

KfK 3996  
Dezember 1985

**Der Einfluß von Cobalt, Chrom  
und Blei auf Pflanzen am  
Beispiel des Grases  
*Lolium multiflorum***

Th. Liese, W. Schmidt  
Hauptabteilung Sicherheit

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Hauptabteilung Sicherheit

KfK 3996

Der Einfluß von Cobalt, Chrom und Blei auf Pflanzen  
am Beispiel des Grases *Lolium multiflorum*

Th. Liese, W. Schmidt

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

## Zusammenfassung

In einem Topfversuch mit *Lolium multiflorum* wurde der Transfer Boden/Pflanze bei Kontaminationsmengen von 5-400  $\mu\text{g}$  Co, 10-1800  $\mu\text{g}$  Pb und 10-1000  $\mu\text{g}$  Cr pro Gramm Boden unter Ausschluß von Depositionen auf die Pflanzen bestimmt.

Höhere Konzentrationen jeweils eines dieser drei Elemente stören die physiologischen Prozesse innerhalb der Pflanzen bis zum Absterben. Die Störung äußerte sich z.B. in geringem Wasserverbrauch und niedrigeren Zuwächsen.

Der Transferfaktor liegt bei Co in der Größenordnung von 0,1 bis 1,3, wobei bei zunehmender Bodenkonzentration der Wert ansteigt und bei hohen Bodenkonzentrationen wieder abfällt. Bei Cr ist der Transferfaktor geringer und schwankt im Bereich  $10^{-4}$  bis  $10^{-2}$ , wobei durch zunehmende Cr-Gehalte im Boden der Transferfaktor abnimmt. Bei Pb ist der Transferfaktor eng zwischen  $1 \cdot 10^{-2}$  und  $3 \cdot 10^{-2}$  vorzufinden, eine Abhängigkeit von der Zeit oder der Bodenkonzentration läßt sich nicht ableiten.

The Transfer Soil to Plant (*Lolium multiflorum*) of Cobalt, Chromium, and Lead

## Summary

A pot experiment was made with *lolium multiflorum* to measure the transfer soil to plant for heavy metals without deposition on the plant surface. The soil contamination varied for Co from 5-400  $\mu\text{g/g}$  soil, for Pb from 10-1800  $\mu\text{g/g}$  soil and for Cr from 10-1000  $\mu\text{g/g}$  soil.

High concentrations of one of these elements influence the physiological processes in the plant. This causes a lower water consumption and lower crop yield.

The transfer factor of Co is in a range from 0.1 to 1.3. The factor increases with increasing soil concentration, but decreases then, if Co concentration in soil becomes very high. The transfer factor of Cr is in a range of  $10^{-4}$  to  $10^{-2}$ . Increasing Cr concentration in soil decreases the transfer factor. The transfer factor of Pb varies in a range of  $10^{-2}$  to  $3 \cdot 10^{-2}$  without a clear dependence on time or Pb concentration in soil.

<u>I n h a l t</u>	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Material und Methoden	5
2.1 Versuchsanlage und Durchführung	5
2.2 Analytik	9
2.2.1 Verwendete Geräte	9
2.2.2 Chemikalien	9
2.3 Probenvorbereitung	10
2.4 Analysenverfahren	10
3. Ergebnisse	11
3.1 Gewächshaus - Wasserverbrauch und Erntegewichte	11
3.1.1 Cobalt	11
3.1.2 Blei	11
3.1.3 Chrom	
3.2 Konzentration einiger wichtiger Elemente in Lolium multiflorum in Abhängigkeit vom Alter des Grases und unterschiedlicher Konzentrationen von Cobalt, Blei und Chrom im Boden	16
3.2.1 Variation der Cobaltgehalte im Boden	16
3.2.2 Variation der Bleigehalte im Boden	21
3.2.3 Variation der Chromgehalte im Boden	24
4. Diskussion der Ergebnisse	28
4.1 Zeitabhängigkeit der Metallkonzentrationen in der Pflanze	30
4.2 Abhängigkeit des Transferfaktors von der im Boden enthaltenen Schwermetallmenge	34
4.3 Einfluß von Cobalt, Chrom und Blei auf Lolium multiflorum	39
5. Schlußfolgerungen	42
<u>Anhang</u>	44
Fehlermöglichkeiten bei der Grasanalyse	45
Anhang Nr. 1 - 19	47
Literatur	66

## 1. Einleitung

Um durch Schwermetallbelastung der Umwelt entstandene Risiken abschätzen zu können, ist u.a. eine Kenntnis der Wirkung der Schwermetalle auf Pflanzen sowie des Transferfaktors Boden → Pflanze notwendig. Die Bestimmung von Transferfaktoren ist bereits Gegenstand vieler Untersuchungen gewesen. Meist blieb dabei jedoch unberücksichtigt, ob vielleicht parallel zur Aufnahme des toxisch wirkenden Elements andere Stoffe toxisch wirkend oder essenziell vermehrt bzw. verringert aufgenommen werden. Schadbilder an Pflanzen lassen sich bei Kenntnis des exakten Elementgehaltes weitaus besser interpretieren bzw. Abweichungen in der Pflanzenphysiologie sind schon vor der Änderung des äußeren Bildes ablesbar.

Wesentlich ist auch folgendes: Der Pflanze stehen zwei Wege offen, Stoffe aufzunehmen, nämlich erstens über die Wurzeln und zweitens über die Spaltöffnungen. Da gerade die Luftbelastung in Ballungsgebieten und in der Nähe großer Emittenten hoch ist, spielt die direkte Aufnahme Luft → Pflanze sicherlich mitunter eine große Rolle, speziell wenn durch ausreichende Luftfeuchtigkeit ein Lösen der Schadstoffe auf der Blattoberfläche möglich ist bzw. die Stoffe in gasförmiger Form vorliegen. Deshalb ist es wichtig zu wissen, was unter definierten Bedingungen über jeweils einen Weg in die Pflanze gelangen kann.

Im vorliegenden Fall sollte ausschließlich der Transfer Boden → Pflanze sowie die Abhängigkeit des Transferfaktors von der Elementkonzentration im Boden untersucht werden. Um die Stoffaufnahme aus der Luft auszuschließen, wurden die Versuche in einem Gewächshaus mit gefilterter Luft durchgeführt.

In Anlehnung an das Verfahren der standardisierten Graskultur wurde der Einfluß der Metalle Cr, Co und Pb auf das Verhalten

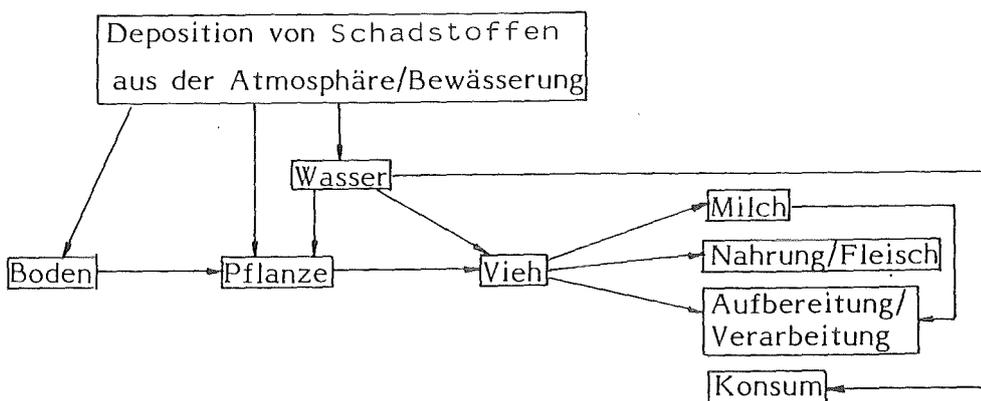
und den Elementgehalt der Pflanze untersucht.

Von Chrom weiß man, daß es für die menschliche und tierische Ernährung unentbehrlich ist. Andererseits sind Chrom-VI-Verbindungen stark toxisch und wirken carcinogen. Als Radionuklid wäre Cr-51 zu erwähnen, welches in geringen Mengen von kerntechnischen Anlagen emittiert wird.

Cobalt ist ebenfalls ein essentielles Spurenelement, welches in höheren Dosen giftig ist. So führte der Zusatz von 1 mg  $\text{CoSO}_4$  pro 1 l Bier (Stabilisierung des Schaumes) zu einer Vielzahl von Vergiftungen und Todesfällen. Von den Radionukliden sind Co-57, Co-58 und Co-60 zu nennen, die ebenfalls von kerntechnischen Anlagen emittiert werden. Die größte Bedeutung hat Co-60 jedoch zweifelsohne als Strahlenquelle in der Medizin und Lebensmittelindustrie.

Abbildung 1 gibt die möglichen Wege von Radionukliden und Schwermetallen im Ökosystem wieder.

Abbildung 1 [nach 2]



Blei- und Bleiverbindungen sind lediglich als toxisch bekannt. Von Bleivergiftungen durch Keramikglasur und bleihaltige Farben sowie von Bleibelastung durch das als Antiklopfmittel verwendete Tetraäthylblei weiß man schon lange. Das wichtigste Radionuklid des Bleies, das Pb-210 kommt als Glied der natürlichen Zerfallsreihe des Urans vor.

Die Tabellen 1 und 2 geben beispielhaft Aktivitätsemissionen von Cr-51, Co-58, Co-60 und Pb-210 wieder.

Nach den Produktionszahlen der verschiedenen Radionuklide, den gemessenen Emissionsraten und theoretischen Überlegungen kann man bei großen Kernkraftwerken mit etwa  $10^3$  MW elektrischer Leistung die in Tabelle 1 aufgeführten Emissionsraten erwarten:

Tab. 1 (nach 1): Mögliche Emissionsraten von Co-58, Co-60 und Cr-51 von Kernkraftwerken mit etwa  $10^3$  MW elektrischer Leistung

Nuklid	SWR mCi/a	DWR mCi/a	HTR <sup>x</sup> mCi/a	SBR <sup>x</sup> mCi/a	
Abluft	Co-58	5	5	$10^{-6}$	0,1
	Co-60	12,5	6	$2 \cdot 10^{-6}$	0,01
	Cr-51	5	1	$10^{-5}$	0,01
Abwasser	Co-58	50	30	0,12	12
	Co-60	125	75	0,24	1
	Cr-51	50	15	1,2	1

SWR = Siedewasserreaktor; DWR = Druckwasserreaktor; HTR = Hochtemperaturreaktor; SBR = Schneller Brüter

x = Abschätzungen aufgrund von Meßwerten durch Versuchsreihen

Zum Vergleich die Daten für die Emissionen des stabilen Cobalts, Chroms und Bleis.

Tabelle 2 [nach 4]

Natürliche und anthropogene Quellen der atmosphärischen Emission

Element	Fracht ( $10^8$ g/a)			
	Kontint. Staubfracht	Vulkan. Staubfracht	Industrielle Partik.Emission	Fracht der foss.Brennstoffe
Co	40	30	24	20
Cr	500	84	650	290
Pb	50	8,7	16 000	4 300

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Versuchsanlage und Durchführung

Um unter Ausschluß von Luftverunreinigungen über den Luftpfad und Deposition auf oberirdische Pflanzenteile den Transfer von Cobalt, Blei und Chrom aus dem Boden über die Wurzel in die Pflanze bestimmen zu können, erfolgte die Versuchsdurchführung im vollklimatisierten Gewächshaus im Kernforschungszentrum Karlsruhe. Die Anlage ist so ausgestattet, daß bei 5-fachem Luftwechsel pro Stunde die Zuluft über S-Filter gereinigt wird.

Einige chemische und physikalische Kenndaten des verwendeten Versuchsbodens lassen sich aus Tabelle 3 entnehmen. Neben der Kontrolle wurden bei 5-facher Wiederholung zu Cobalt, Blei und Chrom sechs Konzentrationsstufen eingesetzt:

Cobalt	5	/	10	/	20	/	50	/	200	/	400	µg/g Boden
Blei	10	/	30	/	100	/	300	/	900	/	1800	µg/g Boden
Chrom	10	/	20	/	50	/	150	/	500	/	1000	µg/g Boden

Um die Bodenmischung herzustellen, wurden die Salze der zu untersuchenden Schwermetalle gemörsert, für jede Konzentrationsstufe mit einem kg Boden vorgemischt und dann im Betonmischer mit 30 kg Boden 30 Minuten gemischt. Im selben Arbeitsgang wurde dem lufttrockenen Boden Volldünger (12/12/17/2) auf der Basis von 0,12 g N/1 kg Boden zugemischt. Dann wurden jeweils 6 kg Boden über einer Drainschicht aus Kies - Sand (0,2 kg) in Plastiktöpfe gefüllt. Um die Homogenität der Mischung zu überprüfen, wurden jeder Charge (31 kg) nach erfolgtem Mischprozess 5 x 100 g Boden entnommen. Aus diesen 100 g Boden wurden wiederum 2 x 0,5 g zur Analyse verwendet. Die Ergebnisse in Tabelle 4 zeigen, daß trotz der Vormischung mit 1 kg Boden die Homogenität nicht immer gut war. Dies trifft insbesondere für Blei zu und wird bei der Interpretation der Ergebnisse mit zu berücksichtigen sein.

Tabelle 3

Einige physikalische und chemische Kenndaten des verwendeten Bodens

Herkunft		Spöck
Bodentyp		diluvialer sandiger Oberboden
pH (CaCl <sub>2</sub> )		6,8
organische Substanz	(%)	2,1
CaCO <sub>3</sub>	(%)	1,3
<u>Nährstoffe</u>		
Gesamt-N	(%)	0,12
Natrium	(mg Element/kg)	13
Kupfer		4,0
Mangan		145
Molybdän		0,10
<u>CAL-Methode</u>		
Phosphor	(mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /kg)	180
Kalium	(mg K <sub>2</sub> O/kg)	260
<u>Austauschkapazität</u>		
T-Wert	(mval/kg)	7,8
S-Wert		6,8
V-Wert	%	87,2
<u>Schlämmanalyse</u>		
Grobsand	%	14,9
Mittelsand		41,0
Feinsand		20,4
Grobschluff		11,5
Mittelschluff		8,0
Feinschluff		0,5
Ton		3,7

Tabelle 4

Überprüfung der Homogenität der Mischungen  
(nach Druckaufschluß mit HNO<sub>3</sub>)

Element	Konzentrations- stufe	Zugabe µg/g	gefunden µg/g	Abweichung	
				absolut ±	%
Pb	K	-	24	1	4
	1	10	35	13	37
	2	30	43	14	33
	3	100	36	64	74
	4	300	262	55	21
	5	900	662	183	28
	6	1800	2194	1048	48
Cr	K	-	17	2	12
	1	10	24	2	8
	2	20	31	4	13
	3	50	56	6	11
	4	150	147	20	14
	5	500	505	96	19
	6	1000	875	72	8
Co	K	-	3,1	0,2	6
	1	5	8	1	13
	2	10	12	1	8
	3	20	18	5	28
	4	50	52	4	8
	5	200	104	11	11
	6	400	136	16	12

In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3792 /3/ kam als Versuchspflanze das Gras *Lolium Multiflorum* der Sorte "Lema" mit 30 g Saatgut/m<sup>2</sup> zur Aussaat.

Der Feuchtigkeitsgehalt des Bodens in den Töpfen wurde auf 60% der Feldkapazität eingestellt und dann 3 mal pro Woche überprüft. Die jeweils nachgegossene Differenz wurde genau registriert und diente als eine Meßgröße der Wirkung der Schwermetalle auf das Gras.

Der Schnitt des Grases wurde alle 2 bzw. 3 Wochen durchgeführt, wobei der Rückschnitt auf ca. 3 cm erfolgte. Die Trockentemperatur des Grases war 80 °C. Anschliessend wurde das Gras pulverisiert.

Der Versuchsbeginn lag im Oktober 1983 und wurde unter standardisierten Klimabedingungen durchgeführt. Die Lichtstärke betrug 6000 Lux/m<sup>2</sup> im Bereich der Tischhöhe bei einer Tageslänge von 16 h mit 22 °C. Nachts wurde eine Temperatur von 15 °C vorgegeben.

## 2.2 Analytik

2.2.1 Verwendete Geräte: ICP-AES: Applied Research Laboratories  
3520 ICP (sequentielles Vacuum Spektrometer mit 1 m Paschen-Runge-Aufstellung;  
Gitter 1080 Linien/mm; Auflösung von  
0,046 nm in der ersten Ordnung bis 0,012 nm  
in der vierten Ordnung)

Quarzstabilisierter Hochfrequenzgenerator  
(27,12 MHz) mit max. 2,5 kW Leistung;  
Betriebsleistung: 1,2 kW

Steuerung und Datenauswertung: PDP 11/03  
Computer mit einem 8 Zoll Diskettenlaufwerk,  
Winchester, VT 125 Display und  
LA 100

Meinhard-Zestäuber mit vorgeschalteter  
Schlauchpumpe (Gilson HP-2); eingestellte  
Förderleistung: 1 ml/min.

AAS: Perkin Elmer 5000 Zeeman Atom-Absorptionsspektrometer

HGA 500 Graphitrohrküvette

AS 40 Autosampler, Datenstation 3600

Aufschlußapparatur nach Tölg mit 50 ml  
Teflongefäßen

## 2.2.2 Chemikalien:

Sämtliche Säuren ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HClO}_4$ ):

Merck suprapur

Elementlösungen zur Herstellung der Standards:

Merck-Titrisol

Riedel de Häen-Fixanal

Alfa/Ventron

Salze: Merck p.A. und suprapur Qualität

Wasser: Millipore, Reagent-Water System  
(18  $\text{M}\Omega/\text{cm}$ )

### 2.3 Probenvorbereitung

Pflanzenproben: 0,3 g getrocknetes und pulverisiertes Material wurden in einem 50 ml Teflongefäß unter Zugabe von 4 ml 65 %iger Salpetersäure einem Druckaufschluß unterzogen. Zum Abklingen der ersten Reaktionen blieben die verschlossenen Teflongefäße für mindestens 4 Stunden bei ca. 50°C im Trockenschrank, wurden dann in die Druckbehälter überführt und 4 Stunden auf 170 °C erhitzt. Die Proben wurden nach dem Aufschluß auf 20 ml aufgefüllt und in Kunststofffläschchen aufbewahrt.

Bödenproben: 0,5 g des getrockneten und gesiebten Materials (<2 mm) wurden wie oben beschrieben behandelt.

### 2.4 Analysenverfahren

Das getrocknete und gemahlene Gras wurde wie zuvor beschrieben aufgeschlossen. Die resultierenden 80 ml Probelösung wurden direkt zur Bestimmung mittels ICP-AES und AAS eingesetzt.

Die Eichung erfolgte bei ICP-AES und AAS mit angesäuerten, wässrigen Multielementstandards. Bei der AAS erfolgte die Korrektur des Untergrundes unter Ausnutzung des Zeeman-Effektes, bei der ICP-AES wurden neben der Korrektur des Untergrundes für einige Elemente zusätzlich spektrale Interferenzen korrigiert.

Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens wird in [5] gegeben.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Gewächshaus - Wasserverbrauch und Erntegewichte

##### 3.1.1 Cobalt

Bereits zwei Wochen nach Versuchsbeginn läßt sich anhand des Wasserverbrauchs die Wirkung unterschiedlicher Konzentrationen von Cobalt im Boden auf die Grasvegetation erkennen (Abb. 2). Wenn die zugesetzte Menge dieses Schwermetalles 10 µg/g Boden übersteigt, nimmt der Wasserverbrauch ab, weil offenbar die schädigende Wirkung von Cobalt den Wasserverbrauch der Pflanze reduziert. Während 5 µg Cobalt/g Boden im Untersuchungszeitraum von 77 Tagen keine toxischen Auswirkungen erkennen ließ - im Gegenteil eher sogar eine positive Spurenelementwirkung sich entwickelte - führten 400 µg/g nach ca. 6 Wochen zum vollständigen Absterben der gesamten Nabe.

Im Laufe des Versuchszeitraumes nimmt der Wasserverbrauch kontinuierlich zu und erreicht sein Maximum nach der 11. Woche. Ähnliche Schlußfolgerungen lassen sich aus den Ergebnissen des Erntefrischgutes ziehen. Gras des Kontrollbodens sowie dem Boden zugesetzte Cobaltkonzentrationen von 5 und 10 µg/g Boden führen zu ähnlichen Aufwuchsgewichten. Bei über 10 µg Cobalt pro g Boden sinkt der Ertrag deutlich in Abhängigkeit von der Metallkonzentration. Die Phase der größten Schädigung, gemessen am Ertrag, scheint im Zeitraum zwischen der 5. und 9. Woche zu liegen, um danach bei allen Konzentrationsstufen wieder deutlich über das Niveau des 2. und 3. Schnittes (1.-5. Woche) anzusteigen.

##### 3.1.2 Blei

Weniger deutlich als bei Cobalt ist der Wasserverbrauch des Grases bei unterschiedlicher Konzentration von Blei im Boden einzuschätzen (Abb. 3). Möglicherweise kommt hier zum Tragen, daß die Homogenität des zugemischten Bleis im Boden nicht ausreichend war und somit keine klare Korrelation zwischen den zugegebenen Bleigehalten und dem Wasserverbrauch des Grases besteht.

