

Beziehungen zwischen der Schwermetallaufnahme von Sommerweizen und einer leicht mobilisierbaren Schwermetallfraktion in Böden

SONJA ECKER UND OTHMAR HORAK*)

13 Abbildungen, 3 Tabellen

Schlüsselwörter

Schwermetallaufnahme
Triticum aestivum
Bodeneigenschaften
mobilisierbare Fraktion
Ammoniumacetat
Bioverfügbarkeit

Keywords

Heavy metals
Triticum aestivum
soil characteristics
exchangeable fraction
ammonium acetate extraction
bioavailability

Inhalt

Zusammenfassung	103
Abstract	103
1. Einleitung und Problemstellung	104
2. Material und Methode	104
3. Ergebnisse und Diskussion	105
4. Schlußfolgerungen	113
5. Literaturverzeichnis	113

Zusammenfassung

Seit 1987 wird im Rahmen eines Langzeitversuches der Transfer von Schwermetallen in verschiedene Kulturpflanzen unter Berücksichtigung der Eigenschaften von drei Versuchsböden untersucht. Die Böden wurden mit gestaffelten Mengen an Zn, Cu, Cd, Ni und V kontaminiert.

Der leicht mobilisierbare, potentiell pflanzenverfügbare Schwermetallanteil in den Böden wurde mittels Extraktion mit 1 M Ammoniumacetat (pH 7) ermittelt. Im allgemeinen steigen mit zunehmenden Gesamtgehalten sowohl die absolute Mobilisierbarkeit des jeweiligen Elements als auch der mobilisierbare Anteil am Gesamtgehalt. Ein Vergleich der Elemente zeigt, daß deren Mobilität im Boden von Cd über Zn, Ni und Cu bis V abnimmt. Bedingt durch ihren Gehalt an Sorptionsträgern (Ton, Humus) und ihre bodenchemischen Eigenschaften (pH, Ca-Carbonatgehalt) weisen die Versuchsböden deutlich unterschiedliche Bindungskapazitäten für Schwermetalle auf. Die Schwermetallanreicherung in den vegetativen und generativen Teilen der Pflanzen (*Triticum aestivum*) korreliert gut mit den mobilisierbaren Schwermetallfraktionen. Regressionsanalysen zwischen den ammoniumacetatlöslichen Anteilen und den Schwermetallgehalten in den Weizenkörnern zeigen spezifische Akkumulationsmuster für Cd, Cu, Ni und Zn. Ein linearer Zusammenhang ergibt sich für Ni und Zn, für Cd wurde eine Potenzfunktion und für Cu eine Sättigungskurve erhalten. Aus den Versuchsergebnissen ist abzuleiten, daß die Bodenextraktion mit 1 M Ammoniumacetat als Referenzmethode zur Bestimmung tolerierbarer Schwermetallkonzentrationen in Böden herangezogen werden kann.

Relationships Between the Absorption of Heavy Metals by Spring Wheat and an Easily Mobilizable Heavy Metal Fraction in Soils

Abstract

Since 1987 a long term experiment under outdoor conditions has been conducted in order to investigate the absorption of heavy metals into different agricultural plants with regard to soil characteristics. Three different soils were contaminated with increasing concentrations of zinc, copper, nickel, cadmium and vanadium.

The exchangeable (bioavailable) heavy metal pool in the soils was determined by extraction with 1 M ammonium acetate (pH 7). In general, the exchangeable fractions increase absolutely as well as relatively to the total metal content with increasing total content. A comparison of the elements shows decreasing mobility in soil in the order Cd > Zn > Ni > Cu > V. The experimental soils show different binding capacities for heavy metals according to their contents of clay and organic matter and their chemical characteristics, like pH and Ca-carbonate content. The heavy metal concentrations in the vegetative and generative parts of the plants (*Triticum aestivum*) correlate well with the exchangeable heavy metal fractions. Regression analysis between the amount of heavy metals extractable by ammonium acetate and their concentrations in wheat grain gives a specific accumulation pattern for each metal. The results of the experiments indicate that the extraction with 1 M ammonium acetate (pH 7) can be used as a reference method for the determination of tolerable heavy metal concentrations in soils.

