transport der Elemente Blei, Chrom, Cobalt, Nickel und Cadmium durch Regenwürmer

Zusammenfassung

Im vorliegenden Säulenexperiment war zu überprüfen, ob, wie und in welchem Zeitraum Regenwürmer der Art *Lumbricus terrestris*, die in einer Rindermistschicht von 5 cm Dicke in verschiedenen Tiefen eingebrachten Schwermetalle Cd, Co, Cr, Ni und Pb in den Bodensäulen verteilen. Weiterhin war von Interesse, wie sich das Verhältnis von pflanzenverfügbaren und mobilisierbaren Anteilen der Schwermetalle verändert. Dazu wurden die Säulen bei Versuchsende in ca. 5 cm dicke Scheiben zerlegt.

Unabhängig von der Auslage der kontaminierten Rindermistschicht wurde die organische Substanz als Tapetenmaterial in den Regenwurm-gängen von oben nach unten und umgekehrt in der Säule verteilt.

Im Mittel aller Säulen sind die HNO_3 -löslichen (mobilisierbaren) Anteile metallspezifisch mehr oder weniger gegenüber dem Boden zu Versuchsbeginn erhöht. Mit Ausnahme von Cr trifft diese Aussage auch für die EDTA-löslichen (pflanzenverfügbaren) Gehalte zu.

Durch die Tätigkeit der Regenwürmer wurde der pflanzenverfügbare Anteil insbesondere bei Cd und nicht bei Cr relativ stärker erhöht als der mobilisierbare Anteil.

Section II: Vertical Transport of the Elements Lead, Chromium, Cobalt, Nickel and Cadmium by Earthworms

Abstract

The column experiment under consideration served to examine whether, how and during which period earthworms of the *lumbricus terrestris* species distribute in the soil columns the heavy metals Cd, Co, Cr, Ni and Pb introduced into various depths in a cattle dung layer of 5 cm thickness. Furthermore, it was of interest to know how the ratio of heavy metal portions available to plants and capable of mobilization undergoes variations. For this purpose, the columns were cut into slices of about 5 cm thickness upon termination of the experiment.

Independent of the application of the contaminated cattle dung layer the organic matter was turned over in the column from top to bottom and vice versa forming tapetal layers in the earthworm tunnels.

For the average of all columns taken together the portions soluble in HNO_3 at the beginning of the experiment are more or less higher than in the soil, depending on the metals considered. Except for Cr, this statement holds also for the EDTA-soluble (available to plants) contents.

By the action of the earthworms the portion available to plants, especially for Cd and not for Cr, was increased at a relatively higher rate than the portion amenable to mobilization.

<u>I n h a l t</u> =====	Seite
<u>Teil I</u>	
1. Einleitung	2
2. Material und Methoden	5
2.1 Versuchsanlage	5
3. Ergebnisse	7
4. Diskussion der Ergebnisse	11
4.1 Cadmium	14
4.2 Blei	14
4.3 Nickel	15
4.4 Chrom	16
4.5 Cobalt	16
5. Literatur	27
<u>Teil II</u>	
1. Einleitung	30
2. Material und Methoden	32
3. Ergebnisse	33
4. Diskussion der Ergebnisse	37
Anhangtabellen	62
5. Literatur	78

Teil I:

Anreicherung von Blei, Chrom, Cobalt, Nickel und Cadmium
in Wurmaggagaten und Wurmgewebe

1. Einleitung

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, das Wissen über Schadstoffe in terrestrischem Ökosystem zu erweitern. Dabei ist herauszufinden, in welcher Weise die Schwermetalle Blei, Chrom, Cobalt, Nickel und Cadmium im Boden über das übliche Migrationsverhalten hinaus durch mechanisch-biologische Vorgänge im Boden verteilt werden. Weiterhin ist es von Interesse, welche Auswirkungen auf die Mobilität der Schadstoffe im Boden im Hinblick auf die Pflanzenverfügbarkeit durch biologische Einflüsse zu erwarten sind.

Verteilungsmuster für Schadstoffe bzw. Schwermetalle im Boden sind dann wichtig, wenn ihre Verfügbarkeit für Pflanzen und ihre Anreicherung in diesen, die Gesundheit der Menschen über die Nahrungskette unmittelbar gefährden kann. Für die Anreicherung auf und im Boden gibt es eine Reihe von bekannten Ursachen. Das betrifft z.B. flächenmässig die Deposition von Schadstoffen aus der Luft ganz allgemein, in Einzelfällen können aber auch Ablagerungen von Klärschlämmen, Deponien oder Unfallsituationen zu Kontaminationen des Bodens führen.

Der Boden selbst ist eben nicht nur Puffer- und Lagerstätte von Schadstoffen, er ist auch Standort für Nahrungs- und Futtermittelpflanzen und Träger des Grundwassers. Boden ist ein Wirkungskomplex vielfältiger Faktoren, der über seine physikalisch-chemische Funktion hinaus auch mit Leben erfüllt ist. Dabei handelt es sich um Bodenflora und Bodenfauna. Letztere umfaßt einen Bereich, der von einzelligen Protozoen bis hin zu den Säugern Hamster und Ziesel reicht. Bodenbiologisch besonders bedeutsam ist der als

Kosmopolit bekannte Regenwurm, weil die Regenwürmer wegen ihres hohen Umsetzungsvermögens an Boden und organischer Substanz eine Sonderstellung einnehmen. Deren bodenbiologische Aktivitäten sind eine wesentliche Komponente zur physikalischen Bewegung von Teilchen und Elementen im Boden und ihre Umwandlung durch Ab-, Um- und Aufbauvorgänge in lösliche Formen, die eng mit der Pflanzenverfügbarkeit und dem Transfer in die Pflanze zusammenhängen. Hervorzuheben ist die Tatsache, daß Regenwürmer den Materialaustausch sowohl von oben nach unten, als auch umgekehrt vornehmen.

Regenwürmer gehören innerhalb der Gruppe Metazoen zur Stammgruppe der Articulata bzw. zur Familie der Lumbridae. Von den in Deutschland beschriebenen ca. 50 Regenwurmartarten lassen sich die am häufigsten vorkommenden Arten nach Graff (1953) folgendermaßen einteilen (Tab. 1):

Tabelle 1: Die wichtigsten Regenwürmer (nach Graff, 1953) in Deutschland

Art	Länge mm	Dicke mm	
Tauwurm (<i>Lumbricus terrestris</i>)	90-300	6-9	legt tiefe, senkrechte Röhren an
Rotwurm (<i>Lumbricus rubellus</i>)	70-120	4	flach grabend
Erdwürmer (<i>Allolobophora caliginosa</i>)	50-160	3-5	} flach grabend
(<i>Allolobophora rosen</i>)	25- 80	3-4	
Kompostwurm (<i>Eisenia faetida</i>)	30-130	3-4	

Der sehr wichtige Tauwurm kommt praktisch auf allen Kulturböden vor. Er legt in lehmigen Sandböden bis zu 3 m, in Löß bis zu 7 m tiefe Röhren an (Graf 1983). Seine Hauptnahrung stellt wahrscheinlich Humus dar; der Wurm bewegt sich bohrend und fressend in die Tiefe. Seine quantitative und qualitative Besiedlung ebenso wie die Tiefenwanderung ist stark umweltabhängig. Als Einflußfaktoren sind Art, Struktur und Temperatur, Humusgehalt, Feuchtigkeit und pH-Wert des Bodens zu nennen. Ein Beispiel für flächenmäßigen Besatz liefert Kollmannsperger (zitiert bei Müller 1965), der bei Gartenland ca. 390, bei Wiesen/Weiden 8-293 und bei Ackerland 70-112 Stück Regenwürmer pro Quadratmeter fand. Die mengenmäßige Bodenbewegung geht aus Untersuchungen von Stöckel und Kollmannsperger (zitiert bei Müller 1965) hervor: sie fanden z.B. bei Gartenboden 1090 g und bei Dauerwiesen 3600 g Losung pro Quadratmeter und 1 Jahr. Graff (1971) fand pro Quadratmeter eine Biomasse von 96,5 g, wobei Lumbricus 32 g ausmachte, während die Gesamtlosung für einen Zeitraum von 180 Tagen auf der Wiesenoberfläche 25,7 kg betrug und davon 5,8 kg auf Lumbricus entfielen.

In verschiedenen Arbeiten u.a. von Ireland (1975, 1977, 1979), Ireland und Wootan (1976), Morgan und Morris (1982), Nelson (1982), Richards und Ireland (1977, 1978), Wright und Stringer (1980) wurden Schwermetalle in Regenwürmern untersucht, wobei die Anreicherung für Cadmium und Zink deutlich wird. Indifferent ist dies für Blei, Kupfer und Nickel, während Mangan abgereichert wird. Umfangreiche Transferdaten Boden/Wurm liefert Beyer (1980). Demnach liegen Zink, Selen, Chrom, Cadmium, Quecksilber und Gold deutlich über dem Transferfaktor 1, Cobalt, Kupfer und Arsen bei zw. unter 1, während Chrom, Mangan und Antimon deutlich unter der Konzentration der umgebenden Bodens liegen.

Die vorliegende Arbeit soll nicht nur die Reihe der Transferfaktoren für Blei, Chrom, Cobalt, Nickel und Cadmium vom Boden in die Regenwürmer ergänzen, sondern es soll auch gemessen werden, wie die Würmer Schwermetalle im Boden verteilen. Schon 1881 folgerte Darwin aus seinen Beobachtungen, daß die gesamte Ackerkrume den Regenwurmdarm in wenigen Jahrzehnten durchwandert.

2. Material und Methoden

2.1 Versuchsanlage

Zur Versuchsdurchführung wurden Plexiglaszylinder mit einer Wandstärke von 10 mm verwendet. Die 100 cm hohen Zylinder mit einem Durchmesser von 45 cm ($F = 0,16 \text{ m}^2$) bestehen längsseits aus zwei Hälften, die durch Klammern und Scharniere zusammengehalten werden. Die Bodenplatten bestehen aus Plexiglas und sind eingeklebt (Abb. 1).

Als Versuchsboden wurde ein Lößunterboden aus dem Raum Grötzingen verwendet, der mit 0,2 % Humus arm an organischer Substanz ist. Die helle, gelblichbraune Farbe des Bodens ist geeignet, die dunklen reich an organischer Substanz ausgeschiedenen Ablagerungen und Aggregate der Regenwürmer zu unterscheiden. Der Boden enthält 49,6 Gew.-% in der Schlufffraktion von 20-63 μm bei einem pH-Wert von 7,0. Tabelle 3 zeigt, welche Konzentrationen der Elemente Blei, Chrom, Cobalt, Nickel und Cadmium zu Versuchsbeginn im Löß - Unterboden gefunden wurden. Erwartungsgemäß sind die höchsten Werte bei der Analyse nach Totalaufschluß, die niedrigsten im komplexierbaren Anteil vorhanden. Im Rindermist wurden nach Druckaufschluß vor der Kontamination die in Tabelle 4 aufgeführten Werte ermittelt.

Unter der Zielvorgabe der Verteilung der Schwermetalle im Boden wurden diese Elemente schichtweise im Boden eingelagert. Da die organische Substanz die Hauptnahrungsquelle der Regenwürmer ist, wurde die Schadstoffkombination homogenisiertem Rindermist zuzemischt, weil dieser von den Würmern besonders gerne gefressen wird. In jedem Zylinder befindet sich eine etwa 5 cm dicke und 4 kg schwere Schicht aus feuchtem Rindermist, mit einem Wassergehalt von ca. 65 % zum Zeitpunkt der Einlagerung. So ergab sich eine Mischung von 600 mg Blei, 30 mg Chrom, 60 mg Cobalt, 60 mg Nickel und 6 mg Cadmium, jeweils bezogen auf 1 kg trockenen Rindermist. Die Elemente wurden als Nitrat zugegeben.

Zum Vergleich sind in Tabelle 2 Grenzwerte und Orientierungsdaten für tatsächliche Gesamtkonzentrationen im Boden angegeben, wie sie von Kloke (1980, 1982) zusammengestellt wurden.

Der Aufbau der Zylinder ist in Abb. 2 dargestellt. Der Rindermist wurde über dem Boden (Nr. 1 - 4) als Zwischenschicht (5, 6) und unterhalb des Versuchsbodens (7, 8) deponiert. Um bei der Bewässerung eine Auswaschung der zu untersuchenden Metalle zu verhindern, wurde bei den Zylindern Nr. 3 und 4 ein Bewässerungssystem auf der Bodenoberfläche unterhalb der kontaminierten Mist-schicht installiert.

Alle Zylinder sind mit einer Drainschicht aus Kiessand ausgestattet.

Je Zylinder wurden 45 bzw. 40 Regenwürmer der Art "Lumbricus terrestris" ausgesetzt. Die so hohe Menge von ca. 281 Würmern/m² war erforderlich, weil die Vitalität der Tiere durch Fangen, Transport und Lagerung nur sehr gering war. Um eine bessere Verteilung des Besatzes herbeiführen zu können, wurde jedem Wurm ein 5 cm senkrecht angelegter Gang von 5 mm Durchmesser vorgegeben.

Abschließend wurde eine Abdeckung mit 2 kg Quarzsand/Zylinder vorgenommen. Das entspricht einer Schichtdicke von etwa 1 cm.

Während des Versuchs wurde der Boden feucht gehalten. Die Aggregate wurden abgesammelt, getrocknet, gewogen und analysiert.

Nach 10-monatiger Versuchsdauer wurden die noch vorhandenen Regenwürmer mit einer 0,1 %igen Formalinlösung an die Oberfläche gebracht, abgesammelt und auf feuchtes Filterpapier gesetzt; nach 2 Tagen wurden Würmer und Ausscheidungen getrennt gewogen. Die Bestimmung der Trockengewichte erfolgte bei 105°C.

Anschließend wurden die einzelnen Zylinder umgelegt, aufgeklappt und in ca. 7 cm dicke Schichten zerlegt. Der Boden wurde getrocknet und homogenisiert, bevor aus jeder Schicht 5 repräsentative Stichproben gezogen wurden.

3. Ergebnisse

In Tab. 5 ist die Anzahl an Würmern und deren Biomasse aufgelistet. Zunächst einmal fällt auf, daß nach 10-monatiger Versuchsdauer die Zahl der Regenwürmer stark abgenommen hat. Bei Säule 1 und 2 wurden nur noch 3 bzw. 6 von 40 eingesetzten Würmern wiedergefunden, während bei Säule 6 immerhin noch 30 von 45 Stück vorhanden waren. Ähnlich wie die Stückzahl ist auch die Wurmbiomasse reduziert. Betrachtet man das Durchschnittsgewicht der Würmer, dann haben die Kontrollwürmer mit 4,7 g/Stück ein beträchtlich höheres mittleres Einzelgewicht als die Würmer der Säulen Nr. 1 - 8 mit nur 2-3 g Lebendgewicht. Reduzierte Populationsdichte und reduziertes Körpergewicht können ihre Ursachen in nicht ausreichender Nahrung und Konkurrenzdruck oder Störung des Metabolismus wegen der Schwermetalle im Rindermist haben, der den Regenwürmern als Futter dient.

Die Arbeitsleistung der Regenwürmer kann man auch an Zahl und Menge der an der Oberfläche abgesetzten Aggregate erkennen. Von Anbeginn ergaben sich Unterschiede in der Menge der Ablagerungen in Abhängigkeit von der Lage des eingebrachten Rindermistes. Dort wo der Mist obenauf liegt, wurde bei den 4 Sammelterminen von Oktober bis Januar weniger Auswurfmaterial als bei den anderen Säulen wiedergefunden. Die größten Aggregatmengen ergaben sich von Zylinder Nr. 7 und 8, wo der Mist unter der Bodensäule deponiert wurde. Zu den Terminen im März, Mai und zu Versuchsende im Juli hat sich dann ein anderes Bild eingestellt, wobei die Zylinder mit Bewässerungsanlage unter dem an der Oberfläche liegenden Mist mit 700 - 800 g/Säule die höchsten Werte vorzuweisen hatten. Addiert man die Werte der Einzelsammlungen so ergibt sich eine klare Aussage nur zu den Zylindern 1 und 2 mit Rindermist an der Oberfläche ohne Bewässerungsanlage. Hier finden sich nur 6 bzw. 8 kg/m² trockene Aggregatmenge im Versuchszeitraum. Dies läßt sich auch durch die geringere Zahl an ausgesetzten (40 gegenüber 45) und (3 bzw. 6) gefundenen Würmern zu Versuchsende erklären. Für die anderen Zylinder läßt sich kein eindeutiger Zusammenhang

zwischen Versuchsbedingungen zwischen verschiedenen Mistlagen sowie unterschiedlich hoher Wurmzahl zu Versuchsende und der Gesamtsumme der ausgeworfenen Aggregate pro Bodensäule erkennen. Insgesamt müssen die Auswurfmengen mit bis zu 19,7 kg trockenen Wurmaggregat bei Säule 3 als sehr hoch eingeschätzt werden.

In Tab. 7 ist dargestellt, welche Schwermetallgehalte im Wurmgebe zu finden sind. Die ermittelten Konzentrationen lassen keinen Rückschluß auf die Lage des eingebrachten Rindermistes zu. Man kann davon ausgehen, daß alle Würmer sich überwiegend aus den jeweils verschieden liegenden kontaminierten Rindermistschichten ernährt haben und elementspezifische An- und Abreicherungen abgelaufen sind.

Bei Blei reicht die Konzentration für die Würmer der Säule 1 bis 8 von 8,7 (Säule 1) bis 13,5 (Säule 6) gegenüber 2,9 $\mu\text{g/g}$ Gewebe bei den Kontrollwürmern; bei Chrom von 9,2 (Säule 8) bis 17,3 (Säule 2) gegenüber 1,7 μg der Kontrolle; bei Cobalt von 17,1 (Säule 2) bis 28,0 (Säule 1) gegenüber 8,7 μg der Kontrolle; bei Nickel 4,8 (Säule 3) bis 9,8 (Säule 7) gegenüber 1,7 μg der Kontrolle und letztlich bei Cadmium von 7,1 (Säule 2) bis 9,2 (Säule 7) gegenüber 4,8 $\mu\text{g/g}$ Gewebe der Kontrollwürmer. Während die Konzentration der Element Pb, Cr, Co und Ni bei den Kontrollwürmern durchaus als normal bezeichnet werden kann, liegt für Cd mit 4,8 $\mu\text{g/g}$ bereits vor Versuchsbeginn eine Anreicherung dieses Elementes im Wurmgebe vor.

Aus Tab. 7 wird weiterhin deutlich, daß die Würmer der Säulen Nr. 1 bis 8 für alle untersuchten Elemente eine teilweise mehrfach höhere Konzentration nach Versuchsende in ihrem Gewebe gegenüber den Kontrollwürmern haben. Zu Beurteilung der An- oder Abreicherung der untersuchten Elemente im Regenwurm gegenüber dem kontaminierten Rindermist und dem umgebenden Lebensraum, also dem Lößboden, wird der Koeffizient aus Elementkonzentration im Regenwurmgebe und zugegebener Metallmenge bzw. Konzentrationsgehalt der untersuchten Schwermetalle im Boden vor Versuchsbeginn errechnet. Es gilt dabei der jeweils mobilisierbare

Anteil nach Extraktion mit Salpetersäure (siehe Tab. 3).

Aus Tab. 8 kann man ablesen, daß bei Zusätzen von 600 µg Blei, 30 µg Chrom und je 60 µg Cobalt und Nickel pro Gramm Nahrungssubstanz der Würmer diese sehr hohen Konzentrationen im Gewebe nicht nachzuweisen sind; sie liegen bei Blei um den Faktor 50, bei Chrom um den Faktor 2, bei Cobalt um den Faktor 2,5 und bei Nickel um den Faktor 10 niedriger. Cadmium als hochtoxisches Umweltgift wird dagegen bei 6 µg/g trockenem Rindermist im Gewebe der Würmer angereichert und zwar um den Faktor 1,4 höher als diese Zugabe.

Betrachtet man die Konzentration der Schwermetalle im Vergleich zum Boden in dem die Tiere leben (Stand: Versuchsbeginn) so erscheinen die Würmer geradezu als wandelnde Schadstoffdeponien. Tab. 9 zeigt, daß bei Blei die Konzentration dieses Elementes in den Würmern im Mittel um den Faktor 2,4 gegenüber dem Boden höher liegt. Bei Chrom beträgt dieser Faktor im Mittel der 8 Säulen 25,9, bei Cobalt 23,8, bei Nickel 5,0 und bei Cadmium 85,4.

Der beschriebene Sachverhalt hat zur Folge, daß soweit die Würmer die Metallvergiftungen überleben, beim natürlichen Tod der Würmer im Boden punktuelle Anreicherungszone der Metalle entstehen. Obwohl die vorliegenden Zahlen dem Langzeit mobilisierbaren Anteil zuzurechnen sind, dürfte in diesen Bereichen durch die Umsetzungsvorgänge im Regenwurm die punktuelle Pflanzenverfügbarkeit im Boden erhöht sein.

Die von den Regenwürmern nach Versuchsende in Petrischalen abgelagerten Aggregate wurden gleichfalls auf ihre Schwermetallgehalte untersucht und in Tabelle 10 zusammengestellt.

Unabhängig von der Tiefe der abgelegten Rindermistschicht, weichen die Ergebnisse der einzelnen Säulen insbesondere bei Blei relativ stark voneinander ab; sie reichen von 26,3 bis 117,7 µg/g Trockensubstanz des Regenwurmauswurfs. Diese Schwankungen treten auf, weil jeweils nur eine Probe vorlag. Die Chromkonzentrationen reichen von 24 bis 29 µg/g, die von Cobalt

von 7 - 14 $\mu\text{g/g}$ Trockensubstanz. Nickelkonzentrationen schwanken zwischen 17 und 32 $\mu\text{g/g}$ Trockensubstanz, während bei Cadmium die Spannweite von 0,9 bis 2,6 $\mu\text{g/g}$ trockene Regenwurmausscheidung reicht.

Überraschend hoch sind die Nickelgehalte in den Ausscheidungen der Kontrollwürmer; mit 28,2 $\mu\text{g/g}$ liegen sie teilweise höher als bei der Untersuchungsgruppe. Auch für Cadmium ergeben sich bei den Kontrollwurmauswürfen fast gleich hohe Gehalte wie bei den Versuchssäulen Nr. 1 bis 8.

Tabelle 11 zeigt, um welchen Faktor die Konzentrationen der untersuchten Elemente in den Regenwurmausscheidungen höher als im Ausgangsboden liegen. Als Mittelwerte wurden für Blei 14,1, für Chrom 65,6, für Cobalt 10,5, für Nickel 17,1 und für Cadmium 13,5 errechnet. Hier wird nochmals deutlich, daß auch bei den Wurmausscheidungen der Kontrollgruppe gegenüber dem Boden teilweise höhere Anreicherungsgrade vorliegen.

Bei der Gegenüberstellung der Metallkonzentration im Regenwurm-gewebe (Tabelle 7) und denen in den Regenwurmausscheidungen (Tabelle 10) zeigen sich unterschiedliche Reaktionen der einzelnen Elemente. Im Mittel aller 8 Säulen ist der Gehalt an Blei, Chrom und Nickel im Regenwurm-gewebe niedriger als in Wur-mausscheidungen. Bei Blei 10,5 gegenüber 60,6 $\mu\text{g/g}$ Trockensubstanz, bei Chrom 13,5 gegenüber 34,1 $\mu\text{g/g}$ Trockensubstanz und Nickel 7,5 gegenüber 25,6 $\mu\text{g/g}$ Trockensubstanz. Umgekehrt verhalten sich Cobalt und Cadmium. Beide sind mit 21,9 bzw. 8,5 $\mu\text{g/g}$ Trockensubstanz im Wurm-gewebe in einer höheren Konzentration als in den Ausscheidungen der Würmer mit 9,7 bzw. 1,3 $\mu\text{g/g}$ Trocken-substanz.