Abb. 2: Wasserverbrauch und Ertrag bei Cobalt

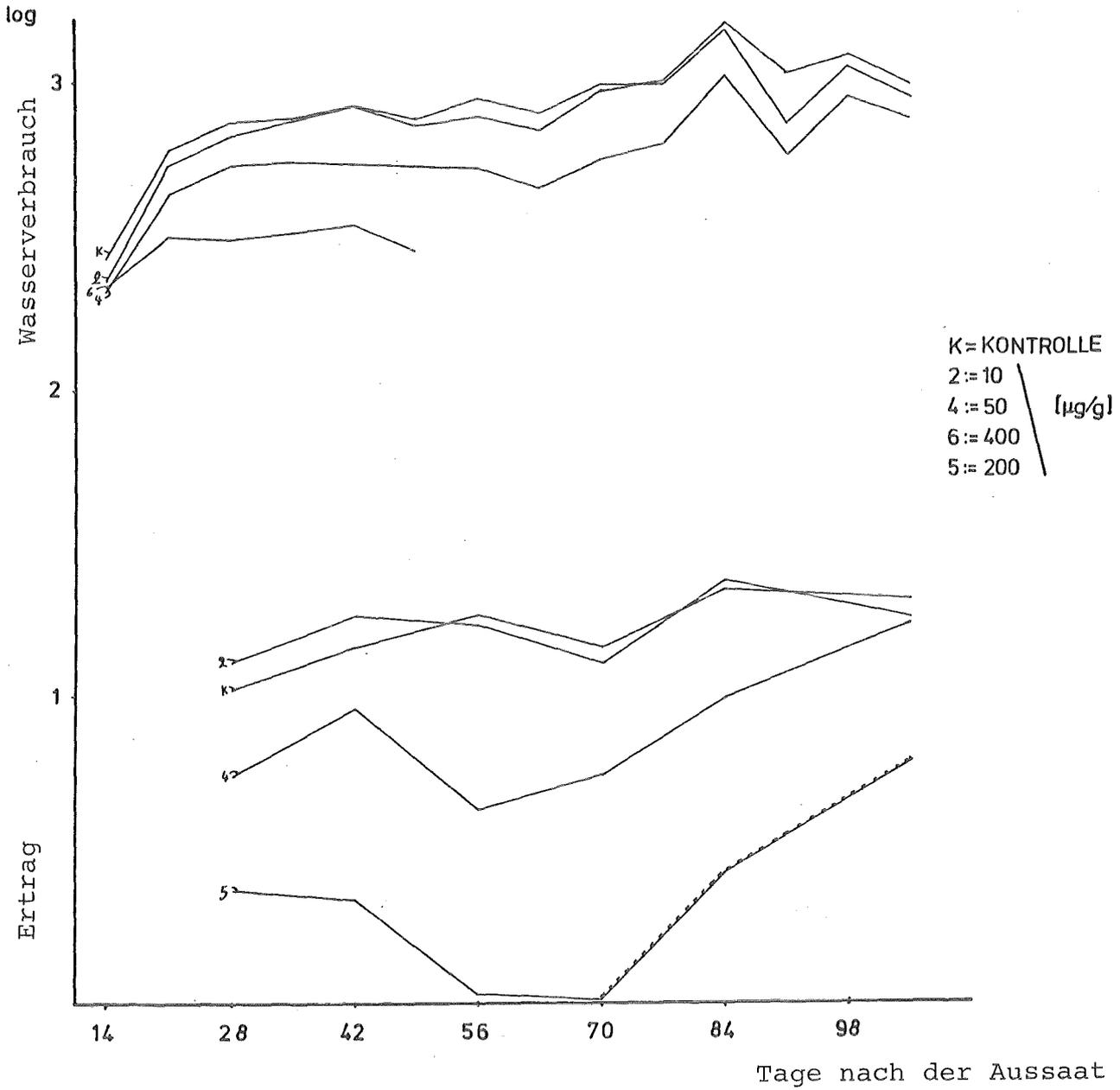
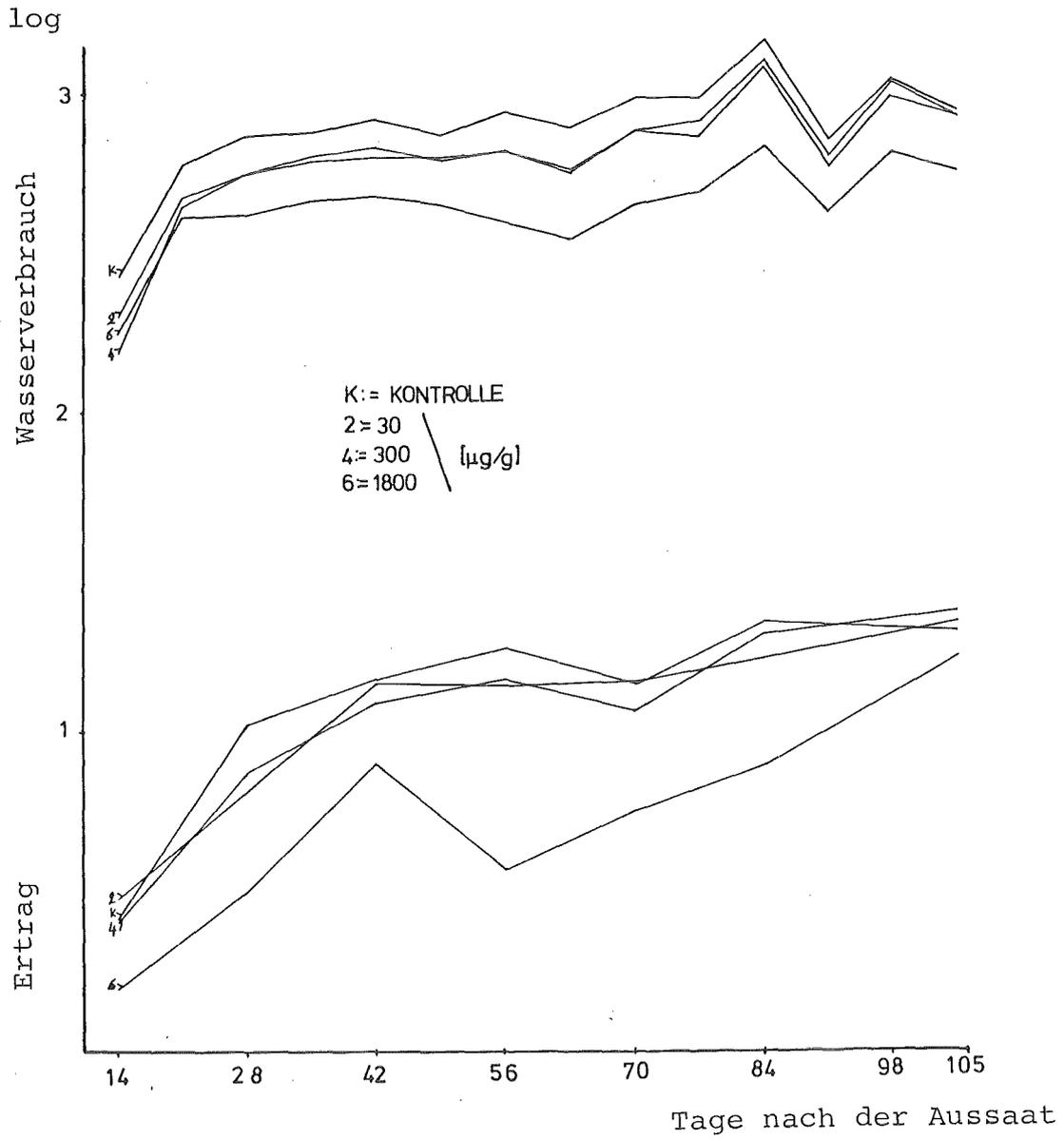


Abb 3: Wasserverbrauch und Ertrag bei Blei



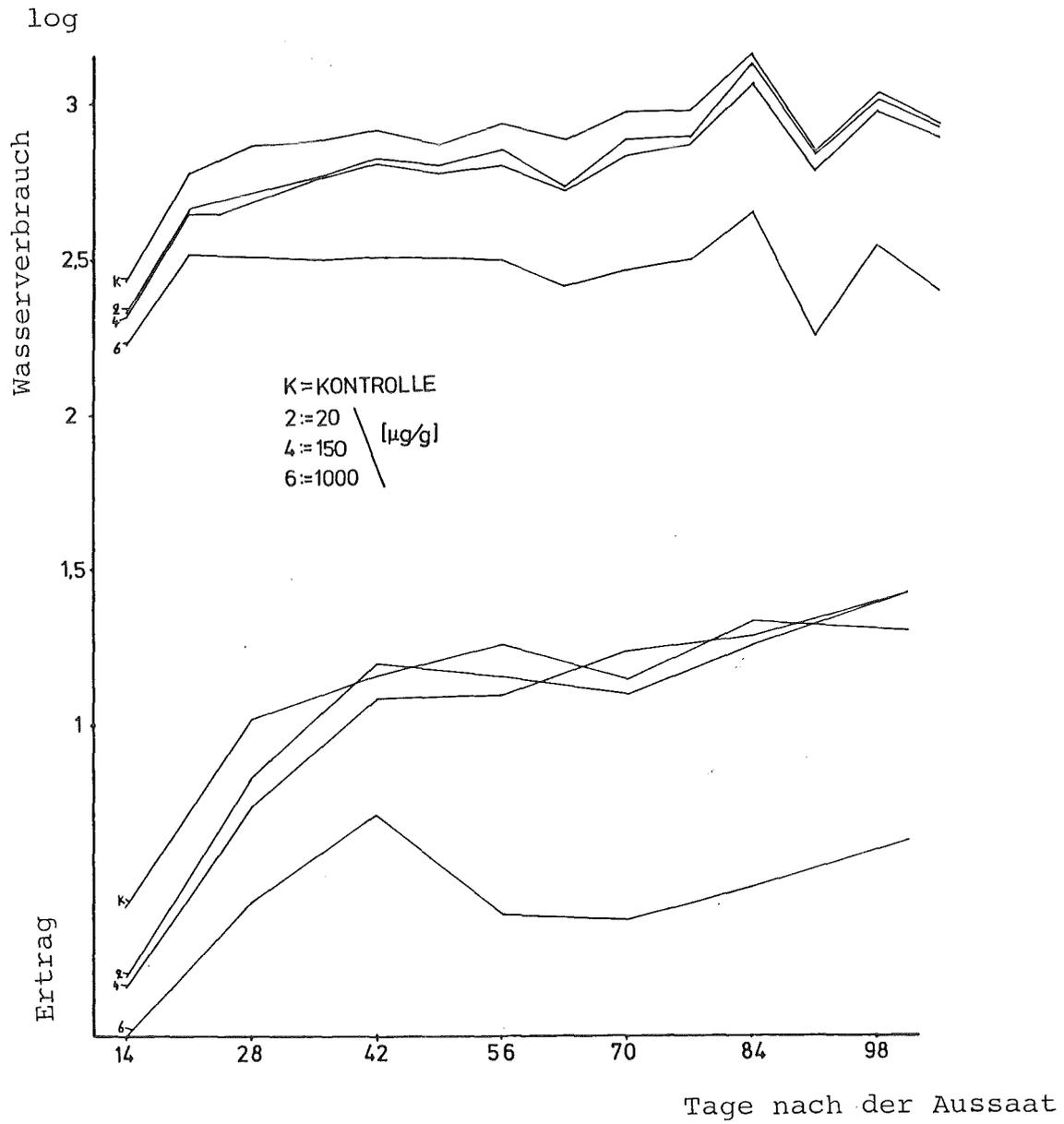
Dennoch ist der Wasserverbrauch der Kontrollvariante stets am höchsten. Demgegenüber zeigen die Konzentrationen von 10 - 900  $\mu\text{g}$  Blei/g Boden, daß prinzipiell der Wasserverbrauch als Folge der Schwermetallschädigungen reduziert wird. Eine deutliche Abhängigkeit zwischen zunehmender Bleikonzentration im Boden und geringerem Wasserverbrauch liegt allerdings nicht vor. Lediglich bei 1800 ppm Blei im Boden ist ein deutlich reduzierter Wasserverbrauch zu erkennen.

Ähnlich wie bei Cobalt erhöht sich der Wasserverbrauch mit zunehmender Versuchsdauer, da die toxische Wirkung von Blei nachzulassen scheint bzw. Festlegung des Bleis im Boden erfolgt. Das frische Erntegut hat ein erstes Gewichtsmaximum zum dritten Schnitt, also nach 5 Wochen, fällt dann etwas ab und steigt erneut an, wenn die schädigende Wirkung des Bleis nachläßt. Während bei der Kontrolle überwiegend der höchste Naßgutertrag anfällt, ist bei 1800 ppm Blei im Boden das deutlich geringste Erntegewicht wegen der Schwermetallschädigung zu erkennen. Ähnlich den Wasserverbrauchswerten führt eine zunehmende Bleikonzentration im Boden zwischen 10 und 900  $\mu\text{g}/\text{g}$  nicht zwingend zu deutlich zuzuordnenden geringeren Erntemengen des Grases. Dies hängt evtl. mit der teilweise inhomogenen Einmischung des Bleis im Boden zusammen (siehe Tabelle 4).

### 3.1.3 Chrom

Wasserverbrauch und Erntefrischgut von *Lolium multiflorum* lassen unter dem Einfluß verschiedener Chromkonzentrationen im Boden die schädigende Wirkung dieses Schwermetalles bei zunehmender Bodenkonzentration von Chrom erkennen (Abb. 4). Besonders ab 500  $\mu\text{g}$  und noch stärker ausgeprägt bei 1000  $\mu\text{g}$  Chrom/g Boden wird der geringere Wasserverbrauch und die Ertragsminderung deutlich.

Abb. 4: Wasserverbrauch und Ertrag bei Chrom



Ab dem 3. Schnitt bzw. nach ca. 7 Wochen ist die Abhängigkeit der Schädigung von der Chrom — Bodenkonzentration im Bereich zwischen 10 und 150  $\mu\text{g/g}$  Boden nicht mehr klar zu erkennen. Ähnlich wie bei Cobalt und Blei wird zu überprüfen sein, welche Ursache verantwortlich sein könnte. Entweder erfolgt im Rahmen der Einstellung eines Gleichgewichtes im Boden nach dem Mischvorgang eine zunehmende Immobilisierung von Blei, Chrom und Cobalt oder aber das Gras verändert sein Aufnahmeverhalten für dieses Element.

Für Chrom kann dennoch festgestellt werden, daß dieses Element ab einer Konzentration von 1000  $\mu\text{g/g}$  Boden die Grasart *Lolium multiflorum* intensiv und nachhaltig schädigt. Dies läßt sich anhand verringerter Erntegewichte und reduzierter Evapotranspiration eindeutig ablesen.

### 3.2 Konzentration einiger wichtiger Elemente in *Lolium multiflorum* in Abhängigkeit vom Alter des Grases und unterschiedlicher Konzentrationen von Cobalt, Blei und Chrom im Boden

#### 3.2.1 Variation der Cobaltgehalte im Boden

Die abgestufte Kontamination des Bodens mit Cobalt führte nach dem 2. Schnitt in der Konzentration von 400  $\mu\text{g}$  Cobalt/g Boden zum Absterben der gesamten Kultur. Das Gras dieser Konzentrationsstufe zeigte bereits nach dem Aufgang kümmerlichen Wuchs und krankhaftes Aussehen. Aus Tab. 5 geht hervor, daß die Elemente, Schwefel, Phosphor, Calcium, Magnesium, Mangan und Cobalt in hohem Maße, sowie Natrium und Chrom noch deutlich überhöht im Pflanzenmaterial angereichert wurden. Lediglich bei Blei ist keine beachtenswerte Veränderung zu erkennen.

Bei zunehmender Konzentration von Cobalt im Boden in der Größenordnung von 5 bis 200  $\mu\text{g/g}$  Boden steigt die Konzentration im Gras unabhängig vom Alter des Grases an. Es wurden beim 2. Schnitt Mengen von 116  $\mu\text{g/Trockensubstanz}$ , bei 200  $\mu\text{g/g}$  Cobalt im Boden gefunden; bei der absterbenden Kultur mit 400  $\mu\text{g}$  Cobalt im Boden

sogar 267  $\mu\text{g}$  in der Trockensubstanz. Die zunächst steigende Kurve flacht bei zunehmender Konzentration von Cobalt im Boden bei mehr als 20  $\mu\text{g}$  Cobalt ab, weil die relative Zunahme in der Pflanze geringer wird (Abb. 4). Die Zunahme von Cobalt ist nicht direkt proportional der Konzentration im Boden. Der Alterungsprozess des Grases wirkt sich nur geringfügig aus. Nach etwa 6 - 8 Wochen scheint die Aufnahme von Cobalt in die Pflanze absolut gesehen etwas abzunehmen.

Das Element Blei reagiert kaum auf die Zugabe von Cobalt in den Boden. Höhere Zugaben an Cobalt haben tendenziell ganz geringfügig höhere Konzentrationen von Pb im Erntegut des Grases zur Folge.

Auch Chromgehalte im Gras lassen nur bedingt Abhängigkeiten vom Cobaltgehalt im Boden zu. Einerseits ist nur beim zweiten bis vierten Schnitt eine prinzipiell höhere Konzentration an Chrom in der Pflanze bei Cobaltzugabe im Boden festzustellen, andererseits nimmt der Chromgehalt in Folge des Alterungsprozesses des Grases beim 5. und 6. Schnitt unabhängig von der Cobaltkonzentration im Boden ab.

Mangan wird nur bei 400  $\mu\text{g}$  Co/g Boden in leicht erhöhtem Maße im Gras mit 53 beim ersten Schnitt und 43  $\mu\text{g}$  Mangan/g Trockensubstanz beim 2. Schnitt festgestellt. Mit zunehmendem Alter scheint anhand dieser Ergebnisse eine leichte Abnahme von Mangan zu erfolgen. Die Meßwerte der Kontrollproben zeigen, daß Mangan im Kontroll-Gras meistens höhere Werte hat, als die des Grases des mit Cobalt versehenen Bodens.

Die Natriumkonzentration im Gras ist nicht deutlich sichtbar von der Cobaltkonzentration des Bodens abhängig und wurde in einer Größenordnung von 230 bis 530  $\mu\text{g}$  Natrium/g trockenem Erntegut gemessen. Lediglich bei Schnitt Vier und Fünf steigt der Natriumgehalt in der Pflanze mit zunehmendem Cobaltgehalt im Boden ganz leicht an. Es deutet sich weiterhin an, daß der Natriumgehalt bei *Lolium multiflorum* im Laufe des Versuchszeitraumes auch gering bei der Kontrollprobe ansteigt, jedoch geringer als

es bei den entsprechenden Proben der Fall ist, die auf mit Cobalt kontaminiertem Boden wachsen, speziell wenn es sich um hohe Cobaltgaben handelt.

Auch die Magnesiumgehalte im Gras bleiben von der Cobaltkonzentration im Boden nahezu unberührt; lediglich die absterbende Konzentrationsstufe mit 400 µg Cobalt/g Boden zeigt mit 4427 µg Magnesium/g Trockensubstanz eine überhöhte Anreicherung. Ähnlich wie bei Natrium steigt der Magnesiumgehalt im Gras nach dem ersten Schnitt an und nimmt dann langsam wieder ab. Mit Ausnahme des oben genannten Wertes der höchsten Cobaltkonzentration im Boden bewegen sich die gemessenen Werte zwischen ca. 2200 und 2900 µg Magnesium/g Trockensubstanz des trockenen Grases.

Die Calciumgehalte in *Lolium multiflorum* hängen von der Cobaltkonzentration des Bodens und dem Alterungsprozess des Grases ab. Während dieser Zusammenhang beim ersten Schnitt noch nicht sichtbar ist, sind beim zweiten Schnitt die Calciumwerte bei einer Bodenkontamination von 200 µg Cobalt und beim folgenden Schnitt bereits ab 20 µg Cobalt/g Boden jeweils gegenüber Kontrolle und den geringeren Cobaltzusätzen mit 5 und 10 µg zum Boden deutlich höher. Zeitlich gesehen steigt der Calciumgehalt beim 2. Schnitt an und fällt dann wieder ab, was besonders beim 6. Schnitt deutlich wird. Hier stehen die am geringsten gemessenen Calciumgehalte in der Pflanze mit etwa 8500 µg/g Trockensubstanz bei einer geringen Cobalt - Bodenkontamination (0, 5, 10 µg Cobalt) Werten mit ca. 12700, 16500 und 20000 µg Calcium/g Trockensubstanz bei einer Cobalt - Bodenkonzentration von 20, 50 und 200 µg Cobalt im Boden gegenüber.

Wesentlich anders ist der Kurvenverlauf bei Phosphor. Während beim ersten Schnitt mit Ausnahme der höchsten Cobaltkonzentration des Bodens der Phosphorgehalt bei zunehmendem Cobaltgehalt im Boden ansteigt, ist der Verlauf ab dem 3. Schnitt umgekehrt. Der Phosphorgehalt in *Lolium multiflorum* nimmt mit zunehmender Cobaltkonzentration im Boden ab. Weiterhin führt der Alterungsprozeß des Grases generell zu einer Abnahme der Phosphatgehalte im Erntegut.

Die Schwefelgehalte im Erntegut zeigen den umgekehrten Verlauf wie bei Phosphor. Steigende Cobaltgehalte im Boden führen zu langsam ansteigenden Schwefelgehalten im Gras. Der Alterungsprozeß läßt eine leicht steigende Tendenz über den gesamten Versuchszeitraum erkennen, die durch hohe Cobaltgaben forciierbar ist. Die Streubreite der Schwefelgehalte in der Pflanze nimmt gegenüber dem 1. und 2. Schnitt ab dem dritten Erntezeitpunkt deutlich ab.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß unterschiedliche Cobaltkonzentrationen im Boden den Mineralhaushalt des untersuchten Grases *Lolium multiflorum* verändern. Nicht nur der Cobaltgehalt selbst, sondern auch für die Pflanzenernährung wichtige Elemente, wie Phosphor, Magnesium, Schwefel, Calcium und Mangan werden zum Teil in beträchtlichem Maße von der Cobaltkonzentration im Boden beeinflußt.

Die Konzentrationen der einzelnen Elemente im Gras in Abhängigkeit von der Zeit bei der Kontrolle und der Cobaltkonzentration im Boden sind für die einzelnen Schnitte im Anhang Nr. 1 bzw. 2 - 7 graphisch dargestellt.

Tab. 5: S, P, Ca, Mg, Na, Mn, Co, Cr und Pb in Lolium multi florum in Abhängigkeit vom Co-Gehalt im Boden bei 6 aufeinanderfolgenden Gras-Schnitten

Co-Konzentration im Boden µg/g Boden	Element	Schnitt 1			Schnitt 2			Schnitt 3			Schnitt 4			Schnitt 5			Schnitt 6		
		$\bar{x}$	$\pm$	$\sigma$															
0	S	2870	70		3540	60		3400	100		3280	80		3700	100		3900	300	
5	S	3200	300		3300	100		3100	100		3260	80		4100	200		3900	300	
10	S	3400	200		3800	200		3100	100		3300	100		3900	300		3800	400	
20	S	3700	200		4000	80		3400	100		3400	100		3900	200		4100	300	
50	S	5100	400		5000	200		4100	100		3800	300		4200	200		4500	200	
200	S	8100	500		5800	600		4000	1000		4500	800		4800	300		5200	400	
400	S	8100	700		10000	1000		-	-		-	-		-	-		-	-	
0	P	4800	300		4600	200		4400	100		3900	200		3300	100		3400	100	
5	P	5300	300		4300	200		4500	200		3620	90		3500	100		3400	100	
10	P	5900	300		4300	500		4300	200		4000	400		3600	100		3400	200	
20	P	7100	500		4400	400		4200	400		3700	200		3300	400		3000	300	
50	P	7100	300		4300	100		4100	300		3400	300		2700	200		2300	100	
200	P	7730	40		4400	200		4000	1000		3700	800		3170	80		2900	100	
400	P	6600	700		7400	400		-	-		-	-		-	-		-	-	
0	Ca	9800	900		14500	900		12000	2000		11000	1000		10000	1000		9000	2000	
5	Ca	12000	1000		13900	400		12000	1000		12000	1000		11000	1000		9000	1000	
10	Ca	10500	900		13000	700		11200	900		12000	2000		12000	4000		8400	500	
20	Ca	10400	500		16100	600		14400	900		10000	3000		16000	4000		13000	2000	
50	Ca	10700	800		17000	1000		16000	1000		21000	1000		23000	400		16500	900	
200	Ca	10600	300		26000	3000		18000	4000		23000	3000		23000	2000		20000	3000	
400	Ca	12000	2000		42100	900		-	-		-	-		-	-		-	-	
0	Mg	2200	200		2860	70		2670	70		2500	70		2410	40		2300	50	
5	Mg	2500	30		2900	100		2920	40		2750	60		2690	80		2330	90	
10	Mg	2300	100		2700	100		2800	100		2700	80		2700	200		2300	100	
20	Mg	2400	200		2960	50		2760	90		2800	200		2800	100		2600	100	
50	Mg	2510	20		2870	60		2650	60		2900	200		2850	50		2700	100	
200	Mg	2650	40		2900	200		2300	600		2900	500		2900	100		2700	100	
400	Mg	2700	200		4400	300		-	-		-	-		-	-		-	-	
0	Na	250	20		340	20		310	40		320	20		340	20		347	6	
5	Na	260	30		330	20		340	10		320	20		320	10		320	20	
10	Na	250	20		290	20		320	20		350	30		320	40		300	30	
20	Na	250	30		306	7		350	40		410	80		400	80		360	40	
50	Na	230	30		200	20		300	20		470	70		400	70		370	40	
200	Na	230	20		330	20		310	60		500	300		400	30		350	40	
400	Na	240	20		417	8		-	-		-	-		-	-		-	-	
0	Mn	36	6		38	6		36	3		31	2		31	5		29	2	
5	Mn	35	3		31	2		31	2		28	2		24	2		26	1	
10	Mn	35	2		32	8		33	10		28	7		26	8		27	4	
20	Mn	32	3		31	2		32	6		28	7		26	8		24	4	
50	Mn	29	1		29	1		30	2		28	3		25	4		22	1	
200	Mn	33	4		22	1		19	6		25	7		30	3		31	2	
400	Mn	53	11		42	4		-	-		-	-		-	-		-	-	
0	Co	<0,6	-		<0,6	-		<0,6	-		<0,6	-		<0,6	-		<0,6	-	
5	Co	0,9	0,1		0,8	0,3		1,1	0,9		0,8	0,1		<0,6	-		<0,6	-	
10	Co	4,0	0,7		7	2		6,1	0,7		7,6	0,9		4,0	0,5		2,4	0,2	
20	Co	15	2		31	5		28	6		23	3		17	2		14	2	
50	Co	35	4		70	9		61	3		52	6		32	2		34	3	
200	Co	62	5		120	30		90	20		81	7		52	5		67	3	
400	Co	120	5		267	8		-	-		-	-		-	-		-	-	
0	Cr	<1,5	-		<1,5	-		<1,5	-		<1,5	-		<1,5	-		<1,5	-	
5	Cr	<1,5	-		<1,5	-		<1,5	-		6	3		2,2	0,4		<1,5	-	
10	Cr	<1,5	-		<1,5	-		1,5	0,4		7	3		1,7	0,4		<1,5	-	
20	Cr	<1,5	-		4	2		6	4		7	6		<1,5	-		<1,5	-	
50	Cr	<1,5	-		3	1		5	4		6	2		1,9	0,9		<1,5	-	
200	Cr	<1,5	-		4	4		<1,5	-		5	3		3	1		<1,5	-	
400	Cr	2,8	0,8		5,3	0,4		-	-		-	-		-	-		<1,5	-	
0	Pb	0,7	0,2		0,4	0,1		0,5	0,4		<0,23	-		0,3	0,1		<0,23	-	
5	Pb	0,4	0,2		<0,23	-		1,0	0,1		0,5	0,1		<0,23	-		<0,23	-	
10	Pb	0,4	0,1		<0,23	-		<0,23	-		0,4	0,1		<0,23	-		<0,23	-	
20	Pb	0,4	0,1		<0,23	-		<0,23	-		0,5	0,3		0,4	0,2		0,3	0,1	
50	Pb	0,23	-		<0,23	-		<0,23	-		0,6	0,2		0,5	0,2		0,5	0,4	
200	Pb	0,3	0,1		0,4	0,3		0,3	0,1		0,6	0,3		0,8	0,1		0,4	0,2	
400	Pb	0,7	0,4		0,4	0,1		-	-		-	-		-	-		-	-	

### 3.2.2 Variation der Bleigehalte im Boden

Sehr viel deutlicher als bei den beiden Untersuchungskriterien Wasserverbrauch und Ertrag besteht ein deutlicher Zusammenhang zwischen ansteigenden Bleigehalten im Boden und denen in der Pflanze (Tab. 6). Geringere Bodenkontaminationen mit bis zu 100 µg Blei/g Boden sind allerdings für die Bleikonzentrationen im Gras kaum wirksam. Die Bleigehalte im Boden und in der Pflanze verlaufen dann fast proportional bzw. bei der Steigerung von 900 auf 1000 µg Blei/g Boden überproportional. Zum Verlauf des Untersuchungszeitraumes läßt sich keine klare Aussage darüber machen, ob der Bleigehalt im Gras als Folge des Alterungsprozesses zu- oder abnimmt.