*) Anschrift der Verfasser: SONJA ECKER, OTHMAR HORAK, Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf, Abteilung Agrarforschung und Biotechnologie, A-2444 Seibersdorf.

1. Einleitung und Problemstellung

Schwermetalle kommen in allen Böden in geringen Mengen natürlich vor. Einige davon sind als Spurenelemente für die Ernährung von Pflanze und Tier unentbehrlich, im Überschuß wirken sie jedoch sowohl auf die Pflanze als auch auf deren Konsumenten toxisch. Der Gehalt eines Bodens an Schwermetallen ist primär vom Ausgangsgestein abhängig. In zunehmendem Maße vergrößert sich jedoch die Anzahl der durch anthropogene Quellen belasteten Flächen. Da der Boden sowohl als Senke für die verschiedensten Schadstoffe als auch als Trinkwasserfilter und Standort für höhere Pflanzen dient, ist diese Entwicklung von deutlicher ökologischer Relevanz. Um eine Akkumulation von Schwermetallen, besonders in Nutzpflanzen, zu vermeiden und damit sowohl die Schädigung der Pflanzen als auch die kumulative Aufnahme der Schwermetalle durch den Menschen über die Nahrungskette möglichst gering zu halten, ist die Bestimmung und Einhaltung von Grenzwerten für Metalle in Böden notwendig geworden. Die Belastung von Böden mit Schwermetallen wird zumeist immer noch anhand der in starken Säuren löslichen, im allgemeinen als „Gesamtgehalt“ bezeichneten Fraktion beurteilt. Schwermetalle liegen im Boden in mehr oder weniger fester, vorwiegend adsorptiver Bindung vor. Gemessen am Gesamtgehalt ist der in der Bodenlösung befindliche, unmittelbar mobile Anteil klein und durch bodenspezifische Eigenschaften geprägt. Er wird in hohem Maße vom Gehalt an Sorptionsträgern (Huminstoffe, Ton, Fe-Oxide) und von bodenchemischen Einflußgrößen wie pH-Wert, Redoxbedingungen und Konzentration niedermolekularer Komplexbildner bestimmt.

Von großer Bedeutung für die Klassifizierung von Böden ist die Quantifizierung jener Schwermetallfraktion, die als leicht mobilisierbarer Vorrat vorliegt und die innerhalb kurzer Perioden für die Pflanze verfügbar ist. In mehreren Untersuchungen hat sich gezeigt, daß neutrale Salzlösungen als Bodenextraktionsmittel zur Erfassung mobilisierbarer Schwermetalle gut geeignet sind. Sie bieten mehrere Vorteile: Einerseits findet die Extraktion bei bodentypischen pH-Werten statt, andererseits lösen sie durch Austausch mehr Schwermetalle als Wasser, aber weniger als starke Komplexbildner. Im allgemeinen wurden gute Beziehungen zwischen Schwermetallen in Neutralsalzextrakten und pflanzlichen Geweben festgestellt. Als häufig verwendete Extraktionsmittel gelten 0,1 M CaCl_2 (DELSCHEN und WERNER, 1989), 0,1 M BaCl_2 (BLUM et al., 1989), 0,1 M NaNO_3 (HÄNI und GUPTA, 1980), 1 M NH_4 -Acetat (DEL CASTILHO und RIX, 1993) sowie 1 M NH_4 -Nitrat (PRÜESS et al., 1991).

In den eigenen Untersuchungen wurde nach Prüfung mehrerer Extraktionsmittel auf das 1 M NH_4 -Acetat zurückgegriffen (HORAK und KAMEL, 1990). Dieses wird bereits seit längerer Zeit zur Ermittlung pflanzenverfügbarer Schwermetalle verwendet, da es die aufschließende Wirkung der Pflanzenwurzel simuliert und deshalb mehr als den wasserlöslichen Anteil extrahiert (ERNST, 1974). Die vorliegende Arbeit ist Teil eines seit 1987 laufenden Langzeitversuches unter Freilandbedingungen. In diesem wurden abgestufte Konzentrationen an Zn, Cu, Ni, Cd und V zu drei verschiedenen Böden zugesetzt. Die Kombination der Metalle wurde gewählt, da sie in belasteten Böden häufig auftritt. Ziel des Versuches ist die Herstellung von Beziehungen zwischen einer mobilisierbaren Schwermetallfraktion und Bodeneigenschaften sowie der Anreicherung von Schwermetallen in verschiedenen Kulturpflanzen und der Wirkung auf das Pflanzenwachstum. Über bisherige Versuchsergebnisse wurde von HORAK und KAMEL (1990, 1991), KAMEL und HORAK (1991), KANDELER et al. (1990), LUMMERSTORFER et al. (1992) berichtet. Der gegenständliche Bei-