4. Diskussion der Ergebnisse

Bei der Versuchsanordnung fiel die Auswahl des Bodens auf einen Löß - Unterboden. Zum einen bevorzugen die Tauwürmer einen lehmigen Boden mit einem neutralen pH-Wert (Graff 1983), zum anderen stand die Erwartung, die dunkelgefärbten, reich an organischer Substanz abgelagerten Exkreme in den Regenwurmgängen gegenüber dem gelblich gefärbten Löß - Boden zu unterscheiden. In Abb. 1 ist zu sehen, daß die Würmer die deponierte organische Substanz von oben nach unten bzw. von unten nach oben verschleppt haben. Damit steht fest, daß die Verteilung der organischen Substanz und möglicherweise auch von Schadstoffen im gesamten Lebensbereich der Würmer stattfindet. Regenwürmer, in diesem Fall Tauwürmer, sind also in der Lage kurzfristig den Transport von Bodenbestandteilen, z.B. organische Substanz, horizontal und vertikal im Boden durchzuführen. Inwieweit davon auch der Schadstofftransport betroffen ist, wird für die untersuchten Elemente Blei, Chrom, Cobalt, Nickel und Cadmium anhand der durchgeführten Untersuchungen genauer zu erklären sein.

Bei der Auswahl der Konzentrationen der einzelnen Schadstoffe war ein vorrangiges Ziel, solche Verhältnisse zu schaffen, wie sie in unserer Umwelt möglich, teilweise kleinräumig schon vorhanden sein können. Die Orientierung an Grenzwerten für Böden, wie sie in Tabelle 2 aufgeführt sind, bedeutet, daß für Pb (Grenzwert: 100 µg/g) das 6-fache, für Cr (Grenzwert 100 µg/g) das 3-fache, für Co (Grenzwert: 50 µg/g), Ni (Grenzwert: 50 µg/g) und Cd (Grenzwert: 3 µg/g) jeweils das 2-fache des tolerierbaren im Boden dem Rindermist zugesetzt wurde. Dies entspricht sicherlich realistischen Umweltbedingungen einer leichten Bodenkontamination.

Die ausgesetzte Stückzahl mit 100 (40 je Säule) bzw. 113 (45 pro Säule) Regenwürmern pro m² deckt sich mit den Besatzdichten, wie sie Müller (1965) zur Orientierung angibt, nämlich 390 Stück/m² bei Gartenland, 8 - 293 Stück/m² bei Wiesen und Weiden und 70 - 112 Stück/m² bei Ackerland. In Abhängigkeit von den jeweiligen Umweltbedingungen, wie pH-Wert des Bodens, organische Substanz,

mechanische Bodenbearbeitung usw. wird die Anzahl und Artenzusammensetzung der Regenwürmer beträchtlichen Schwankungen ausgesetzt sein. Bei konservativer Betrachtung müssen jedoch unter Ausschluß der zu betrachtenden Schadstoffe für die Regenwürmer optimale Lebensbedingungen angenommen werden.

Betrachtet man zu Versuchsende die Wurmbiomasse so fallen zwei Gesichtspunkte auf: Die Anzahl der Würmer schwankt von Säule zu Säule zwischen 3 und 30 Stück, was einer Verlustrate zwischen 92 und 33 % entspricht. Außerdem ist das mittlere Einzelgewicht gegenüber der Kontrolle auf 45 - 64 % reduziert. Als Ursache für diesen Verlust an Biomasse scheidet ein Überbesatz bzw. Konkurrenzdruck aus, vielmehr dürfte in erster Linie ein Teil der zu Versuchsbeginn alten und durch Fangen und Transport nicht mehr sehr vitalen Regenwürmern die Umsetzung nicht überlebt haben. Darüberhinaus ist eine toxische Wirkung der zugesetzten Schwermetalle nicht auszuschließen und führte bei den überlebenden Würmern zu einer Gewichtsabnahme. Finck (1952) berichtet aus einer umfangreichen Studie über Besatzdichte von Regenwürmern auf verschiedenen Böden, wobei *Lumbricus terrestris* zwischen 10 und 150 g/m² Biomasse erreichte. Die Gesamtmenge der 10 verschiedenen Arten, die aufgeführt sind, variiert je nach Probestandort zwischen 10 und 230 g/m². Dies würde die Möglichkeit zulassen, daß die Menge an zugeführtem Rinderkot als Nahrung zu wenig gewesen ist und die Tiere gegen Versuchsende hungern mußten. Graff (1970) ermittelte auf einer Goldhaferwiese eine Wurmbiomasse mehrerer Arten von 96,5 g/m²; bei den eigenen Versuchen wurden 52 - 476 g Biomasse/m² gefunden, die jedoch ausschließlich der Art *Lumbricus terrestris* zuzuordnen sind. Wright und Stringer (1980) fanden 58 - 70 Stück *Lumbricus terrestris*/m² mit einer Biomasse von 81 - 87 g/m².

Ein Maß für die Leistung der Würmer sind neben den charakteristischen Beschreibungsmerkmalen, wie Stückzahl und Biomasse, die von den Regenwürmern an der Bodenoberfläche abgelagerten Wurmaggregate. Diese Aggregate, in Anlehnung an die Jägersprache werden sie auch als Losung bezeichnet (Graff, 1984), sind die festen Ausschei-

dungen der Regenwürmer. An der Bodenoberfläche wird jedoch nur ein Teil der Losung erfaßt, der andere Teil bleibt im Inneren des Bodens und dient zur Auskleidung (Tapeten) der Regenwurmgänge. Die im Boden gebliebene Menge ist dann wichtig, wenn, wie bei der vorliegenden Versuchsanstellung, die Verteilung von Schwermetallen im Boden durch Regenwürmer von Interesse ist.

Der in Tabelle 5 aufgeführten Wurmfrischmasse, sie beträgt umgerechnet etwa 50 bis 480 g/m² für die 10-monatige Versuchsdauer, lassen sich ca. 5,8 - 18,1 kg Losung/m² zuordnen. Größenordnungsmäßig stimmen diese Zahlen mit Ergebnissen von Graff (1970) überein: Bei einer Dauer von 180 Tagen

wurden für erwachsene Regenwürmer der Art *Lumbricus terrestris* 5,8 kg Losung/m² auf der Wiesenoberfläche abgesammelt, für die gesamte Biomasse aller Regenwürmer der verschiedenen Arten waren es 25,8 kg/m².

Für das Interesse möglicher Anreicherungen von Schadstoffen im Regenwurmgewebe gibt es zwei Gründe: Zum einen dient der Regenwurm einer ganzen Reihe von Vögeln als Nahrung und ist damit wichtiger Bestandteil von Nahrungsketten in der Natur, zum anderen kann man für einige Schwermetalle annehmen, daß sie nach dem Absterben und der natürlichen Zersetzung des Wurmes im Boden kleinräumig zu höheren Konzentrationen (Ireland, 1977) und in höherer Löslichkeit vorliegen. Nelson u.a. (1982) berichtet z.B. daß Cadmium vom Regenwurm aus dem Boden aufgenommen und biologisch verfügbar gemacht wird. Darüber hinaus ist der Zusammenhang zwischen Schwermetallen und Regenwürmern deswegen von Interesse, weil die Würmer zum einen Anzeiger für Schwermetallverseuchungen sein können (Ash and Lee, 1980) zum anderen generell als Bioindikatoren angesehen werden können (van Hook, 1974).

Bedingt durch die punktuelle Verteilung des kontaminierten Rindermistes im Boden bei der Versuchsanstellung ergeben sich zwei Betrachtungsebenen für die An- bzw. Abreicherung der untersuchten Elemente: Zum einen die Konzentration im Regenwurmgewebe im Vergleich zum kontaminierten Rindermist, zum anderen im Vergleich zum nichtkontaminierten Boden.

4.1 Cadmium

Der mittlere Cd-Gehalt aller 8 Säulen der Regenwürmer der Art *Lumbricus terrestris* beträgt 8,5 µg Cd/g Gewebe. Dies bedeutet gegenüber dem kontaminierten Rinderkot eine Anreicherung um den Faktor 1,4 im Mittel, gegenüber dem Boden sogar um 85. Die Anreicherung von Cd ist bei anderen Untersuchungen immer wieder bestätigt worden. Cadmium wird wohl von allen Metallen am stärksten in Regenwürmern angereichert (Ireland, 1979). Ash and Lee (1980) ermittelten Cd-Gehalte in *Lumbricus terrestris* an Straßenrändern von 3,8-12 µg/g, Czarnowska u.a. (1978) 0,3-1,1 µg/g, wobei die Gehalte mit zunehmender Entfernung zur Straße abnehmen, ebenso wie bei den Anreicherungsfaktoren, die von 17,1 bis 31,1 reichen. Bei Wright und Stringer (1980) finden sich Anreicherungsfaktoren von 5,2 und 5,6. Martin (1976) berichtet von einem sehr hohen Cd-Gehalt in Regenwürmern bei verschiedenen Arten von 143,7 µg/g mit einem Anreicherungsfaktor von 7,6 gegenüber dem umgebenden Boden. Aus der Literatur zusammengefaßte Werte reichen von 5 bis 18,6.

4.2 Blei

Ähnlich umfangreich wie für Cd liegen Ergebnisse über Pb-Gehalte im Regenwurmgewebe vor. Über An- oder Abreicherungen dieses Elementes gibt es jedoch widersprüchliche Angaben vor. Eine Akkumulation im Gewebe ermittelten z.B. Ash and Lee (1980) bei *Lumbricus* mit bis zu 331 µg Pb/g Gewebe oder Ireland (1976) bei *Dendrobaena rubida*. Keine Anreicherung in den Regenwürmern im Vergleich zum Boden mit Faktoren die kleiner als 1 sind wird von den meisten Autoren berichtet, z.B. Martin (1976), Nelson u.a. (1982), Czarnowska u.a. (1978), Wielgus u.a. (1976), Wright u.a. (1980) und van Hook (1974). Wright und Stringer (1980) fassen für Blei Anreicherungsfaktoren zusammen, die von 0,2 bis 2,4 reichen.

Die eigenen Ergebnisse mit etwa 10,5 µg Pb/g Regenwurmgewebe führten zu einer Anreicherung von im Mittel 2,4 im Vergleich zum

nichtkontaminierten Boden und zu einer Abreicherung um den Faktor 0,02 gegenüber dem kontaminierten Rindermist.

Unabhängig vom jeweiligen An- oder Abreicherungsfaktor scheinen jedoch Cd und Pb im Regenwurmgewebe mit den jeweiligen Gehalten im Boden zu korrelieren (Nelson u.a., 1982), Hartenstein u.a. (1980). Demnach führen hohe Pb-Gehalte im Boden trotzdem zu hohen Pb-Gehalten im Regenwurm. Ireland and Richards (1977) berichten über Pb-Konzentrationen im Boden von ca. 17.000 µg/g und von Gehalten in *Dendrobaena rubidia* von ca. 7.600 µg/g.

4.3 Nickel

Über die Anreicherung bzw. Abreicherung von Nickel im Regenwurmgewebe liegen z.Zt. nur wenige Ergebnisse vor. Beyer u.a. (1982) berichten über Versuche auch mit Ni und Regenwürmern verschiedener Arten einschließlich *Lumbricus terrestris*. Bei Konzentrationen von im Mittel 14 µg Ni/g Trockensubstanz Boden und 14 bis 19 µg Ni/g Regenwurmgewebe lassen sich Anreicherungsfaktoren im Bereich um 1 herum errechnen. Aus den Ergebnissen von Gish und Cristensen (1973) von Untersuchungen an amerikanischen Highways kann man Anreicherungsfaktoren für Ni im Wurm gegenüber dem Boden zwischen 1 und 2 berechnen. Hartenstein u.a. (1980) errechnet bei Klärschlammkonzentrationen von 100 - 1000 µg Ni und Ni-Gehalten von 4 - 32 µg/g in *Eisenia* Konzentrationsfaktoren von 0,02 bis 0,04.

Fleckenstein und Graff (1982) berichten über eine Anreicherung im Wurmgewebe von Nickel. Bei den eigenen Untersuchungen wurde im Regenwurmgewebe im Mittel 7,5 µg/g Trockensubstanz gefunden. Dieser Wert liegt damit um das 10-fache niedriger als der des kontaminierten Rinderkotes. Gegenüber dem nichtkontaminierten Boden in der Säule ergab sich aber eine Anreicherung in den Würmern um den Faktor 5.

4.4 Chrom

Beyer (1980) gibt in seiner Berechnung des Faktors Wurm/Boden für Cr einen Abreicherungsfaktor von 0,05 an; auch aus den Ergebnissen von Shivas (1980) läßt sich für Cr keine Anreicherung im Gewebe der Regenwürmer ableiten. Mori und Kurihara (1979) berechneten beim Verhältnis von Chrom im Regenwurm zu Chrom im Kompost einen Wert von weniger als 0,3, wobei allerdings zunehmende Gehalte an Chrom im Kompost zu zunehmenden Chromgehalten in Eisenia führten. Dies zeigt auch der eindeutige Korrelationskoeffizient von 0,96.

Auch bei den eigenen Untersuchungen ist keine Anreicherung von Cr im Wurmgewebe im Vergleich zum mit 30 µg Chrom/g trockenen Rindermist zu verzeichnen. Der Faktor beträgt im Mittel aller 8 Säulen 0,5. Im Verhältnis zum nichtkontaminierten Boden ist dann aber eine Anreicherung in den Regenwürmern festzustellen, im Mittel 25,9 mit einer Schwankungsbreite von 17,7 - 33,3.

4.5 Cobalt

Auch für Cobalt gibt es nur sehr wenige Untersuchungen. Beyer (1980) berechnete aus dem Verhältnis Cobalt im Wurmgewebe zu Co im Boden einen Faktor von 0,38. Dies deckt sich mit dem Faktor 0,4 bei den eigenen Untersuchungen, wenn man es auf den mit 60 µg Co/g trockenen kontaminierten Rindermist bezieht. Gegenüber dem nichtkontaminierten Boden des Lebensraumes der Würmer findet dann eine Anreicherung um den Faktor 23,8 mit einer Schwankungsbreite von 18,6 bis 30,4 statt.

Aus den durchgeführten Untersuchungen der Elementgehalte Cd, Pb, Ni, Cr und Co im Regenwurmgewebe nach Kontamination einer Schicht im Lebensraum der Tiere, ergibt sich eine elementspezifische Anreicherung für alle Elemente bezogen auf den nichtkontaminierten Boden in der Reihenfolge Cd >>> Cr = Co >> Ni > Pb. Die Zuhilfenahme der Schwermetallgehalte im nichtkontaminierten Boden

als Bezugsbasis für die Berechnung des Anreicherungs-faktors scheint gerechtfertigt, weil eine Anreicherung im Gewebe stattfinden kann, auch wenn der Anreicherungs-faktor < 1 ist (Hartenstein u.a., 1980). Damit steht zunächst fest, daß Regenwürmer elementspezifische Verteiler von Schwermetallen sind, soweit es die eigene Biomasse betrifft.

Aus den vorliegenden Resultaten läßt sich kein signifikanter Einfluß der Tiefenlage der kontaminierten Schicht auf die Schwermetallanreicherung im Wurm-gewebe ableiten.

Die von den Regenwürmern unmittelbar nach ihrer Gefangennahme ausgeschiedene organo-mineralische Substanz beinhaltet auch die zugesetzten Schwermetalle die mit der Nahrung aufgenommen wurden. Die Elementkonzentration weicht allerdings beträchtlich von den im Regenwurm-gewebe gefundenen Konzentrationen ab. In Tabelle 13 ist noch einmal zusammengestellt, wie sich im Mittel der 8 angelegten Säulen die Schwermetall-gehalte im Regenwurm-gewebe und im Ausscheidungs-material gegenüber der zugeführten Elementkonzentration verhalten. Die biologische Halbwertszeit der einzelnen Elemente im Darm ist vermutlich unterschiedlich.

Es wäre zu erwarten, daß insbesondere in den Ausscheidungen für alle Elemente der prozentual gleiche Anteil zu finden wäre. Die Schwankungen des Ausscheidungs-materials von 12 % bei Pb bis zu 73 % bei Co gegenüber der zugeführten Menge sind auf andere Ursachen zurückzuführen. Neben der unterschiedlichen Verweildauer im Darm des Wurmes fressen die Würmer nicht nur im Bereich der kontaminierten Rindermistschicht sondern auch in anderen Stellen z.B. zur Erweiterung ihres Gangsystemes und konsumieren somit andere Schwermetallkonzentrationen, die durch ihre eigene Verteilungsmechanismen bewirkt werden.

Tabelle 2: Grenzwerte und Orientierungsdaten für Pb, Cr, Co, Ni und Cd (nach Kloke 1980, 1982)

Element	Grenzwert im Boden mg/kg	Orientierungsdaten für tatsächliche Gesamtkonzentrationen im Boden mg/kg	
		häufig	maximal
Blei	100	0,1 - 20	bis 4.000
Chrom	100	2 - 50	bis 20.000
Cobalt	50	1 - 10	bis 800
Nickel	50	2 - 50	bis 10.000
Cadmium	3	0,01 - 1	bis 200

Kloke, 1982; Erläuterungen zur Klärschlammverordnung
Landw. Forschung, Sonderh. 39, S. 302 - 308

Kloke, 1980; Mitt. VDLUFA, H. 1 - 3, 9 - 11

Tabelle 3: Konzentration der Elemente Pb, Cr, Co, Ni und Cd im Löß-Böden zu Versuchsbeginn

Ele- mente	Elementkonzentrationen nach verschiedenen Aufschlußverfahren ($\mu\text{g/g}$, trocken)			
	a)	b)	c)	d)
Pb	14,6 \pm 0,9	29,2 \pm 4	4,3 \pm 0,5	(1,7) ¹
Cr	26 \pm 1	54 \pm 5	0,52 \pm 0,008	<0,08
Co	4,4 \pm 0,2	7,6 \pm 1,1	0,92 \pm 0,05	0,2 \pm 0,04
Ni	19,2 \pm 1,4	28 \pm 5	1,5 \pm 0,1	0,3 \pm 0,05
Cd	0,1 \pm 0,01	0,1 \pm 0,01	0,09 \pm 0,02	<0,01

a) Analyse nach Druckaufschluß (0,5 g Boden + 4 ml konz. HNO_3)
4 h bei 170° C

b) Analyse nach Totalaufschluß (Abrauchen mit HF)

c) mobilisierbarer Anteil: Extraktion (0,5 h) von 4 g Boden
mit 20 ml 2 n HNO_3

d) komplexierbarer Anteil: Extraktion (0,5 h) von 4 g Boden
mit 20 ml Lsg. (0,5 m NH_4Ac + 0,02 m EDTA: pH = 4,65 mittel
HAc eingestellt)

¹ Werte in Klammern sind lediglich Informationswerte

Tabelle 4: Konzentrationen der Elemente Pb, Cr, Co, Ni und Cd im Rindermist vor und nach der Kontamination nach Druckaufschluß

Element	vor der Kontamination $\mu\text{g/g}$	nach der Kontamination $\mu\text{g/g}$
Pb	<5,0	110 \pm 54
Cr	3,6 \pm 0,2	17 \pm 5
Co	<1,0	23 \pm 9
Ni	4,3 \pm 0,4	26 \pm 8
Cd	<0,2	3,2 \pm 0,8

Tabelle 5: Anzahl an Würmern und deren Biomasse

Säule Nr.	Anzahl Würmer		Wurmbiomasse		Biomasse/Wurm	
	Anfang St	Ende St	naß g	trocken g	naß g	trocken g
1	40	3	8,3	1,3	2,8	0,42
2	40	6	14,0	2,7	2,3	0,44
3	45	11	33,0	4,1	3,0	0,37
4	45	16	48,1	6,1	3,0	0,38
5	45	7	21,0	3,3	3,0	0,47
6	45	30	76,2	11,3	2,5	0,38
7	45	27	65,1	11,0	2,4	0,41
8	45	11	23,2	3,5	2,1	0,32
Kontrolle	19	19	88,3	12,7	4,7	0,66

Tabelle 6: An der Bodenoberfläche entnommene Regenwurmaggregate während des Versuchszeitraumes

Säule Nr.	Aggregatmengen der Oberfläche in g							Gesamt- menge	kg/m ²
	Oktober	November	Dezember	Januar	März	Mai	Juli		
1	34,6	59,5	128,1	143,2	197,3	118,0	239,6	920,2	5,8
2	22,5	75,9	150,7	286,8	333,0	158,0	223,2	1250,1	7,8
3	58,8	139,6	188,8	460,9	593,3	946,2	759,6	3146,9	19,7
4	58,7	79,0	82,0	220,4	384,7	591,2	883,5	2299,5	14,4
5	214,5	250,3	203,8	446,7	296,6	238,1	227,9	1877,9	11,7
6	282,3	339,6	236,2	446,8	312,1	257,1	262,9	2137	13,4
7	660,0	369,3	218,0	741,3	235,2	202,6	473,6	2900	18,1
8	595,1	355,4	320,0	351,0	158,1	77,1	156,7	2013,4	12,6

Tabelle 7: Gehalte an Pb, Cr, Co, Ni und Cd im Regenwurmgewebe nach HNO₃-Aufschluß

Säule Nr.	Anzahl Würmer	Elementgehalte im Regenwurmgewebe (µg/g, trocken)				
		Pb	Cr	Co	Ni	Cd
1	3	8,7 ±1,6	11,6 ±1,4	28,0 ±4,0	6,1 ±0,8	9,1 ±1,4
2	6	10,7 ±3,0	17,3 ±5,7	17,1 ±7,0	9,1 ±2,8	7,1 ±3,0
3	11	10,9 ±6,0	11,1 ±3,4	18,4 ±4,1	4,8 ±1,4	8,5 ±2,6
4	16	12,6 ±6,0	16,5 ±6,5	20,7 ±5,6	8,8 ±2,4	8,4 ±1,9
5	7	7,2 ±1,9	13,0 ±3,7	23,1 ±5,0	5,7 ±3,4	8,7 ±2,5
6	26	13,5 ±5,8	13,6 ±5,5	24,7 ±6,8	7,7 ±2,7	8,7 ±3,5
7	27	- -	15,3 ±6,6	20,5 ±6,8	9,3 ±5,0	9,2 ±3,3
8	11	10,0 ±4,2	9,2 ±1,9	23,0 ±6,4	8,1 ±1,8	8,6 ±2,2
Kontrolle	17	2,9 ±0,9	1,7 ±0,4	8,7 ±3,2	1,5 ±0,4	4,8 ±2,3
kontaminierter Mist		600	10	60	60	6

Tabelle 8: An-/Abreicherungs-faktoren für Pb, Cr, Co, Ni und Cd im Regenwurm-gewebe gegenüber dem kontaminierten Rindermist

Säule Nr.	An-/Abreicherungs-faktoren für die Elemente				
	Pb	Cr	Co	Ni	Cd
1	0,01	0,4	0,5	0,1	1,5
2	0,02	0,6	0,3	0,2	1,2
3	0,02	0,4	0,3	0,1	1,4
4	0,02	0,6	0,3	0,1	1,4
5	0,01	0,4	0,4	0,1	1,5
6	0,02	0,5	0,4	0,1	1,5
7	-	0,5	0,3	0,2	1,5
8	0,02	0,3	0,4	0,1	1,4
\bar{x}	0,020	0,5	0,4	0,10	1,4
\pm	0,005	0,1	0,1	0,05	0,1

Tabelle 9: An-/Abreicherungs-faktoren für Pb, Cr, Co, Ni und Cd im Regenwurm-gewebe gegenüber dem nicht-kontaminierten Boden

Säule Nr.	An-/Abreicherungs-faktoren für die Elemente				
	Pb	Cr	Co	Ni	Cd
1	2,0	22,3	30,4	4,1	91
2	2,5	33,3	18,6	6,1	71
3	2,5	21,3	20,0	3,2	85
4	2,9	31,7	22,5	5,8	84
5	1,7	25	25,1	3,8	87
6	3,1	26,2	26,8	5,1	87
7	-	29,4	22,3	6,2	92
8	2,3	17,7	25,0	5,4	86
\bar{x}	2,4	26	24	5,0	85
σ	0,5	6	3	2	6
Kontrolle	0,7	3,3	9,5	1,0	53,3