Chrom- ebenso wie Cobaltgehalte im Gras zeigen keine klare Abhängigkeit vom Bleigehalt im Boden. Ein Zusammenhang ist lediglich in einigen Fällen bei hohen Bleikonzentrationen erkennbar.

Bei höheren Bleigehalten im Boden, insbesondere bei 900 und 1800 µg/g erhöht sich der Mangangehalt in der Pflanze deutlich. Im Verlauf der 6 Schnitte fällt mit Ausnahme der höchsten Bleikonzentrationen im Boden die Mangankonzentration im Gras leicht ab. Die Mangangehalte streuen während des Versuchszeitraumes zwischen 29 und 73 µg/g Trockensubstanz. Ähnlich wie bei Cobalt lassen sich nach der Zugabe von Blei zum Boden keine eindeutigen Abhängigkeiten für Natrium in der Pflanze ableiten. Es ist aber ähnlich wie bei Cobalt ein prinzipieller Alterungsprozess zu erkennen, wodurch bei zunehmendem Alter der Pflanzen der Natriumgehalt im Gras ansteigt.

Auch der Magnesiumgehalt in *Lolium multiflorum* ist vom Bleigehalt bis zu 900 µg/g Boden unbeeinflusst. Bei 1800 µg Bleizugabe im Boden scheint der Magnesiumgehalt im Gras ab dem 3. Schnitt allerdings etwas höher zu sein, als bei den geringeren Konzentrationen.

Tab. 6: S, P, Ca, Mg, Na, Mn, Co, Cr und Pb in Lolium multi florum in Abhängigkeit vom Pb-Gehalt im Boden bei 6 aufeinanderfolgenden Ernteschnitten

Pb-Konzentration im Boden µg/g Boden	Element	Schnitt 1			Schnitt 2			Schnitt 3			Schnitt 4			Schnitt 5			Schnitt 6		
		$\bar{x}$	$\pm$	$\sigma$															
0	S	2870	70		3540	60		3400	100		3280	80		3800	100		3900	300	
10	S	3300	200		3100	100		2900	100		3300	200		3400	100		3700	300	
30	S	3700	600		3200	200		2800	200		3300	200		3490	80		3700	100	
100	S	3600	700		3200	200		3100	200		3600	200		3500	100		3590	90	
300	S	3600	300		3300	200		3100	100		3200	100		3600	200		4000	300	
900	S	3700	200		3400	400		3100	60		3200	200		3700	100		4000	200	
1800	S	3900	800		3500	200		3300	200		3500	200		3900	100		4000	200	
0	P	4800	300		4600	200		4400	100		3900	200		3300	100		3400	100	
10	P	7400	400		4100	400		4300	300		4000	300		2900	200		3000	300	
30	P	7400	500		4100	300		3900	300		4100	300		3700	200		3500	100	
100	P	9000	2000		4200	500		4100	500		4000	300		3000	200		3300	300	
300	P	7000	400		4000	400		3000	400		3800	200		3000	200		3200	100	
900	P	6800	700		4200	300		3900	100		3900	400		2800	200		3000	100	
1800	P	7000	1000		3800	90		3700	300		3700	400		3100	200		3200	100	
0	Ca	10000	1000		14600	900		12000	2000		11000	1000		10000	1000		9000	2000	
10	Ca	11000	200		14000	2000		12000	2000		13000	3000		12000	3000		9700	200	
30	Ca	11000	1000		13000	1000		11000	1000		11800	900		11800	600		10300	700	
100	Ca	13000	3000		14000	2000		14000	3000		15000	4000		13000	5000		8330	160	
300	Ca	11900	500		13000	1000		13000	1000		15000	2000		15000	3000		12000	2000	
900	Ca	12300	800		17000	3000		17000	1000		19000	2000		20000	2000		16000	1000	
1800	Ca	11000	2000		19000	1000		18000	1000		23000	5000		26000	800		21000	7000	
0	Mg	2200	200		2860	60		2670	70		2500	70		2410	40		2300	50	
10	Mg	2700	100		2800	100		2900	100		2900	200		2600	100		2500	100	
30	Mg	2700	300		2900	200		2700	100		2700	100		2790	50		2540	80	
100	Mg	3000	700		2760	50		2690	70		2710	90		2610	90		2400	200	
300	Mg	2500	100		2800	100		2750	90		2760	90		2600	100		1500	60	
900	Mg	2400	200		2900	200		2680	60		2800	200		2700	100		2500	30	
1800	Mg	2300	300		2500	100		3700	100		2800	60		2800	200		2600	200	
0	Na	250	20		340	20		310	40		320	20		340	20		350	60	
10	Na	260	30		270	30		340	30		430	40		410	90		330	30	
30	Na	260	40		230	10		260	30		320	30		320	30		310	20	
100	Na	310	90		280	40		340	10		420	60		470	60		490	70	
300	Na	270	40		250	20		320	40		370	50		360	50		320	40	
900	Na	200	30		240	40		270	10		340	40		330	30		300	20	
1800	Na	230	40		220	20		270	20		400	20		370	20		370	30	
0	Mn	36	6		39	6		36	3		31	2		31	5		29	2	
10	Mn	46	9		37	7		36	6		32	4		24	2		30	10	
30	Mn	43	9		32	4		31	5		30	2		29	2		31	2	
100	Mn	46	9		40	10		40	10		33	9		28	8		40	10	
300	Mn	39	8		34	1		36	4		36	4		33	9		33	6	
900	Mn	48	5		45	9		42	2		40	4		38	3		36	7	
1800	Mn	56	6		55	4		64	5		60	2		73	9		70	20	
0	Co																		
10	Co																		
30	Co																		
100	Co	Alle																	
300	Co	<0,6			<0,6			<0,6			<0,6			<0,6			<0,6		
900	Co																		
1800	Co																		
0	Cr	3,2	0,9		1,6	0,2		<1,5			<1,5			<1,5			<1,5		
10	Cr	1,9	0,7		<1,5			4	2		2,0	0,3		9	2		8	2	
30	Cr	1,8	0,1		4	2		3	2		5	3		3,2	0,7		5	2	
100	Cr	2,3	0,6		9	3		2,0	0,6		2,6	0,7		2,5	0,6		5	2	
300	Cr	2,0	0,8		5	2		6	4		2,4	0,9		5	2		5,5	0,7	
900	Cr	3	1		3	2		4	2		2	1		12	1		3	1	
1800	Cr	5	3		1,5	0,2		6	3		3	1		4	2		4	2	
0	Pb	0,7	0,2		0,4	0,1		0,5	0,4		0,23	0,08		0,3	0,1		<0,23		
10	Pb	0,6	0,2		0,5	0,2		0,4	0,2		0,5	0,2		0,5	0,2		0,9	0,8	
30	Pb	1,0	0,6		2	2		0,5	0,3		0,9	0,3		0,5	0,1		0,9	0,1	
100	Pb	2,3	0,6		2,5	0,8		0,9	0,6		1,3	0,9		1,1	0,5		1,3	0,2	
300	Pb	6,4	0,6		5	3		5	2		6	1		4,3	0,8		4	1	
900	Pb	17,0	0,8		10	10		16	1		13	2		16	2		13	5	
1800	Pb	35	4		80	30		50	10		34	8		44	8		60	20	

Mit Ausnahme des 1. Schnittes läßt sich den Ergebnissen entnehmen, daß bei den genannten höchsten Zugaben an Blei im Boden der Calciumgehalt in der Pflanze gegenüber den geringeren Bodenkonzentrationen an Blei höher ist. Mit zunehmendem Alter des Grases wird dieser Effekt auch bei geringeren Bleigaben im Boden deutlich.

Gegenüber der ersten Ernte sind die Calciumgehalte beim 2. Schnitt deutlich erhöht. Tendenziell scheinen die Calciumgehalte im Gras im Verlauf des Versuchszeitraumes aber wieder abzunehmen, wie an der Kontrollprobe deutlich wird.

Die Aufnahme von Phosphor ist bei dem sehr jungen Gras beim 1. Schnitt eindeutig höher als bei den folgenden Ernten; eine weitere deutliche Reaktion des Phosphorgesamtniveaus findet sich dann beim 5. gegenüber dem 4. Schnitt. Während zur ersten Ernte die Kontrolle mit nur etwa 4800 µg Phosphor im Gras gegenüber mehr als 6700 µg Phosphor bei mit Blei kontaminiertem Boden zu finden war, sind die Verhältnisse während des 2. Schnittes so umgekehrt, daß bei der Kontrolle knapp 4600 µg Phosphor und der Variante mit einer Kontamination von 1800 Blei nur ca. 2800 µg Phosphor gemessen wurde. Mit zunehmendem Alter des Grases ist eine leichte Abnahme der Phosphorkonzentrationen in der Pflanze zu erkennen: Zwischen 6000 und 8000 µg beim 1. Schnitt, ca. 4000 µg beim 2. bis 4. Schnitt und 3000 µg Phosphor beim 5. und 6. Schnitt, bezogen auf jeweils 1 g Trockensubstanz.

Auch der Schwefelgehalt im Gras wird durch unterschiedliche Blei-gehalte im Boden beeinflusst. Es deutet sich an, daß mit einigen Ausnahmen bei zunehmender Bodenkontamination an Blei die Schwefelgehalte in der Pflanze leicht zunehmen. Allerdings liegt nur beim 1. Schnitt die Kontrollvariante im Schwefelgehalt niedriger als die der kontaminierten Töpfe. Die gefundenen Schwefelwerte im Pflanzenmaterial liegen überwiegend zwischen 3- und 4000 µg Schwefel/g Trockensubstanz. Es besteht der Trend, daß nach höheren Anfangswerten der Schwefelgehalt zur 3. und 4. Ernte absinkt und dann wieder ansteigt.

Ein Kontamination von Boden mit unterschiedlichen Bleikonzentrationen bis 1800  $\mu\text{g/g}$  beeinflusst ähnlich wie bei Cobalt den Mineralhaushalt der Pflanze, hier bei *Lolium multiflorum*. Dies gilt natürlich insbesondere für den Bleigehalt selbst und darüber hinaus auch für Mangan, Blei und Schwefel sowie in geringerem Maße für Magnesium und Phosphor. Die Konzentrationen der einzelnen Elemente im Gras in Abhängigkeit der Pb-Konzentrationen im Boden sind für die einzelnen Schnitte in Anhang Nr. 8 - 13 graphisch dargestellt.

### 3.2.3 Variation der Chromgehalte im Boden

Die Zugabe von Chrom in Versuchsböden bewirkte insbesondere bei 500 und 100  $\mu\text{g}$  Chrom/g Boden einen deutlichen Anstieg dieses Elementes im Gras zur 1. Ernte (Tab. 7). Das Gesamtniveau der Chromgehalte nimmt bei weiteren Schnitten auch bei den höheren Chromzugaben in den Boden ab. Lediglich die Zugabe von 1000  $\mu\text{g}$  Chrom/g Boden führt während des Beobachtungszeitraumes bis zum 5. Schnitt zu etwas höheren Chromgehalten im Pflanzenmaterial. Während beim 6. Schnitt zwischen verschiedenen Chromzugaben im Boden kaum eine Beziehung zu den Chromanteilen im Gras hergestellt werden kann, liegt der Wert der Kontrolle deutlich unter denen mit Cr-Kontamination. Die Wirkung hoher Chromkontaminationen läßt im Laufe der Zeit nach.

Die Cobalt- und Bleigehalte in *Lolium multiflorum* sind von den Chromzugaben zum Boden in der Größenordnung bis 1000  $\mu\text{g}$  Chrom/g Boden nicht klar abhängig. Nur für Blei deutet sich mitunter eine Beziehung an.

Die Konzentration von Mangan in der Graspflanze hängt deutlich vom Chromgehalt im Boden ab, wobei insbesondere 1000  $\mu\text{g}$  Chrom/g Boden die Manganwerte der Pflanze bis zu 150  $\mu\text{g}$ /Trockensubstanz heraufschnellen lassen. Bemerkenswert ist die Tatsache, daß bei einer Chromzugabe bis zu 150  $\mu\text{g}$  keine Unterschiede im Mangangehalt des Grases zur Kontrolle bestehen. Wie aus Tab. 7 weiter hervorgeht scheinen die Mangangehalte der Kontrollpflanzen als Folge der Alterung zügig abzunehmen. Die Konzentrationen von Natrium im Gras sind bei der Kontrolle im Bereich zwischen 245 und 347  $\mu\text{g}$  Natrium/g Trockensubstanz überwiegend höher als bei denen

Tab. 7: S, P, Ca, Mg, Na, Mn, Co, Cr und Pb in Lolium multi florum in Abhängigkeit vom Cr-Gehalt im Boden bei 6 aufeinanderfolgenden Ernteschnitten

Cr-Konzentration im Boden µg/g Boden	Element	Schnitt 1			Schnitt 2			Schnitt 3			Schnitt 4			Schnitt 5			Schnitt 6		
		$\bar{x}$	$\pm$	$\sigma$															
0	S	2870	70		3540	60		3400	100		3270	80		3800	100		3900	300	
10	S	3400	100		3100	100		2900	100		3300	80		3600	100		3700	200	
20	S	2800	900		3300	200		3140	70		3200	100		3600	200		3600	200	
50	S	3600	700		3100	100		3200	100		3270	70		3600	100		3800	100	
150	S	3900	300		3300	200		3130	90		3300	300		3500	100		3700	200	
500	S	5200	100		4600	500		3270	30		3270	80		3800	200		3750	60	
1000	S	4500	300		4600	300		4000	200		3500	400		4280	40		3900	100	
0	P	4800	300		4600	200		4400	100		3900	200		3300	100		3400	100	
10	P	8300	300		4250	70		4200	200		4100	100		3120	50		3400	200	
20	P	6000	2000		4400	400		4200	200		4100	100		3200	100		3500	200	
50	P	7400	300		4100	100		4300	300		3900	100		3170	90		3400	200	
150	P	6000	1000		3800	600		3400	300		3600	300		2900	100		3100	100	
500	P	5800	200		3900	200		3500	300		3000	500		2600	300		2470	80	
1000	P	5000	100		3600	300		3100	300		2600	400		2400	100		2300	200	
0	Ca	10000	1000		14600	800		12000	2000		11000	1000		10000	1000		8000	2000	
10	Ca	9700	400		13000	1000		12400	900		13000	1000		12000	1000		9700	500	
20	Ca	9000	2000		13000	1000		13000	3000		12000	1000		12000	1000		10000	900	
50	Ca	9800	500		13100	700		14000	1000		15000	2000		14000	1000		11000	1000	
150	Ca	9800	400		12700	300		13000	1000		15000	2000		17000	3000		14000	2000	
500	Ca	8000	400		13900	1000		15000	1000		19000	2000		23000	2000		22000	2000	
1000	Ca	7620	90		15700	700		17000	1000		23000	2000		29000	1000		31000	2000	
0	Mg	2200	200		2850	60		2670	70		2500	70		2410	40		2300	50	
10	Mg	2200	80		2650	60		2660	90		2690	80		2510	80		2390	50	
20	Mg	1900	500		2800	80		2700	100		2600	80		2510	80		2340	50	
50	Mg	2150	50		2710	40		2680	90		2550	70		2560	80		2410	60	
150	Mg	2200	100		2700	100		2700	100		2600	200		2700	200		2600	100	
500	Mg	2210	30		2400	200		2580	60		2600	300		2720	70		2780	80	
1000	Mg	1940	50		2260	60		2220	70		2300	300		2800	200		2500	100	
0	Na	250	20		240	20		310	40		320	20		330	20		350	10	
10	Na	180	30		250	20		290	20		330	10		350	40		380	40	
20	Na	190	70		280	20		350	60		310	10		320	10		320	40	
50	Na	210	20		260	10		280	20		300	30		310	40		300	30	
150	Na	230	30		230	10		240	40		270	30		300	20		320	40	
500	Na	220	20		210	30		290	20		250	40		280	30		290	20	
1000	Na	210	40		200	50		220	20		270	30		300	10		320	50	
0	Mn	36	6		39	6		36	3		31	2		31	5		20	2	
10	Mn	40	3		28	1		32	1		33	2		31	4		32	3	
20	Mn	40	10		34	5		44	7		38	6		33	5		33	4	
50	Mn	37	2		33	4		40	10		36	6		30	5		29	6	
150	Mn	41	1		34	2		39	4		34	4		35	4		35	5	
500	Mn	55	1		47	3		50	6		49	3		53	6		50	4	
1000	Mn	101	2		140	20		140	20		150	20		150	10		140	10	
0	Co																		
10	Co																		
20	Co																		
50	Co	Alle																	
150	Co	<0,6			<0,6			<0,6			<0,6			<0,6			<0,6		
500	Co																		
1000	Co																		
0	Cr	2,7	0,5		1,6	0,2		<1,5			<1,5			<1,5			<1,5		
10	Cr	2,3	0,8		<1,5			2			2,3	0,9		1,6	0,4		2	2	
20	Cr	3,5	0,5		2	1		2	1		2	1		1,9	0,5		3	3	
50	Cr	2,7	0,9		2	1		2,1	0,5		4	2		2,3	0,5		3	1	
150	Cr	4,2	0,6		3,2	0,6		4	2		3,8	0,9		2,1	0,3		3,2	0,4	
500	Cr	10	1		4	2		5	2		2,8	0,8		2,6	0,7		3	1	
1000	Cr	13	1		6	2		6	2		8	4		5	3		4	1	
0	Pb	0,7	0,2		0,4	0,1		0,5	0,4		<0,23			0,3	0,1		<0,23		
10	Pb	0,9	0,4					0,3	0,2		0,4	0,1		0,3	0,2		0,3	0,1	
20	Pb	1,0	0,7		0,3	0,1		0,4	0,2		0,3	0,1		0,3	0,1		0,4	0,1	
50	Pb	0,9	0,4		<0,23			<0,23			0,5	0,2		0,3	0,1		0,4	0,1	
150	Pb	0,9	0,1		0,4	0,1		0,3	0,1		0,3	0,1		<0,23	0,1		0,4	0,1	
500	Pb	0,9	0,2		0,4	0,2		0,35	0,09		0,3	0,4		0,4	0,2		0,4	0,2	
1000	Pb	1,3	0,3		0,4	0,1		<0,23			3	1		1,0	0,1		0,5	0,1	

mit Chromzugabe. Eine klare Abstufung unterschiedlicher Natriumgehalte im Boden findet sich in der Pflanze nicht wieder. Im Rahmen des Alterungsprozesses erhöht sich die Natriumanreicherung in der Blattmasse des Grasses leicht von etwa 200 auf etwa 300  $\mu\text{g}$  Natrium/g Trockensubstanz.

Die Magnesiumgehalte im *Lolium multiflorum* hängen in unterschiedlichem Maße vom Chromgehalt im Boden ab. Bei Schnitt 1 und 4 kann man annehmen, daß Chromzugaben die Magnesiumgehalte der Pflanzen reduzieren. Bei der 3. und 4. Ernte findet man lediglich bei einer Chromkonzentration von 1000  $\mu\text{g/g}$  Boden noch niedrigere Werte gegenüber der Kontrolle in den mit geringen Chromgehalten versetzten Böden. Zur 5. und 6. Ernte finden sich dann die niedrigsten Magnesiumwerte im Gras bei der Variante ohne Chromanreicherung des Bodens.

Auch die Calciumgehalte im Gras zeigen ein mehr- oder weniger auffällig verändertes Verhalten. Beim 1. Schnitt bewirken die beiden höchsten Chromzugaben im Boden, daß der Calciumgehalt in der Pflanze mit ca. 8000 und 7600 ppm wesentlich geringer als bei der Kontrolle mit etwa 10.000  $\mu\text{g}$  Calcium zu finden ist. Beim 2. Schnitt ist die Calciumkonzentration gegenüber dem 1. Schnitt deutlich erhöht. Bei ca. 15.700  $\mu\text{g}$  Calcium/g Trockensubstanz bei einer Zugabe von 1000  $\mu\text{g}$  Cr/g Boden ist der Wert gegenüber den anderen Varianten am höchsten. Ab dem 3. bis zum 6. Schnitt wird zunehmend deutlich, daß ein steigender Chromgehalt im Boden die Calciumaufnahme in die Pflanze erhöht. Dabei ist bei Kontrolle und geringen Chromzugaben in den Boden tendenziell eine Reduktion der Calciumwerte zu beobachten (bis ca. 50  $\mu\text{g}$  Chrom/g Boden). Mit zunehmendem Alter und zunehmender Chromzugabe in den Boden wird der Calciumgehalt im Gras wieder geringer. So findet sich bei einer Bodenkontamination von 1000  $\mu\text{g/g}$  Boden beim 6. Schnitt 30.800  $\mu\text{g}$  Calcium/g Trockensubstanz gegenüber nur 8.700  $\mu\text{g}$  bei der Kontrolle und sogar nur 7.600  $\mu\text{g}$  beim 1. Schnitt, der höchsten Chromstufe im Boden.

Der Phosphatgehalt im Gras zeigt beim 1. Schnitt die Tendenz, daß mit steigender Chromkonzentration im Boden der Phosphorgehalt im Gras von etwa 8.300 auf 5.000  $\mu\text{g}$  Phosphor/g Trockensubstanz abnimmt, wobei die Kontrolle mit etwa 4.800  $\mu\text{g/g}$  den niedrigsten Wert hat.

Ab dem 2. Schnitt wird aber deutlich in Abhängigkeit zunehmender Chromgehalte im Boden der Phosphorgehalt im Pflanzenmaterial reduziert. Sehr systematisch und unabhängig von der Schwermetallzugabe nimmt der Phosphorgehalt im Gras im Laufe der Zeit ab, wobei die absolute Abnahme zwischen dem 1. und dem 6. Schnitt bei allen Chromzugaben zum Boden größer als bei der Kontrolle ist.

Die Schwefelgehalte im Gras lassen einige Zusammenhänge zum Chromgehalt im Pflanzenmaterial erkennen. So verursachen Kontaminationen von 500  $\mu\text{g}$  Chrom/g Boden höhere Schwefelgehalte im Gras als bei geringeren Chromzugaben. Die Schwefelgehalte in *Lolium multiflorum* der Kontrolle liegen in der Regel höher als die bei Chrom- Bodenkonzentrationen von 10 - 150  $\mu\text{g/g}$ .

Die Konzentrationen der einzelnen Elemente im Gras in Abhängigkeit von der Zeit und der Chromkonzentration im Boden sind für die einzelnen Schnitte im Anhang Nr. 14 - 19 graphisch dargestellt.

#### 4. Diskussion der Ergebnisse

Alle drei Elemente zeigen in höheren Konzentrationen deutlich einen schädigenden Einfluß auf das Gras, welcher sich neben sinkenden Erträgen und geringem Wasserverbrauch auch in einer veränderten Elementzusammensetzung äußert. Hinsichtlich des Transfers Boden/Pflanze machen sich zwischen den drei Metallen beachtliche Unterschiede bemerkbar. Die Aufnahme von Cobalt durch die Pflanze ist mit Abstand am höchsten, wohingegen Blei und Chrom zwar einander ähnliche, aber weitaus geringere Aufnahmen zeigen.

Tab. 8 gibt für die einzelnen Schnitte und Elemente die jeweiligen Transferfaktoren wieder. Die Transferfaktoren wurden berechnet, indem die in den Pflanzen gefundenen Metallkonzentrationen ( $\mu\text{g/g TS}$ ) durch die im Boden enthaltene Schwermetallmenge ( $\mu\text{g/g}$ ) dividiert wurde.

Ein linearer Anstieg des Schwermetallgehaltes in der Pflanze läßt sich nur bei Cobalt bis zu einer Zugabe von 20 mg/kg Boden und bei Blei ab einer Zugabe von 100 mg/kg Boden erkennen. Dies deckt sich teilweise mit dem, was in [6] berichtet wird. Hier zeigten auf mit Klärschlamm behandeltem Boden gezogene Feldfrüchte hinsichtlich ihres Blei- und Chromgehaltes keine Korrelation zu den entsprechenden Schwermetallmengen im Boden.