trag berichtet über die Ergebnisse des Versuchsjahres 1992 mit Sommerweizen.

2. Material und Methode

Der Versuch wird in 50 Liter fassenden Kunststoffcontainern durchgeführt, welche im Boden eingesenkt sind. Im Jahr 1992 war Sommerweizen (*Triticum aestivum* L., Sorte „Svenno“) die Versuchspflanze. In dreifacher Wiederholung wurden folgende Varianten angelegt:

Variante 0: Kontrolle, unbelastete Böden

Variante 1: Konzentrationen der oben angeführten Schwermetalle nahe den Orientierungswerten nach KLOCKE (1980).

Variante 2: Konzentrationen knapp über diesen Orientierungswerten.

Variante 3: Konzentrationen ca. doppelt so hoch wie die Orientierungswerte.

Die „Gesamtgehalte“ an Schwermetallen (Extraktion mit Königswasser = KW) sind der Tab. 1 zu entnehmen. Die Schwermetalle wurden 1987, zu Beginn des Langzeitversuches, den Böden in Form ihrer Sulfate, Vanadium jedoch als V_2O_5 , zugesetzt. Es ist anzunehmen, daß die Metalle nunmehr weitgehend in bodenspezifische Bindungsformen übergegangen sind.

Die Versuchsböden sind eine tonreiche, schwach alkalische Lockersedimentbraunerde aus Untertiefenbach, A-3071 Böheimkirchen (NÖ), eine schwach saure, tonarme Felsbraunerde aus Weyersdorf, A-3121 Karlstetten (NÖ) und ein kalkreicher Tschernosem mittleren Tongehaltes aus Reisenberg, A-2440 Gramatneusiedl (NÖ).

Ab 1991 wurden zusätzlich zwei immissionsbelastete Böden aus der Umgebung des Hüttenwerkes Brixlegg (T) in die Untersuchungen aufgenommen: Brixlegg 1 aus ca. 2500 m Entfernung vom Werk und Brixlegg 2 aus ca. 1200 m Entfernung; beide stammen aus einem Maisfeld (jeweils in zweifacher Wiederholung).

Über die wichtigsten Kenndaten der Böden informiert Tab. 2: Die nachfolgenden methodischen Angaben beziehen sich auf die einzelnen Parameter: Korngrößenverteilung; Sedimentation in Na-Pyrophosphat (ÖNORM L 1061), Bodenart (L = Lehm, S = Sand, u = schluffig, t = tonig, s = sandig, l = lehmig). pH-Wert in 0,1 M CaCl_2 (ÖNORM L 1083). Glühverlust bei 550°C im Muffelofen. Gesamtstickstoff in mg/100 g nach Kjeldahl (ÖNORM L 1082). CaCO_3 nach Scheibler (ÖNORM L 1084). Kationenaustauschkapazität (KAK); Extraktion mit Bariumchlorid-Triethanolamin (ÖNORM L 1086). Calciumacetat-Lactat (CAL); Extraktion für verfügbare Nährstoffe (ÖNORM L 1087).

Die Entnahme der Bodenproben erfolgte mit Hilfe eines Bodenbohrers aus Kunststoff, mit dem die Proben an 5 Stellen pro Gefäß aus 0-20 cm Tiefe entnommen wurden. Weizenpflanzen gelangten sowohl im Jungstadium (vor dem Ährenschieben) als auch in reifem Zustand zur Analyse. Korn und Stroh wurden getrennt untersucht. Die Schwermetallanalytik erfolgte mittels ICP oder Graphitrohr-AAS, wobei je nach Element und Konzentration selektiv vorgegangen wurde. Pflanzenmaterial wurde mit Salpetersäure + Perchlorsäure (5+1 Volumsteile) in Kjeldahlkolben naß verascht (2 g Probe, 100 ml Endvolumen).