Tabelle 10: Gehalte an Pb, Cr, Co, Ni und Cd in Wurmausscheidungen der Regenwürmer bei Versuchsende (Mittelwert in $\mu\text{g/g}$ - σ in %)

Säule Nr.	Elementkonzentrationen in Wurmausscheidungen ($\mu\text{g/g}$, trocken)				
	Pb	Co	Cr	Ni	Cd
1	66,1 ±5,1	8,8 ±0,7	33,1 ±3,3	21,7 ±1,5	1,1 ±20,3
2	36,9 ±2,3	12,0 ±5,1	32,8 ±0,8	20,4 ±3,1	1,3 ±5,8
3	26,3 ±4,4	7,4 ±0,5	29,9 ±0,9	17,1 ±1,3	0,9 ±14,5
4	59,7 ±1,0	7,8 ±1,4	34,9 ±1,9	31,5 ±1,3	1,2 ±19,8
5	41,6 ±0,5	6,7 ±1,4	28,8 ±0,0	22,1 ±0,1	0,7 ±0,2
6	117,7 ±0,8	13,5 ±1,0	30,5 ±2,6	26,4 ±2,5	1,3 ±4,8
7	65,8 ±2,2	8,6 ±4,2	39,0 ±2,0	34,0 ±0,2	2,6 ±2,1
8	70,6 ±9,5	12,8 ±1,3	43,7 ±3,1	31,9 ±1,0	1,4 ±7,0
Kontrolle	38,2 ±2,0	2,0 ±0,5	12,6 ±0,7	28,2 ±0,6	0,9 ±12,5
\bar{x}	61	10	34	26	1,3
σ	28	3	5	6	0,6

Tabelle 11: An-/Abreicherungs-faktoren für Pb, Cr, Co, Ni und Cd in Wurmausscheidungen gegenüber dem nichtkontaminierten Boden

Säule Nr.	An-/Abreicherungs-faktoren in Wurmausscheidungen für die Elemente				
	Pb	Cr	Co	Ni	Cd
1	15,4	63,7	9,6	14,5	12,2
2	8,6	63,1	13,0	13,6	14,4
3	6,1	57,5	8,0	11,4	10
4	13,9	67,2	8,5	21	13,3
5	9,7	55,4	7,3	14,7	7,8
6	27,4	58,7	14,7	17,6	14,4
7	15,3	75	9,3	22,7	28,9
8	16,4	84,0	13,9	21,3	15,6
\bar{x}	14	66	11	17	14
\pm	7	8	3	4	8
Kontrolle	8,9	24,2	2,2	18,8	10

Tab. 12: Vergleich der Gehalte an Pb, Cr, Co, Ni und Cd im Regenwurm-gewebe und in den Ausscheidungen der Würmer

	zugeführte Menge		durchschnittlich gemessene Element-gehalte im Regenwurm-gewebe		durchschnittlich gemessene Element-gehalte im Darminhalt	
	Rindermist					
	$\mu\text{g/g}$	%	$\mu\text{g/g}$	%	$\mu\text{g/g}$	%
Pb	600	100	10,5	2	70,6	12
Cr	30	100	13,5	45	12,8	43
Co	60	100	21,9	37	43,7	73
Ni	60	100	7,5	13	31,9	53
Cd	6	100	8,5	142	1,4	23

5. Literatur

- Ash, C.P.G., and D.L. Lee, 1980: Lead, Cadmium, Copper and Iron in Earthworms from Roadside Sites. Environ.Pollut. A, Vol. 22, 59-67
- Beyer, W.N., 1980: Metals and Terrestrial Earthworms, Workshop on the Role of Earthworms. Proceedings, Kalamannzoo, Michigan 137-150
- Beyer, W.N., H.I. Chaney, and B.M. Mulhern, 1982: Heavy Metal Concentrations in Earthworms from Soil Amended with Sewage Sludge. Environ. Qual., Vol. 11, No. 3, 381-385
- Czarnowska, K., and K. Jopkiewicz, 1978: Heavy Metals in Earthworms as an Index of Soil Contamination. Polish J. of Soil Sci., No. 1, 57-62
- Fleckenstein, G. und O. Graff, 1982: Schwermetallaufnahme aus Müllkompost durch den Regenwurm Eisenia foetida. Landbauforschung Völkenrode, 32.Jg., Heft 4, 198-202
- Finck, A., 1952: Ökologische und bodenkundliche Studien über die Leistung der Regenwürmer für die Bodenfruchtbarkeit. Zeitschrift Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde 58. (103), Seite 120-145
- Graff, O., 1970: Stickstoff, Phosphor und Kalium in der Regenwurmlösung auf der Wiesenversuchsfläche des Sollingprojektes. Int. Kongreß über Bodenbiologie 4.Dijon 1970, 503-511
- Graff, O., 1971: N, P und K in der Regenwurmlösung. Organismes du Sol et Production Primaere. Internationale de Science du Sol Paris
- Graff, O., 1979: Gewinnung von Biomasse aus Abfallstoffen durch Kultur des Kompostregenwurmes Eisenia foetida (Savigny 1826) Landbauforschung Völkenrode, 24. Jg., Heft 2, 137-142
- Graff, O., 1983: Unsere Regenwürmer. Schaper, Hann., 112 S
- Hartenstein, R., E.F. Neuhauser, and J. Collier, 1980: Accumulation of Heavy Metals in the Earthworm Eisenia foetida. Environ. Qual., Vol. 9 No. 1, 23-26

- Ireland, M., 1975: The Effect of the Earthworm *Dendrobaena Rubidia* on the Solubility of Lead, Zinc, and Calcium in Heavy Metal Contaminated Soil in Wales. *Journal Soil Sci.* Volume 26, No.3, 313-318
- Ireland, M., 1976: Excretion of Lead, Zinc and Calcium by the Earthworm *Dendrobaena Rubidia*, Living in Soil Contaminated with Zinc and Lead. *Soil Biol. Biochem.*, Vol. 8, 347-350
- Ireland, M., 1977: Heavy Worms. *New Scientist* Vol. 76, No. 1072, 486-487
- Ireland, M., 1979: Metal Accumulation by the Earthworms *Lumbricus Rubellus*, *Dendrobaena Veneta* and *Eiseniella Tetradra* Living in Heavy Metal Polluted Sites. *Environ. Pollut.*, Vol. 19, 201-206
- Ireland, M., and R.J. Wootan, 1976: Variations in the Lead, Zinc, and Calcium Content of *Dendrobaena Rubidia* in a Base Metal Mining Area. *Environ. Pollut.* Vol. 10, 201-208
- Ireland, M.P., and K.S. Richards, 1977: The Occurrence and Localisation of Heavy Metals and Glycogen in the Earthworms *Lumbricus Rubellus* and *Dendrobaena Rubida* from a Heavy Metal Site. *Histochemistry* 51, 153-166
- Kloke, 1980: *Mittl. VDLUFA*, H. 1-3, 9-11
- Kloke, 1982: Erläuterungen zur Klärschlammverordnung. *Landw. Forschung, Sonderheft 39*, S. 302-208
- Müller, G., 1965: *Bodenbiologie*, Fischer Verlag, Jena
- Richards, S., and M.P. Ireland, 1978: Glycogen - Lead Relationship in the Earthworm *Dendrobaena Rubidia* from a Heavy Metal Site. *Histochemistry* 56, 55-64
- Shivas, S.A.J., 1980: The Effect of Trivalent Chromium from Tannery Wastes on Earthworms. *Jalca*, Vol. 75, 300-304
- van Hook, 1974: Cadmium, Lead, and Zinc Distributions between Earthworms and Soils: Potentials for Biological Accumulation. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, Vol. 12, No.4 509-512
- Wright, M.A., and A. Stringer, 1980: Lead, Zinc and Cadmium Content of Earthworms from Pasture in the Vicinity of an Industrial Smelting Complex. *Environ. Pollut.* (Series a) 23, 313-321

Teil II:

Vertikaler Transport der Elemente Blei, Chrom, Cobalt,
Nickel und Cadmium durch Regenwürmer

1. Einleitung

Schadstoffe gelangen auf vielfältige Art und Weise in die Umwelt. Insbesondere durch Industrie, Haushalte und Autoverkehr, aber auch durch die Anwendung mineralischer Dünger und kommunale Entsorgung z.B. von Klärschlamm werden landwirtschaftlich und gartenbaulich genutzte Böden mit Schwermetallen belastet. Während sich einerseits eine Vielzahl von Schadstoffen im Boden anreichert, werden andererseits über diese Flächen pflanzliche und tierische Nahrungsmittel produziert. In zunehmendem Maße gelangen auf diese Weise Schadstoffe direkt und indirekt in die Nahrungskette des Menschen.

Die im Laufe der Vegetationsperiode auf Pflanzen und Pflanzenteilen deponierten Schadstoffe können in Abhängigkeit von der Konzentration des jeweiligen Stoffes eine aktuelle Gefährdung von Mensch und Tier darstellen. Es bleibt jedoch die Frage offen, wie sich Schadstoffe, z.B. Schwermetalle, langfristig verhalten, wenn sie auf oder in den Boden gelangen und dort akkumuliert werden.

Je nach Mobilität des entsprechenden Elementes bzw. der entsprechenden Verbindung ergibt sich im humiden Klimabereich eine Bewegung von oben nach unten, die zunächst den Wurzelraum der Pflanzen umfaßt. Schadstoffe stehen dann den Wurzeln potentiell zur Aufnahme zur Verfügung. Im anderen Fall werden Schadstoffe durch mechanische kulturtechnische Maßnahmen im Wurzelraum verteilt. Nicht zuletzt biogene Einflüsse im Boden bewirken Umschichtungen der Schadstoffe sowie Veränderungen ihrer Pflanzenverfügbarkeit.

Im vorliegenden Versuch war zu überprüfen, wie und in welchem Zeitraum Regenwürmer der Art *Lumbricus terrestris* als wichtiger Vertreter der Bodenlebewesen Schadstoffe im Boden verteilen. Solche Informationen sind eben dann von Interesse, wenn Überlegungen angestellt werden, kontaminierte Flächen mit nichtkontaminiertem Boden zu überdecken um so eine ökologische Schutzschicht zu bilden. Darüber hinaus ist die qualitative Veränderung

der Schadstoffe durch den Einfluß der Bodenlebewesen mit zu berücksichtigen, wenn die Löslichkeit der Schadstoffe erhöht wird und diese in höherem Maße der Pflanze zur Verfügung stehen und dann auch in Nahrungsmittel gelangen können.

Während über biogene Verteilungsmechanismen von Schadstoffen im Boden durch Regenwürmer bisher wenig bekannt ist, untersuchte Ireland (1975) den Blei-, Zink- und Calciumgehalt im Boden, in Regenwurmauswürfen und im Regenwurmgewebe nach verschiedenen Extraktionstechniken, nämlich wasserlösliche, essigsäure und salpetersäure Extraktion um Fragen der Pflanzenverfügbarkeit zu klären. Demnach können Regenwürmer der Art *D. rubidia* durch ihre Auswürfe die Zink- und Calciumverfügbarkeit erhöhen, die von Blei jedoch nur geringfügig oder gar nicht. Aufgrund anderer Arbeiten mit Pflanzennährstoffen, die die erhöhte Konzentration von austauschbarem Calcium, Magnesium, Kalium und Phosphor sowie Molybdän durch die Anwesenheit von Regenwürmer im Boden zeigen (Lunt und Jacobsen, 1944, Graff, 1971, Edwards and Lofty, 1972) liegt der Verdacht nahe, daß auch Schadstoffe, wie z.B. Schwermetalle, durch Regenwürmer pflanzenverfügbar gemacht werden können.

2. Material und Methoden

Zur Versuchsdurchführung waren 8 Säulen mit einem Löß-Unterboden angelegt worden, wobei jeweils eine kontaminierte Rindermistschicht von ca. 5 cm Dicke auf der Bodenoberfläche (Säule 1+2), auf der Bodenoberfläche mit Bewässerungssystem unter der Rindermistschicht (Säule 3+4), in der Mitte der etwa 90 cm hohen Säulen (Säule 5+6) und am Grund über der Drainschicht (Säule 7+8) deponiert worden waren.

In Tabelle 1 sind die tatsächlichen Zugaben an Cadmium, Cobalt, Chrom, Nickel und Blei aufgelistet sowie die gemessenen Konzentrationen des Rindermistes vor und nach der Kontamination. Dabei fällt auf, daß ein beträchtlicher Anteil der tatsächlich zugemischten Schadstoffe im Rindermist fest gebunden wird und durch Druckaufschluß mit konzentrierter HNO_3 nicht mehr verfügbar ist. Der so wieder gefundene Gehalt des kontaminierten Rindermistes beträgt für Cadmium 53 %, für Cobalt 38 %, für Chrom 57 %, für Nickel 43 % und für Blei nur 20 %.

Um einen Überblick über die potentielle und die tatsächliche biologische Aktivität zu erhalten, sind in Tabelle 2 die Anzahl der Regenwürmer zu Versuchsbeginn und Versuchsende sowie die Wurmbiomasse und die Biomasse pro Wurm aufgeführt.

Im übrigen ist die genaue Versuchsbeschreibung sowie der Versuchsablauf in Teil I beschrieben worden (Schmidt und Liese, 1985).

Nachdem die Regenwürmer aus den Bodensäulen entfernt worden waren, wurden die Säulen waagrecht gelegt, die Plexiglaswände aufgeklappt und die Bodensäulen von oben nach unten in ca. 5 cm dicke Schichten zerlegt. Das Material der waagerechten Bodenschichten wurde naß und trocken gewogen und die genaue Schichtdicke bestimmt. In Tabelle 3 sind die Schichten mit ihrer jeweils genauen Schichtdicke aufgeführt. Die in den Abbildungen

dargestellten punktförmigen Schwermetallgehalte gelten immer als Mittelwert für die gesamte Schicht. Bei der Probenahme wurde das getrocknete homogenisierte Bodenmaterial jeweils einer Schicht auf eine Fläche von 0,5 m² ausgebreitet und an 15 gleichmäßig verteilten Stellen mit einer Plastikschaufel Bodenmengen von jeweils 80 g entnommen. Der Boden wurde erneut homogenisiert. Anschließend wurden 5 Proben zu 100 g zur Analyse abgefüllt.

Die Analyse erfolgte mittels ICP-AES nach Extraktion von 4 g Boden mit Salpetersäure bzw. essigsaurer EDTA-Lösung.

3. Ergebnisse

In Abbildung 1 sind die Ergebnisse nach Extraktion mit HNO₃ dargestellt. Jeweils im Vergleich zur Kontrolle vor Versuchsbeginn ist der mobilisierbare Anteil wiedergegeben. Für alle 8 Säulen ergeben sich Elementgehalte in den einzelnen Bodenschichten, die von der Ausgangslage des Mistes geprägt sind. Dies trifft besonders auf die Säulen Nr. 5 und Nr. 6 (Mittellage) sowie 7 und 8 (Grundlage) zu, wo deutliche Peaks vorhanden sind. Die zu Versuchsbeginn ausgelegten Rindermistschichten waren als solche nicht mehr vorhanden und nur durch ihre dunkle Färbung zu erkennen. Der Boden war dunkel und krümlig und von unzähligen Regenwurmgingen durchsetzt. Dies legt die Vermutung nahe, daß die Regenwürmer den kontaminierten Rinderkot mehr oder weniger vollständig gefressen haben und sich in dieser Schicht entsprechend häufig im Gebiet des Nahrungsangebotes aufgehalten haben. In einzelnen Schichten sind gegenüber der Kontrolle aber teilweise auch deutliche Anreicherungen vorzufinden. Dies sind dann entweder Orte in denen sich mehrere Würmer auch zeitlich öfter aufhielten als an anderen oder aber Orte an denen tote Regenwürmer durch den Abbau ihrer Körpersubstanz zur Anreicherung der Schadstoffe beigetragen haben. Solche Schichten mit stark erhöhter Konzentration

aller zugeführten Elemente findet sich z.B. bei Säule Nr. 1 in einer Tiefe von 70 - 80 cm (Schichten 13 und 14). Bei Säule Nr. 7 in einer Tiefe von 25-42 cm (Schichten 7-9) und bei Säule Nr. 5, mit Ausnahme von Nickel in Schicht 13 und 14, was einer Tiefe von ca. 50 - 60 cm entspricht.

Aus den Abbildungen 1/1 bis 1/8 läßt sich weiterhin entnehmen, daß bei der überwiegenden Zahl der untersuchten Schichten der HNO_3 -lösliche Anteil aller Elemente mindestens über dem der Kontrollprobe liegt. Ausnahme finden sich z.B. bei Säule Nr. 1 für Blei, bei Säule Nr. 2 für Nickel und bei Säule Nr. 4 für Cadmium.

Eine klare Systematik der Ablagerung bzw. der Verteilung der Schadstoffe durch die Regenwürmer im Boden läßt sich aber nicht ableiten. Die Ablage der Schadstoffe oben, in der Mitte oder unten haben auf die ganze Säule bezogen, offenbar keinen direkten Einfluß auf die Verteilung der Schadstoffe.

Es bleibt weiterhin festzustellen, daß eine Auswaschung von HNO_3 -löslichen Anteilen nicht oder nur unwesentlich erfolgt ist. Dies wird deutlich, wenn man die Säulen Nr. 1 und 2 mit normaler Bewässerung während des Versuchszeitraumes mit den Säulen Nr. 3 und 4 vergleicht, bei denen die Bewässerung über eine Schlauchanlage unterhalb der auf die Bodenoberfläche aufgetragenen Mistschicht erfolgt. Die Einzelergebnisse sind den Anhangtabellen Nr. 1-8 zu entnehmen.

In Tabelle 4 sind die Mittelwerte der Elemente Cd, Co, Cr, Ni und Pb pro Säule im Vergleich zur Kontrolle aufgelistet, wobei die überhöhten Werte der kontaminierten Schichten unberücksichtigt bleiben. Jeweils im Mittel aller und im Mittel der einzelnen Säulen hat demnach durch die Tätigkeit der Regenwürmer einer Verteilung der Schadstoffe aus der kontaminierten Schicht heraus stattgefunden und läßt sich gegenüber der Kontrolle an den höheren Zahlenwerten ablesen. Sehr gering sind die Unterschiede bei Cadmium deswegen, weil die Würmer dieses Element in ihrem Gewebe stark anreichern (siehe Teil I) und außerdem nur 6 $\mu\text{g/g}$ trockenem Rindermist zugegeben worden waren, von dem nur die Hälfte durch

Druckaufschluß wiederzufinden war. Sieht man einmal von Abweichungen einzelner Schichten ab, so ist die Anreicherung aller Schadstoffe im Mittel aller Säulen zwar gering, aber doch deutlich sichtbar. Dies wird auch dann erkennbar, wenn man den Schadstoffgehalt des Bodens nach Ende des Versuchs in Relation zum Gehalt des Bodens zu Versuchsbeginn setzt. Die Verhältniszahlen in Tabelle 5 dokumentieren die Arbeit der Würmer für den relativ kurzen Zeitraum von 9 Monaten, nämlich in der Zeit von Oktober bis Juli.

Beim Vergleich der Schadelemente untereinander fällt auf, daß Pb im Mittel die relativ geringste Anreicherung in den Säulen im Vergleich zur Kontrolle hat, während bei Cr ein mittlerer Faktor von 1,4 berechnet wurde. Bei Cr sind die Schwankungen der einzelnen Säulen allerdings auch am größten, nämlich von 1,0 bei Säule 4 bis 1,6 bei den Säulen Nr. 1 und 7.

In den Abbildungen 2/1 bis 2/8 sind die Gehalte der Schadstoffe Cd, Co, Cr, Ni und Pb nach Extraktion mit EDTA punktförmig für die einzelnen Schichten abzulesen. Es handelt sich hierbei um den komplexierbaren Anteil der jeweiligen Elemente. Auch hier gilt, daß jede Bodensäule unabhängig von der Auslage des kontaminierten Rindermistes oder der Wiederholung sein individuelles Bild hat. Es gibt dabei in allen Säulen Zonen, die höhere lösliche Schadstoffe beinhalten als andere. Während die Konzentration der Elemente Cd, Co, Ni und Pb meistens deutlich über denen der Kontrollwerte liegen, ist bis auf wenige Ausnahmen bei allen Säulen für Cr keine Erhöhung des EDTA-löslichen Anteiles festzustellen. Die Werte liegen in der Regel unter der Nachweisgrenze. Demnach gibt es keinen Einfluß der Regenwurmtätigkeit auf eine mögliche Erhöhung des pflanzenverfügbaren Chromgehaltes im Boden. Im Gegensatz dazu erhöht sich der pflanzenverfügbare Anteil von Cd, Co, Ni und Pb. Lediglich in einigen Schichten von Säule 8 (Abb. 2/8) ist für Cd, Co und Ni keine Erhöhung festzustellen. Hohe Gehalte der zugesetzten Schadstoffe finden - ähnlich wie beim HNO_3 -löslichen Anteil - sich im

unmittelbaren Bereich des deponierten Rindermistes, so bei Säule 5 und 6 etwa in der Mitte und bei Säule 7 und 8 im Boden über der Dränschicht. Die Ergebnisse der einzelnen Säulen ergeben sich aus den Anhangtabellen 9 bis 16.

In Tabelle 6 sind noch einmal die mittleren Gehalte der einzelnen Schadstoffe pro Säule zusammengefaßt. Damit werden die individuellen Verhaltensweisen der Regenwürmer in den einzelnen Schichten unberücksichtigt gelassen, um einen Überblick über die Lebensraumverhältnisse zu bekommen. Das Element Cd streut von $<0,01$ bis $0,09 \mu\text{g/g}$ Boden und liegt damit doch wesentlich über der Kontrolle, ebenso wie Co mit $0,2 - 0,4 \mu\text{g/g}$ Boden. Am pflanzenverfügbaren Anteil von Chrom hat die Regenwurmtätigkeit nichts geändert, weil dieses Element sehr schwer komplexierbar ist. Mit Ausnahme von Säule 8 sind auch bei Nickel die Gehalte mit $0,4 - 0,6 \mu\text{g/g}$ Boden deutlich über der Kontrolle von $0,3 \mu\text{g/g}$. Bei Pb liegt der Streubereich zwischen $1,8$ und $3,3 \mu\text{g/g}$ gegenüber der Kontrolle mit $1,7 \mu\text{g/g}$ Boden.

Während bei Säule 1 - 7 alle komplexierbaren Schadstoffgehalte, mit Ausnahme von Cr, deutlich über dem jeweiligen Kontrollwert liegen, ist in Säule 8, mit Ausnahme weniger Schichten, bei Cd, Co und Ni kein EDTA-löslicher, erhöhter Anteil festzustellen.

Der oben dargestellte Sachverhalt wird auch durch die Anreicherungsfaktoren bestätigt (Tabelle 7), nämlich Faktoren die >1 sind, mit Ausnahme von Säule 8. Insgesamt fallen die höheren Werte bei Cd auf, wobei die Erhöhung gegenüber der Kontrolle das Sechsfache beträgt. Bei Co wurde ein Faktor 1,5, bei Ni 1,4 und bei Pb ein Faktor 1,6 berechnet.

Ein Zusammenhang zwischen Wurmbiomasse bei Versuchsende und dem Anteil mobilisierbarer und austauschbarer Schadstoffe konnte nicht festgestellt werden.

4. Diskussion der Ergebnisse

Als wichtigste Aussage dieser Untersuchung läßt sich feststellen, daß Regenwürmer der Art *Lumbricus terrestris* organische Substanz und mit ihr die zugesetzten Schadstoffe Cd, Co, Cr, Ni und Pb im Boden verteilen. Es spielt dabei keine Rolle, ob der schichtweise ausgebrachte kontaminierte Rindermist auf der Bodenoberfläche oder im Boden selbst ausgelegt worden war. Wie auch aus Abbildung 1 hervorgeht, erfolgt die Verteilung sehr rasch, d.h. Regenwürmer beschleunigen Verlagerungsvorgänge im Boden, die eigentlich nur in Verbindung mit der Versickerung von Regenwasser zu erwarten wären.