Tab.: 8 Transferfaktoren für die Aufnahme von Chrom, Blei und Cobalt durch *Lolium multiflorum*  
( $\mu\text{g/g}$  TG in der Pflanze dividiert durch  $\mu\text{g/g}$  TG im Boden/ $\pm$ Standardabweichung)

Im Boden vorhandene Menge an Schwermetall Angaben in $\mu\text{g/g}$ TG	Schnitt 1 (14 Tage nach Aussaat)	Schnitt 2 (28 Tage nach Aussaat)	Schnitt 3 (42 Tage nach Aussaat)	Schnitt 4 (56 Tage nach Aussaat)	Schnitt 5 (70 Tage nach Aussaat)	Schnitt 6 (84 Tage nach Aussaat)
Chrom	17	0,16 $\pm$ 0,03	0,09 $\pm$ 0,01	<0,09	<0,09	<0,09
	27	0,09 $\pm$ 0,03	<0,06	0,07 $\pm$ 0,07	0,09 $\pm$ 0,04	0,06 $\pm$ 0,01
	37	0,10 $\pm$ 0,01	0,06 $\pm$ 0,03	0,05 $\pm$ 0,03	0,05 $\pm$ 0,03	0,05 $\pm$ 0,01
	67	0,04 $\pm$ 0,01	0,03 $\pm$ 0,02	0,030 $\pm$ 0,007	0,06 $\pm$ 0,04	0,030 $\pm$ 0,006
	167	0,030 $\pm$ 0,004	0,019 $\pm$ 0,004	0,03 $\pm$ 0,02	0,023 $\pm$ 0,006	0,013 $\pm$ 0,002
	517	0,019 $\pm$ 0,002	0,009 $\pm$ 0,003	0,010 $\pm$ 0,004	0,005 $\pm$ 0,001	0,005 $\pm$ 0,001
	1017	0,012 $\pm$ 0,001	0,006 $\pm$ 0,002	0,006 $\pm$ 0,002	0,008 $\pm$ 0,004	0,005 $\pm$ 0,003
Blei	24	0,030 $\pm$ 0,009	0,018 $\pm$ 0,004	0,01 $\pm$ 0,01	<0,010	0,012 $\pm$ 0,004
	34	0,018 $\pm$ 0,005	0,015 $\pm$ 0,006	0,01 $\pm$ 0,01	0,015 $\pm$ 0,005	0,014 $\pm$ 0,006
	54	0,02 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,04	0,01 $\pm$ 0,01	0,016 $\pm$ 0,005	0,010 $\pm$ 0,001
	124	0,019 $\pm$ 0,005	0,020 $\pm$ 0,006	0,007 $\pm$ 0,005	0,010 $\pm$ 0,007	0,009 $\pm$ 0,004
	324	0,020 $\pm$ 0,002	0,02 $\pm$ 0,01	0,017 $\pm$ 0,007	0,017 $\pm$ 0,003	0,013 $\pm$ 0,002
	924	0,018 $\pm$ 0,001	0,02 $\pm$ 0,02	0,017 $\pm$ 0,001	0,014 $\pm$ 0,002	0,017 $\pm$ 0,002
	1824	0,019 $\pm$ 0,002	0,04 $\pm$ 0,01	0,030 $\pm$ 0,007	0,019 $\pm$ 0,005	0,024 $\pm$ 0,004
Cobalt	3	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
	8	0,11 $\pm$ 0,02	0,10 $\pm$ 0,04	0,1 $\pm$ 0,1	0,10 $\pm$ 0,01	<0,08
	13	0,31 $\pm$ 0,06	0,60 $\pm$ 0,14	0,47 $\pm$ 0,06	0,59 $\pm$ 0,07	0,31 $\pm$ 0,04
	23	0,65 $\pm$ 0,10	1,3 $\pm$ 0,2	1,2 $\pm$ 0,3	1,0 $\pm$ 0,1	0,74 $\pm$ 0,10
	53	0,66 $\pm$ 0,08	1,3 $\pm$ 0,2	1,15 $\pm$ 0,06	1,0 $\pm$ 0,1	0,60 $\pm$ 0,05
	203	0,31 $\pm$ 0,02	0,60 $\pm$ 0,16	0,42 $\pm$ 0,09	0,40 $\pm$ 0,04	0,26 $\pm$ 0,02
	403	0,30 $\pm$ 0,01	0,66 $\pm$ 0,02	-	-	-

#### 4.1 Zeitabhängigkeit der Metallkonzentrationen in der Pflanze

Abb. 5 zeigt die Zeitabhängigkeit der Konzentration in der Pflanze am Beispiel des Elementes Cobalt. Es wird deutlich, daß die Cobaltkonzentration in der Pflanze bis ungefähr zum 30. Tag nach der Aussaat zunimmt, um dann wiederum abzunehmen. Eine Ausnahme machten hierbei die Pflanzen, die in dem Boden wuchsen, der 8 µg Cobalt/g Boden enthielt. In diesem Fall scheint das Maximum erst nach ca. 40 Tagen erreicht zu sein. Verursacht wird dieses Verhalten wahrscheinlich durch zwei Faktoren. Zum einen ist dies eine Stoffwechselfunktion der Pflanze, also ihre Fähigkeit Cobalt aufzunehmen und in die Spitze des Grases zu transportieren, zum anderen die zunehmende Immobilisierung des Cobalts im Boden. Bis zum 30. Tag überwiegen offensichtlich die Änderungen im Stoffwechsel bzw. im Wurzelwachstum der Pflanze eine Fixierung des Cobalts im Boden - die Aufnahme steigt. In der Folge tritt der Alterungsprozeß des Grases in den Vordergrund. Die Cobaltaufnahme wird zunehmend gehemmt, wobei verstärkend auch die Festlegung des Metalls im Boden zum Ausdruck kommt.

Nicht so deutlich ausgeprägt wie beim Cobalt ist das Verhalten des Chroms und des Bleis (Abb. 6 und 7). Im Falle des Chroms läßt sich der mit zunehmender Zeit geringer werdende Gehalt in der Pflanze deutlich erkennen, wobei diese Tendenz umso stärker ausgeprägt ist, je höher die zugegebene Chrommenge war. Die Abnahme ist im Verlauf der ersten Woche am stärksten, was einerseits in der forcierten Fixierung des Chroms zu Versuchsbeginn begründet sein kann, andererseits auch durch das Pflanzenverhalten hervorgerufen werden kann. Ferner ist eine gewisse Kontamination der Wuchsspitzen mit Chrom nicht auszuschließen, da dieses Metall als das schwerlöslichste der drei beim Gießen geringer abgespült wurde. Eine Rolle spielt sicherlich auch die begrenzte Mobilität des dreiwertigen Chroms in der Pflanze. So berichten andere Autoren, daß Chrom-3 in geringeren Mengen in die Blätter von Reben transportiert wird, als Chrom-6 [7] und auch in der Wurzel akkumuliert

ABB. 5: ABHÄNGIGKEIT DER Co-KONZENTRATION  
IN LOLIUM MULTIFLORUM VON DER ZEIT

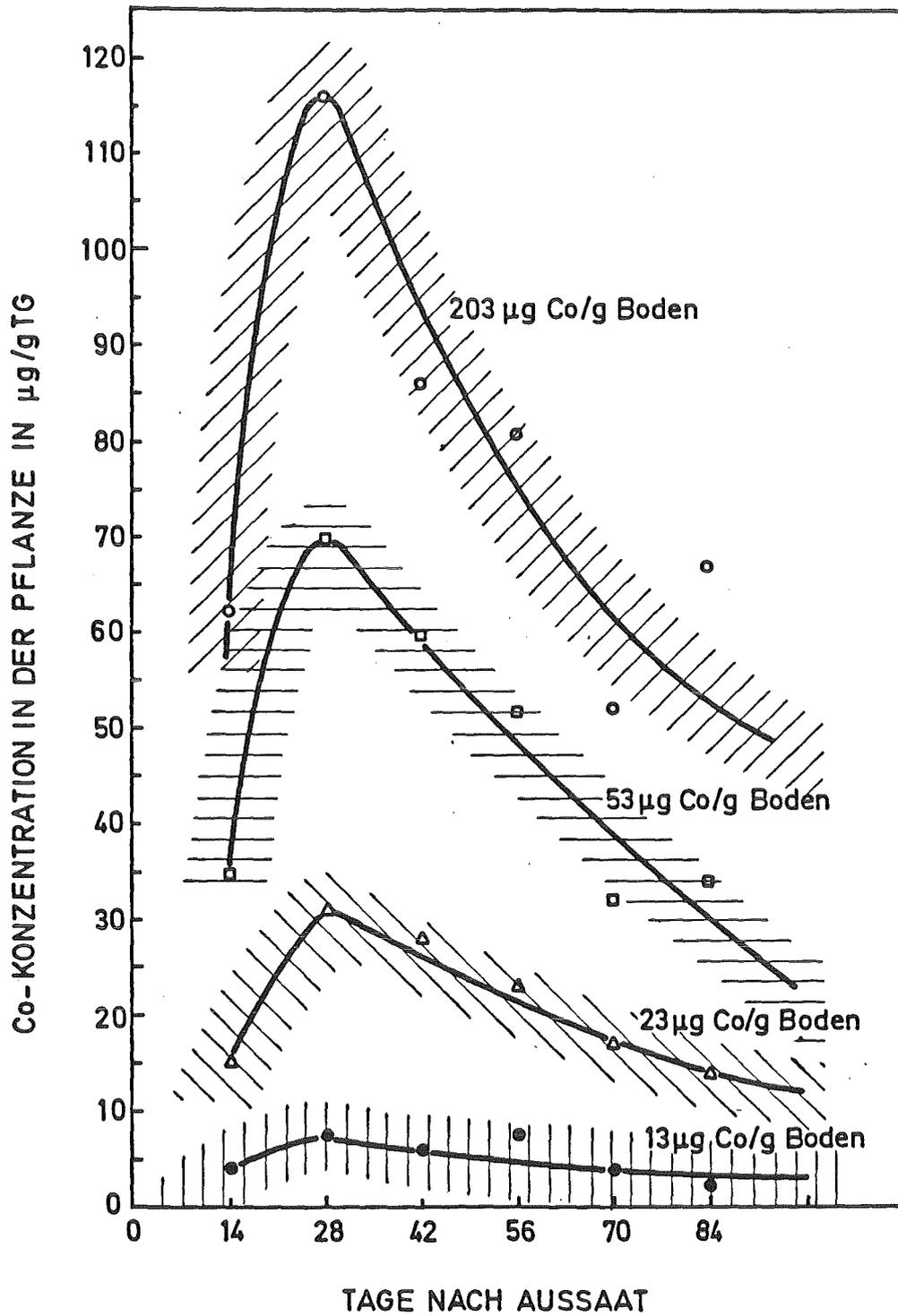


ABB. 6: ABHÄNGIGKEIT DER Cr-KONZENTRATION  
IN LOLIUM MULTIFLORUM VON DER ZEIT

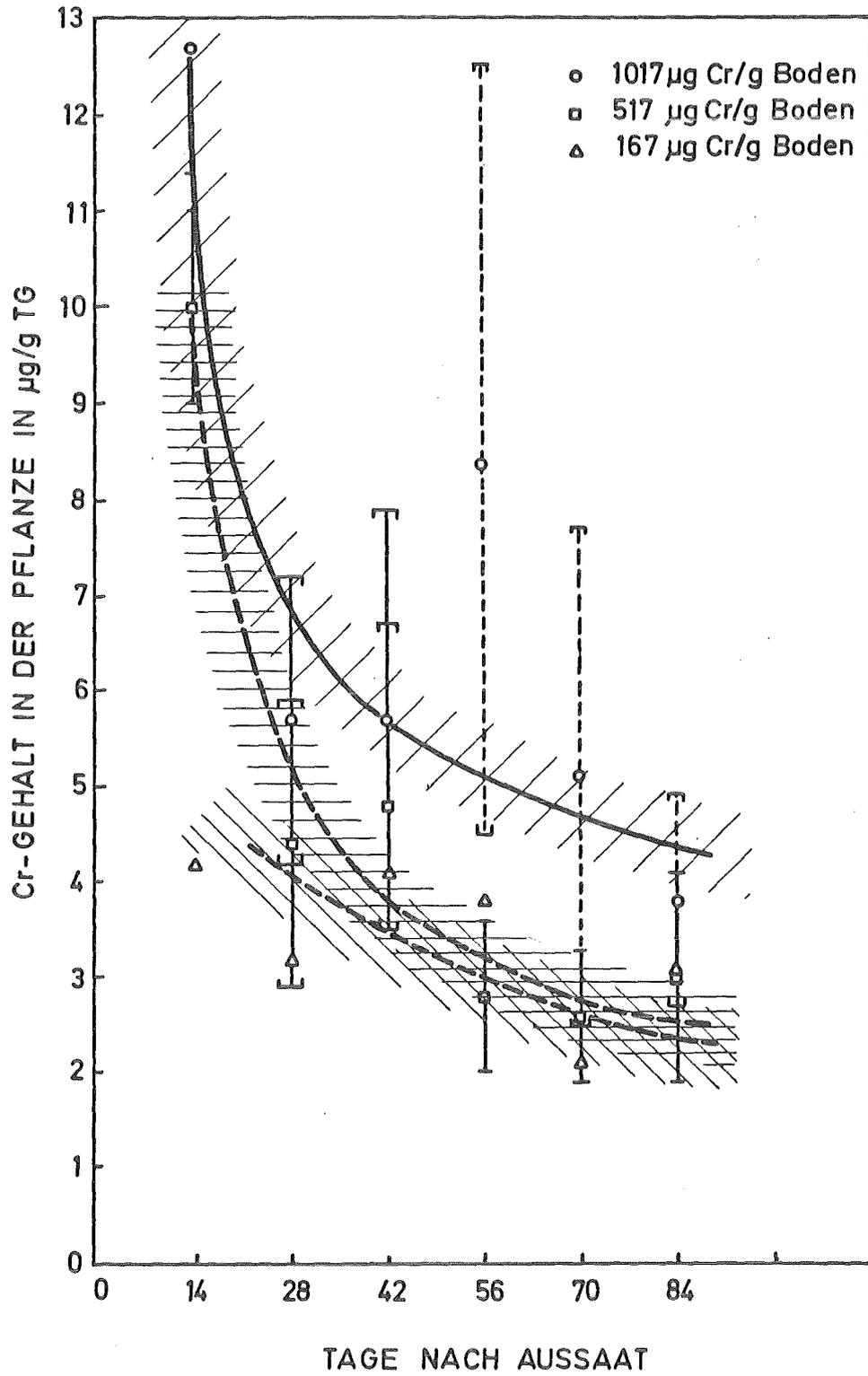
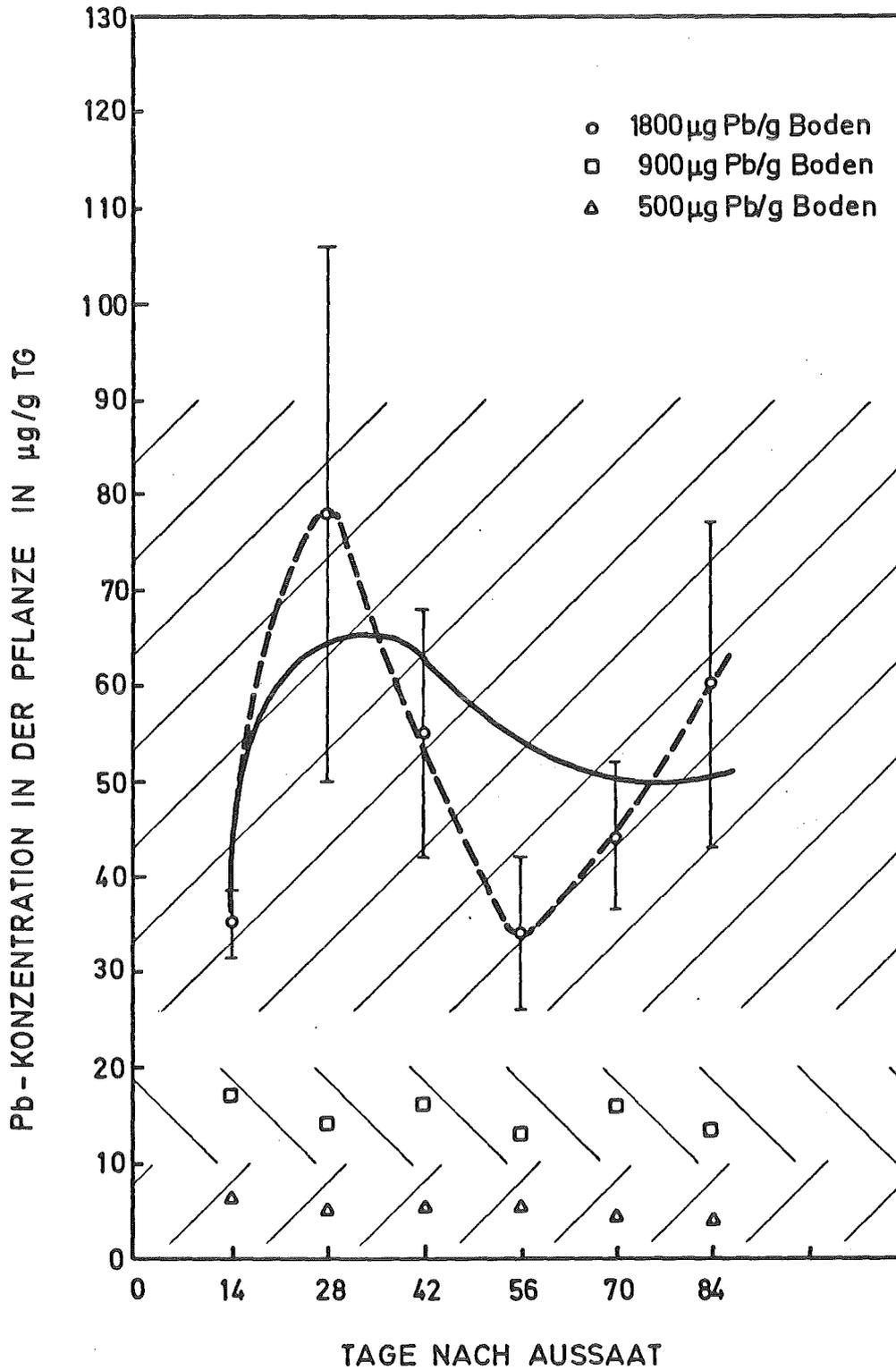


ABB.7: ABHÄNGIGKEIT DER Pb-KONZENTRATION  
IN LOLIUM MULTIFLORUM VON DER ZEIT



wird, wohingegen ein Transport in die Früchte nicht stattfindet [8]. Da zu Beginn des Wachstums der Stoffwechsel des Grases einer raschen Veränderung unterliegt, ist es denkbar, daß anfangs noch eine vermehrte Aufnahme gepaart mit erhöhtem Transport in die Spitze des Grases erfolgt, während mit zunehmendem Alter der Pflanze der Rückhalt des Chroms in und an der Wurzel zunimmt.

Unklar gestaltet sich die Zeitabhängigkeit des Bleigehaltes im Gras. Während bei der höchsten Konzentrationsstufe (1800  $\mu\text{g}$  Blei/g Boden) eine Folge von steilem Anstieg - Abfall - flacherer Anstieg zu beobachten ist, läßt sich bei einer Konzentration von 90  $\mu\text{g}$  Blei/g Boden lediglich ein linearer Verlauf feststellen und bei 300  $\mu\text{g}$  Blei/g Boden ist ein Abnehmen mit zunehmender Zeit nur andeutungsweise zu erkennen. Blei verhält sich also deutlich anders als Chrom und Cobalt. Eine Interpretation der zeitlichen Abhängigkeit der Bleikonzentration in der Pflanze erscheint aufgrund des unterschiedlichen Verlaufs der drei Kurven nicht sinnvoll.

#### 4.2 Abhängigkeit des Transferfaktors von der im Boden enthaltenen Schwermetallmenge

Ein ähnlicher Verlauf wie bei der Zeitabhängigkeit der Cobaltkonzentration der Pflanze ergibt sich bei der Konzentrationsabhängigkeit (siehe dazu Abb. 8). Interessant ist hier, daß nach einer anfänglichen Zunahme des Transfers bei Bodenkonzentrationen zwischen 23 und 53  $\mu\text{g}$  Cobalt/g Boden ein Maximum erreicht wird und danach ein dem Anstieg in der Steilheit ähnlicher Abfall eintritt. Den Wert für 403  $\mu\text{g}$  Cobalt/g Boden mit einzubeziehen erscheint zu riskant, da bei dieser hohen Cobaltkonzentration die Grasnarbe bereits nach 5 Wochen vollständig abgestorben war, mithin schon ein völlig veränderter Stoffwechsel vorlag. Der Anstieg und Abfall des Transferfaktors mit zunehmender Konzentration ist wahrscheinlich Folge zweier gegeneinanderlaufender Prozesse. Einseits nimmt mit zunehmender

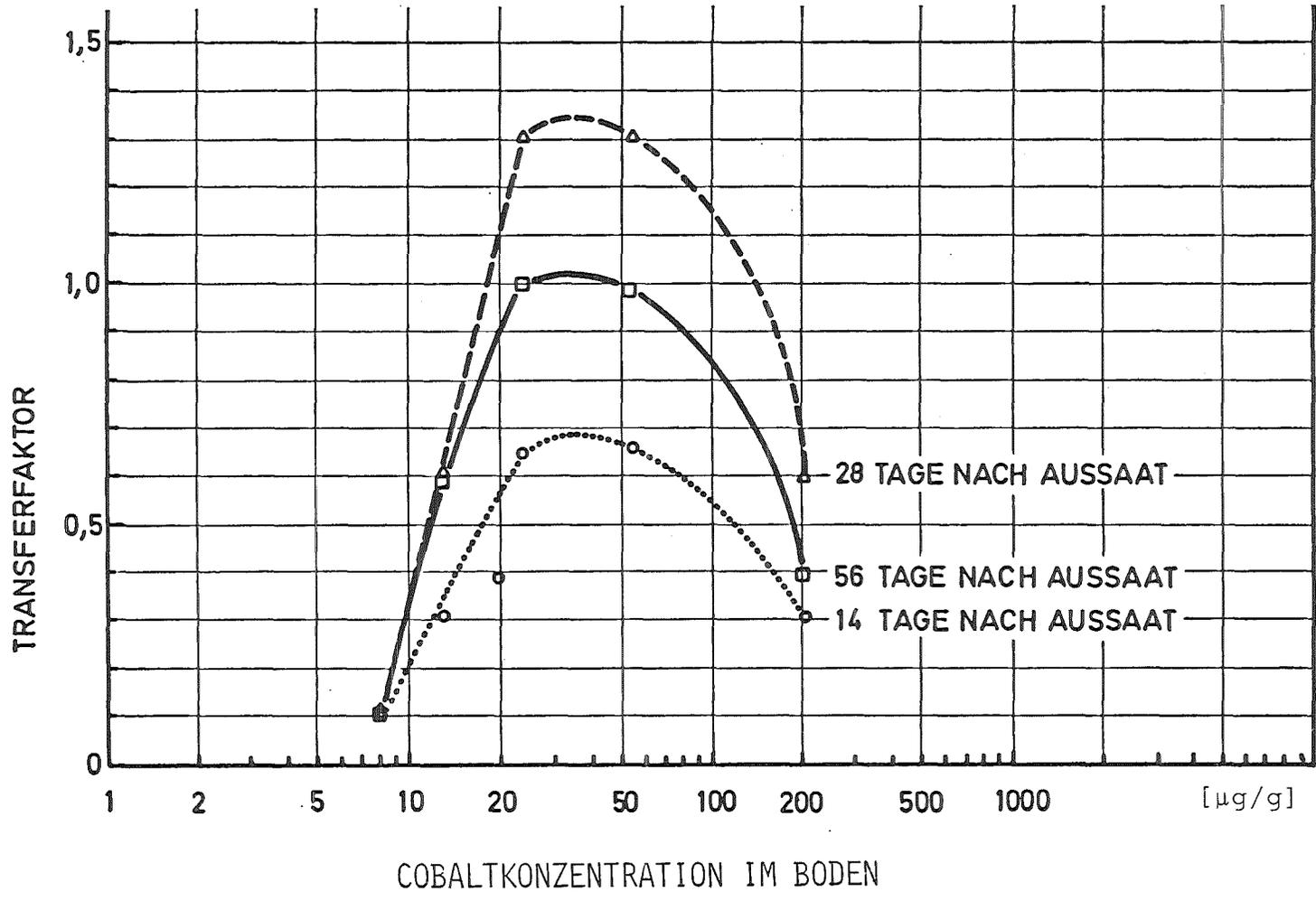


Abb. 8: zeitlicher Zusammenhang zwischen Cobaltaufnahme und Cobaltkonzentration im Boden

Konzentration an Cobalt im Boden die relativ von der Pflanze aufgenommene Menge ab, da entweder die Wurzeln mit steigender Cobaltmenge verstärkt als Barriere fungieren oder die Fixierung des Cobalt prozentual zunimmt. Andererseits steigt mit der dem Boden zugeführten Menge an Cobalt der absolute Anteil des verfügbaren Schwermetalls, so daß eine entsprechende Zunahme des Gehaltes in der Pflanze erfolgen kann. Für die Zeitabhängigkeit der in Abb. 8 dargestellten Kurven gilt das zuvor unter Punkt 4.1 erwähnte.