Bodenproben wurden luftgetrocknet und auf 2 mm Korngröße gesiebt. Der gesamtsäurelösliche Schwermetallpool wurde durch Extraktion mit Königswasser ermittelt. 5 g Boden wurden in Erlenmeyerkolben mit 25 ml Königswasser versetzt,

Tab. 1

Gesamtsäurelösliche (Königswasser = KW) und NH₄-Acetat-lösliche Schwermetallfraktionen der Versuchsböden (mg/kg lufttr. Boden) / Stand 1992.

Boden	Variante	Cd		Cu		Ni		V		Zn	
		KW	NH ₄ -Ac.	KW	NH ₄ -Ac.	KW	NH ₄ -Ac.	KW	NH ₄ -Ac.	KW	NH ₄ -Ac.
Weyersdorf	0	0,07	0,04	13	0,07	19,7	0,02	29,7	0,08	70	0,9
	1	2,13	0,5	84,7	1,26	52,7	1,02	60,3	0,24	287	7,5
	2	3,43	1,04	124	2,91	67,3	3,03	79	0,56	383	25,2
	3	5,93	2,4	227	11,17	95	9,6	126,3	1,94	561	69
Untertiefenbach	0	0,14	0,07	17	0,02	38,3	0,07	37	0,07	97	0,8
	1	1,87	0,37	79,3	0,74	68,7	0,4	65	0,07	290	3,4
	2	3,77	0,84	145,7	2,19	99,3	0,98	90,3	0,2	389	8,8
	3	5,9	1,44	214,3	3,81	132,7	2,41	119,7	0,43	694	19,3
Reisenberg	0	0,17	0,03	20	0,11	14,3	0,02	14,7	0,01	71	0,3
	1	1,83	0,2	75,3	0,8	38	0,43	36	0,37	234	4,3
	2	3,4	0,47	129	2,25	62,3	1,11	56,3	0,87	389	12,1
	3	5,03	0,76	188	4,39	86	2,36	81	1,76	555	19,9
Brixlegg 1		0,65	0,14	117,9	1,22	26,4	0,05	26	0,09	223	3,7
Brixlegg 2		2,8	0,36	410,7	6,35	37,7	0,06	36	<0,03	580	7,5
Orientierungswerte nach KLOKE (1980)		3		100		50		50		300	

über Nacht stehen gelassen und nach 2-stündigem Kochen mit dest. Wasser verdünnt und in 100 ml-Meßkolben filtriert. Die leicht mobilisierbare Schwermetallfraktion wurde nach Extraktion mit 1 M Ammoniumacetat-Lösung bei pH 7 bestimmt. Dazu wurden 25 g Boden in Kunststoffgefäßen mit 50 ml Extraktionslösung versetzt und über Nacht stehen gelassen. Nach 2-stündigem Schütteln wurde über ein Schwarzbandfilter in Polyethylenfläschchen filtriert.

3. Ergebnisse und Diskussion

In Tab. 1 sind die Ergebnisse der Extraktion mit 1 M Ammoniumacetat-Lösung aufgelistet. Diese Werte stellen die leicht

mobilisierbaren, potentiell pflanzenverfügbaren Schwermetallfraktionen dar. Wie aus den Abb. 1-5 ersichtlich ist, liegen die durch NH₄-Acetat extrahierbaren Prozentanteile am Gesamtgehalt bei Cadmium (Abb. 1) mit Abstand am höchsten, gefolgt von Zink (Abb. 5), Nickel (Abb. 3), Kupfer (Abb. 2) und Vanadium (Abb. 4). Geringere relative Mobilisierbarkeit entspricht stärkerer Adsorption an pedogenen Eisenoxiden, Tonmineralen und Huminstoffen. Von Cadmium ist bekannt, daß es im Boden nur relativ schwach adsorbiert wird (HERMS und BRÜMMER, 1984). Für alle Metalle und Böden ergab sich eine zunehmende Löslichkeit mit steigenden Gesamtgehalten. Nur bei Cadmium (Abb. 1) fällt auf, daß die mobilisierbaren Anteile am Gesamtgehalt auf den Kontrollvarianten höher liegen. Dies ist vermutlich auf den Einbezug biogener Cd-Mengen