Die Kenntnis solcher bodenbiologisch wichtigen Vorgänge ist dann von Nutzen, wenn Problemlösungen bei z.B. mit Schadstoffen kontaminierten Flächen gesucht werden. Es dürfte nicht ausreichen, kontaminierte Areale einfach mit einer Bodenschicht abzudecken, da nämlich mit einer zeitlichen Verzögerung die Schadstoffe in dem neu geschaffenen Wurzelraum und an die Bodenoberfläche durch Bodenlebewesen gelangen. Hier sei noch einmal an die Erkenntnis Darwins erinnert, daß eine auf der Bodenoberfläche ausgebreitete Sandschicht nach 7 Jahren 5 cm hoch mit Krumenerde bedeckt war.

Um im Falle einer solchen Abdeckung dennoch zumindest den mechanischen Transport zu unterbinden, müßten gezielte Bekämpfungsmaßnahmen der größeren grabenden und fressenden Bodenbewohner, also auch der Regenwürmer, vorgenommen werden. Dies könnte entweder chemisch oder aber durch eine allgemeine Verschlechterung der Lebensbedingungen der Regenwürmer erfolgen. Denkbar ist dabei eine intensive mechanische Bearbeitung, eine Erhöhung der Salzkonzentration im Boden durch erhöhte mineralische Düngung oder eine pH-Absenkung des Bodens, da Regenwürmer eher einen neutralen bis schwachsauren Boden bevorzugen. Dennoch muß immer damit gerechnet werden, daß Regenwürmer aus Nachbargebieten auch bei für

sie schlechteren Lebensbedingungen einwandern und sich den neuen Lebensraum erschließen.

Die Einschätzung der Größenordnung der vorliegenden Konzentrationen deutet vordergründig auf ein niedriges Schadstoffniveau hin, insbesondere wenn man die Grenzwerte nach Kloke (1981) den eigenen Ergebnissen gegenüberstellt, nämlich 2 gegenüber $0,11 \mu\text{g/g}$ bei Cd, 60 gegenüber $1,09 \mu\text{g/g}$ bei Co, 10 gegenüber $0,7 \mu\text{g/g}$ bei Cr, 60 gegenüber $1,8 \mu\text{g/g}$ bei Ni und 100 gegenüber $4,7 \mu\text{g/g}$ bei Pb. Dies ändert aber nichts an der Tatsache, daß hier prinzipiell Vorgänge ablaufen, die bei der Betrachtung eines längeren Zeitraumes, als wie im vorliegenden Fall 9 Monate, und einer höheren Konzentration der Schadstoffe, zu einer ungewollten Schadstoffverteilung im Boden führen. Ein solcher Vorgang gewinnt insofern an Bedeutung, weil der Boden als Standort von Nahrungsmittelpflanzen direkt im Bereich der Nahrungskette des Menschen anzusiedeln ist. Aus der Versuchsanstellung mit relativ geringen Schadstoffgehalten ergibt sich die weitergehende Fragestellung, wie die Verteilung höherer Schadstoffkonzentrationen in einem längeren Zeitraum erfolgen würde.

Bemerkenswert ist das Verhältnis der HNO_3 - und EDTA-löslichen Anteile der untersuchten Schadstoffe zueinander. Zunächst muß noch einmal darauf hingewiesen werden, daß der HNO_3 -lösliche Anteil ein Orientierungswert für den mobilisierbaren Anteil darstellt, ebenso wie die EDTA-löslichen Anteile dem pflanzenverfügbaren Anteil nahekommen, ihn aber selbstverständlich nicht für jede Pflanzenart repräsentieren können. Es handelt sich somit um Anhaltswerte, die einen sinnvollen Vergleich ermöglichen. Wie aus den Ergebnissen der Tabelle 5 und 7 hervorgeht, nimmt der komplexierbare, also der pflanzenverfügbare Anteil gegenüber dem mobilisierbaren Anteil relativ stärker zu. Dies trifft ganz besonders bei Cd mit einem Faktor von 6,2 (ohne Säule 8) gegenüber 1,2 bei dem HNO_3 -löslichen Anteil zu. Durch die Aktivität der Regenwürmer werden Umsetzungsprozesse eingeleitet, die insbesondere die Pflanzenverfügbarkeit von bestimmten Schad-

stoffen verändern bzw. erhöhen können. Weil in Auswürfen der Regenwürmer in der Regel eine erhöhte Mikrobentätigkeit nachzuweisen ist, dürften auch die Umsetzungsvorgänge mit der Erhöhung des pflanzenverfügbaren Anteiles zusammenhängen. Keine Gültigkeit hat die erhöhte Komplexierbarkeit für Cr. Dieses Element neigt von seinen chemischen Eigenschaften her nicht zur Komplexbildung und konnte daher nur in Einzelfällen oberhalb der Nachweisgrenze gemessen werden.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß das Wissen über Schadstoffe insbesondere im terrestrischen Ökosystem verstärkt erweitert werden muß und Umweltschutz nicht nur den Schutz von Luft und Wasser, sondern auch den des Bodens umfaßt.

Tabelle 1: Zugabe an Cd, Co, Cr, Ni und Pb und die Konzentration dieser Elemente vor und nach der Kontamination im Rindermist nach Druckaufschluß

Element	Zugabe als Nitrat zum Rindermist $\mu\text{g/g}$	Elementgehalt im Rindermist $\mu\text{g/g}$	
		vor der Kontamination	nach der Kontamination
Cd	6	<0,2	3,2 \pm 0,8
Co	60	<1,0	23 \pm 9
Cr	30	3,6 \pm 0,2	17 \pm 5
Ni	60	4,3 \pm 0,4	26 \pm 8
Pb	600	<5,0	119 \pm 54

Tabelle 2: Anzahl an Regenwürmern zu Beginn und zum Ende des Versuches sowie die Wurmbiomasse und Biomasse/Wurm für die einzelnen Bodensäulen

Säule Nr.	Anzahl Würmer		Wurmbiomasse		Biomasse/Wurm	
	Anfang St	Ende St	naß g	trocken g	naß g	trocken g
1	40	3	8,3	1,3	2,8	0,42
2	40	6	14,0	2,7	2,3	0,44
3	45	11	33,0	4,1	3,0	0,37
4	45	16	48,1	6,1	3,0	0,38
5	45	7	21,0	3,3	3,0	0,47
6	45	30	76,2	11,3	2,5	0,38
7	45	27	65,1	11,0	2,4	0,41
8	45	11	23,2	3,5	2,1	0,32
Kontrolle	19	19	88,3	12,7	4,7	0,66

Tabelle 3: Tatsächliche Schichtdicken der zerlegten Bodensäulen von oben nach unten

Schicht Nr.	Schichtdicke (cm)							
	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 5	Säule 6	Säule 7	Säule 8
1	0 - 4,7	0 - 5,2	0 - 5,1	0 - 3,8	0 - 3,8	0 - 3,9	0 - 3,5	0 - 4,0
2	4,7 - 10,4	5,2 - 10,7	5,1 - 9,2	4,6 - 8,1	3,8 - 8,2	3,9 - 9,0	3,5 - 8,1	4,0 - 10,3
3	10,4 - 16,5	10,7 - 16,5	9,2 - 13,3	8,1 - 12,5	8,2 - 13,2	9,0 - 13,7	8,1 - 11,6	10,3 - 14,6
4	16,5 - 22,9	16,5 - 21,3	13,3 - 18,3	12,5 - 17,6	13,2 - 17,5	13,7 - 19,5	11,6 - 15,7	14,6 - 19,7
5	22,9 - 28,9	21,3 - 28,0	18,3 - 23,4	17,6 - 22,8	17,5 - 22,2	19,5 - 24,4	15,7 - 20,1	19,7 - 26,2
6	28,9 - 36,1	28,0 - 33,7	23,4 - 27,9	22,8 - 27,8	22,2 - 24,9	24,4 - 30,0	20,1 - 25,2	26,2 - 31,5
7	36,1 - 40,4	33,7 - 39,6	27,9 - 32,5	27,8 - 33,1	24,9 - 27,1	30,0 - 33,5	25,2 - 30,3	31,5 - 38,1
8	40,4 - 44,5	39,6 - 45,6	32,5 - 36,2	33,1 - 38,7	27,1 - 32,5	33,5 - 35,3	30,3 - 36,3	38,1 - 42,7
9	44,5 - 51,4	45,6 - 51,2	36,2 - 41,9	38,7 - 44,7	32,5 - 37,2	35,3 - 40,5	36,3 - 41,7	42,7 - 49,5
10	51,4 - 57,2	51,2 - 59,2	41,9 - 47,5	44,7 - 50,5	37,2 - 41,3	40,5 - 46,4	41,7 - 47,8	49,5 - 55,8
11	57,2 - 63,9	59,2 - 66,2	47,5 - 54,1	50,5 - 56,4	41,3 - 46,5	46,4 - 51,5	47,8 - 52,8	55,8 - 62,3
12	63,9 - 69,6	66,2 - 72,1	54,1 - 58,8	56,4 - 61,7	46,5 - 50,5	51,5 - 57,1	52,8 - 58,3	62,3 - 68,3
13	69,6 - 75,0	72,1 - 81,9	58,8 - 63,5	61,7 - 66,6	50,5 - 55,6	57,1 - 62,6	58,3 - 63,8	68,3 - 75,5
14	75,0 - 81,8	81,9 - 89,5	63,5 - 69,6	66,5 - 71,9	55,6 - 60,8	62,6 - 68,6	63,8 - 70,0	75,5 - 84,5
15	81,8 - 90,0		69,6 - 75,8	71,9 - 78,3	60,8 - 66,7	68,6 - 77,4	70,0 - 74,9	
16					66,7 - 72,7		74,9 - 77,2	
17			75,8 - 89,0	78,3 - 92,0	72,7 - 78,5	77,4 - 85,0	77,2 - 85,0	
18					78,5 - 86,5			

Tabelle 4: Mittlere Gehalte an HNO₃ löslichem Cd, Co, Cr, Ni und Pb im Vergleich zur Kontrolle bei den einzelnen Säulen, deren Mittelwerten und der Kontrolle zu Versuchsbeginn

Element	Kontrolle Versuchs- beginn	Konzentration µg/g								
		∅ Säule 1-8	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 5	Säule 6	Säule 7	Säule 8
Cd	0,09 ±0,01	0,11 ±0,03	0,09 ±0,02	0,10 ±0,01	0,10 ±0,02	0,18 ±0,03	0,11 ±0,02	0,12 ±0,02	0,10 ±0,01	0,11 ±0,01
Co	0,92 ±0,05	1,09 ±0,05	1,07 ±0,09	1,01 ±0,08	1,1 ±0,1	1,10 ±0,05	1,1 ±0,1	1,1 ±0,1	1,1 ±0,1	1,07 ±0,02
Cr	0,52 ±0,08	0,7 ±0,1	0,9 ±0,3	0,65 ±0,04	0,8 ±0,3	0,48 ±0,03	0,8 ±0,3	0,77 ±0,05	0,8 ±0,3	0,70 ±0,04
Ni	1,48 ±0,09	1,8 ±0,1	1,9 ±0,4	1,6 ±0,1	1,9 ±0,5	1,92 ±0,09	1,9 ±0,4	1,8 ±0,2	2,0 ±0,5	1,64 ±0,06
Pb	4,3 ±0,5	4,7 ±0,2	4,5 0,3	4,7 0,4	4,7 0,5	5,0 0,3	4,9 0,5	4,9 0,6	4,7 0,4	4,5 0,1

Tabelle 5: Mittlere Anreicherungsfaktoren für Cd, Co, Cr, Ni und Pb in den Bodensäulen gegenüber dem Boden zu Versuchsbeginn nach Extraktion mit HNO₃

Element	∅ Säule 1-8	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 5	Säule 6	Säule 7	Säule 8
Cd	1,2 ±0,1	1,1	1,1	1,2	1,0	1,3	1,3	1,2	1,3
Co	1,18 ±0,05	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Cr	1,4 ±0,2	1,6	1,2	1,5	1,0	1,5	1,5	1,6	1,3
Ni	1,24 ±0,09	1,3	1,1	1,3	1,3	1,3	1,2	1,3	1,1
Pb	1,13 ±0,05	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1

Tabelle 6: Mittlere Gehalte an EDTA-löslichem Cd, Co, Cr, Ni und Pb im Vergleich zur Kontrolle bei den einzelnen Säulen, deren Mittelwerten und der Kontrolle zu Versuchsbeginn

Element	Kontrolle Versuchs- beginn	Konzentration µg/g								
		∅ Säule 1-8	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 5	Säule 6	Säule 7	Säule 8
Cd	0,01 ±0,00	0,06 0,03	0,06 0,02	0,07 0,01	0,06 0,01	0,07 0,01	0,09 0,02	0,07 0,02	0,02 0,01	<0,01 -
Co	0,20 0,04	0,29 0,05	0,28 0,03	0,25 0,04	0,29 0,02	0,33 0,06	0,34 0,05	0,36 0,07	0,26 0,04	0,20 0,03
Cr	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08	<0,08
Ni	0,31 0,05	0,4 0,1	0,40 0,06	0,46 0,05	0,54 0,05	0,56 0,1	0,50 0,09	0,55 0,09	0,37 0,06	0,21 0,04
Pb	1,75 0,26	2,6 0,5	2,12 0,22	2,41 0,28	2,99 0,45	2,8 0,62	3,38 0,6	3,10 0,8	3,61 0,3	1,8 0,1

Tabelle 7: Mittlere Anreicherungsfaktoren für Cd, Co, Cr, Ni und Pb in den Bodensäulen gegenüber Boden zu Versuchsbeginn nach Extraktion mit EDTA

Element	Ø Säule 1-8	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 5	Säule 6	Säule 7	Säule 8
Cd	6 ¹⁾ ±2	5,9	7,4	5,7	6,6	8,7	7,0	2,0	-
Co	1,5 ±0,3	1,4	1,3	1,4	1,7	1,7	1,8	1,3	1,0
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	1,4 ±0,4	1,3	1,5	1,8	1,5	1,6	1,8	1,2	0,7
Pb	1,6 ±0,3	1,2	1,5	1,8	1,6	2,0	1,9	1,6	1,1

¹⁾ ohne Säule Nr. 8

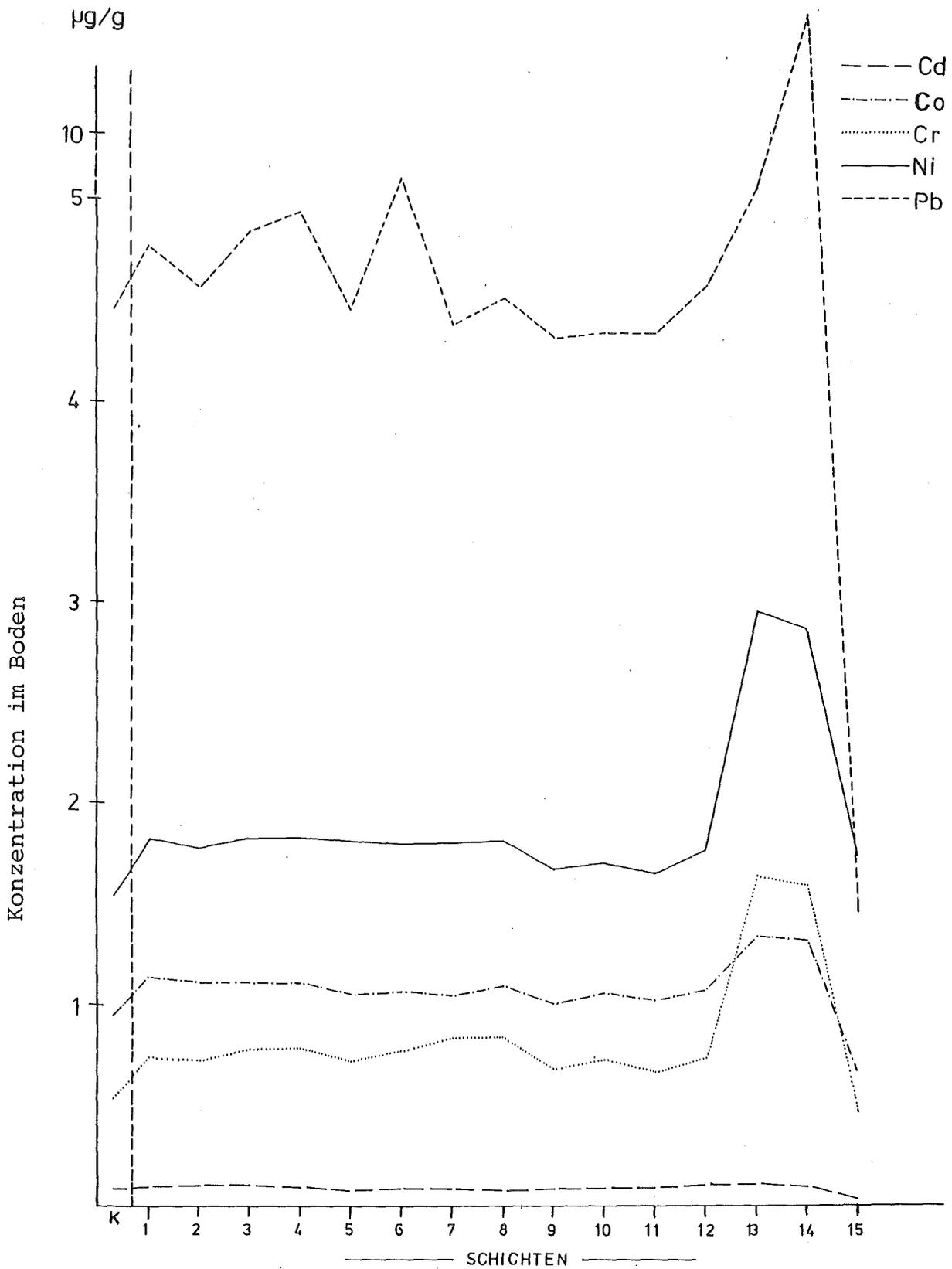


Abb. 1/1: Der HNO₃-lösliche Anteil der Elemente Cd, Co, Cr, Ni und Pb pro Schicht in Säule 1 im Vergleich zur Kontrolle

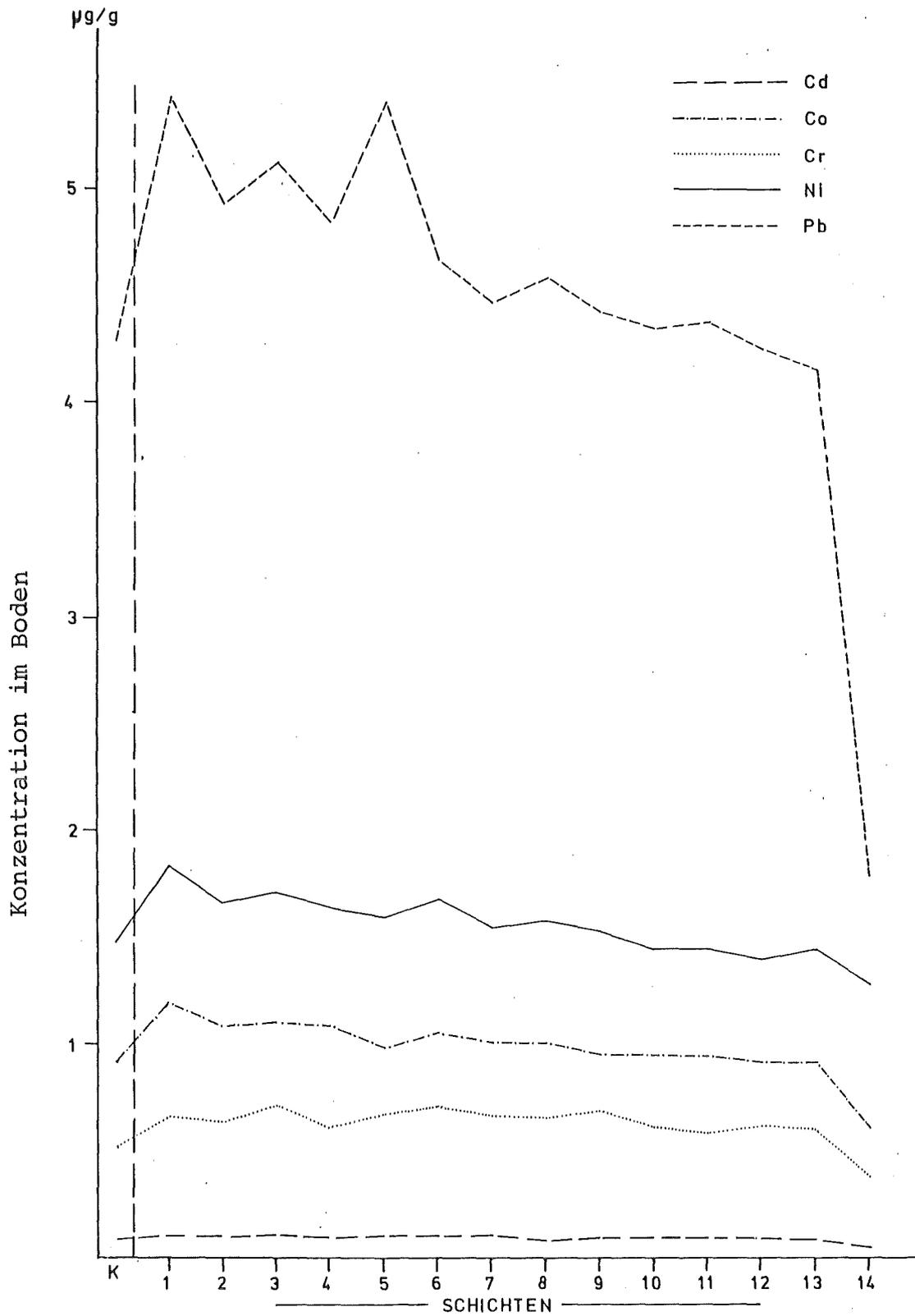


Abb. 1/2: Der HNO_3 -lösliche Anteil der Elemente Cd, Co, Cr, Ni und ^3Pb pro Schicht in Säule 2 im Vergleich zur Kontrolle