Abb. 9 zeigt die Abhängigkeit des Transferfaktors für die Chromaufnahme durch *Lolium multiflorum* von der im Boden enthaltenen Schwermetallmenge. Genau wie beim Cobalt gleicht auch beim Chrom der konzentrationsabhängige Verlauf des Transferfaktors dem zeitlichen Verlauf des Chromgehaltes in der Pflanze. Das dort Erwähnte findet auch in dieser Darstellungsart seinen Niederschlag.

Anders als bei Chrom und Cobalt ist bei Blei keine gute Übereinstimmung zwischen der zeitlichen Abhängigkeit der Bleikonzentration in der Pflanze und der Konzentrationsabhängigkeit des Transferfaktors (Abb.10) feststellbar.

In Anbetracht des unterschiedlichen Kurvenverlaufs, der hohen Standardabweichung und der Unsicherheit des Wertes mit 124  $\mu\text{g Pb/g}$  Boden (siehe Tabelle 2 wo gezeigt wird, daß in den Stichproben dieser Bodenfraktion statt 124  $\mu\text{g Pb/g}$  Boden nur 36  $\mu\text{g Pb/g}$  Boden im Mittel gefunden werden) erscheint eine tiefergehende Interpretation nicht sinnvoll. Denkbar wäre lediglich eine Abnahme des Transferfaktors zu mittleren Bodengehalten hin, daß also geringe und hohe Bleikonzentrationen im Boden einen höheren Transfer verursachen.

Abb. 9: Zeitlicher Zusammenhang zwischen Chromaufnahme und Chromkonzentration im Boden

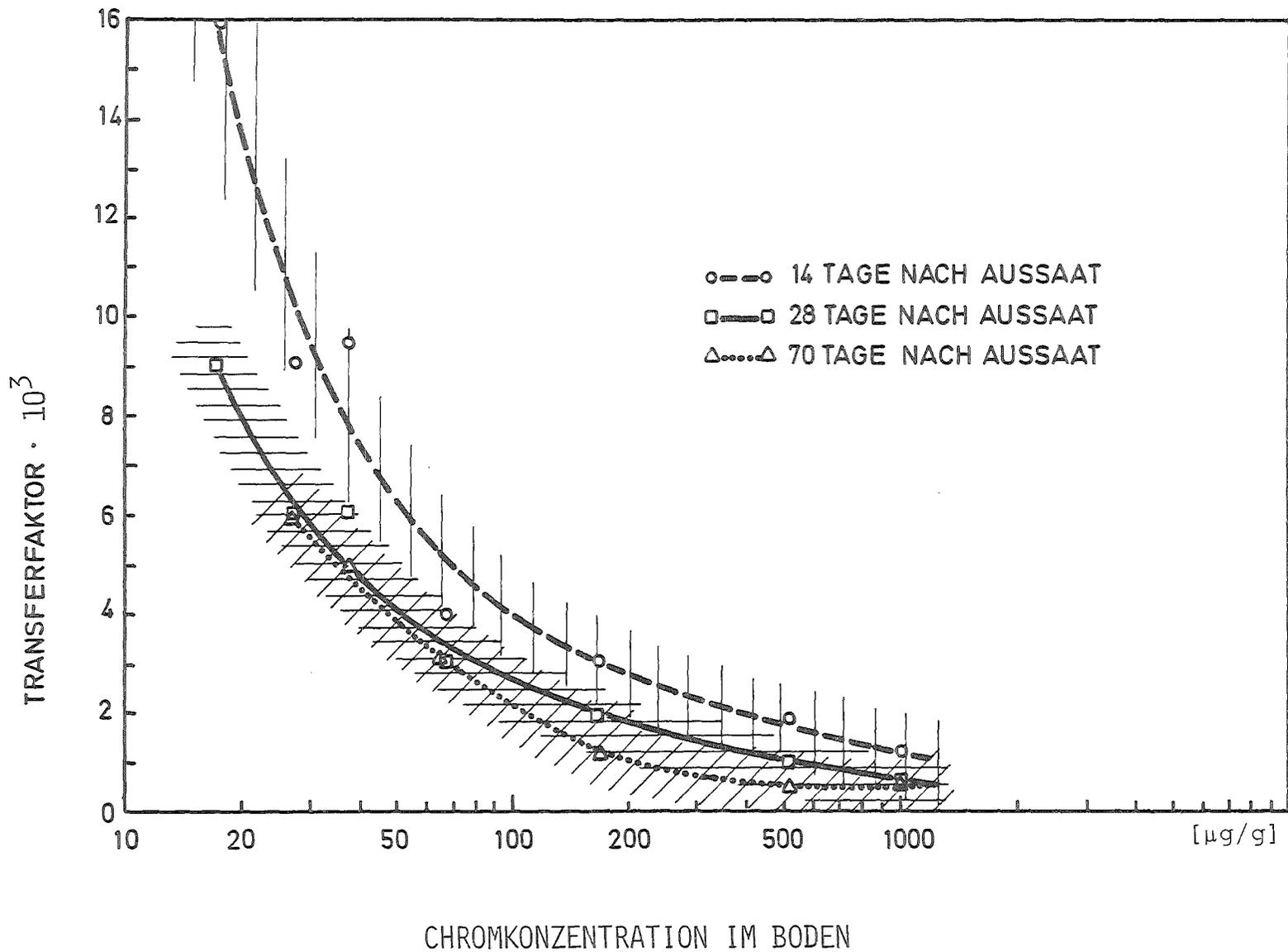
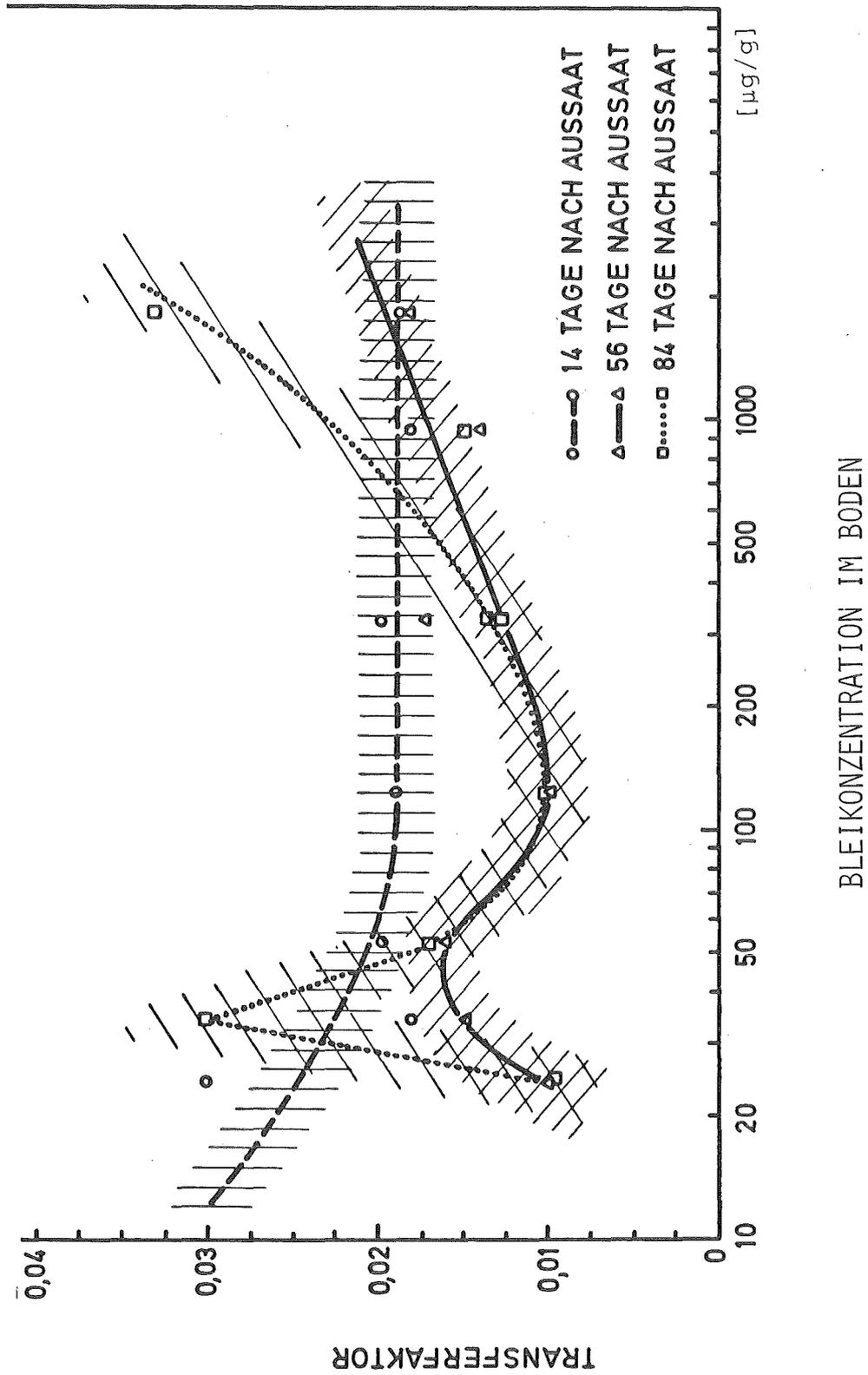


Abb. 10: Zeitlicher Zusammenhang zwischen Bleiaufnahme und Bleikonzentration im Boden



#### 4.3. Einfluß von Cobalt, Chrom und Blei auf Lolium multiflorum

Auch in der Wirkung auf den sonstigen Elementgehalt und Zustand der Pflanze sind deutliche Unterschiede zwischen den drei Metallen zu erkennen. Anders als Blei und Chrom ist Cobalt ein für Pflanzen notwendiges Element. Demzufolge wirken sich geringe Gaben an Cobalt günstig für die Pflanze aus. Ertrag und Wasserverbrauch bei mit 5 und 10 mg Cobalt/kg Boden kontaminierten Töpfen liegen teilweise über den Werten der Kontrollproben. Bei höheren Cobaltkonzentrationen im Boden macht sich eine schädigende Wirkung des Schwermetalles bemerkbar, die sich deutlich in Wuchsreduzierung und veränderten Elementgehalten manifestiert. Ein Eisenmangel wie er in [9] beschrieben wird, konnte nicht aufgezeigt werden, doch zeigen die deutlichen Veränderungen bei Calcium, Schwefel, Mangan und Phosphor den Einfluß des Cobalts in hohen Konzentrationen. Am Beispiel des Mangans und Phosphors läßt sich die mit der Zeit fortschreitende Schädigung des Grases bei den Zugaben von 50 und 200 mg Cobalt/kg Boden gut erkennen. Anfangs wird das Mangan durch Cobalt substituiert (Absinken des Mangangehaltes von Schnitt I bis Schnitt III). Dies deckt sich auch mit dem in [9] Erwähnten wo gesagt wird, daß die toxische Wirkung des Cobalts einem Manganmangel gleicht. Mit der Zeit ist das Gras bei einem Cobaltgehalt von 200 mg/kg Boden so geschädigt, daß eine unkontrollierte und/oder verstärkte Aufnahme des Mangans stattfindet, zu ähnlich hohen Werten, wie sich auch bei der sterbenden Graskultur in den mit 400 mg Cobalt/kg kontaminierten Töpfen zu finden war. Die Zugabe von 50 mg Cobalt/kg Boden scheint unter den vorliegenden Bedingungen ein Grenzwert zu sein. Dies wird auch durch den Verlauf der anderen Elementgehalte sowohl in Abhängigkeit von der Zeit als auch den Konzentration sichtbar. In einigen Fällen deutet sich eine starke Schädigung des Grases auch durch erhöhte Blei- und Chromgehalte an.

Über den schädigenden Einfluß des Chroms, speziell in der höchsten Oxidationsstufe, wird verschiedentlich in der Literatur berichtet.

Die schädigende Wirkung äußert sich vor allem im Welken, Auftreten von Blattnekrosen, Gewebeabsterben usw. [6,7,8]. In [6] wird ferner berichtet, daß in Böden, die bis zu 270 mg Chrom/kg Boden enthielten, keine nennenswerte Schadstoffaufnahme stattfand. Dies deckt sich insofern mit unseren Ergebnissen, als zwar schon bei geringen Chromkonzentrationen im Boden eine Zunahme des Chroms in der Pflanze qualitativ erkennbar ist. Eine deutliche Steigerung zeichnet sich jedoch erst bei Chromkonzentrationen oberhalb 150 mg Chrom/kg Boden ab. Im Gegensatz zu Cobalt substituiert Chrom kein Mangan. Demzufolge ist auch stets ein Anstieg des Mangangehaltes zu bemerken. Die höchste Chromkonzentration im Boden führt zu den höchsten Mangangehalten im Gras, obwohl die Graskultur hier nicht so schnell abstarb wie bei der höchsten Cobaltkonzentration. Parallel zum Chromgehalt im Boden steigt der Calciumgehalt im Gras. Auch die Erniedrigung des Phosphor- und Magnesiumgehaltes bei höheren Chromgehalten im Boden weist auf eine Schädigung der Pflanzen hin. Hier ist möglicherweise von Bedeutung, daß Magnesium bei vielen enzymatischen Prozessen von Mangan ersetzt werden kann und daß ein Magnesiummangel evtl. eine Hemmung der Phosphataufnahme herbeiführt [9].

Beim Blei liegen die Verhältnisse etwas anders als beim Chrom. Während bei Letzterem der höchste Gehalt in der Pflanze beim ersten Schnitt gefunden wird und von da eine Abnahme registriert werden kann, findet man den höchsten Bleigehalt beim zweiten Schnitt, und die bei den folgenden Schnitten stattfindende Abnahme ist auch nur geringfügig. Dies deckt sich etwa mit dem in [10] berichteten, wo bei Rotklee ein Anstieg des Bleigehaltes erst vom dritten zum vierten Schnitt zu beobachten war, ein hoher Bleigehalt in der Pflanze also ebenfalls nicht sofort auftrat.

Eine klare Erhöhung des Bleigehaltes ist erst oberhalb einer Zugabe von 100 mg Blei/kg Boden zu verzeichnen. Dies stimmt

auch mit den in der Literatur berichteten Ergebnissen überein [8, 11], wo an Gemüsepflanzen gezeigt wurde, daß erst Konzentrationen ab 200 bis 300  $\mu\text{g/g}$  Boden bzw. ab 50  $\mu\text{g/ml}$  Nährlösung zu einer stärkeren Zunahme des Bleigehaltes in der Pflanze führen und Schadsymptome deutlich auftraten.

Auch beim Blei ist in der höchsten Konzentrationsstufe eine Zunahme des Mangangehaltes zu beobachten, wenn auch nicht so deutlich wie beim Chrom. An der zeitlichen Zunahme des Mangangehaltes in der Pflanze bei einer Bleikonzentration von 1800 mg/kg Boden ist deutlich zu erkennen, wie die Störungen im Stoffwechsel der Pflanze zunehmen. Dies zeigt sich auch bei den Calciumgehalten. Interessant ist, daß beim ersten Schnitt die Calciumgehalte bei Chrom gegenüber der Kontrollprobe leicht erniedrigt, bei den anderen beiden Schwermetallen leicht erhöht sind, und daß dies zum zweiten Schnitt hin beim Cobalt extrem, bei Blei und Chrom noch deutlich in eine Erhöhung gegenüber der Kontrollprobe geändert ist. Dies, obwohl der Schwermetallgehalt in der Pflanze vom ersten zum zweiten Schnitt keine große Änderung mehr ergab. Es zeigt sich, daß die toxische Wirkung der Schwermetalle sozusagen mit einer gewissen Verzögerung einsetzt bzw. eine höhere Resistenz der sehr jungen Pflanze gegenüber phytotoxischen Stoffen vorhanden ist. Die extreme Änderung beim Calciumgehalt zwischen dem ersten und zweiten Schnitt weist deutlich auf die stärkere Wirkung des Cobalts hin, die wohl hauptsächlich in der hohen Aufnahme durch die Pflanze begründet ist.

## 5. Schlußfolgerungen

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß alle drei Schwermetalle in höheren Konzentrationen die physiologischen Prozesse innerhalb der Pflanze stark stören, was bis zum Absterben der Kultur führen kann. Bei einer Cobaltkonzentration von 400 mg/kg Boden war dies bereits nach 5 Wochen der Fall.

Von den vielen, für die Pflanze essentiellen Elemente eignet sich besonders gut Calcium zur Früherkennung der Schäden bzw. zur Unterstützung von Aussagen, die aus den Messungen des Wasserverbrauchs und der Ertragsmenge resultieren.

Während unter den beschriebenen Versuchsbedingungen schon die geringsten Cobaltgaben zum Boden eine deutliche Erhöhung des Cobaltgehaltes in der Pflanze verursachen, ist dies bei Chrom erst ab ca. 500 mg Chrom/kg Boden und bei Blei erst bei Bodenkonzentrationen oberhalb 100 mg Blei/kg Boden der Fall. Dies weist auf die eindeutig höhere Mobilität des Cobalts hin. Demzufolge ist auch die schädigende Wirkung beim Cobalt am höchsten.

Chrom und Blei werden im Boden stärker fixiert bzw. besser durch die Pflanzenwurzel ausgeschlossen oder dort gebunden, so daß hier eine Gefährdung von z.B. Weidevieh erst bei höheren Konzentrationen möglich ist. Anders kann es sich verhalten, wenn Bodenparameter geändert werden, d.h. wenn z.B. eine starke Versauerung des Bodens auftritt. Dies würde dann im Falle des Bleis zu einer höheren Mobilität führen und damit auch seinen Niederschlag in einer verstärkten Pflanzenaufnahme finden. Die vorliegenden Ergebnisse weisen auch darauf hin, daß die Metalle noch nicht mit dem Boden im Gleichgewicht waren. Im Falle des Cobalts wird z.B. berichtet, daß von ca. 5 mg/kg Boden nur etwa 0,3 mg/kg verfügbar sind [12].

Die Aktivitäten der von Kernkraftanlagen - Brennstoffabriken, Kernkraftwerken, Wiederaufarbeitungsanlagen und Einrichtungen zur Abfallbeseitigung - emittierten Nuklide Chrom-51, Cobalt-57, Cobalt-58 und Cobalt-60 sind bei dem Transfer Boden/Pflanze (Gras) so niedrig, daß kein erhöhtes Strahlenrisiko zu erwarten ist. Dies gilt sowohl direkt für Vieh, welches das in der Umgebung einer Kernkraftanlage wachsende Gras frißt, als auch indirekt für den Menschen, welcher sich als letztes Glied in die Nahrungskette einreihen würde. Diese Überlegung gilt auch für das natürlich vorkommende Blei-210, da dessen Konzentrationen zu gering sind, um bei der Höhe der ermittelten Transferfaktoren in irgendeiner Weise eine Gefährdung darzustellen. Zu einer kritischen Situation kann es kommen, wenn Nuklide des Cobalts, welches den höchsten Transfer von allen drei Metallen aufweist, aufgrund eines Unfalles direkt aus Strahlungsquellen in die Umwelt gelangen.

Anders sieht es im Falle der stabilen Elemente Co, Cr und Pb aus, die in weitaus höheren Konzentrationen in der Umwelt vorhanden sind bzw. in diese gelangen.

Anhang

- 1) Fehlermöglichkeiten bei der Grasanalyse
  
- 2) Graphische Darstellung der Elementkonzentration in  
Lolium multiflorum in Abhängigkeit von Zeit und Zugaben  
an Co, Cr und Pb
  
- 3) Literatur

### Fehlermöglichkeiten bei der Grasanalyse

Entsprechend dem Wege des Grases von der Ernte bis zur Messung sind folgende Fehlermöglichkeiten gegeben:

- a) Kontamination des Grases durch anhaftende Bodenpartikel
- b) Kontamination beim Schneiden des Grases
- c) Kontamination beim Mahlen des Grases
- d) Fehler bei der Einwaage (Wägefehler, Kontamination)
- e) unvollständiger Aufschluß durch mangelhafte Zerstörung des Silikatanteiles
- f) Fehler beim Auffüllen auf 20 ml
- g) Kontamination durch unsaubere Proben- und Meßgefäße sowie durch die benutzten Chemikalien
- h) Meßfehler.

Zu a) Denkbar wäre eine Verunreinigung des Grases mit Bodenpartikeln und Salzkristallen, die während des Gießvorganges bzw. beim Ernten aufgewirbelt werden. Zusätzlich kann auch ein Transport von Partikeln, die an der Oberfläche des Grases haften, mit dem Wachstum des Grases von der Bodenoberfläche des Topfes zur Schnitthöhe erfolgen.

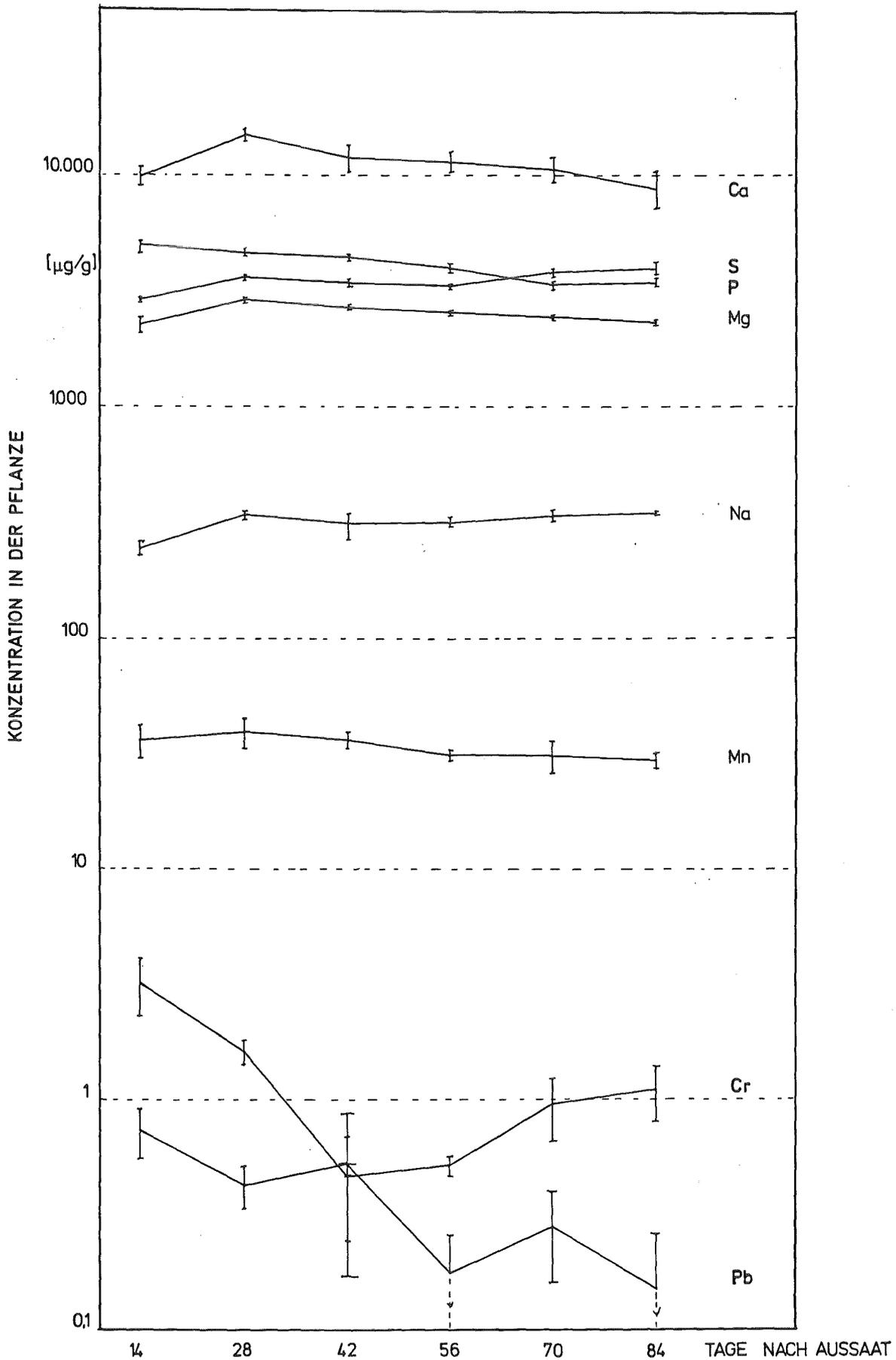
Zu b) Hier wäre Kontamination durch Abrieb von Scherenmaterial möglich. Der Versuch Titanscheren einzusetzen scheiterte, da sich das Gras mit diesem Werkzeug nicht schneiden ließ. Die Verwendung von Plastikhandschuhen beim Ernten verringerte die Gefahr des Übertrags von der Hand.