Parameter	Boden Untertiefenbach	Boden Weyersdorf	Boden Reisenberg	Boden Brixlegg 2	Boden Brixlegg 1
% Sand	11	68	53,3	22,0	41,7
% Ton	32,5	5,8	19,1	20,6	12,6
% Schluff	55,6	26,3	27,7	57,4	45,7
Bodenart	utL	uS	sL	uL	ulS
pH (CaCl ₂)	7,5	6,9	7,7	7,0	7,4
% Glühverlust	6	3,5	4,9	8,6	8,3
mg N ges./100 g	1,9	1,1	1,5	3,8	3,5
% CaCO ₃	5,7	0,2	29,2	4,2	2,9
KAK (mVal/100 g)	27,1	10,9	21,0	2,5	21,0
P ₂ O ₅ CAL (mg/100g)	53,9	24,6	73,2	16,2	44,5
K CAL (mg/100g)	44,7	23,4	44,4	13,9	26,5

Tab. 2

Kenndaten der Versuchsböden. Erklärung der Parameter in Kap. 2.

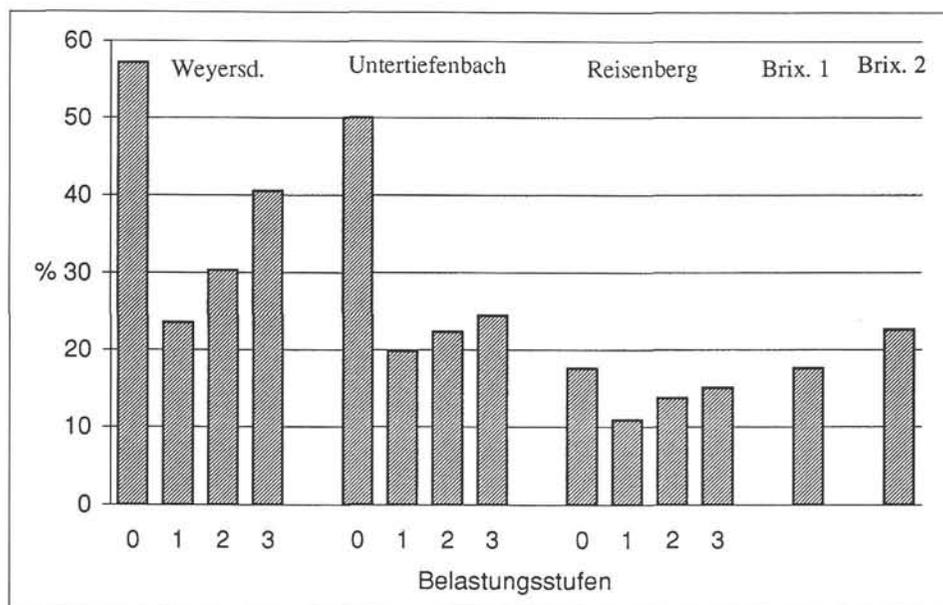


Abb. 1
Ammoniumacetat-lösliches Cadmium in % der gesamtsäurelöslichen Fraktion (Königswasser).