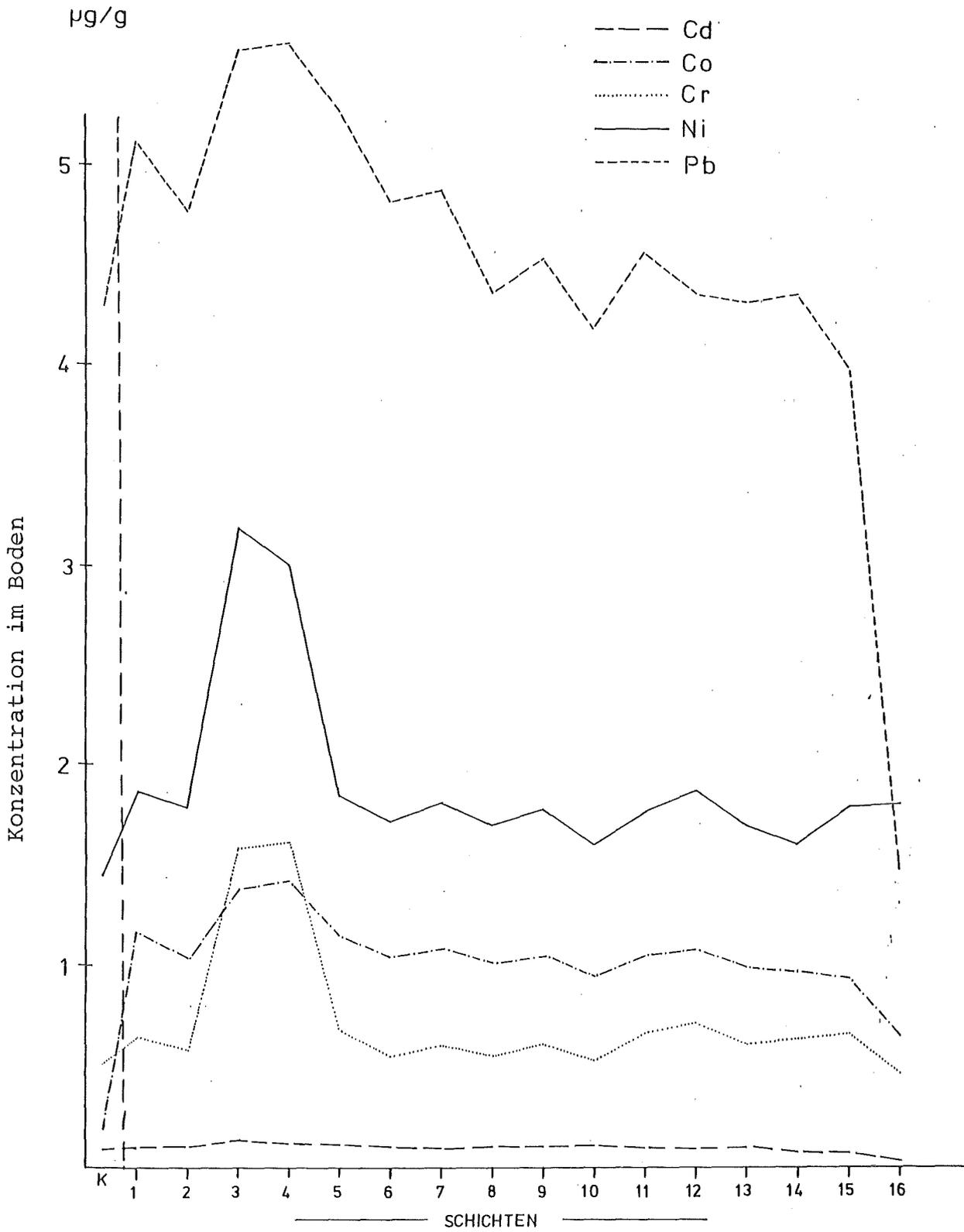


Abb. 1/3: Der HNO_3 -lösliche Anteil der Elemente Cd, Co, Cr, Ni und ^{210}Pb pro Schicht in Säule 3 im Vergleich zur Kontrolle

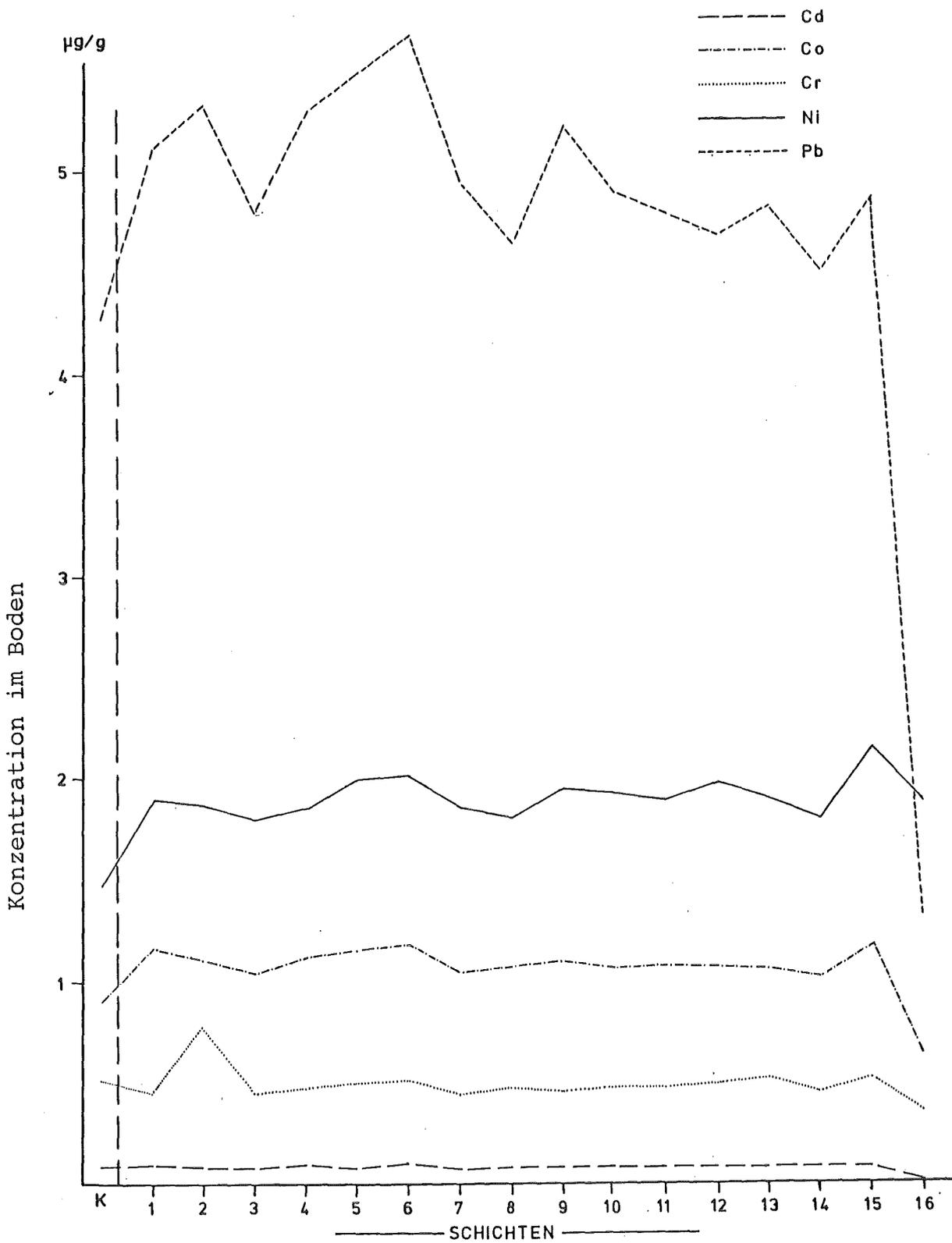


Abb. 1/4: Der HNO_3 -lösliche Anteil der Elemente Cd, Co, Cr, Ni und Pb pro Schicht in Säule 4 im Vergleich zur Kontrolle

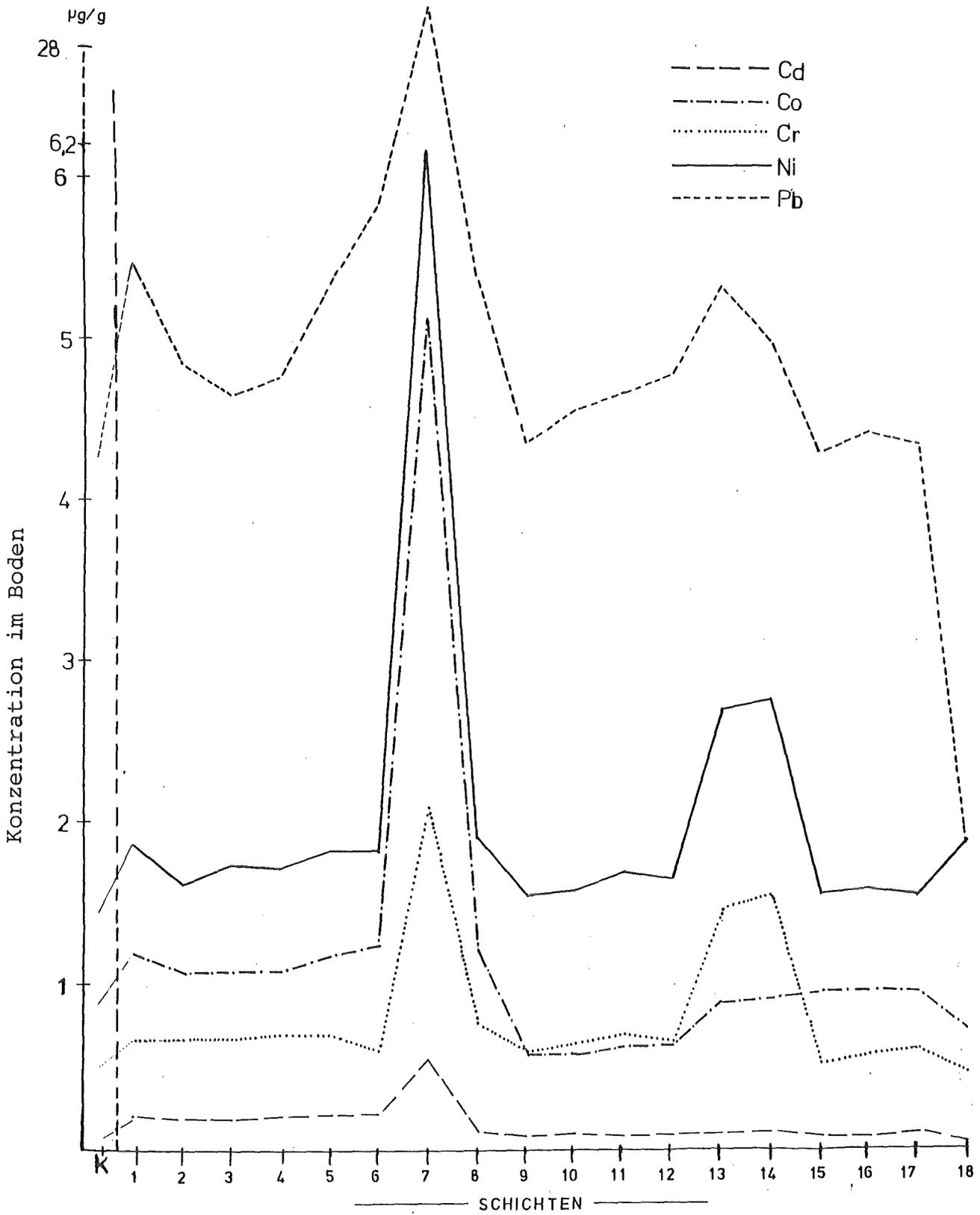


Abb. 1/5: Der HNO₃-lösliche Anteil der Elemente Cd, Co, Cr, Ni und Pb pro Schicht in Säule 5 im Vergleich zur Kontrolle

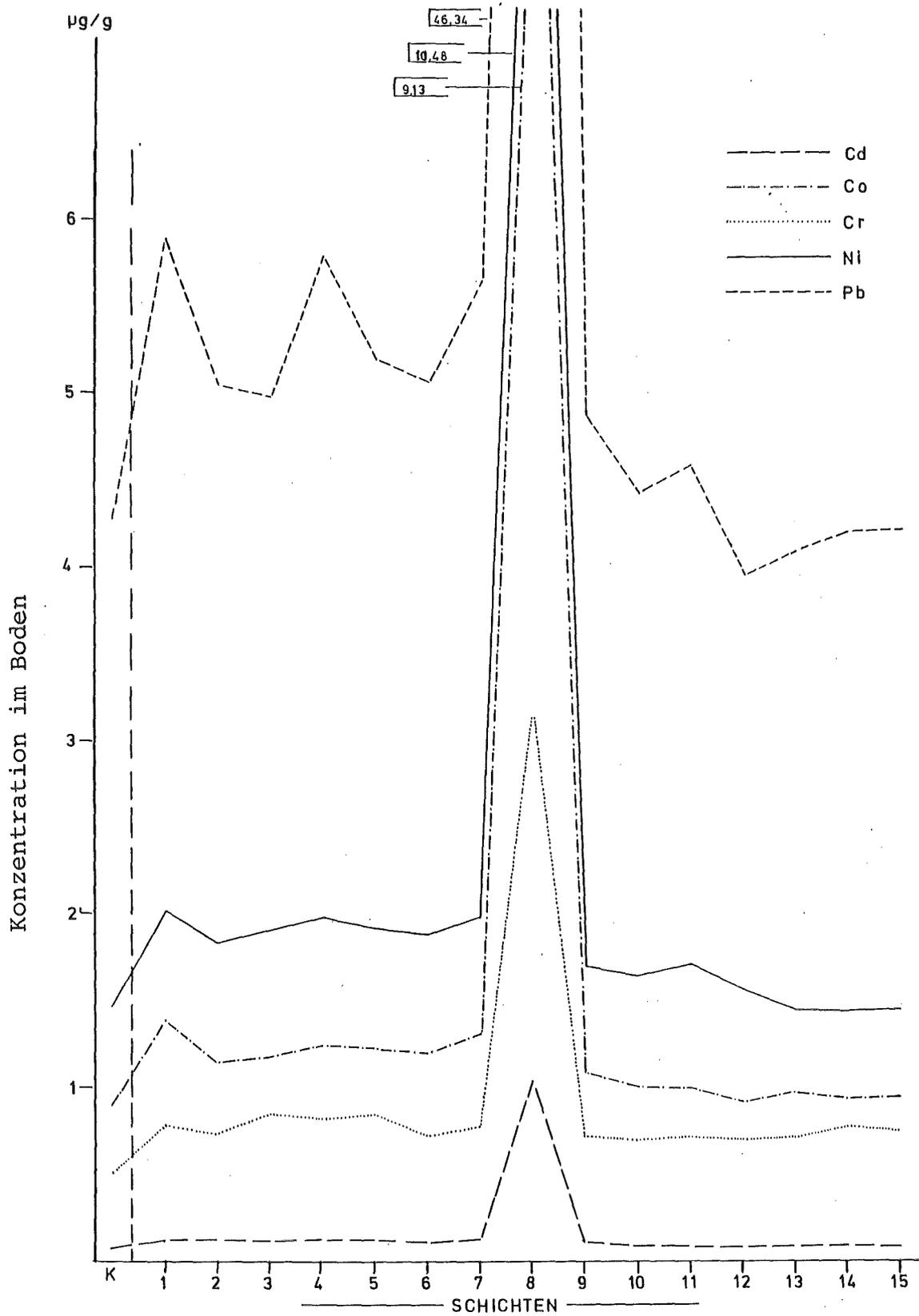


Abb. 1/6: Der HNO₃-lösliche Anteil der Elemente Cd, Co, Cr, Ni und Pb pro Schicht in Säule 6 im Vergleich zur Kontrolle

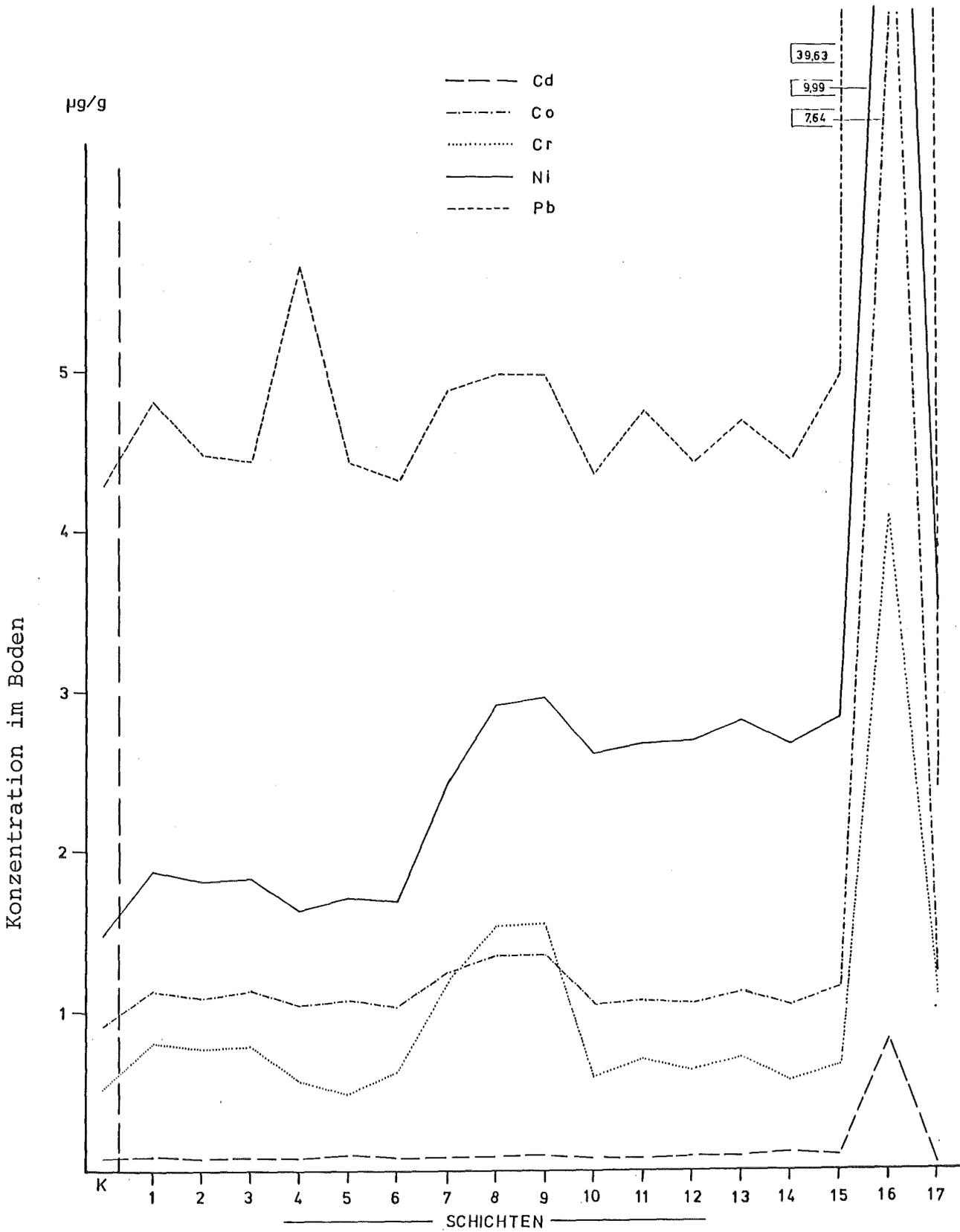


Abb. 1/7: Der HNO_3 -lösliche Anteil der Elemente Cd, Co, Cr, Ni und Pb pro Schicht in Säule 7 im Vergleich zur Kontrolle

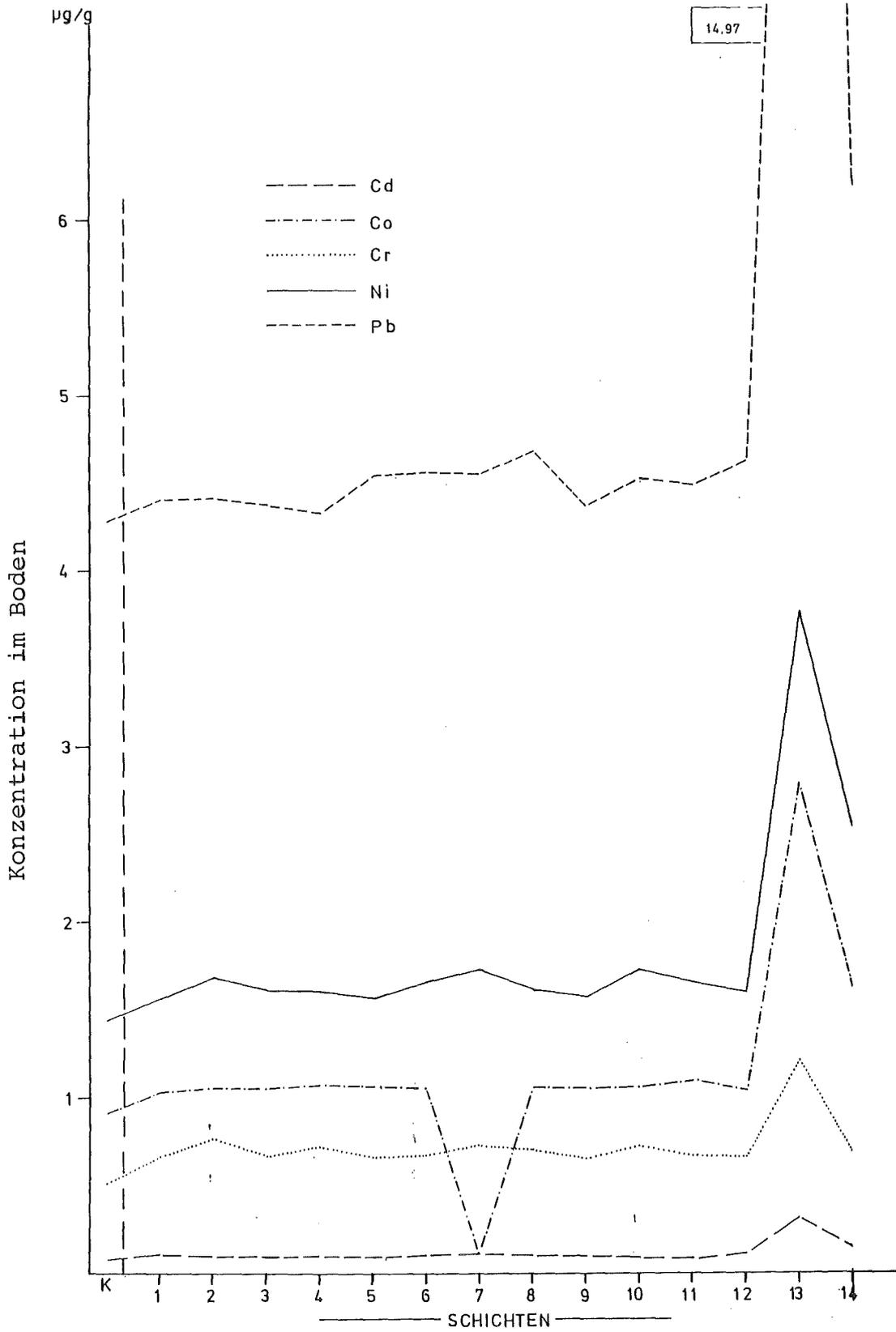


Abb. 1/8: Der HNO_3 -lösliche Anteil der Elemente Cd, Co, Cr, Ni³ und Pb pro Schicht in Säule 8 im Vergleich zur Kontrolle

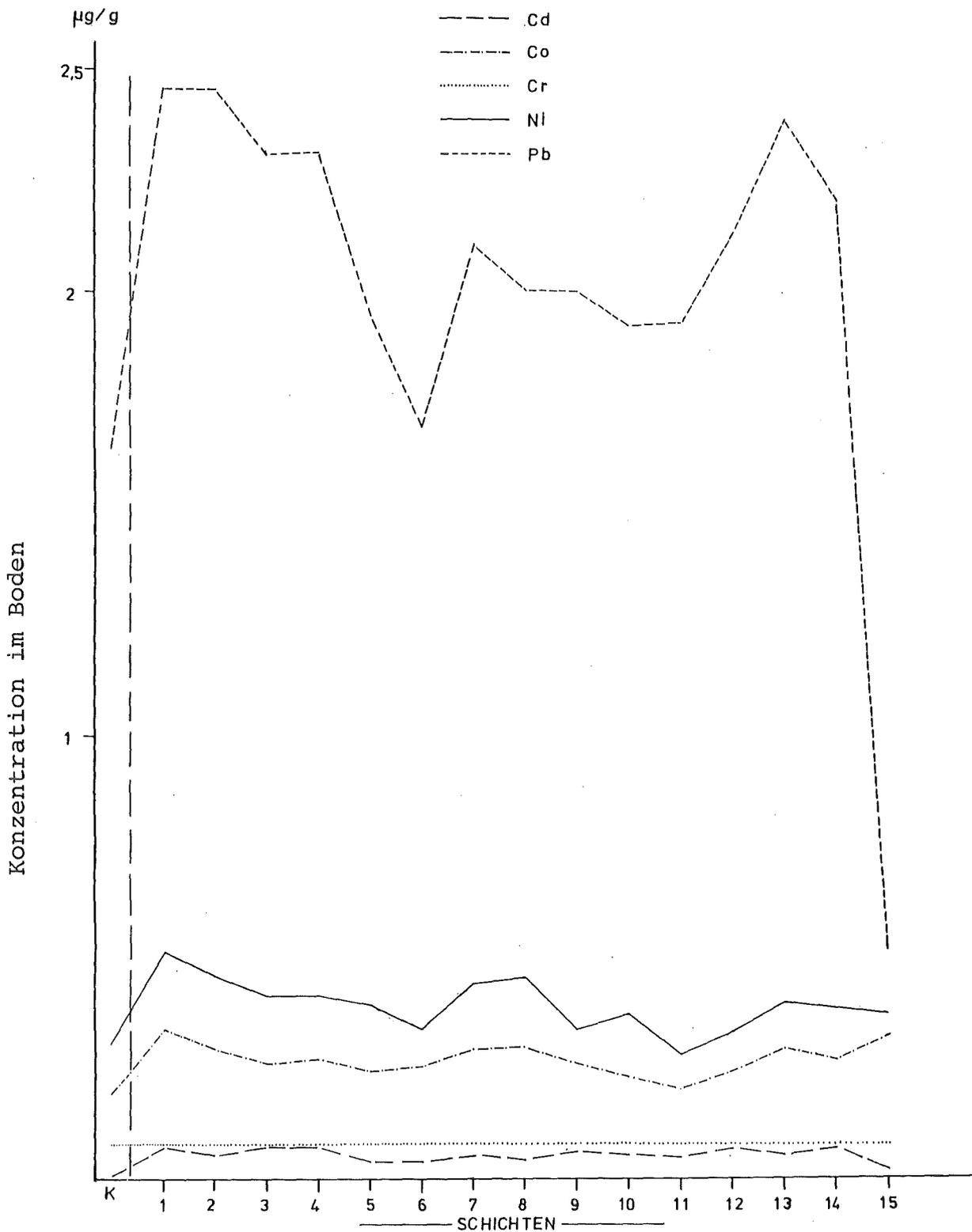


Abb. 2/1: Der EDTA-lösliche Anteil der Elemente Cd, Co, Cr, Ni und Pb pro Schicht in Säule 1 im Vergleich zur Kontrolle