Zu c) Mangelnde Reinigung des Achatmörser ist hierbei die größte Kontaminationsquelle.

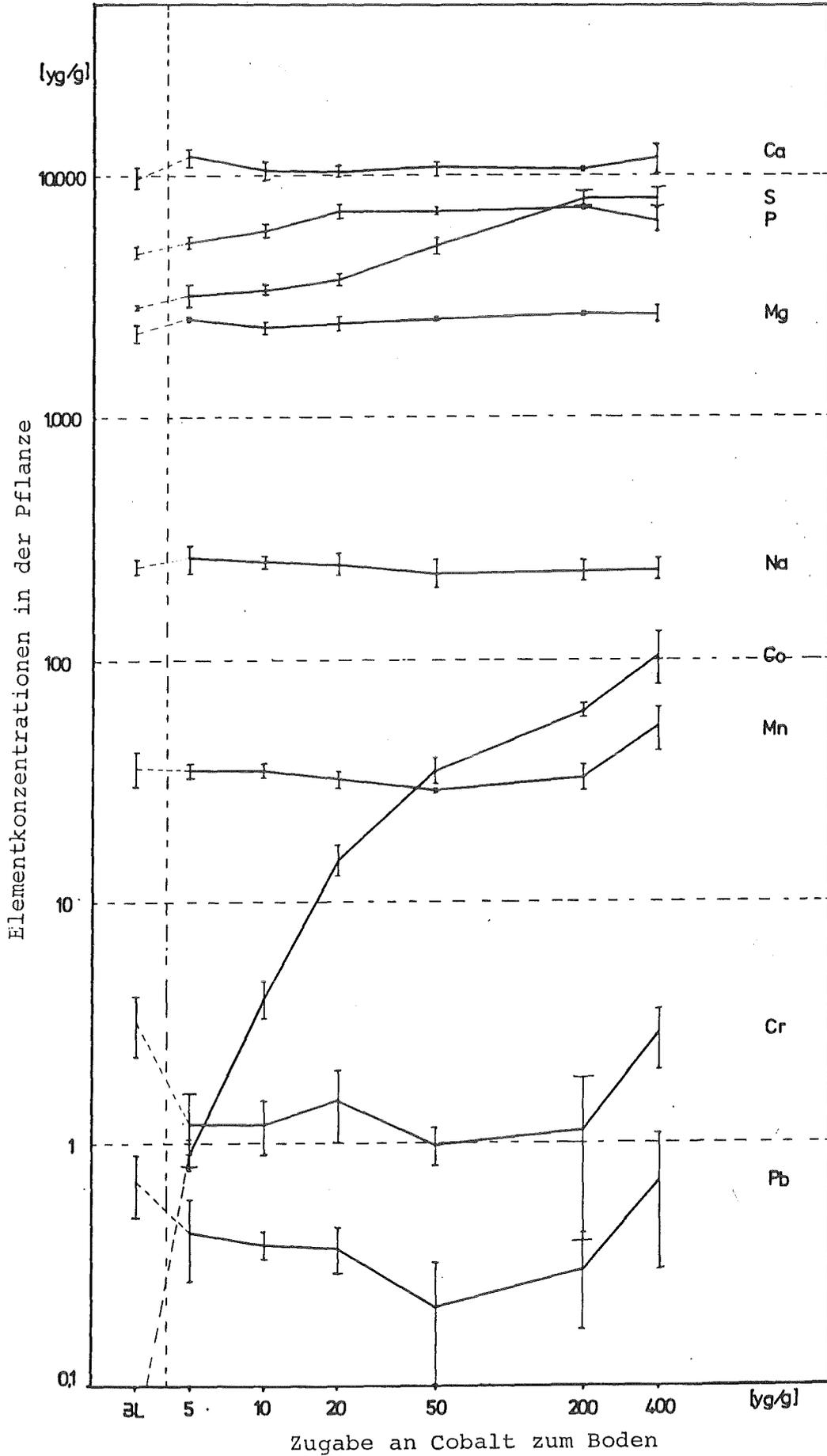
Zu d) Die Genauigkeit der benutzten Waage beträgt  $\pm 0,1$  mg. Bei einer üblichen Einwaage von ca. 300 mg ist dieser Fehler vernachlässigbar klein. Zur Vermeidung von Luftstaubeintrag fand die Einwaage und Säurezugabe in einer "reinen Werkbank" statt.

- Zu e) Spielt eine wesentliche Rolle. Schwankende Na, Al, Fe, Ca und Cr-Werte sind unter anderen darauf zurückzuführen. Auf eine Zugabe von Flußsäure wurde verzichtet. Die bei dem hohen Silikatanteil nötige Menge Flußsäure kann auf die Dauer das aus Quarz bestehende Zerstäuber- und Brennersystem verändern. Ein Abbrauchen von  $\text{SiF}_4$  und überschüssiger Flußsäure mußte aus Zeit- und Arbeitsgründen unterbleiben.
- Zu f) Geringer Einfluß in der Größenordnung von maximal  $\pm 2\%$ .
- Zu g) Sämtliche Proben- und Meßgefäße wurden vor dem Gebrauch in 20 %iger Salpetersäure (p.a.) eingeweicht und mit destilliertem Wasser mehrmals gespült. Die zugegebenen Chemikalien waren ausschließlich Suprapur-Qualität. Die dennoch auftretenden Schwankungen bei parallel mitlaufenden Blindproben weisen, wenn auch auf geringe, aber doch vorhandene Kontaminationen hin.
- Zu g) Zur Vermeidung von Meßfehlern wurden neben den parallel laufenden Blindproben stets Testlösungen bei der ICP-AES und Testlösungen sowie Standardreferenzmaterial bei der AAS mitgemessen. Die Verfahren waren beide vorher am Beispiel von unterschiedlichen Standardreferenzmaterialien überprüft worden [5].
- Entscheidend für die ICP-AES waren mehr die Schwankungen durch Fehler beim Aufschluß als Kontamination. Anders jedoch bei der AAS-Bestimmung von Cr, Co und Pb. Da hier empfindlicher gemessen wurde, war die Anfälligkeit hinsichtlich auftretender Fehler größer. Die großen Standardabweichungen und das Schwanken der Werte verdeutlichen dies.
- Nachteilig war ferner, daß wesentliche Teile der Arbeit wie Trocknen, Mahlen und Aufschließen des Grases von verschiedenen Hilfskräften durchgeführt werden mußten. Die dadurch auftretenden Schwankungen sind sicherlich beachtlich.

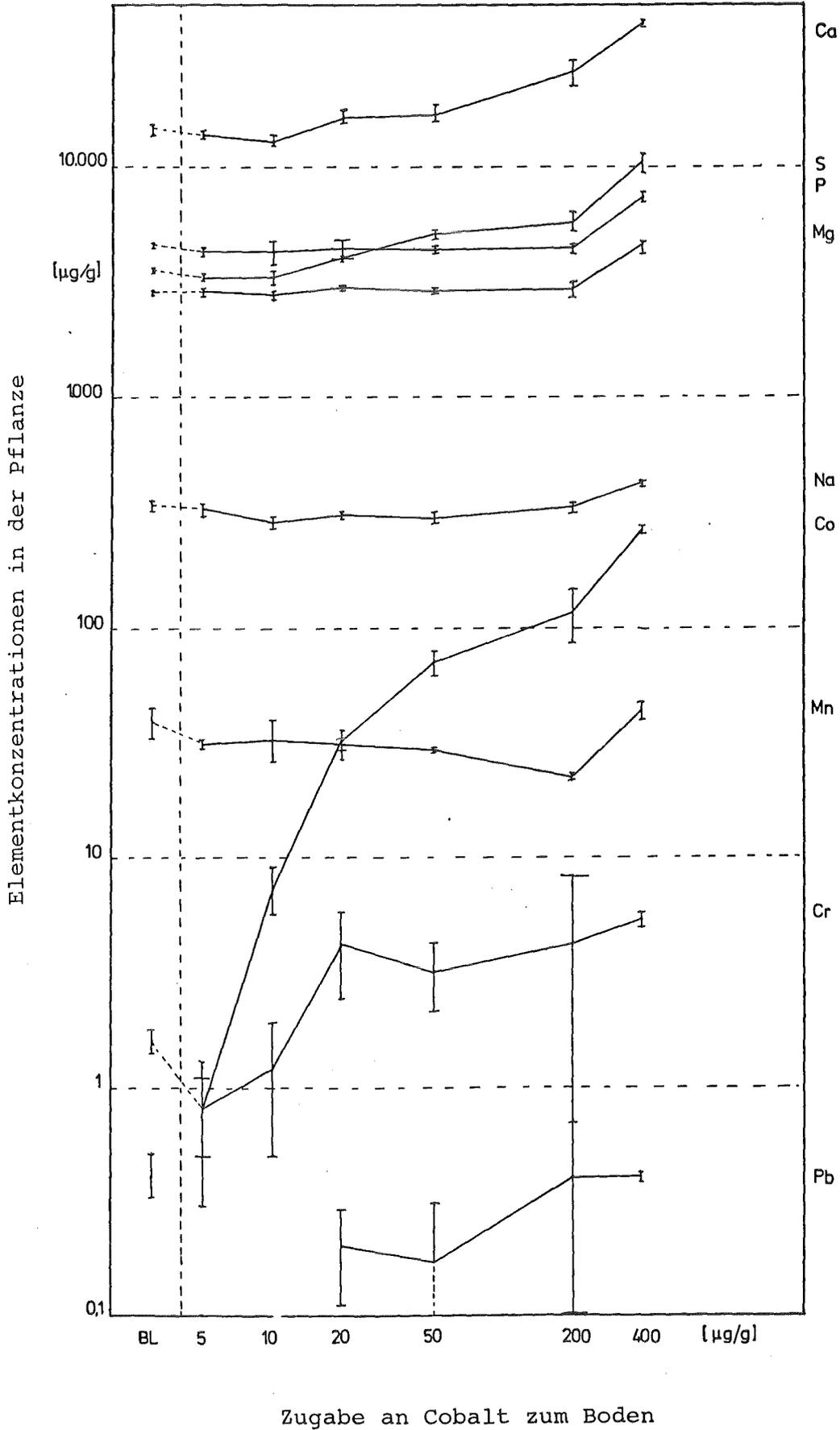
Anhang Nr. 1: Elementkonzentration in *Lolium multiflorum* bei der Kontrolle in Abhängigkeit von der Zeit



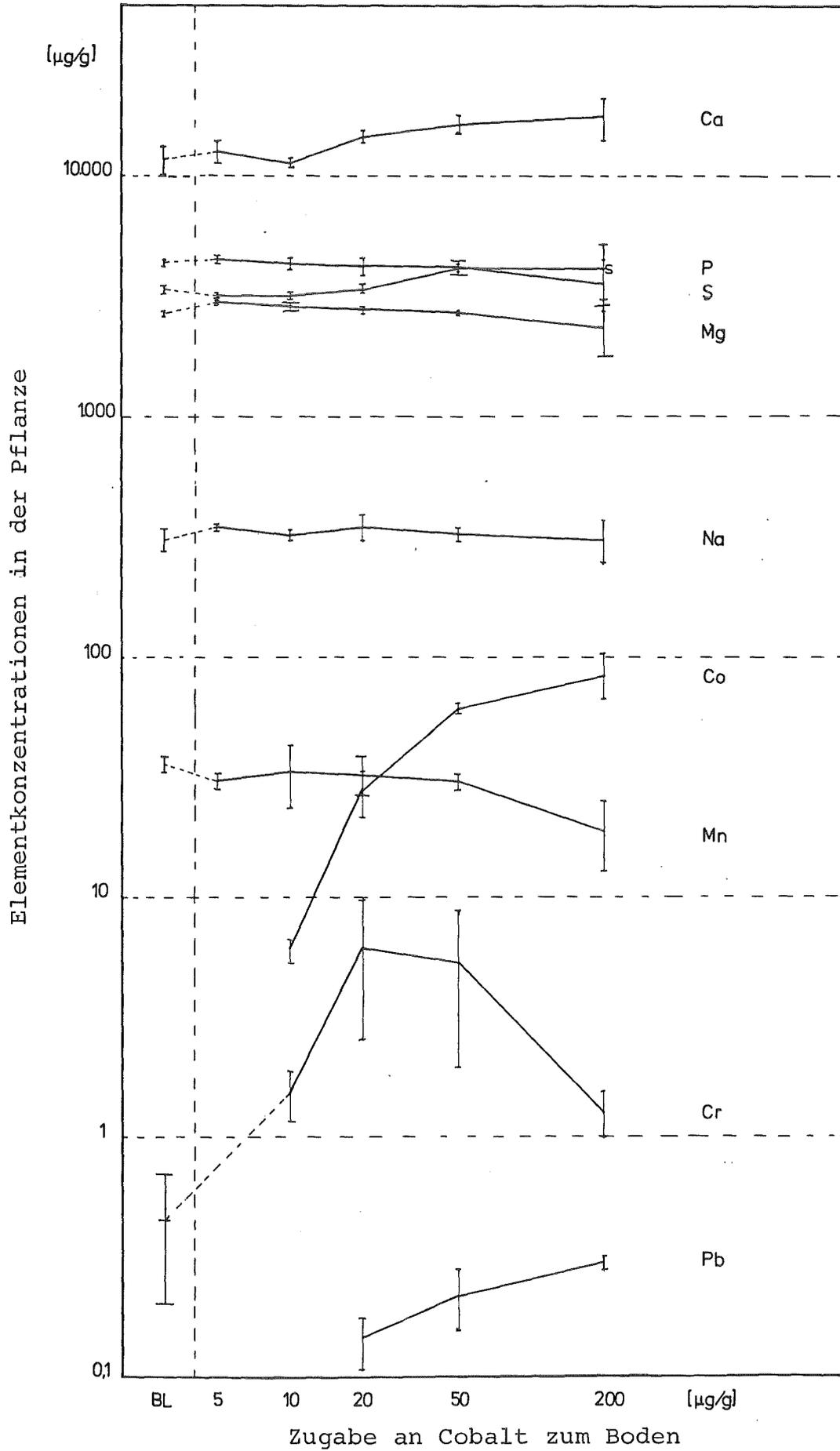
Anhang Nr. 2: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum* bei zunehmenden Cobaltgehalten im Boden  
Schnitt 1



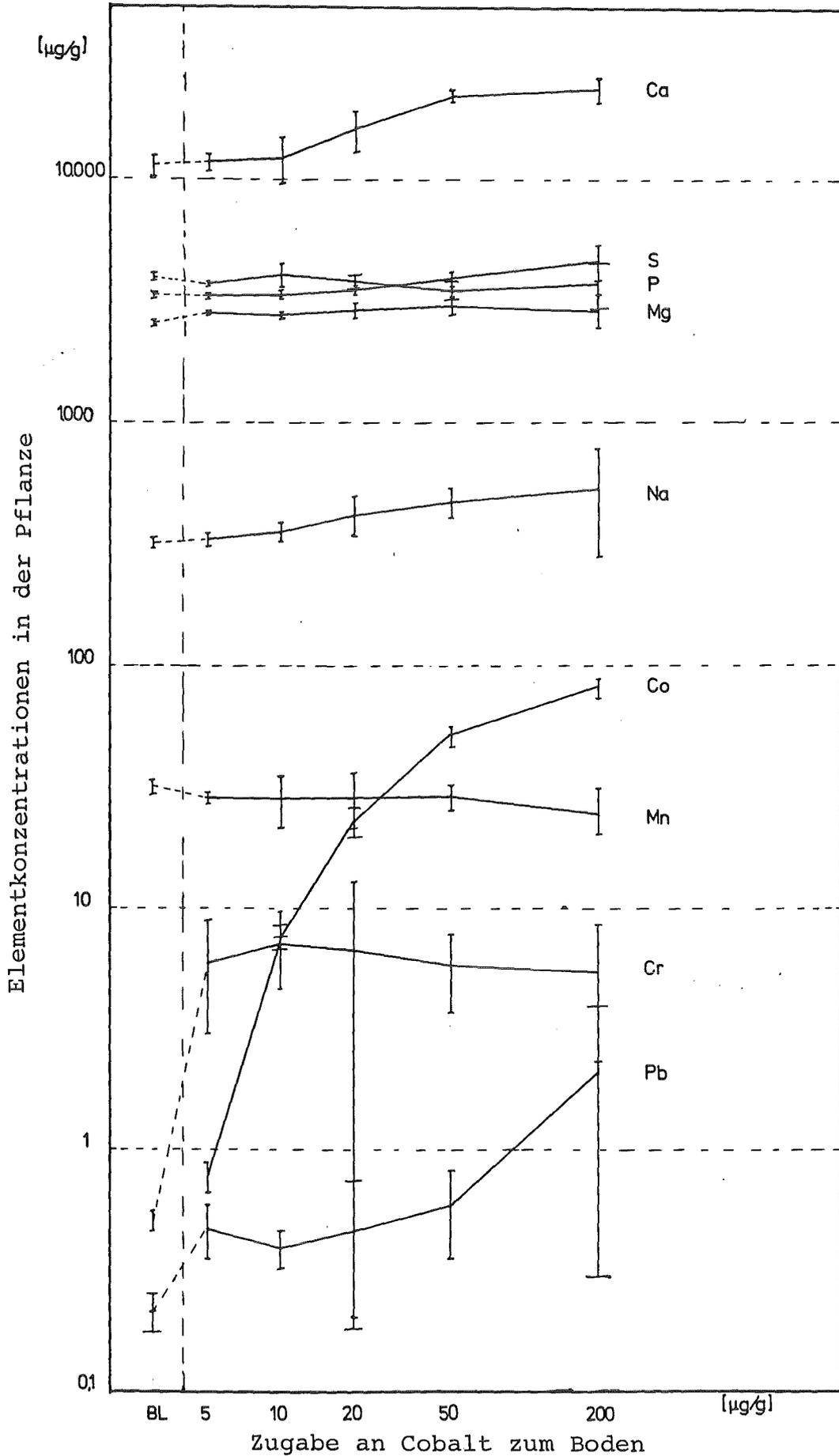
Anhang Nr. 3: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum* bei zunehmenden Cobaltgehalten im Boden  
Schnitt 2



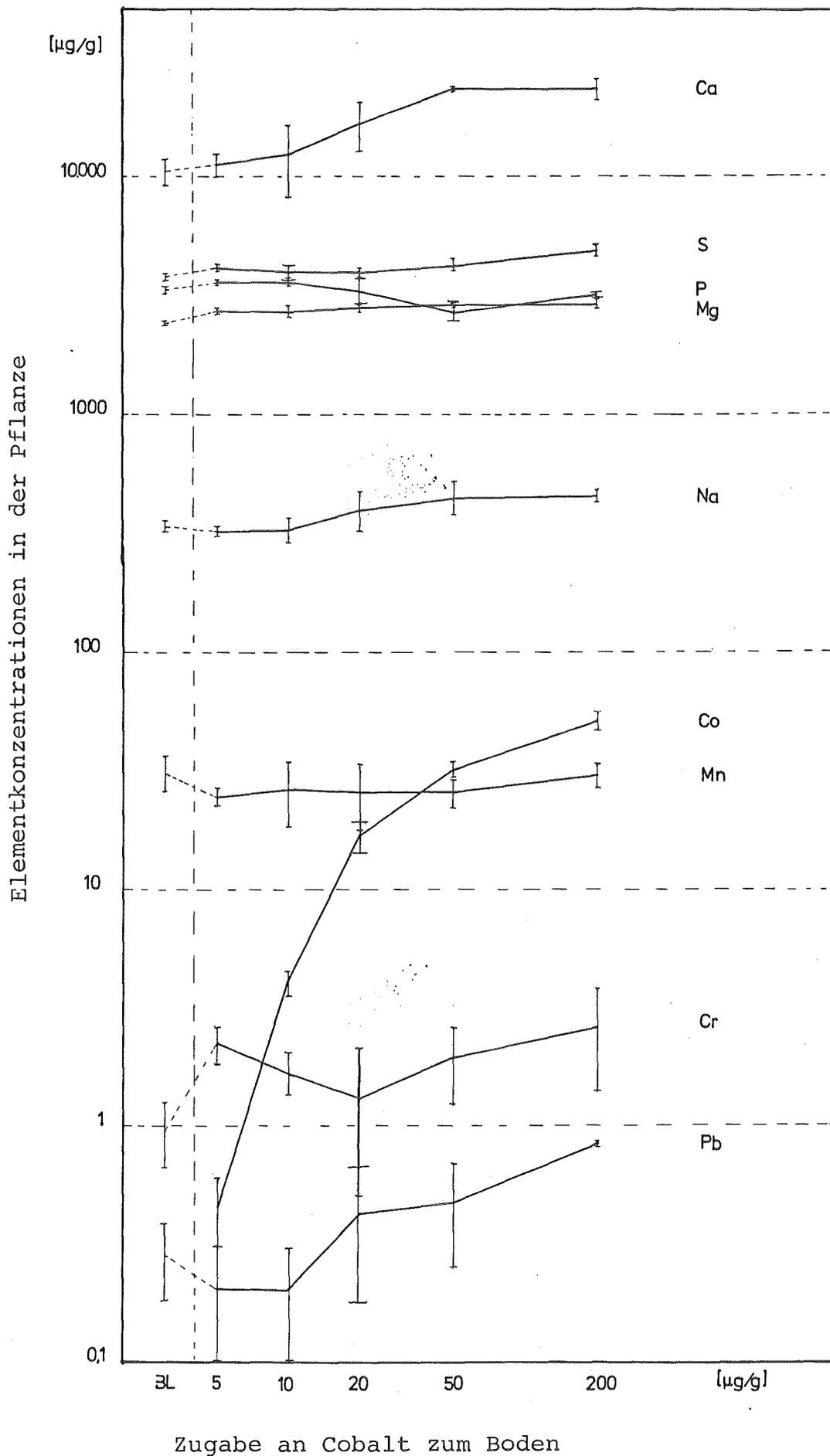
Anhang Nr. 4: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum* bei zunehmenden Cobaltgehalten im Boden Schnitt 3



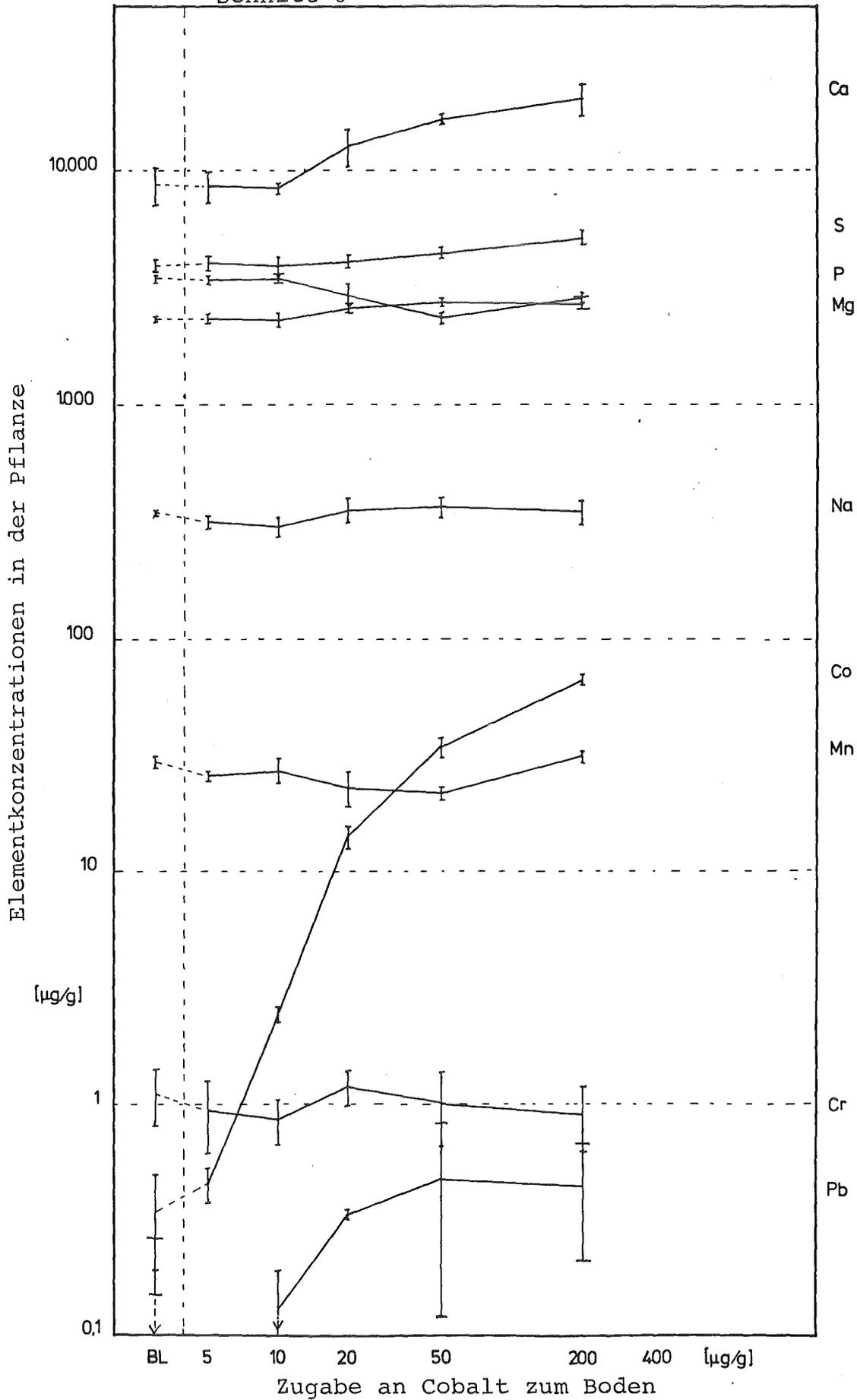
Anhang Nr. 5: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum* bei zunehmenden Cobaltgehalten im Boden  
Schnitt 4