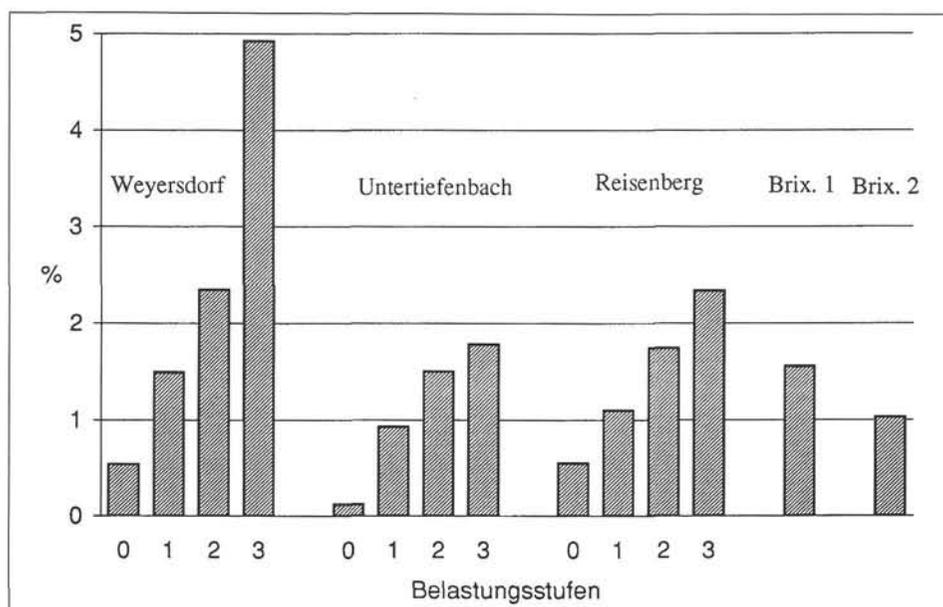


Abb. 2
Ammoniumacetat-lösliches Kupfer in % der gesamtsäurelöslichen Fraktion (Königswasser).

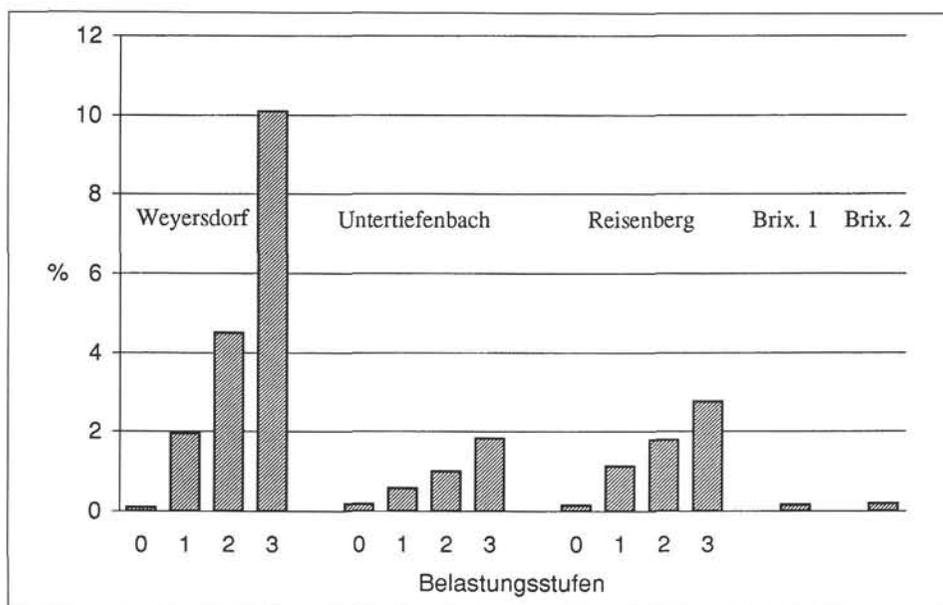


Abb. 3
Ammoniumacetat-lösliches Nickel in % der gesamtsäurelöslichen Fraktion (Königswasser).

Abb. 4
Ammoniumacetat-lösliches Vanadium in % der gesamtsäurelöslichen Fraktion (Königswasser).