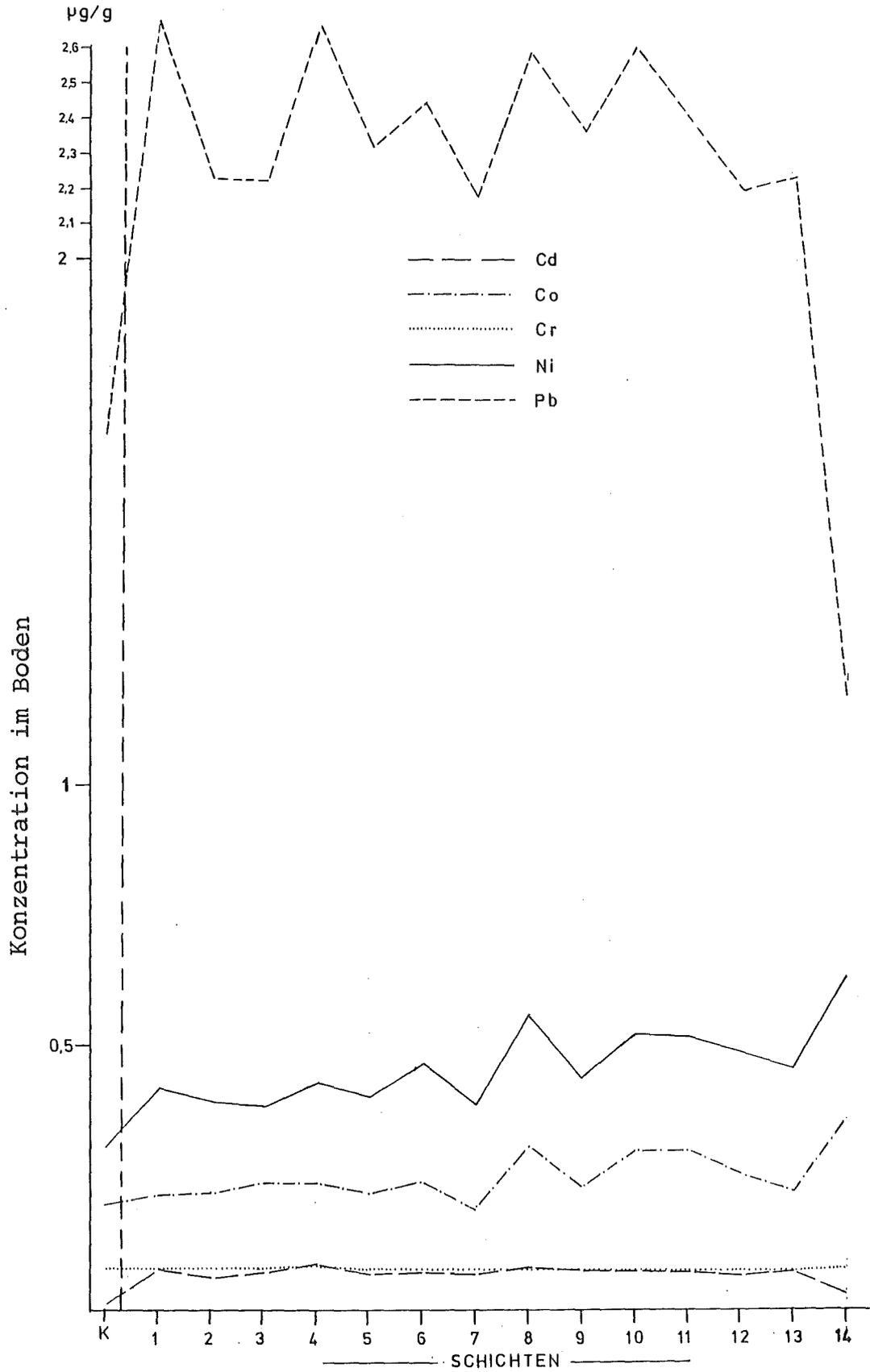


Abb. 2/2: Der EDTA-Lösliche Anteil der Elemente Cd, Co, Cr, Ni und Pb pro Schicht in Säule 2 im Vergleich zur Kontrolle

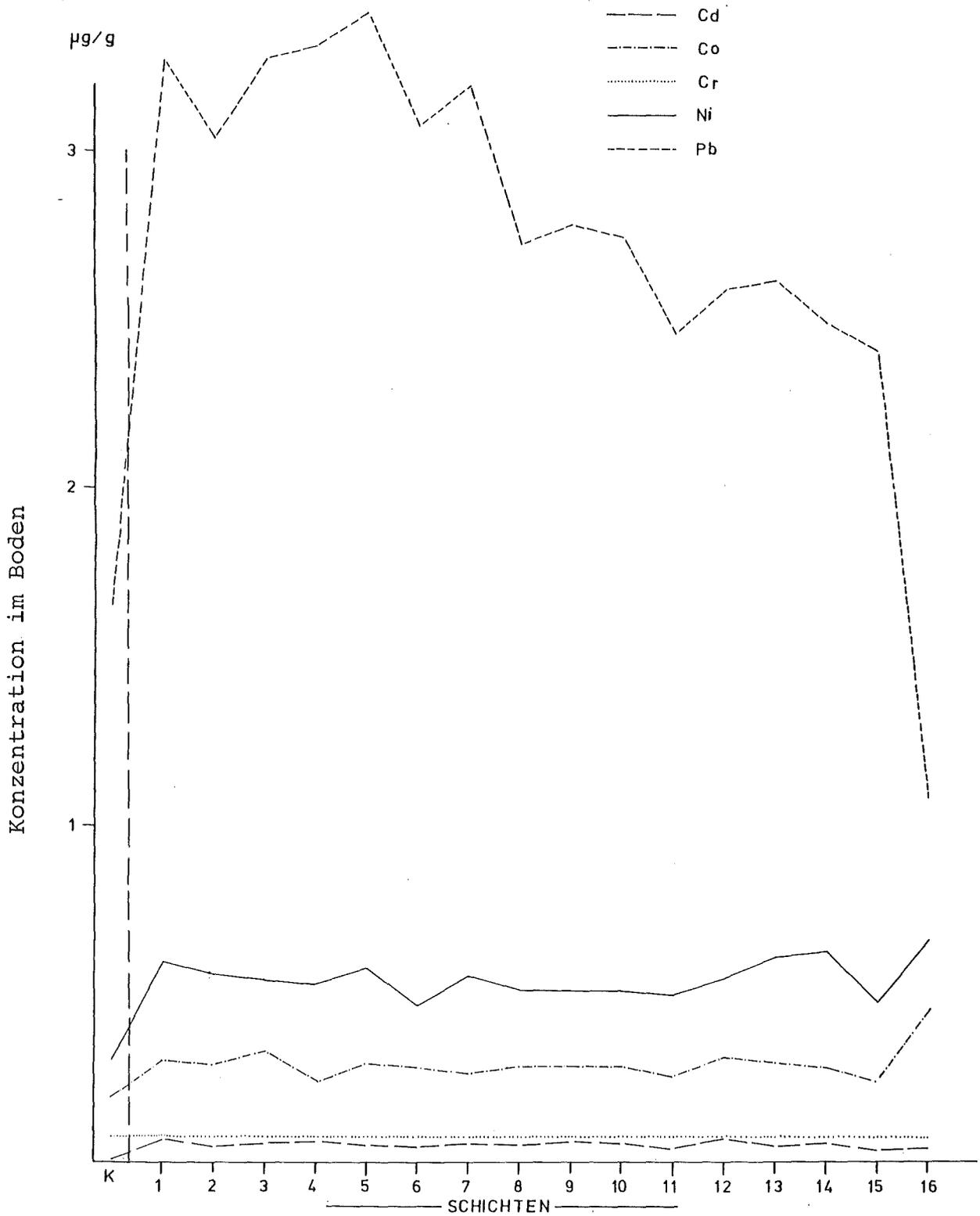


Abb. 2/3: Der EDTA-lösliche Anteil der Elemente Cd, Co, Cr, Ni und Pb pro Schicht in Säule 3 im Vergleich zur Kontrolle

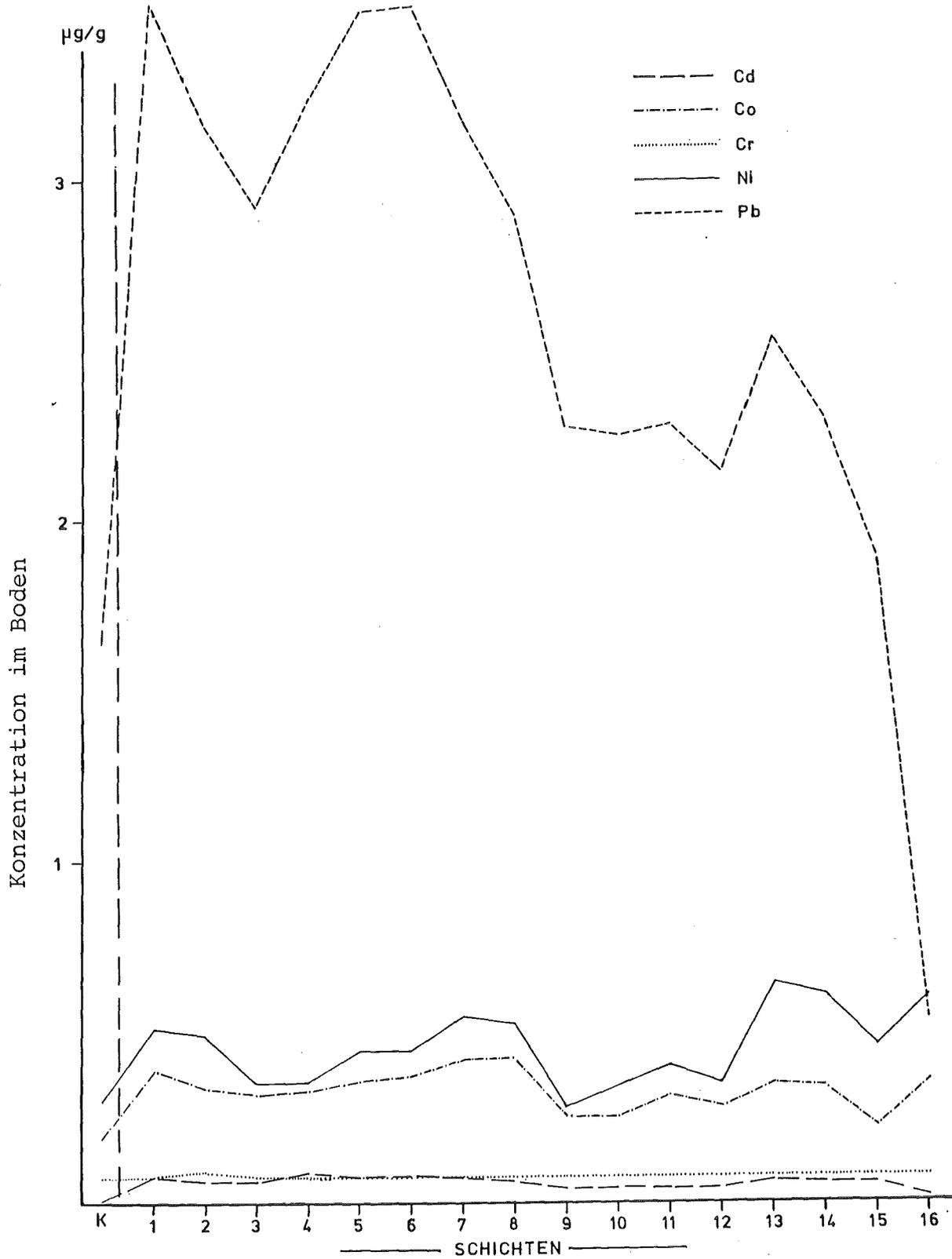


Abb. 2/4: Der EDTA-lösliche Anteil der Elemente Cd, Co, Cr, Ni und Pb pro Schicht in Säule 4 im Vergleich zur Kontrolle

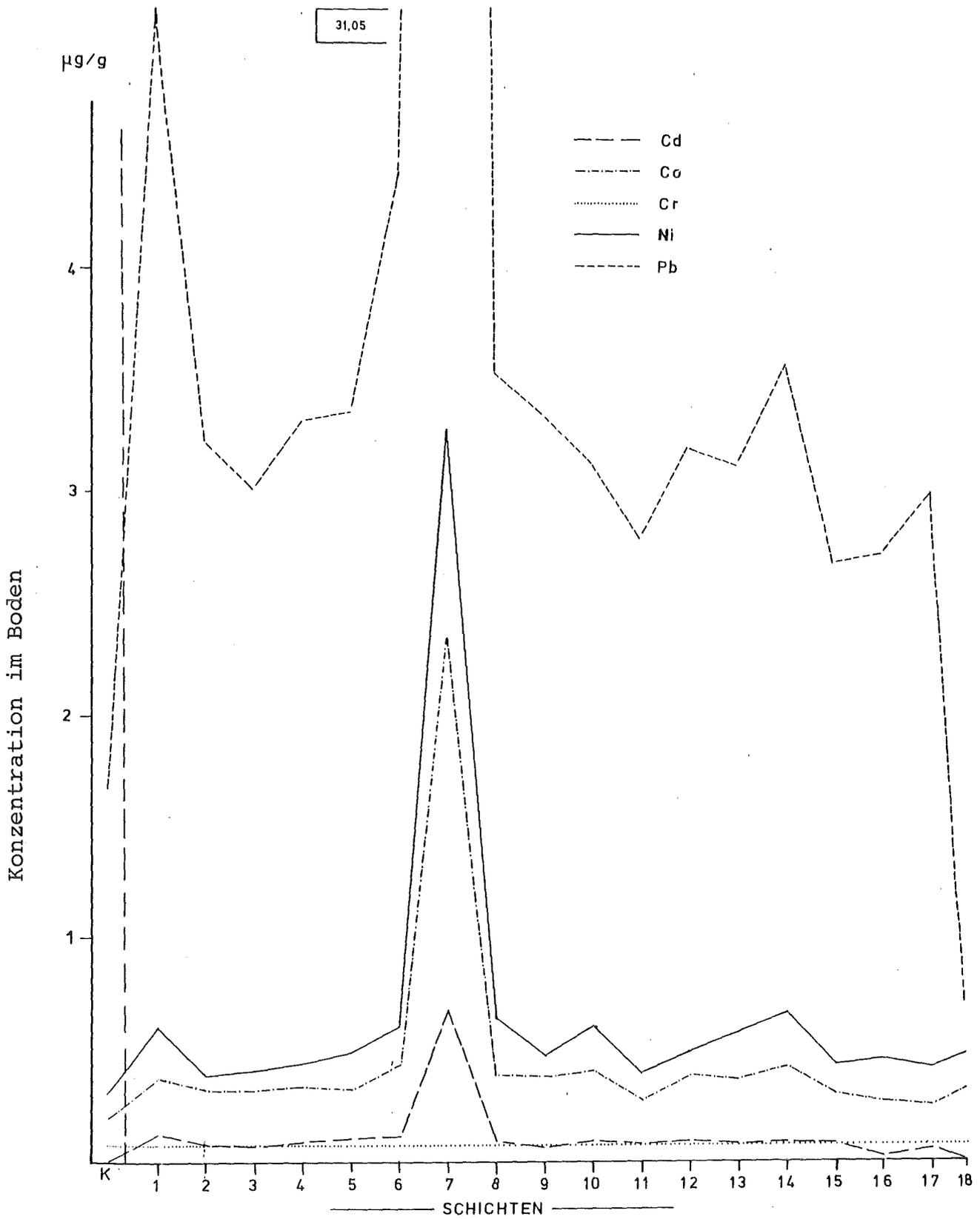


Abb. 2/5: Der EDTA-lösliche Anteil der Elemente Cd, Co, Cr, Ni und Pb pro Schicht in Säule 5 im Vergleich zur Kontrolle

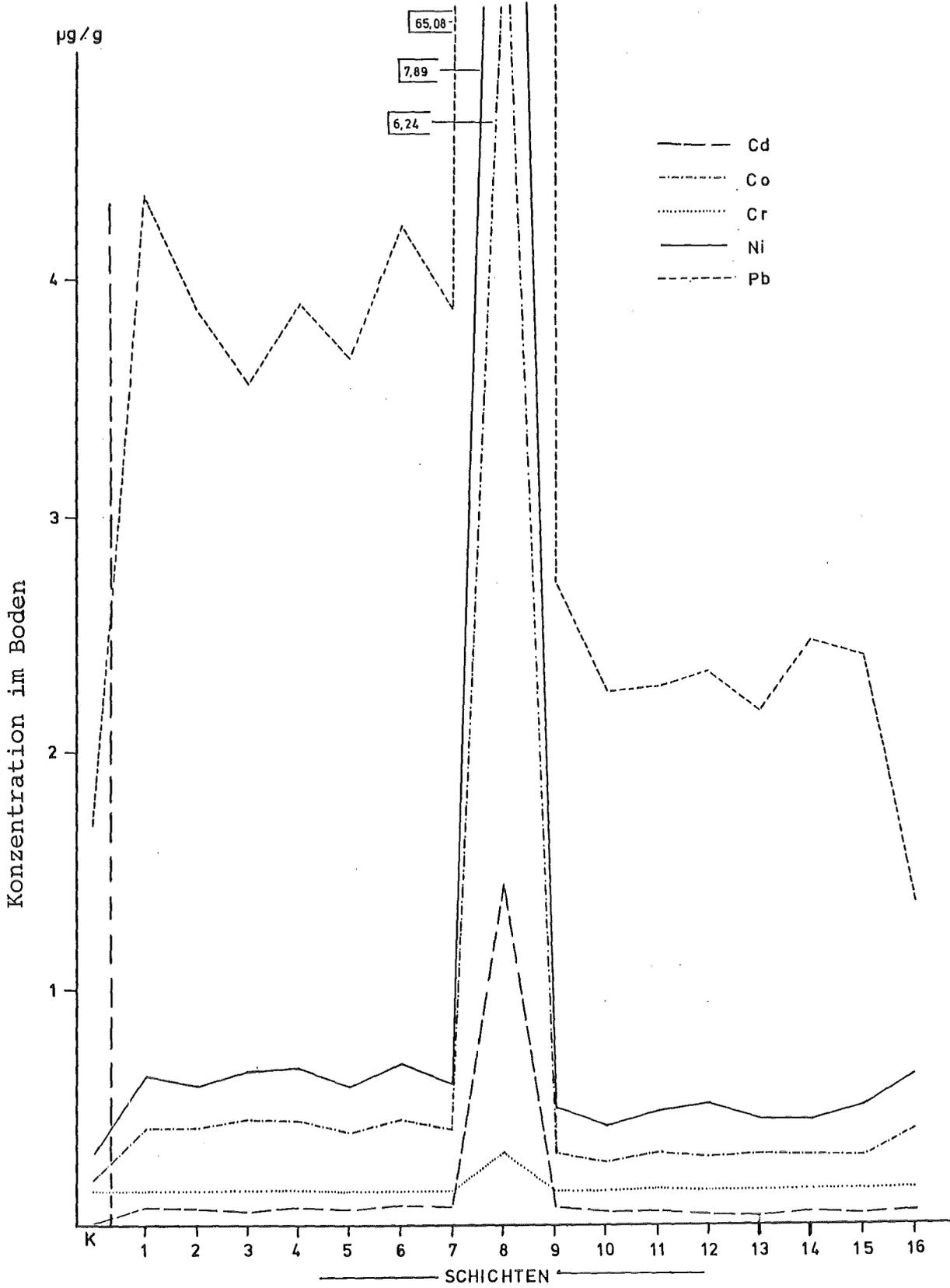


Abb. 2/6: Der EDTA-lösliche Anteil der Elemente Cd, Co, Cr, Ni und Pb pro Schicht in Säule 6 im Vergleich zur Kontrolle

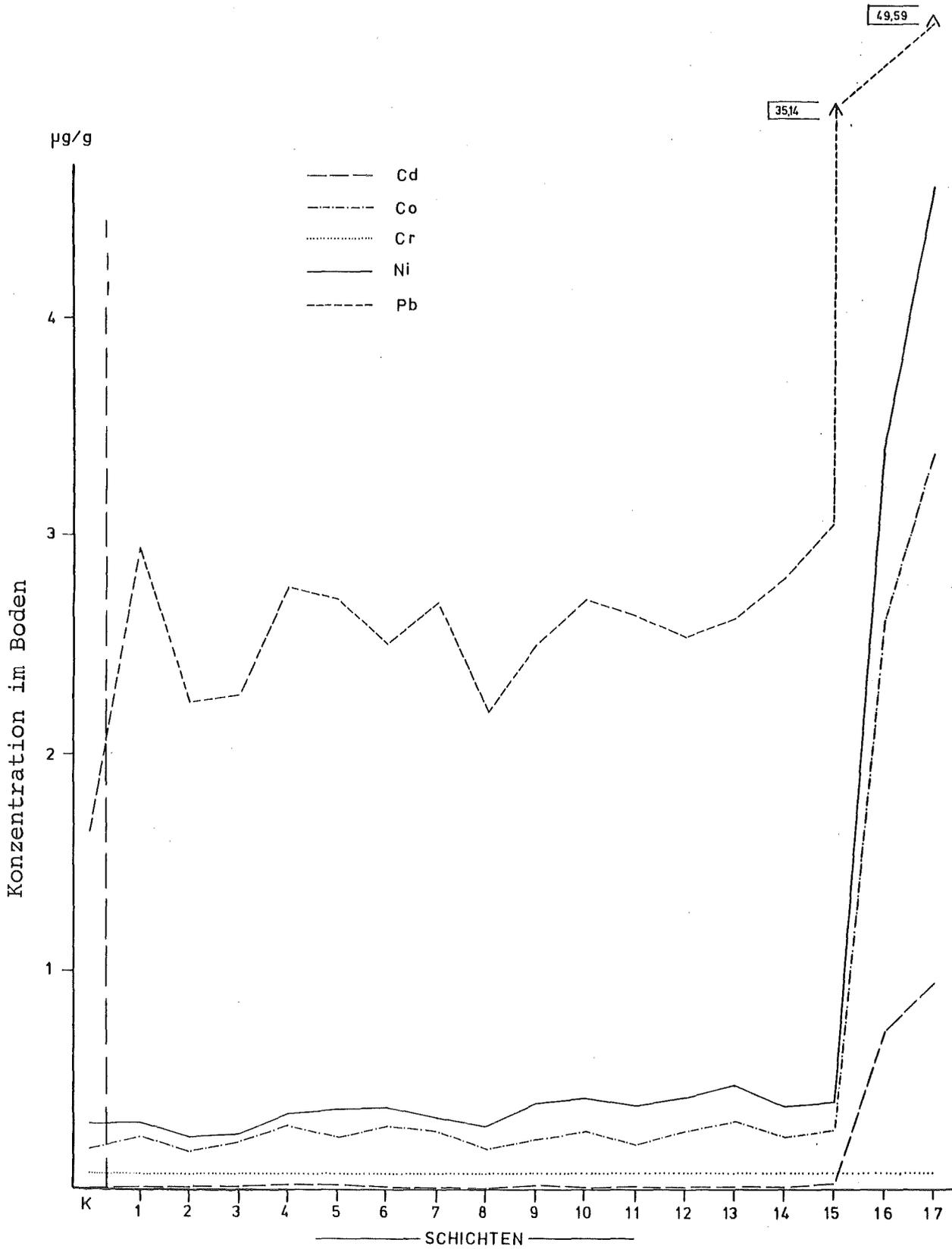


Abb. 2/7: Der EDTA-lösliche Anteil der Elemente Cd, Co, Cr, Ni und Pb pro Schicht in Säule 7 im Vergleich zur Kontrolle