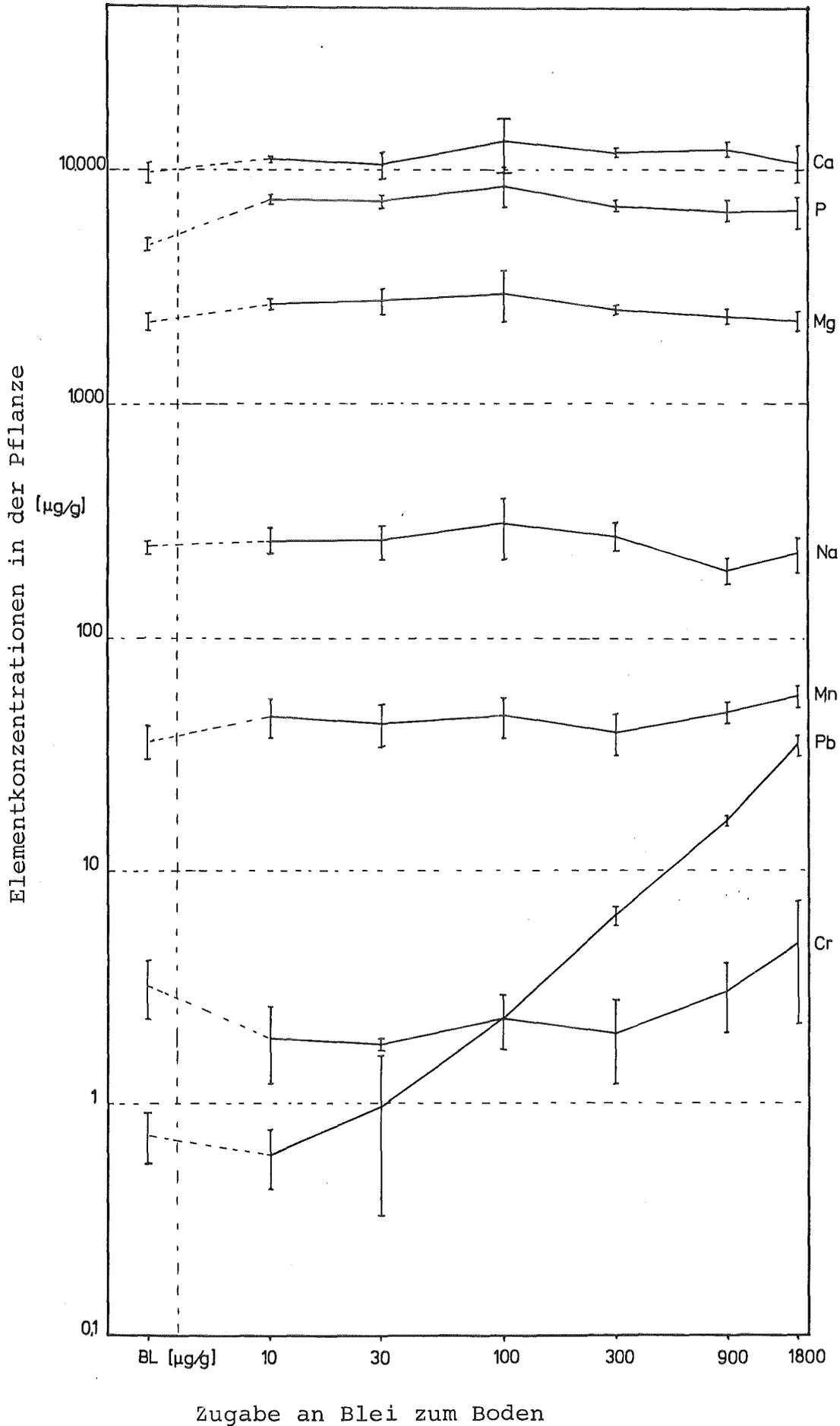
Anhang Nr. 6: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum* bei zunehmenden Cobaltgehalten im Boden  
Schnitt 5



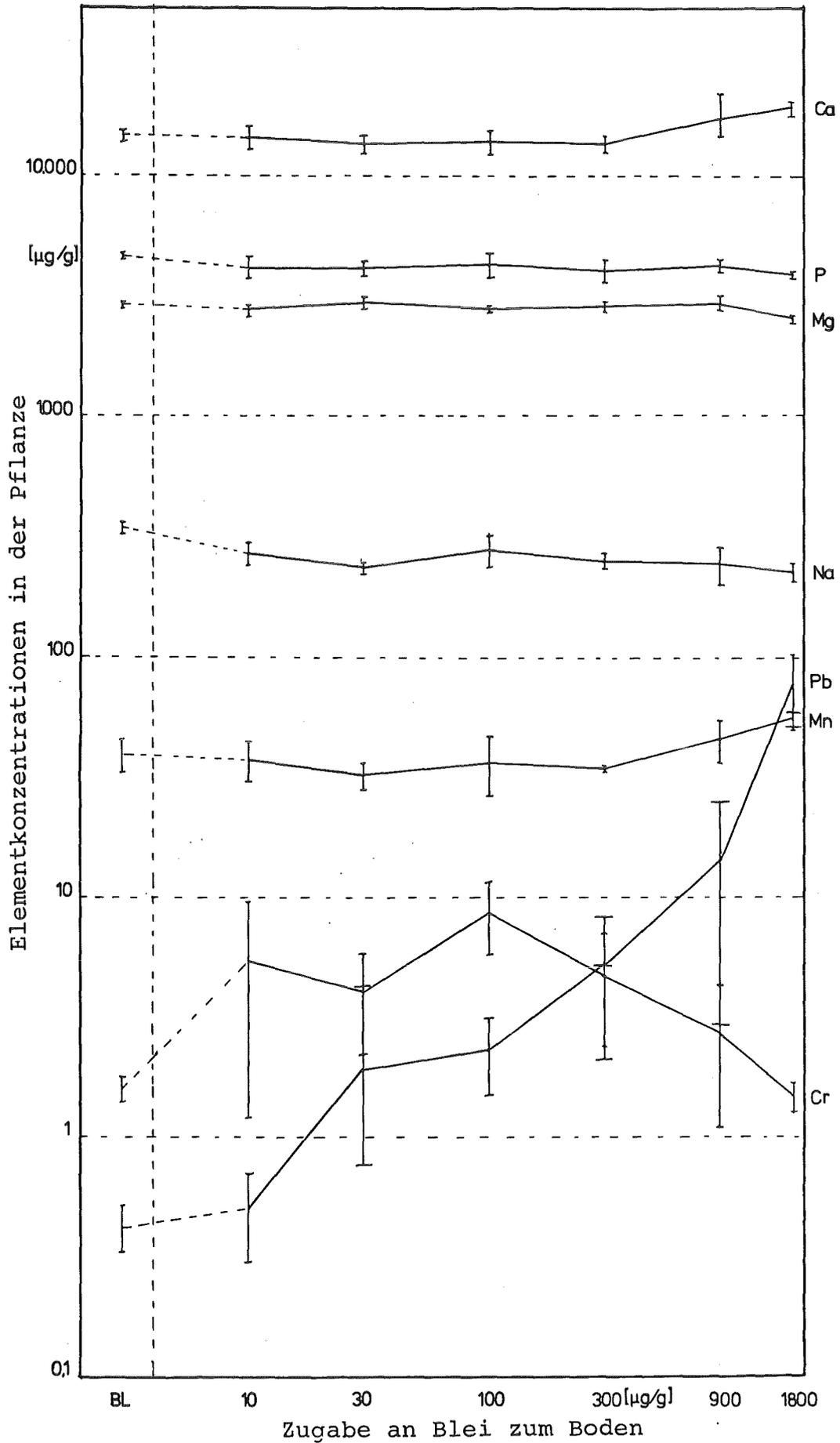
Anhang Nr. 7: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum* bei zunehmenden Cobaltgehalten im Boden Schnitt 6



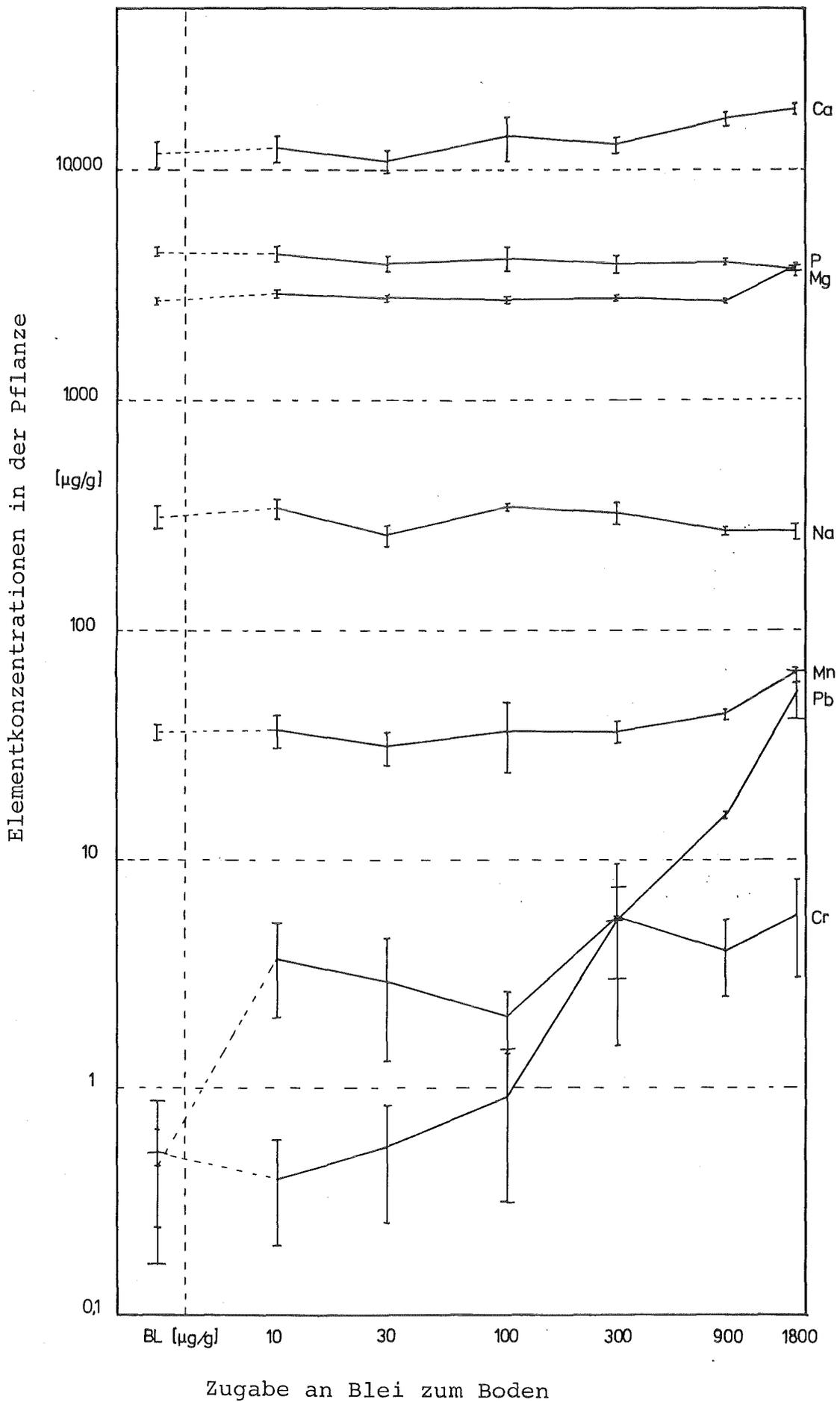
Anhang Nr. 8: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum* bei zunehmenden Bleigehalten im Boden  
Schnitt 1



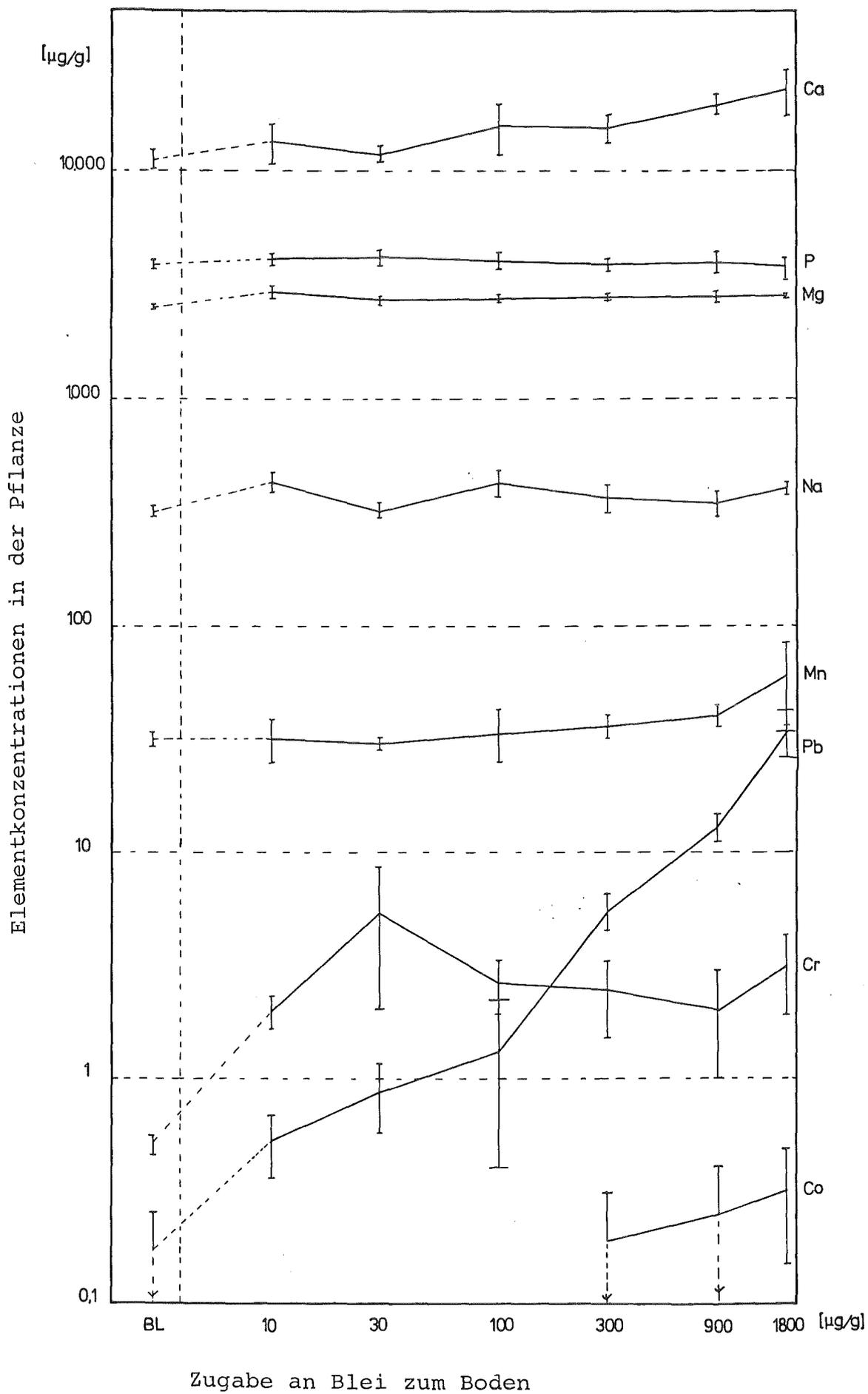
Anhang Nr. 9: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum* bei zunehmenden Bleigehalten im Boden  
Schnitt 2



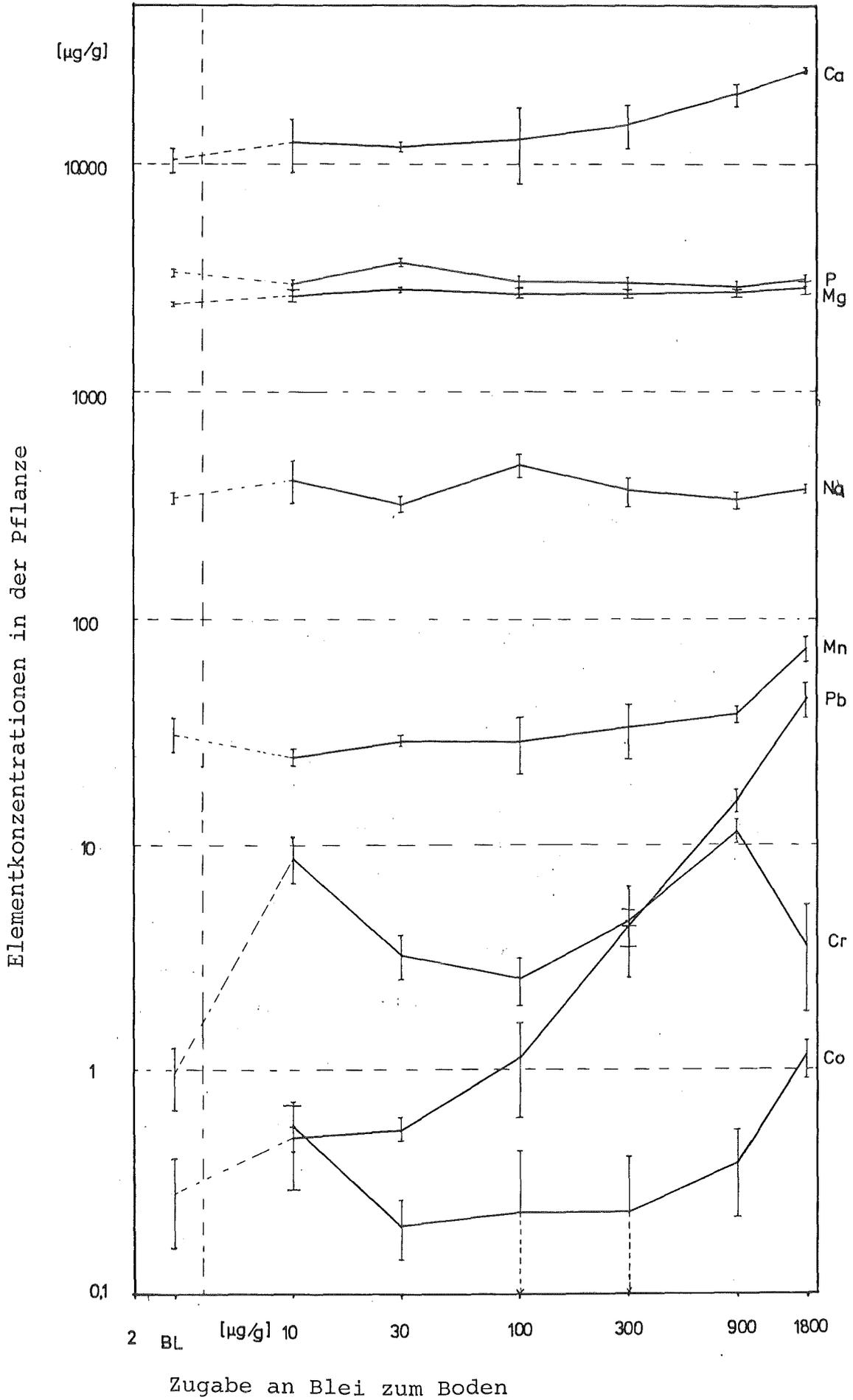
Anhang Nr. 10: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum* bei zunehmenden Bleigehalten im Boden Schnitt 3



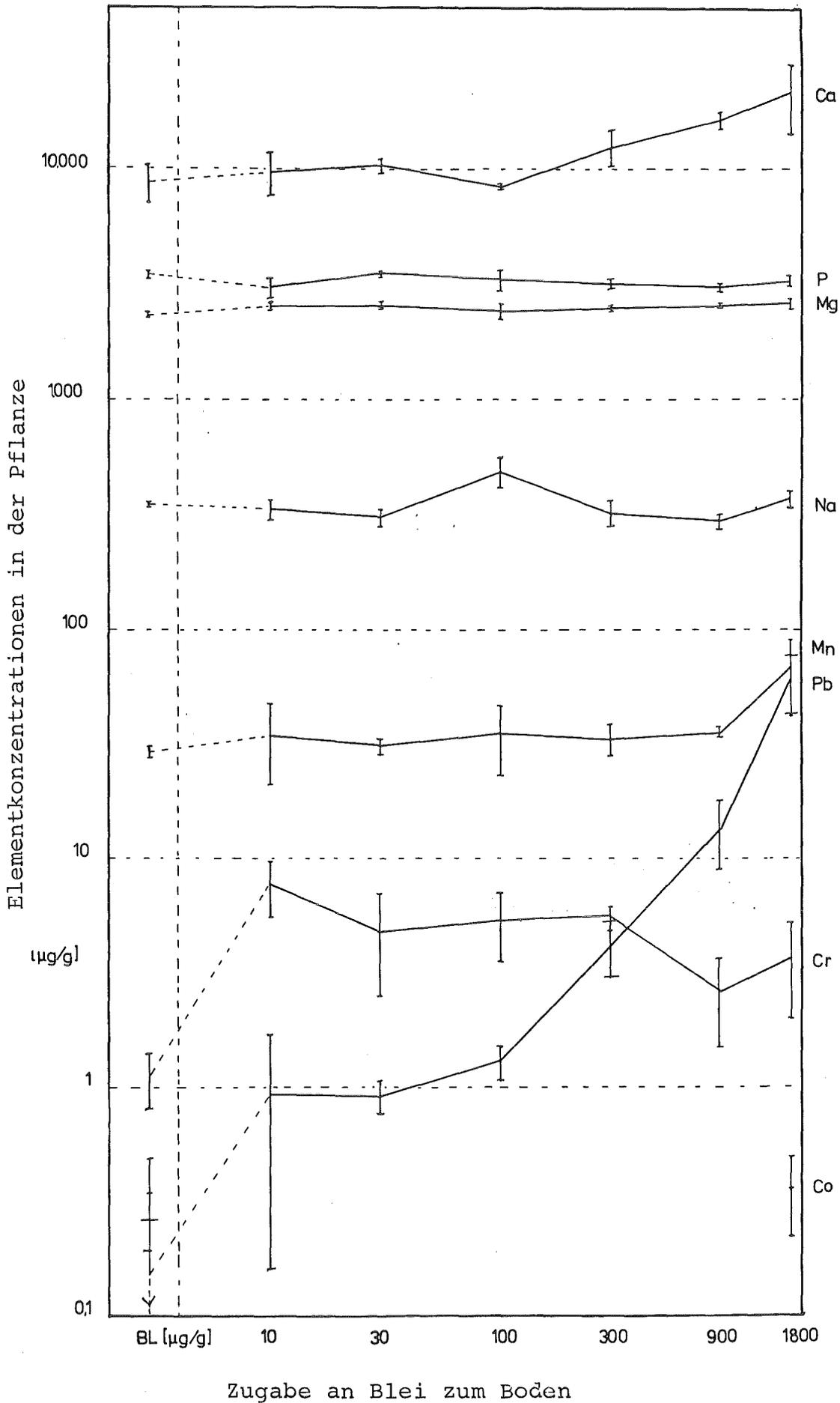
Anhang Nr. 11: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum* bei zunehmenden Bleigehalten im Boden  
Schnitt 4