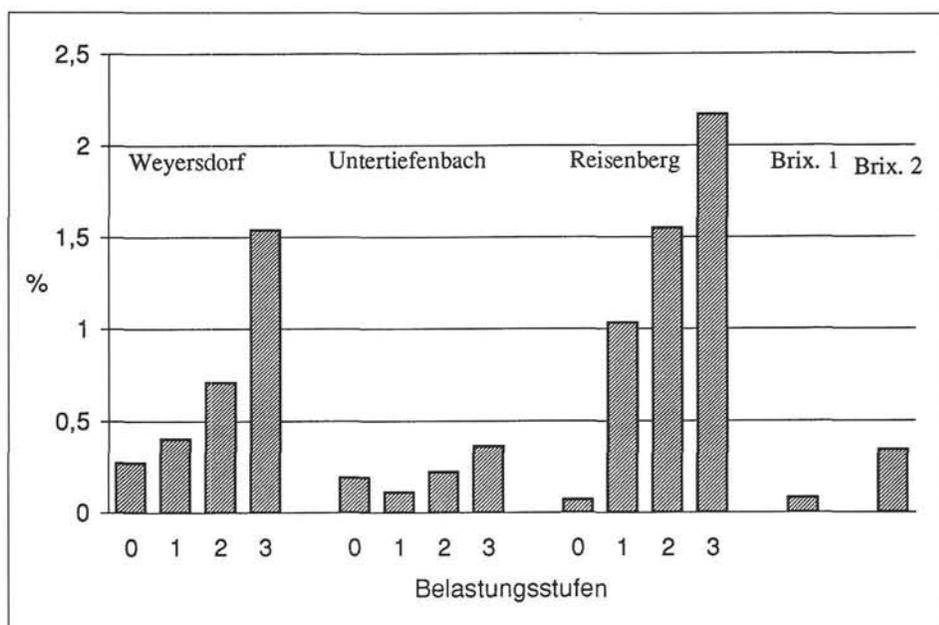
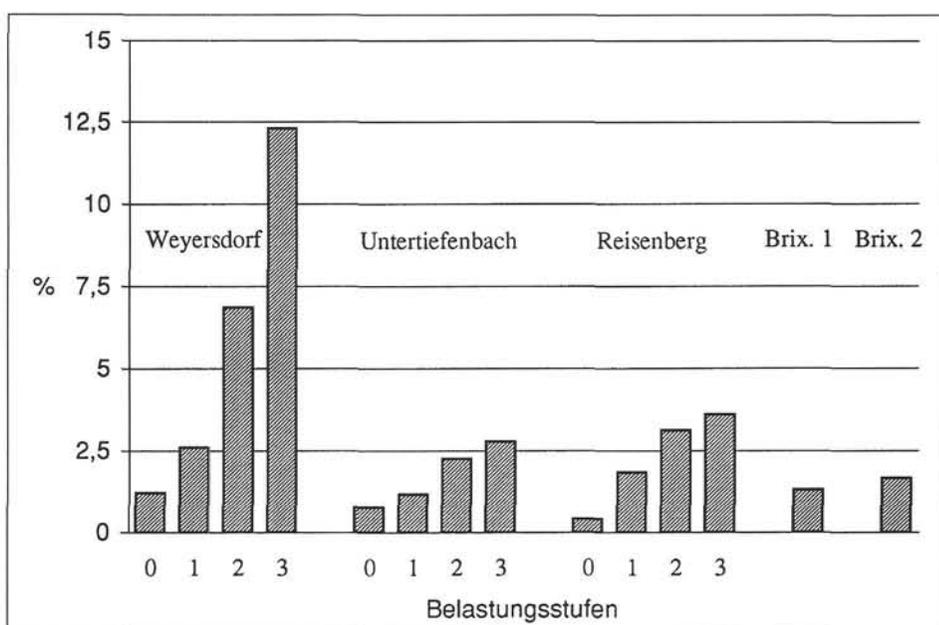


Abb. 5
Ammoniumacetat-lösliches Zink in % der gesamtsäurelöslichen Fraktion (Königswasser).



(z. B. in Mikroorganismen und Wurzelresten) zurückzuführen, welcher sich im niedrigen Konzentrationsbereich stark auswirkt. Im allgemeinen steigt mit zunehmendem Gesamtgehalt sowohl die absolute Mobilisierbarkeit der Elemente als auch ihr mobilisierbarer Anteil am Gesamtgehalt. Dies wird auch auf den Böden aus Brixlegg deutlich, wo hohe Cu-Gesamtgehalte zu höherer Verfügbarkeit dieses Metalles führen (Abb. 2).