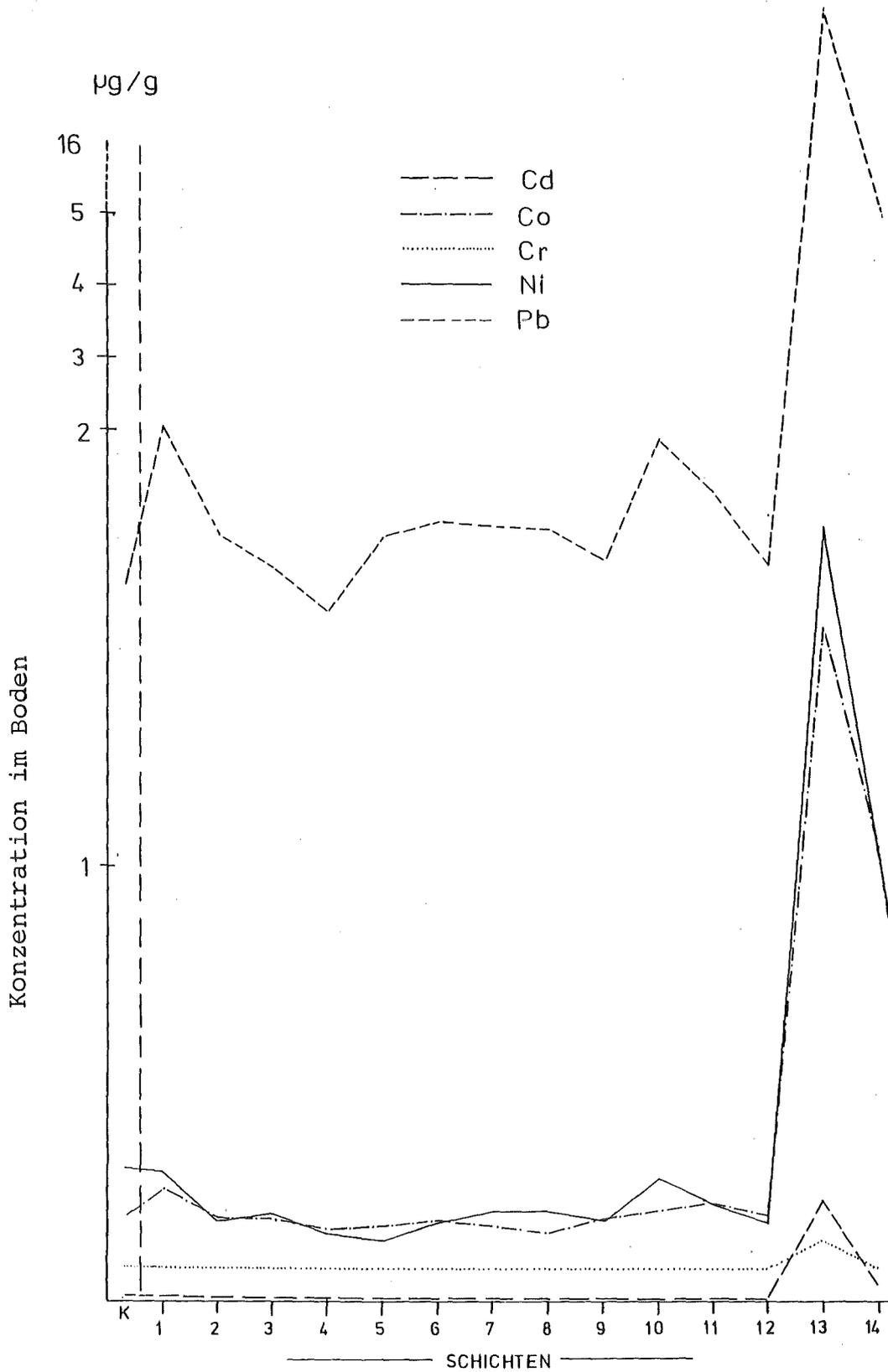


Abb. 2/8: Der EDTA-lösliche Anteil der Elemente Cd, Co, Cr, Ni und Pb pro Schicht in Säule 8 im Vergleich zur Kontrolle

Anhangtabelle 1: HNO_3 -lösliche Schadstoffe in den einzelnen Bodenschichten von Säule Nr. 1

Nr.	Schichttiefe in cm	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
	Kontrolle	0,09 ±0,01	0,92 ±0,05	0,52 ±0,08	1,48 ±0,09	4,3 ±0,5
1	0 - 4,7	0,100±0,007	1,10 ±0,03	0,71 ±0,06	1,75 ±0,07	4,6 ±0,1
2	4,7 -10,4	0,10 ±0,01	1,07 ±0,03	0,70 ±0,03	1,71 ±0,06	4,4 ±0,2
3	10,4 -16,5	0,11 ±0,01	1,07 ±0,03	0,7 ±0,1	1,75 ±0,04	4,6 ±0,1
4	16,5 -22,9	0,10 ±0,02	1,06 ±0,03	0,76 ±0,06	1,77 ±0,05	4,7 ±0,4
5	22,9 -28,9	0,086±0,009	1,01 ±0,04	0,70 ±0,03	1,66 ±0,07	4,3 ±0,2
6	28,9 -36,1	0,094±0,008	1,03 ±0,02	0,75 ±0,08	1,7 ±0,1	5 ±1
7	36,1 -40,4	0,09 ±0,02	1,01 ±0,03	0,81 ±0,05	1,7 ±0,1	4,2 ±0,2
8	40,4 -44,5	0,089±0,007	1,05 ±0,04	0,81 ±0,01	1,76 ±0,01	4,3 ±0,3
9	44,5 -51,4	0,09 ±0,01	0,97 ±0,03	0,67 ±0,02	1,60 ±0,03	4,16 ±0,08
10	51,4 -57,2	0,095±0,003	1,02 ±0,03	0,71 ±0,03	1,64 ±0,03	4,17 ±0,09
11	57,2 -63,9	0,10 ±0,01	0,99 ±0,02	0,65 ±0,07	1,59 ±0,09	4,2 ±0,1
12	63,9 -69,6	0,11 ±0,01	1,04 ±0,02	0,72 ±0,04	1,71 ±0,05	4,4 ±0,1
13	69,6 -75,0	0,116±0,009	1,29 ±0,02	1,57 ±0,03	2,8 ±0,1	4,9 ±0,1
14	75,0 -81,8	0,109±0,008	1,27 ±0,03	1,53 ±0,02	2,8 ±0,1	11 ±13
15	81,8 -90,0	0,04 ±0,02	0,65 ±0,06	0,46 ±0,05	1,77 ±0,07	1,4 ±0,2

Anhangtabelle 2: HNO₃-lösliche Schadstoffgehalte in den einzelnen Bodenschichten von Säule Nr. 2

Nr.	Schichttiefe in cm	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
	Kontrolle	0,09 ±0,01	0,92 ±0,05	0,52 ±0,08	1,48 ±0,09	4,3 ± 0,5
1	0 - 5,2	0,11 ±0,02	1,19 ±0,04	0,66 ±0,05	1,83 ±0,08	5,4 ± 0,4
2	5,2-10,7	0,10 ±0,02	1,08 ±0,03	0,63 ±0,06	1,66 ±0,09	4,9 ± 0,3
3	10,7-16,5	0,11 ±0,02	1,10 ±0,04	0,71 ±0,08	1,7 ±0,1	5,1 ± 0,4
4	16,5-21,3	0,099±0,008	1,09 ±0,06	0,61 ±0,08	1,64 ±0,09	4,8 ± 0,2
5	21,3-28,0	0,10 ±0,02	0,98 ±0,05	0,87 ±0,09	1,6 ±0,1	5 ± 2
6	28,0-33,7	0,10 ±0,01	1,05 ±0,02	0,71 ±0,08	1,67 ±0,06	4,7 ± 0,2
7	33,7-39,6	0,10 ±0,01	1,00 ±0,04	0,7 ±0,1	1,55 ±0,07	4,5 ± 0,3
8	39,6-45,6	0,08 ±0,03	1,00 ±0,04	0,66 ±0,7	1,58 ±0,05	4,6 ± 0,3
9	45,6-51,2	0,09 ±0,01	0,95 ±0,03	0,7 ±0,1	1,53 ±0,04	4,4 ± 0,2
10	51,2-59,2	0,090±0,008	0,05 ±0,06	0,62 ±0,09	1,4 ±0,1	4,3 ± 0,1
11	59,2-66,2	0,10 ±0,01	0,95 ±0,01	0,58 ±0,09	1,45 ±0,05	4,4 ± 0,2
12	66,2-72,1	0,09 ±0,02	0,92 ±0,04	0,62 ±0,02	1,40 ±0,02	4,2 ± 0,2
13	72,1-81,9	0,089±0,008	0,91 ±0,05	0,60 ±0,07	1,44 ±0,08	4,1 ± 0,2
14	81,9-89,5	0,05 ±0,01	0,61 ±0,06	0,38 ±0,06	1,3 ±0,1	1,8 ± 0,1

Anhangtabelle 3: HNO_3 -lösliche Schadstoffgehalte in den einzelnen Bodenschichten von Säule Nr. 3

Nr.	Schichttiefe in cm	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
	Kontrolle	0,09 ±0,01	0,92 ±0,05	0,52 ±0,08	1,48 ±0,09	4,3 ± 0,5
1	0 - 5,1	0,10 ±0,02	1,17 ±0,07	0,65 ±0,04	1,87 ±0,04	5,2 ± 0,2
2	5,1 - 9,2	0,11 ±0,01	1,04 ±0,03	0,59 ±0,04	1,78 ±0,05	4,8 ± 0,1
3	9,2 -13,3	0,136±0,008	1,139±0,04	1,58 ±0,07	3,2 ±0,1	5,5 ± 0,2
4	13,3 -18,3	0,13 ±0,01	1,43 ±0,04	1,61 ±0,04	2,99 ±0,07	5,6 ± 0,3
5	18,3 -23,4	0,113±0,009	1,16 ±0,02	0,68 ±0,08	1,86 ±0,08	5,3 ± 0,1
6	23,4 -27,9	0,109±0,006	1,06 ±0,02	0,55 ±0,04	1,72 ±0,03	4,8 ± 0,2
7	27,9 -32,5	0,11 ±0,01	1,09 ±0,03	0,62 ±0,07	1,82 ±0,06	4,9 ± 0,1
8	32,5 -36,2	0,11 ±0,02	1,02 ±0,05	0,56 ±0,05	1,70 ±0,08	4,3 ± 0,3
9	36,2 -41,9	0,11 ±0,02	1,06 ±0,04	0,63 ±0,07	1,8 ±0,1	4,5 ± 0,1
10	41,9 -47,5	0,11 ±0,02	0,96 ±0,02	0,54 ±0,07	1,61 ±0,03	4,17± 0,09
11	47,5 -54,1	0,09 ±0,02	1,06 ±0,04	0,67 ±0,05	1,78 ±0,07	4,5 ± 0,2
12	54,1 -58,8	0,10 ±0,01	1,08 ±0,03	0,72 ±0,03	1,87 ±0,06	4,3 ± 0,1
13	58,8 -63,5	0,104±0,007	1,00 ±0,03	0,62 ±0,06	1,70 ±0,06	4,3 ± 0,1
14	63,5 -69,6	0,08 ±0,02	0,98 ±0,05	0,65 ±0,02	1,61 ±0,08	4,3 ± 0,2
15	69,6 -75,8	0,07 ±0,01	0,94 ±0,04	0,66 ±0,06	1,61 ±0,02	3,97± 0,08

Anhangtabelle 4: HNO₃-lösliche Schadstoffgehalte in den einzelnen Bodenschichten von Säule Nr. 4

Nr.	Schichttiefe in cm	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
	Kontrolle	0,09 ± 0,01	0,92 ± 0,05	0,52 ± 0,08	1,48 ± 0,09	4,3 ± 0,5
1	0 - 3,8	0,10 ± 0,02	1,17 ± 0,05	0,46 ± 0,02	1,9 ± 0,1	5,1 ± 0,3
2	4,6 - 8,1	0,09 ± 0,01	1,11 ± 0,05	0,8 ± 0,6	1,88 ± 0,08	5,4 ± 0,8
3	8,1 - 12,5	0,08 ± 0,01	1,05 ± 0,04	0,45 ± 0,05	1,81 ± 0,08	4,8 ± 0,1
4	12,5 - 17,6	0,10 ± 0,02	1,14 ± 0,04	0,48 ± 0,02	1,86 ± 0,05	5,33 ± 0,05
5	17,6 - 22,8	0,08 ± 0,01	1,16 ± 0,06	0,50 ± 0,02	2,0 ± 0,1	5,5 ± 0,4
6	22,8 - 27,8	0,10 ± 0,03	1,19 ± 0,04	0,51 ± 0,03	2,0 ± 0,1	5,7 ± 0,6
7	27,8 - 33,1	0,07 ± 0,01	1,05 ± 0,07	0,44 ± 0,03	1,86 ± 0,09	5,0 ± 0,05
8	33,1 - 38,7	0,082 ± 0,004	1,08 ± 0,05	0,5 ± 0,1	1,82 ± 0,08	4,7 ± 0,2
9	38,7 - 44,7	0,082 ± 0,004	1,11 ± 0,03	0,46 ± 0,03	1,96 ± 0,03	5,2 ± 0,4
10	44,7 - 50,5	0,08 ± 0,01	1,07 ± 0,03	0,48 ± 0,03	1,93 ± 0,06	4,9 ± 0,05
11	50,5 - 56,4	0,08 ± 0,02	1,08 ± 0,04	0,48 ± 0,04	1,90 ± 0,09	4,8 ± 0,3
12	56,4 - 61,7	0,08 ± 0,01	1,07 ± 0,04	0,49 ± 0,03	1,99 ± 0,06	4,7 ± 0,03
13	61,7 - 66,6	0,08 ± 0,02	1,06 ± 0,03	0,52 ± 0,05	1,90 ± 0,09	4,8 ± 0,4
14	66,5 - 71,9	0,08 ± 0,01	1,0 ± 0,1	0,45 ± 0,01	1,8 ± 0,2	4,5 ± 0,3
15	71,9 - 78,3	0,08 ± 0,01	1,18 ± 0,09	0,52 ± 0,06	2,2 ± 0,1	4,9 ± 0,3

Anhangtabelle 5: HNO_3 -lösliche Schadstoffgehalte in den einzelnen Bodenschichten von Säule Nr. 5

Nr.	Schichttiefe in cm	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
	Kontrolle	0,09 ± 0,01	0,09 ± 0,05	0,52 ± 0,08	1,48 ± 0,09	4,3 ± 0,5
1	0 - 3,8	0,121 ± 0,008	1,22 ± 0,04	0,70 ± 0,08	1,89 ± 0,08	5,5 ± 0,3
2	3,8 - 8,2	0,11 ± 0,01	1,11 ± 0,07	0,61 ± 0,09	1,6 ± 0,1	4,9 ± 0,3
3	8,2 - 13,2	0,102 ± 0,005	1,12 ± 0,05	0,70 ± 0,03	1,78 ± 0,03	4,7 ± 0,2
4	13,2 - 17,5	0,12 ± 0,01	1,12 ± 0,05	0,72 ± 0,07	1,76 ± 0,06	4,8 ± 0,2
5	17,5 - 22,2	0,126 ± 0,007	1,21 ± 0,05	0,7 ± 0,1	1,86 ± 0,08	5,4 ± 0,4
6	22,2 - 24,9	0,14 ± 0,01	1,28 ± 0,04	0,63 ± 0,04	1,86 ± 0,04	5,9 ± 0,5
7	24,9 - 27,1	0,59 ± 0,05	5,1 ± 0,4	2,1 ± 0,2	6,2 ± 0,5	28 ± 2
8	27,1 - 32,5	0,139 ± 0,007	1,26 ± 0,06	0,80 ± 0,04	2,0 ± 0,1	5,4 ± 0,4
9	32,5 - 37,2	0,101 ± 0,006	1,02 ± 0,03	0,62 ± 0,04	1,59 ± 0,04	4,4 ± 0,2
10	37,2 - 41,3	0,11 ± 0,01	1,01 ± 0,04	0,68 ± 0,05	1,62 ± 0,06	4,6 ± 0,4
11	41,3 - 46,5	0,100 ± 0,008	1,05 ± 0,03	0,73 ± 0,06	1,74 ± 0,07	4,7 ± 0,2
12	46,5 - 50,5	0,10 ± 0,03	1,06 ± 0,01	0,69 ± 0,05	1,69 ± 0,06	4,8 ± 0,3
13	50,5 - 55,6	0,115 ± 0,008	1,31 ± 0,04	1,50 ± 0,08	2,73 ± 0,05	5,4 ± 0,3
14	55,6 - 60,8	0,126 ± 0,009	1,35 ± 0,03	1,59 ± 0,06	2,79 ± 0,03	5,0 ± 0,1
15	60,8 - 66,7	0,09 ± 0,02	0,99 ± 0,07	0,55 ± 0,05	1,59 ± 0,08	4,3 ± 0,2
16	66,7 - 72,7	0,09 ± 0,02	0,99 ± 0,04	0,60 ± 0,07	1,6 ± 0,1	4,5 ± 0,3
17	72,7 - 78,5	0,12 ± 0,01	0,95 ± 0,03	0,63 ± 0,05	1,59 ± 0,06	4,4 ± 0,3
18	78,5 - 86,5	0,06 ± 0,01	0,76 ± 0,03	0,50 ± 0,09	1,93 ± 0,03	1,84 ± 0,06

Anhangtabelle 6: HNO_3 -lösliche Schadstoffgehalte in den einzelnen Bodenschichten von Säule Nr. 6

Nr.	Schichttiefe in cm	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
	Kontrolle	0,09 ± 0,01	0,92 ± 0,05	0,52 ± 0,08	1,48 ± 0,09	
1	0 - 3,9	0,13 ± 0,03	1,32 ± 0,06	0,79 ± 0,07	2,02 ± 0,08	
2	3,9 - 9,0	0,13 ± 0,01	1,16 ± 0,05	0,74 ± 0,05	1,84 ± 0,06	
3	9,0 - 13,7	0,126 ± 0,006	1,18 ± 0,06	0,86 ± 0,08	1,9 ± 0,1	
4	13,7 - 19,5	0,13 ± 0,01	1,24 ± 0,07	0,83 ± 0,05	1,98 ± 0,08	
5	19,5 - 24,4	0,14 ± 0,01	1,23 ± 0,03	0,86 ± 0,03	1,92 ± 0,02	
6	24,4 - 30,0	0,13 ± 0,02	1,21 ± 0,07	0,7 ± 0,1	1,9 ± 0,1	
7	30,0 - 33,5	0,14 ± 0,02	1,32 ± 0,05	0,79 ± 0,06	1,99 ± 0,07	
8	33,5 - 35,3	1,05 ± 0,08	9,1 ± 0,6	3,1 ± 0,2	10,5 ± 0,8	
9	35,3 - 40,5	0,13 ± 0,08	1,10 ± 0,04	0,73 ± 0,05	1,71 ± 0,07	
10	40,5 - 46,4	0,11 ± 0,07	1,02 ± 0,02	0,71 ± 0,07	1,65 ± 0,09	
11	46,4 - 51,5	0,104 ± 0,009	1,02 ± 0,03	0,73 ± 0,06	1,71 ± 0,07	
12	51,5 - 57,1	0,10 ± 0,01	0,93 ± 0,02	0,71 ± 0,09	1,58 ± 0,07	
13	57,1 - 62,6	0,10 ± 0,02	0,99 ± 0,05	0,7 ± 0,1	1,7 ± 0,2	
14	62,6 - 68,6	0,11 ± 0,02	0,95 ± 0,05	0,7 ± 0,2	1,65 ± 0,08	
15	68,6 - 77,4	0,11 ± 0,03	0,96 ± 0,08	0,77 ± 0,09	1,7 ± 0,2	

Anhangtabelle 7: HNO_3 -lösliche Schadstoffgehalte in den einzelnen Bodenschichten von Säule Nr. 7

Nr.	Schichttiefe in cm	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
	Kontrolle	0,09 ± 0,01	0,92 ± 0,05	0,52 ± 0,08	1,48 ± 0,09	
1	0 - 3,5	0,10 ± 0,01	1,14 ± 0,02	0,81 ± 0,08	1,88 ± 0,04	
2	3,5 - 8,1	0,09 ± 0,01	1,10 ± 0,03	0,78 ± 0,07	1,82 ± 0,07	
3	8,1 - 11,6	0,09 ± 0,02	1,13 ± 0,04	0,79 ± 0,07	1,84 ± 0,09	
4	11,6 - 15,7	0,10 ± 0,01	1,04 ± 0,05	0,57 ± 0,07	1,63 ± 0,05	
5	15,7 - 20,1	0,11 ± 0,01	1,08 ± 0,05	0,70 ± 0,03	1,72 ± 0,07	
6	20,1 - 25,2	0,10 ± 0,01	1,03 ± 0,02	0,63 ± 0,03	1,69 ± 0,05	
7	25,2 - 30,3	0,10 ± 0,02	1,2 ± 0,2	1,2 ± 0,5	2,4 ± 0,7	
8	30,3 - 36,3	0,11 ± 0,02	1,34 ± 0,03	1,52 ± 0,07	2,9 ± 0,1	
9	36,3 - 41,7	0,11 ± 0,01	1,35 ± 0,06	1,5 ± 0,1	2,98 ± 0,06	
10	41,7 - 47,8	0,10 ± 0,01	1,06 ± 0,03	0,60 ± 0,06	1,61 ± 0,02	
11	47,8 - 52,8	0,10 ± 0,02	1,08 ± 0,06	0,70 ± 0,05	1,67 ± 0,06	
12	52,8 - 58,3	0,10 ± 0,01	1,06 ± 0,04	0,63 ± 0,05	1,7 ± 0,1	
13	58,3 - 63,8	0,11 ± 0,02	1,12 ± 0,05	0,72 ± 0,04	1,81 ± 0,07	
14	63,8 - 70,0	0,13 ± 0,06	1,05 ± 0,03	0,57 ± 0,06	1,67 ± 0,09	
15	70,0 - 74,9	0,11 ± 0,01	1,15 ± 0,03	0,67 ± 0,07	1,83 ± 0,05	
16	74,9 - 77,2	0,83 ± 0,05	7,6 ± 0,4	4,1 ± 0,2	10,0 ± 0,6	
17	77,2 - 85,0	0,06 ± 0,01	1,12 ± 0,04	1,10 ± 0,05	3,53 ± 0,07	

Anhangtabelle 8: HNO₃-lösliche Schadstoffgehalte in den einzelnen Bodenschichten von Säule Nr. 8