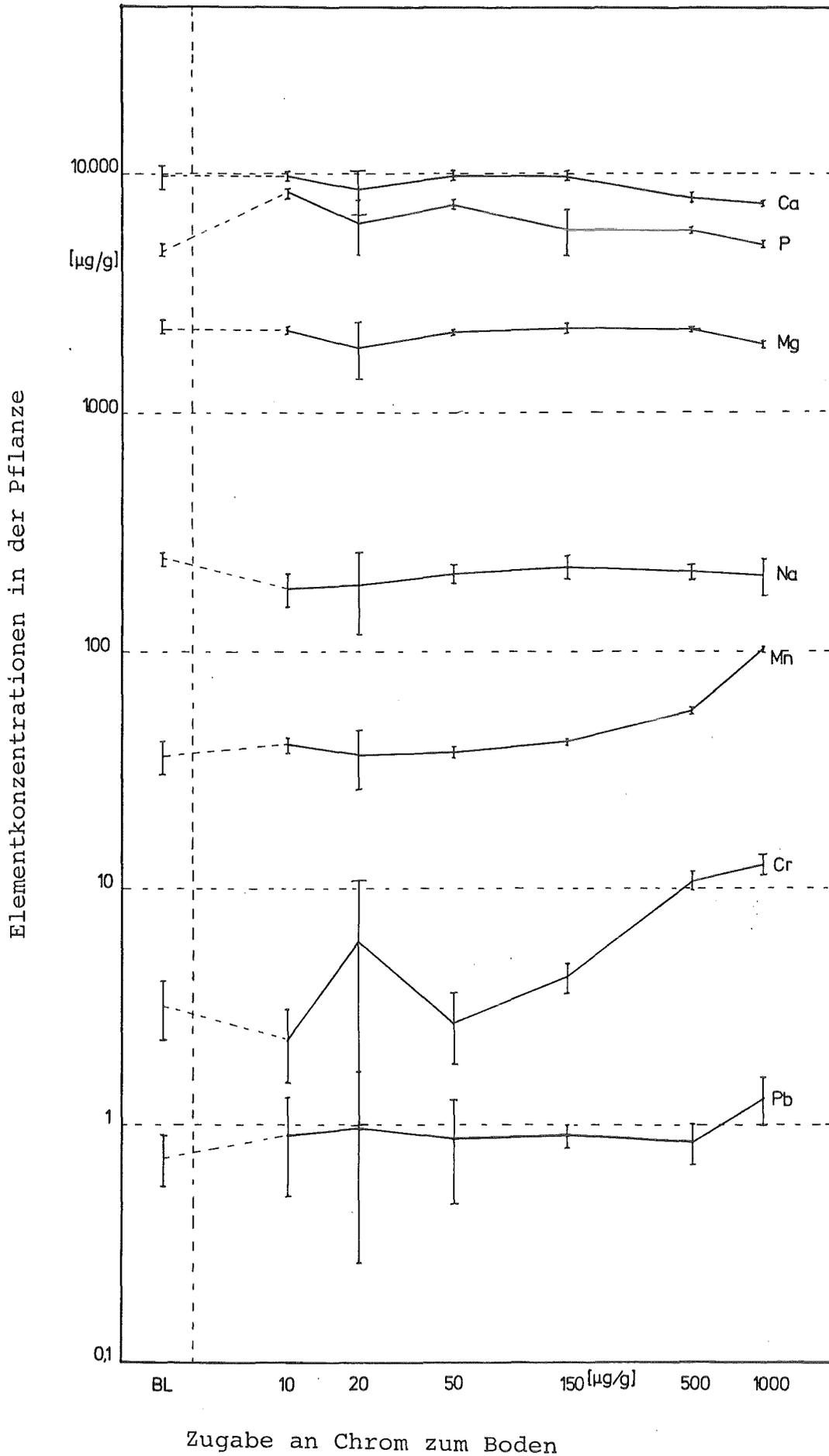
Anhang Nr. 12: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum* bei zunehmenden Bleigehalten im Boden  
Schnitt 5



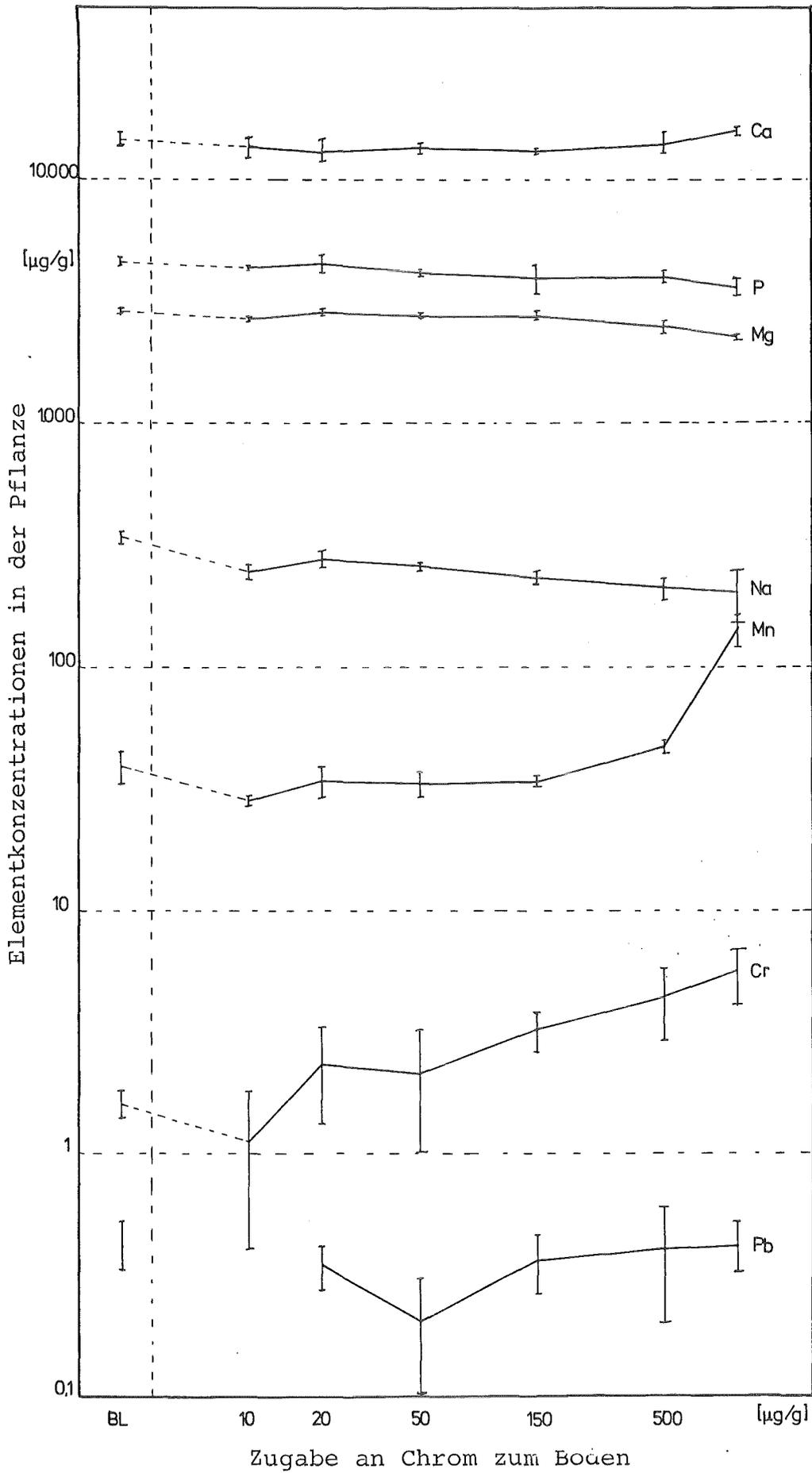
Anhang Nr. 13: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum* bei zunehmenden Bleigehalten im Boden  
Schnitt 6



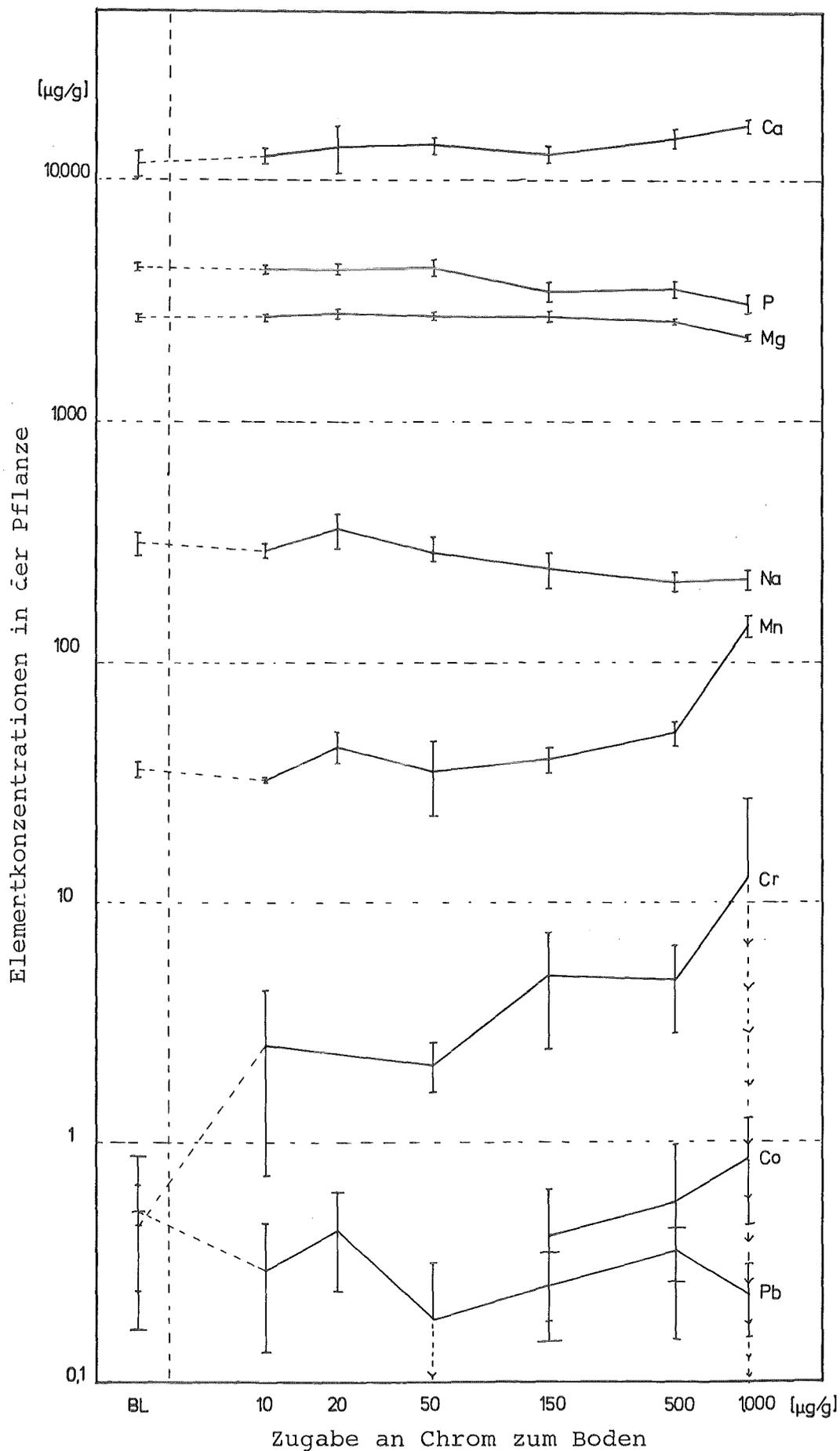
Anhang Nr. 14: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum* bei zunehmenden Chromgehalten im Boden Schnitt 1



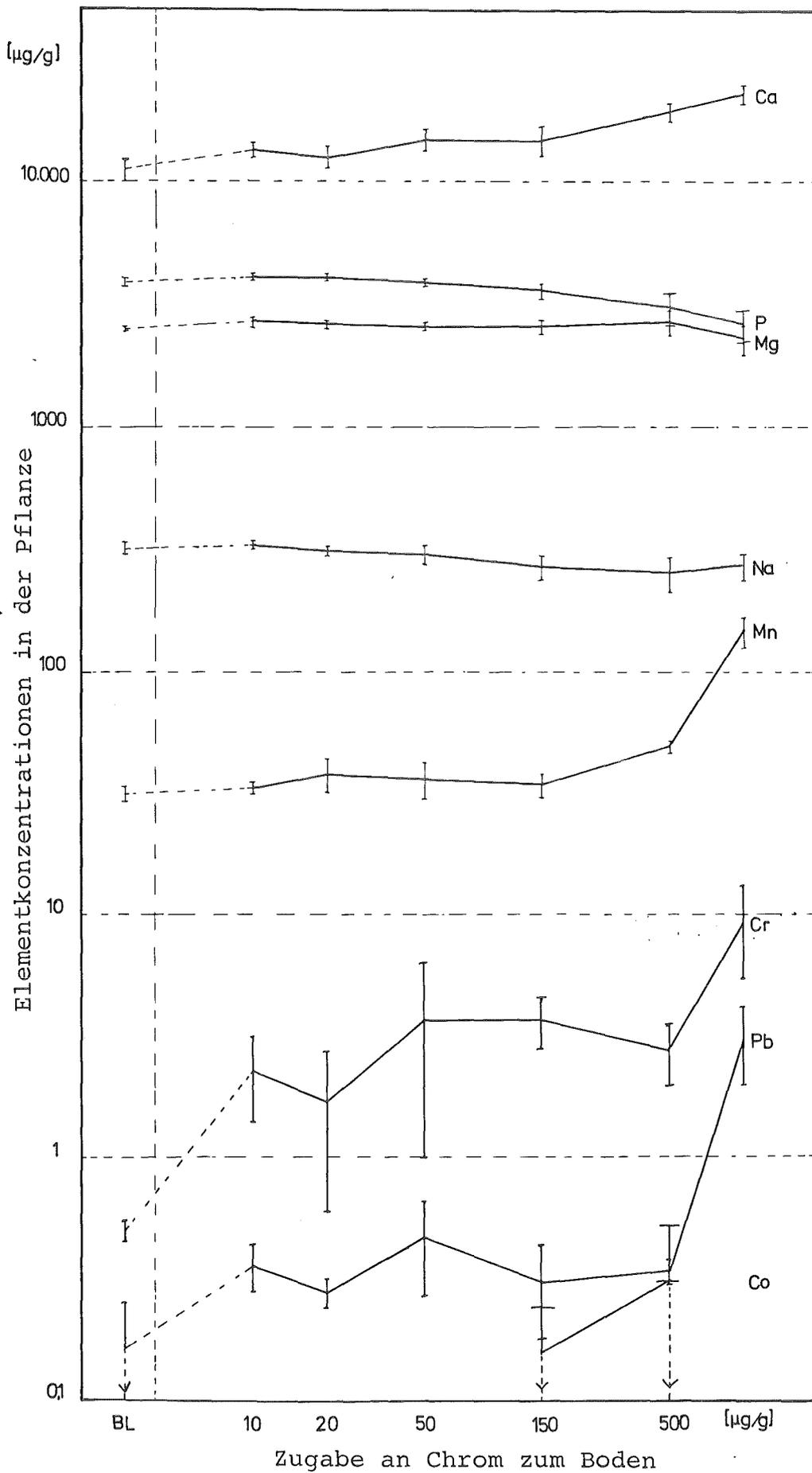
Anhang Nr. 15: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum* bei zunehmenden Chromgehalten im Boden  
Schnitt 2



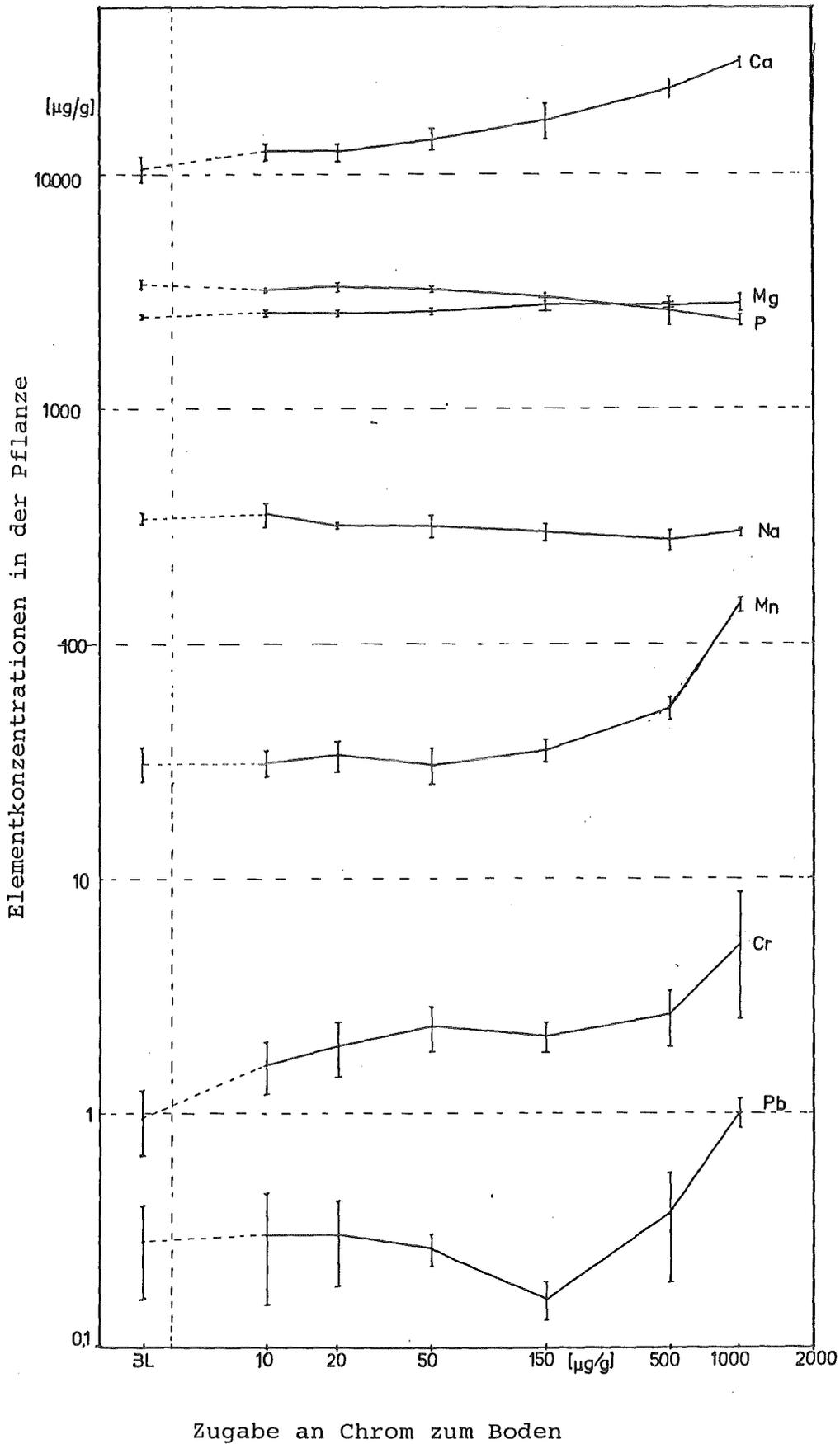
Anhang Nr. 16: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum* bei zunehmenden Chromgehalten im Boden Schnitt 3



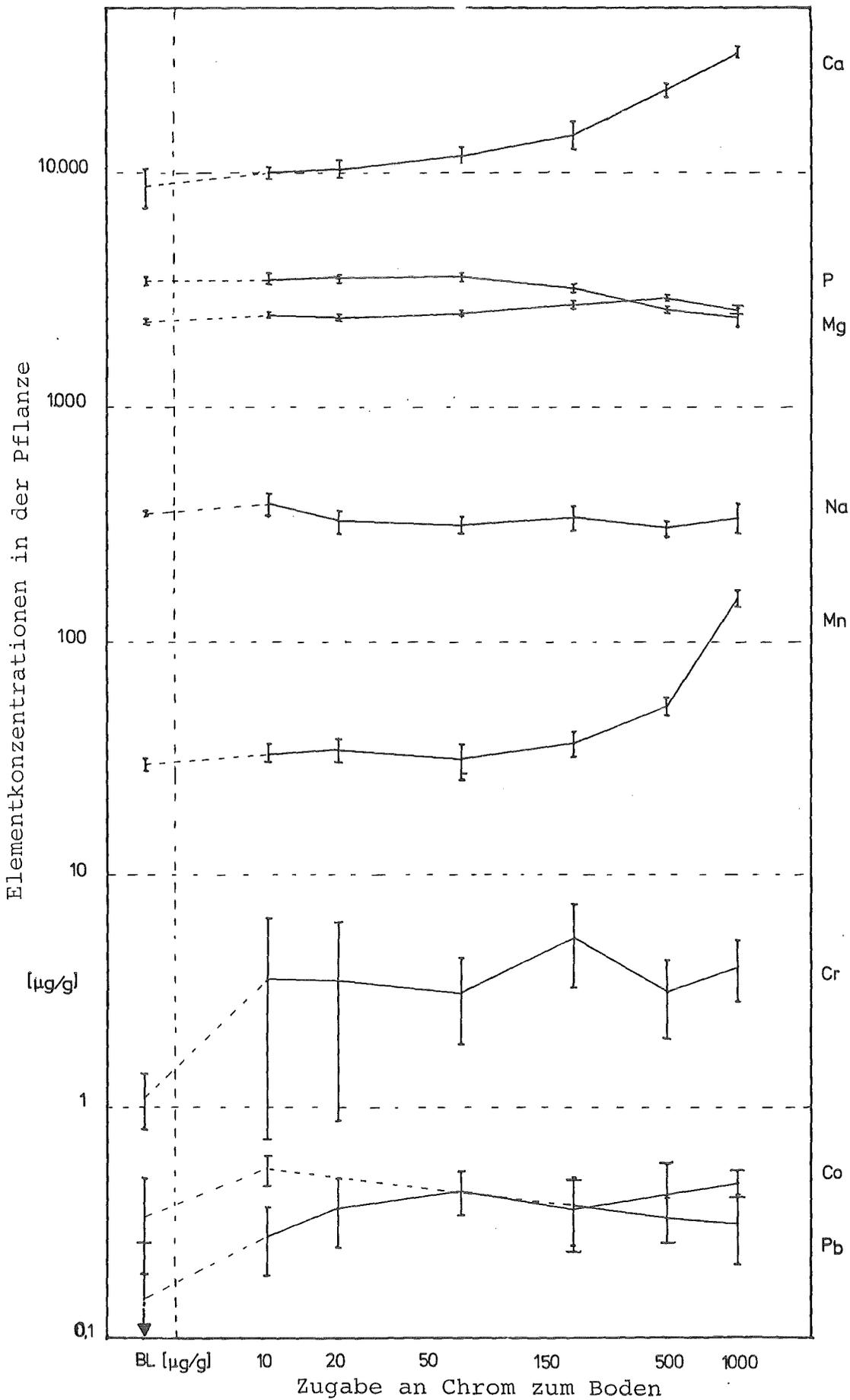
Anhang Nr. 17: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum* bei zunehmenden Chromgehalten im Boden  
Schnitt 4



Anhang Nr. 18: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum* bei zunehmenden Chromgehalten im Boden Schnitt 5



Anhang Nr. 19: Elementkonzentrationen in *Lolium multiflorum*  
bei zunehmenden Chromgehalten im Boden  
Schnitt 6



Literatur

- [ 1] Bonka, H.: Mittlere Emissionsraten radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland; 14. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V., Lausanne, Schweiz, 30.09.-02.10.1981, FS-82-27-T
- [ 2] Drop, F. van; Kopp, P.; Bramen, J.P.; Contribution to the Joint Radiation Protection Meeting on Radiological Impact of Nuclear Power Plants and other Nuclear Installations on Man and his Environment; 14. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V., Lausanne, Schweiz, 30.09.-02.10.1981, FS-82-27-T
- [ 3] VDI: Verfahren der standardisierten Graskultur  
VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, 3792
- [ 4] Lantzy, R.J.; v. Mackenzie, F.T.;  
Geochim. Cosmochim. Acta 43, 511 (1979)
- [ 5] Liese, T., KfK 3830, Februar 1985
- [ 6] Rosopulo, A.; v. Diez, Th.  
Landwirtschaftliche Forschung, Sh. 38, 751-767 (1981)
- [ 7] Mohr, H.D.: Z. Pflanzenernähr. u. Bodenkunde, 143,  
494-504 (1980)
- [ 8] Foroughi, M.; Fritz, D.; Teicher, K.; v.Venter, F;  
Landwirtschaftliche Forschung, Sh. 39, 426-433 (1982)
- [ 9] Mengel, K.: Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze  
Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, (1972)
- [10] Sommer, G.: Landwirtschaftliche Forschung, Sh. 35,  
350-364 (1978)
- [11] Judel, G.K.; v.Stelte, W.: Z. Pflanzenernähr. u. Boden-  
kunde 140, 421-429, (1977)
- [12] Young, R.S.: Cobalt in Biology and Biochemistry  
Academic Press (1979)