Nr.	Schichttiefe in cm	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
	Kontrolle	0,09 ± 0,01	0,92 ± 0,05	0,52 ± 0,08	1,5 ± 0,1	4,3 ± 0,5
1	0 - 4,0	0,12 ± 0,02	1,04 ± 0,04	0,67 ± 0,06	1,6 ± 0,1	4,4 ± 0,2
2	4,0 - 10,3	0,107 ± 0,004	1,06 ± 0,02	0,78 ± 0,06	1,69 ± 0,04	4,4 ± 0,1
3	10,3 - 14,6	0,10 ± 0,01	1,06 ± 0,05	0,68 ± 0,05	1,61 ± 0,05	4,4 ± 0,5
4	14,6 - 19,7	0,11 ± 0,01	1,07 ± 0,02	0,74 ± 0,06	1,61 ± 0,04	4,3 ± 0,2
5	19,7 - 26,2	0,11 ± 0,01	1,07 ± 0,04	0,68 ± 0,06	1,6 ± 0,1	4,6 ± 0,3
6	26,2 - 31,5	0,12 ± 0,02	1,08 ± 0,08	0,68 ± 0,04	1,7 ± 0,1	4,6 ± 0,1
7	31,5 - 38,1	0,12 ± 0,02	0,11 ± 0,04	0,74 ± 0,08	1,7 ± 0,1	4,6 ± 0,2
8	38,1 - 42,7	0,12 ± 0,01	1,07 ± 0,07	0,71 ± 0,05	1,6 ± 0,1	4,7 ± 0,3
9	42,7 - 49,5	0,11 ± 0,02	1,07 ± 0,01	0,66 ± 0,06	1,6 ± 0,1	4,4 ± 0,2
10	49,5 - 55,8	0,10 ± 0,01	1,07 ± 0,03	0,74 ± 0,03	1,7 ± 0,1	4,5 ± 0,2
11	55,8 - 62,3	0,10 ± 0,01	1,10 ± 0,02	0,68 ± 0,05	1,7 ± 0,1	4,5 ± 0,1
12	62,3 - 68,3	0,13 ± 0,01	1,05 ± 0,04	0,67 ± 0,06	1,6 ± 0,1	4,6 ± 0,6
13	68,3 - 75,5	0,33 ± 0,03	2,8 ± 0,1	1,21 ± 0,07	3,8 ± 0,2	15 ± 1
14	75,5 - 84,5	0,16 ± 0,01	1,6 ± 0,2	0,71 ± 0,03	2,6 ± 0,2	6,2 ± 0,5

Anhangtabelle 9: EDTA-lösliche Schadstoffgehalte in den einzelnen Bodenschichten von Säule Nr. 1

Nr.	Schichttiefe in cm	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
	Kontrolle	0,010±0,000	0,20 ± 0,04	0,080±0,000	0,31 ± 0,05	1,7 ± 0,2
1	0 - 4,7	0,08 ±0,02	0,34 ± 0,04	0,080±0,000	0,51 ± 0,09	2,5 ± 0,2
2	4,7 - 10,4	0,06 ±0,01	0,30 ± 0,04	0,080±0,000	0,46 ± 0,07	2,5 ± 0,2
3	10,4 - 16,5	0,08 ±0,01	0,26 ± 0,02	0,080±0,000	0,42 ± 0,05	2,3 ± 0,2
4	16,5 - 22,9	0,08 ±0,02	0,27 ± 0,05	0,080±0,000	0,42 ± 0,08	2,0 ± 0,1
5	22,9 - 28,9	0,04 ±0,01	0,25 ± 0,04	0,080±0,000	0,40 ± 0,04	2,0 ± 0,2
6	28,9 - 36,1	0,044±0,008	0,26 ± 0,02	0,080±0,000	0,34 ± 0,02	1,7 ± 0,2
7	36,1 - 40,4	0,06 ±0,02	0,30 ± 0,03	0,080±0,000	0,44 ± 0,03	2,1 ± 0,2
8	40,4 - 44,5	0,05 ±0,02	0,30 ± 0,05	0,080±0,000	0,46 ± 0,03	2,0 ± 0,2
9	44,5 - 51,4	0,07 ±0,02	0,26 ± 0,01	0,080±0,000	0,34 ± 0,06	2,00± 0,09
10	51,4 - 57,2	0,06 ±0,01	0,23 ± 0,01	0,080±0,000	0,38 ± 0,04	1,9 ± 0,1
11	57,2 - 63,9	0,05 ±0,02	0,21 ± 0,03	0,080±0,000	0,29 ± 0,05	1,94± 0,06
12	63,9 - 69,6	0,07 ±0,01	0,25 ± 0,03	0,080±0,000	0,33 ± 0,08	2,1 ± 0,1
13	69,6 - 75,0	0,06 ±0,01	0,30 ± 0,02	0,080±0,000	0,40 ± 0,05	2,4 ± 0,2
14	75,0 - 81,8	0,07 ±0,02	0,27 ± 0,06	0,080±0,000	0,40 ± 0,02	2,2 ± 0,1
15	81,8 - 90,0	0,024±0,003	0,33 ± 0,04	0,080±0,000	0,38 ± 0,05	0,5 ± 0,2

Anhangtabelle 10: EDTA-lösliche Schadstoffgehalte in den einzelnen Bodenschichten von Säule Nr. 2

Nr.	Schichttiefe in cm	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
	Kontrolle	0,010±0,000	0,20 ± 0,04	0,080±0,000	0,31 ± 0,05	1,7 ± 0,2
1	0 - 5,2	0,078±0,008	0,22 ± 0,03	0,080±0,000	0,42 ± 0,03	2,7 ± 0,2
2	5,2 - 10,7	0,062±0,006	0,22 ± 0,02	0,080±0,000	0,39 ± 0,04	2,2 ± 0,1
3	10,7 - 16,5	0,069±0,007	0,24 ± 0,03	0,080±0,000	0,39 ± 0,06	2,3 ± 0,1
4	16,5 - 21,3	0,09 ± 0,02	0,24 ± 0,03	0,082±0,004	0,43 ± 0,06	2,7 ± 0,2
5	21,3 - 28,0	0,069±0,006	0,22 ± 0,01	0,080±0,000	0,40 ± 0,03	2,3 ± 0,2
6	28,0 - 33,7	0,07 ± 0,02	0,25 ± 0,02	0,080±0,000	0,47 ± 0,04	2,5 ± 0,2
7	33,7 - 39,6	0,069±0,009	0,19 ± 0,03	0,080±0,000	0,39 ± 0,04	2,2 ± 0,3
8	39,6 - 45,6	0,08 ± 0,02	0,31 ± 0,01	0,080±0,000	0,56 ± 0,06	2,6 ± 0,2
9	45,6 - 51,2	0,08 ± 0,02	0,24 ± 0,01	0,080±0,000	0,44 ± 0,04	2,37± 0,09
10	51,2 - 59,2	0,08 ± 0,02	0,30 ± 0,02	0,080±0,000	0,52 ± 0,07	2,6 ± 0,1
11	59,2 - 66,2	0,08 ± 0,01	0,31 ± 0,03	0,080±0,000	0,52 ± 0,04	2,4 ± 0,2
12	66,2 - 72,1	0,07 ± 0,01	0,26 ± 0,01	0,080±0,000	0,49 ± 0,05	2,21± 0,05
13	72,1 - 81,9	0,076±0,008	0,23 ± 0,04	0,080±0,000	0,46 ± 0,08	2,2 ± 0,2
14	81,9 - 89,5	0,08 ± 0,01	0,36 ± 0,03	0,083±0,007	0,63 ± 0,07	1,2 ± 0,2

Anhangtabelle 11: EDTA-lösliche Schadstoffgehalte in den einzelnen Bodenschichten von Säule Nr. 3

Nr.	Schichttiefe in cm	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
	Kontrolle	0,010±0,000	0,20 ± 0,04	0,080±0,000	0,31 ± 0,05	1,7 ± 0,2
1	0 - 5,1	0,07 ±0,02	0,32 ± 0,01	0,080±0,000	0,59 ± 0,06	3,3 ± 0,3
2	5,1 - 9,2	0,05 ±0,02	0,29 ± 0,02	0,080±0,000	0,6 ± 0,1	3,0 ± 0,4
3	9,2 - 13,3	0,06 ±0,02	0,33 ± 0,05	0,080±0,000	0,54 ± 0,09	3,3 ± 0,5
4	13,3 - 18,3	0,06 ±0,02	0,25 ± 0,03	0,080±0,000	0,5 ± 0,1	3,3 ± 0,2
5	18,3 - 23,4	0,06 ±0,03	0,30 ± 0,02	0,080±0,000	0,58 ± 0,06	3,4 ± 0,2
6	23,4 - 27,9	0,05 ±0,03	0,28 ± 0,03	0,080±0,000	0,47 ± 0,07	3,1 ± 0,5
7	27,9 - 32,5	0,06 ±0,02	0,27 ± 0,05	0,080±0,000	0,56 ± 0,05	3,2 ± 0,2
8	32,5 - 36,2	0,05 ±0,04	0,29 ± 0,04	0,080±0,000	0,51 ± 0,06	2,7 ± 0,2
9	36,2 - 41,9	0,07 ±0,01	0,29 ± 0,03	0,080±0,000	0,51 ± 0,04	2,8 ± 0,3
10	41,9 - 47,5	0,06 ±0,01	0,29 ± 0,05	0,080±0,000	0,51 ± 0,07	2,7 ± 0,3
11	47,5 - 54,1	0,04 ±0,01	0,26 ± 0,05	0,080±0,000	0,50 ± 0,04	2,5 ± 0,2
12	54,1 - 58,8	0,07 ±0,02	0,31 ± 0,07	0,080±0,000	0,54 ± 0,06	2,6 ± 0,2
13	58,8 - 63,5	0,05 ±0,02	0,30 ± 0,03	0,080±0,000	0,61 ± 0,03	2,6 ± 0,2
14	63,5 - 69,6	0,06 ±0,01	0,28 ± 0,06	0,080±0,000	0,62 ± 0,06	2,49± 0,05
15	69,6 - 75,8	0,043±0,006	0,24 ± 0,04	0,080±0,000	0,47 ± 0,03	2,4 ± 0,2
16	75,8 - 89,0	0,05 ±0,02	0,46 ± 0,04	0,080±0,000	0,66 ± 0,04	1,09 0,06

Anhangtabelle 12: EDTA-lösliche Schadstoffgehalte in den einzelnen Bodenschichten von Säule Nr. 4

Nr.	Schichttiefe in cm	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
	Kontrolle	0,010±0,000	0,20 ± 0,04	0,080±0,000	0,31 ± 0,05	1,7 ± 0,2
1	0 - 3,8	0,08 ±0,02	0,39 ± 0,05	0,080±0,000	0,5 ± 0,1	3,5 ± 0,9
2	4,6 - 8,1	0,07 ±0,01	0,34 ± 0,03	0,09 ±0,03	0,50 ± 0,02	3,2 ± 0,2
3	8,1 - 12,5	0,067±0,009	0,32 ± 0,01	0,080±0,000	0,35 ± 0,02	2,9 ± 0,1
4	12,5 - 17,6	0,09 ±0,01	0,33 ± 0,04	0,080±0,000	0,36 ± 0,07	3,3 ± 0,4
5	17,6 - 22,8	0,08 ±0,01	0,36 ± 0,03	0,080±0,000	0,45 ± 0,03	3,5 ± 0,3
6	22,8 - 27,8	0,082±0,007	0,38 ± 0,04	0,080±0,000	0,45 ± 0,04	3,5 ± 0,4
7	27,8 - 33,1	0,075±0,006	0,42 ± 0,04	0,080±0,000	0,55 ± 0,08	3,2 ± 0,2
8	33,1 - 38,7	0,07 ±0,01	0,43 ± 0,05	0,081±0,002	0,5 ± 0,1	2,90± 0,05
9	38,7 - 44,7	0,05 ±0,01	0,26 ± 0,02	0,080±0,000	0,3 ± 0,1	2,3 ± 0,2
10	44,7 - 50,5	0,05 ±0,02	0,25 ± 0,01	0,080±0,000	0,28 ± 0,03	2,3 ± 0,2
11	50,5 - 56,4	0,05 ±0,01	0,32 ± 0,02	0,080±0,000	0,40 ± 0,05	2,3 ± 0,2
12	56,4 - 61,7	0,05 ±0,02	0,28 ± 0,02	0,080±0,000	0,35 ± 0,03	2,1 ± 0,1
13	61,7 - 66,6	0,07 ±0,02	0,35 ± 0,02	0,080±0,000	0,64 ± 0,05	2,5 ± 0,2
14	66,6 - 71,9	0,06 ±0,02	0,34 ± 0,03	0,080±0,000	0,61 ± 0,03	2,3 ± 0,3
15	71,9 - 78,3	0,06 ±0,02	0,22 ± 0,03	0,080±0,000	0,46 ± 0,02	1,9 ± 0,2
16	78,3 - 92,0	0,02 ±0,01	0,36 ± 0,05	0,080±0,000	0,61 ± 0,07	0,5 ± 0,1

Anhangtabelle 13: EDTA-lösliche Schadstoffgehalte in den einzelnen Bodenschichten von Säule Nr. 5

Nr.	Schichttiefe in cm	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
	Kontrolle	0,010±0,000	0,20 ± 0,04	0,080±0,000	0,32 ± 0,05	1,7 ± 0,2
1	0 - 3,8	0,13 ±0,03	0,37 ± 0,09	0,080±0,000	0,6 ± 0,1	5 ± 1
2	3,8 - 8,2	0,08 ±0,02	0,32 ± 0,02	0,080±0,000	0,4 ± 0,1	3,2 ± 0,3
3	8,2 - 13,2	0,07 ±0,03	0,32 ± 0,02	0,080±0,000	0,41 ± 0,03	3,0 ± 0,4
4	13,2 - 17,5	0,09 ±0,03	0,34 ± 0,04	0,080±0,000	0,44 ± 0,08	3,3 ± 0,5
5	17,5 - 22,2	0,11 ±0,02	0,32 ± 0,04	0,080±0,000	0,48 ± 0,03	3,29± 0,07
6	22,2 - 24,9	0,12 ±0,02	0,43 ± 0,04	0,080±0,000	0,60 ± 0,06	4,3 ± 0,4
7	24,9 - 27,1	0,67 ±0,08	2,3 ± 0,3	0,080±0,000	3,2 ± 0,4	31 ± 4
8	27,1 - 32,5	0,10 ±0,02	0,39 ± 0,05	0,080±0,000	0,63 ± 0,06	3,5 ± 0,2
9	32,5 - 37,2	0,08 ±0,01	0,37 ± 0,04	0,080±0,000	0,5 ± 0,1	3,3 ± 0,3
10	37,2 - 41,3	0,10 ±0,02	0,40 ± 0,04	0,080±0,000	0,59 ± 0,05	3,1 ± 0,2
11	41,3 - 46,5	0,08 ±0,01	0,27 ± 0,05	0,080±0,000	0,40 ± 0,07	2,7 ± 0,3
12	46,5 - 50,5	0,09 ±0,02	0,38 ± 0,03	0,080±0,000	0,5 ± 0,1	3,1 ± 0,3
13	50,5 - 55,6	0,08 ±0,02	0,36 ± 0,02	0,080±0,000	0,57 ± 0,08	3,1 ± 0,5
14	55,6 - 60,8	0,09 ±0,04	0,41 ± 0,04	0,080±0,000	0,64 ± 0,04	3,5 ± 0,2
15	60,8 - 66,7	0,08 ±0,02	0,30 ± 0,03	0,080±0,000	0,4 ± 0,1	2,6 ± 0,3
16	66,7 - 72,7	0,03 ±0,01	0,26 ± 0,02	0,080±0,000	0,45 ± 0,05	2,7 ± 0,3
17	72,7 - 78,5	0,06 ±0,02	0,25 ± 0,02	0,080±0,000	0,41 ± 0,07	2,9 ± 0,4
18	78,5 - 86,5	0,010±0,000	0,31 ± 0,05	0,080±0,000	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,3

Anhangtabelle 14: EDTA-lösliche Schadstoffgehalte in den einzelnen Bodenschichten von Säule Nr. 6

Nr.	Schichttiefe in cm	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
	Kontrolle	0,010±0,000	0,20 ± 0,04	0,080±0,000	0,31 ± 0,05	
1	0 - 3,9	0,09 ±0,02	0,41 ± 0,07	0,080±0,000	0,62 ± 0,07	
2	3,9 - 9,0	0,082±0,007	0,41 ± 0,05	0,080±0,001	0,58 ± 0,05	
3	9,0 - 13,7	0,07 ±0,02	0,45 ± 0,07	0,080±0,000	0,64 ± 0,03	
4	13,7 - 19,5	0,09 ±0,01	0,44 ± 0,07	0,088±0,009	0,66 ± 0,03	
5	19,5 - 24,4	0,74 ±0,008	0,39 ± 0,03	0,080±0,000	0,58 ± 0,01	
6	24,4 - 30,0	0,09 ±0,02	0,44 ± 0,03	0,080±0,000	0,68 ± 0,06	
7	30,0 - 33,5	0,08 ±0,02	0,41 ± 0,02	0,085±0,009	0,59 ± 0,04	
8	33,5 - 35,3	1,4 ±0,2	6,2 ± 0,6	0,31 ±0,02	7,9 ± 0,6	
9	35,3 - 40,5	0,071±0,006	0,30 ± 0,02	0,080±0,000	0,481± 0,004	
10	40,5 - 46,4	0,07 ±0,03	0,27 ± 0,04	0,080±0,000	0,42 ± 0,07	
11	46,4 - 51,5	0,06 ±0,01	0,30 ± 0,02	0,085±0,008	0,48 ± 0,03	
12	51,5 - 57,1	0,05 ±0,01	0,29 ± 0,03	0,080±0,000	0,507± 0,009	
13	57,1 - 62,6	0,04 ±0,01	0,30 ± 0,04	0,080±0,000	0,44 ± 0,05	
14	62,6 - 68,6	0,06 ±0,02	0,294± 0,005	0,080±0,000	0,44 ± 0,05	
15	68,6 - 77,4	0,051±0,007	0,29 ± 0,03	0,080±0,000	0,49 ± 0,04	
16	77,4 - 85,0	0,06 ±0,03	0,99 ± 0,03	0,084±0,008	0,63 ± 0,03	

Anhangtabelle 15: EDTA-lösliche Schadstoffgehalte in den einzelnen Bodenschichten von Säule Nr. 7

Nr.	Schichttiefe in cm	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
	Kontrolle	0,010±0,000	0,20 ± 0,04	0,080±0,000	0,31 ± 0,05	1,7 ± 0,2
1	0 - 3,5	0,015±0,006	0,25 ± 0,07	0,080±0,000	0,31 ± 0,08	2,9 ± 0,6
2	3,5 - 8,1	0,015±0,007	0,19 ± 0,04	0,080±0,000	0,25 ± 0,05	2,2 ± 0,1
3	8,1 - 11,6	0,02 ± 0,01	0,23 ± 0,02	0,080±0,000	0,26 ± 0,03	2,3 ± 0,2
4	11,6 - 15,7	0,03 ± 0,02	0,30 ± 0,05	0,080±0,000	0,36 ± 0,06	2,8 ± 0,1
5	15,7 - 20,1	0,03 ± 0,01	0,25 ± 0,03	0,080±0,000	0,38 ± 0,03	2,7 ± 0,3
6	20,1 - 25,2	0,02 ± 0,02	0,30 ± 0,05	0,080±0,000	0,39 ± 0,03	2,5 ± 0,1
7	25,2 - 30,3	0,02 ± 0,02	0,27 ± 0,05	0,080±0,000	0,34 ± 0,04	2,7 ± 0,2
8	30,3 - 36,3	0,010±0,000	0,20 ± 0,06	0,080±0,000	0,30 ± 0,05	2,2 ± 0,3
9	36,3 - 41,7	0,02 ± 0,02	0,24 ± 0,05	0,080±0,000	0,40 ± 0,06	2,5 ± 0,1
10	41,7 - 47,8	0,019±0,006	0,28 ± 0,06	0,080±0,000	0,42 ± 0,07	2,7 ± 0,3
11	47,8 - 52,8	0,020±0,006	0,21 ± 0,06	0,080±0,000	0,4 ± 0,1	2,6 ± 0,3
12	52,8 - 58,3	0,019±0,007	0,28 ± 0,04	0,080±0,000	0,43 ± 0,03	2,5 ± 0,2
13	58,3 - 63,8	0,02 ± 0,01	0,32 ± 0,06	0,080±0,000	0,49 ± 0,04	2,6 ± 0,3
14	63,8 - 70,0	0,02 ± 0,01	0,25 ± 0,03	0,080±0,000	0,38 ± 0,08	2,8 ± 0,2
15	70,0 - 74,9	0,03 ± 0,03	0,28 ± 0,05	0,080±0,000	0,41 ± 0,05	3,1 ± 0,3
16	74,9 - 77,2	0,7 ± 0,1	2,6 ± 0,4	0,080±0,000	3,4 ± 0,5	35 ± 6
17	77,2 - 85,0	0,95 ± 0,09	3,4 ± 0,3	0,082±0,004	4,6 ± 0,5	50 ± 3

Anhangtabelle 16: EDTA-lösliche Schadstoffgehalte in den einzelnen Bodenschichten von Säule Nr. 8

Nr.	Schichttiefe in cm	Cd	Co	Cr	Ni	Pb
	Kontrolle	0,010±0,000	0,20 ± 0,04	0,080±0,000	0,31 ± 0,05	1,7 ± 0,2
1	0 - 4,0	0,010±0,000	0,26 ± 0,04	0,080±0,000	0,30 ± 0,07	2,0 ± 0,2
2	4,0 - 10,3	0,010±0,000	0,19 ± 0,01	0,080±0,000	0,19 ± 0,06	1,8 ± 0,2
3	10,3 - 14,6	0,010±0,000	0,20 ± 0,03	0,080±0,000	0,21 ± 0,02	1,7 ± 0,1
4	14,6 - 19,7	0,010±0,000	0,17 ± 0,03	0,080±0,000	0,16 ± 0,06	1,6 ± 0,1
5	19,7 - 26,2	0,010±0,000	0,18 ± 0,02	0,080±0,000	0,15 ± 0,06	1,8 ± 0,1
6	26,2 - 31,5	0,010±0,000	0,19 ± 0,02	0,080±0,000	0,18 ± 0,04	1,8 ± 0,2
7	31,5 - 38,1	0,010±0,000	0,18 ± 0,03	0,080±0,000	0,21 ± 0,05	1,8 ± 0,1
8	38,1 - 42,7	0,010±0,000	0,16 ± 0,06	0,080±0,000	0,21 ± 0,06	1,8 ± 0,1
9	42,7 - 49,5	0,010±0,000	0,19 ± 0,01	0,080±0,000	0,20 ± 0,08	1,7 ± 0,2
10	49,5 - 55,8	0,010±0,000	0,21 ± 0,02	0,080±0,000	0,29 ± 0,03	2,0 ± 0,2
11	55,8 - 62,3	0,010±0,000	0,23 ± 0,02	0,080±0,000	0,23 ± 0,09	1,9 ± 0,1
12	62,3 - 68,3	0,010±0,000	0,20 ± 0,02	0,080±0,000	0,19 ± 0,04	1,7 ± 0,1
13	68,3 - 75,5	0,24 ± 0,07	1,5 ± 0,2	0,1 ± 0,1	1,8 ± 0,3	16 ± 5
14	75,5 - 84,5	0,04 ± 0,02	1,0 ± 0,1	0,080±0,000	1,0 ± 0,1	5,4 ± 0,9

5. Literatur

- Edwards, C.A. and J.R. Lofty, 1972: Biology of Earthworms. Chapman and Hall, London
- Graff, O., 1970: Stickstoff, Phosphor und Kalium in der Regenwurmlosung auf der Wiesenversuchsfläche des Sollnigprojektes. Int. Kongreß über Bodenbiologie 4. Dijon 1970, 503-511
- Ireland, M.P., 1975: The Effect of the Earthworm *Dendrobaena Rubida* on the Solubility of Lead, Zinc, and Calcium in Heavy Metal Contaminated Soil in Wales. Journal Soil Sci. Volume 26, No.3, 313-318
- Lunt, H.A. and Jacobsen, G.M., 1944: The chemical Composition of Earthworm Casts. Ibid. 58, 375-376