Die extrahierbaren Schwermetallanteile zeigen eine starke Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften. Cd, Cu, Ni und Zn sind auf allen Varianten in der Weyersdorfer Braunerde (niedrigster pH-Wert, geringster Ton- und Humusgehalt) sowohl absolut als auch relativ am höchsten verfügbar. Im Gegensatz dazu erreicht Vanadium, das als Oxy-Anion vorliegt, seine höchste Verfügbarkeit auf dem stark kalkhaltigen Reisenberger Boden, der den höchsten pH-Wert aufweist (Abb. 4). Bei niedrigem pH-Wert wird V an Fe-Oxide spezifisch gebunden.

Das Ausmaß der Schwermetallgehalte in den Pflanzen resultiert sowohl aus deren Verfügbarkeit im Boden als auch aus

pflanzenspezifischen Fähigkeiten zur Aufnahme und Verlagerung innerhalb des Sprosses. In Tab. 3 sind die Schwermetallkonzentrationen in den Weizenjungpflanzen, im reifen Korn und im Stroh zusammengefaßt. Die untere Grenze der ertragsbezogenen Toxizitätsgrenzbereiche (ETG) nach SAUERBECK (1982) wurden bei folgenden Varianten und Elementen überschritten bzw. annähernd erreicht:

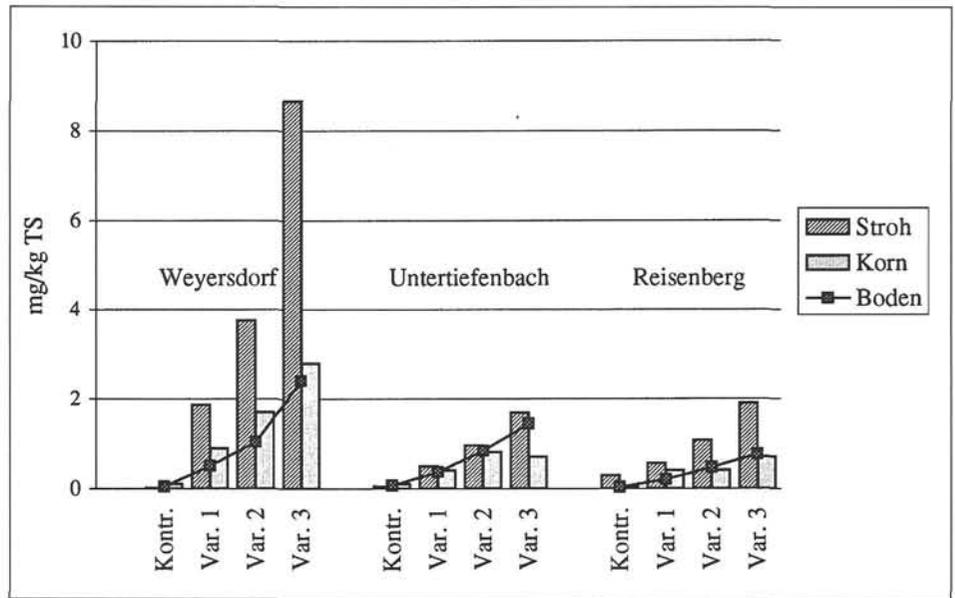
- ☞ Cd: Jungpflanzen und Stroh – Weyersdorf/3; (ETG = 5 mg/kg)
- ☞ Cu: Jungpflanzen und Stroh – Reisenberg/3; (ETG = 15 mg/kg)
- ☞ Zn: Jungpflanzen – Weyersdorf/2, 3, Reisenberg/2, 3, Untertiefenbach/3 und Stroh – Weyersdorf/1, 2 und 3, Reisenberg/2, 3 und Untertiefenbach/3 (ETG = 150 mg/kg).

Interessant ist, daß im Boden Brixlegg 2, der hinsichtlich seiner Gesamtbelastung mit Zn und Cu gleich oder sogar höher liegt als die 3. Stufen der anderen Versuchsböden, keine Überschreitung der ETG eintrat. Dies spricht für eine relativ

Tab. 3
Schwermetall-Konzentration (SM) in Weizen-Jungpflanzen, Korn und Stroh (mg/kg TS).

Standort	Variante	Jungpf.	Korn	Stroh	Jungpf.	Korn	Stroh	Jungpf.	Korn	Stroh	Jungpf.	Korn	Stroh	Jungpf.	Korn	Stroh
		Cd	Cd	Cd	Cu	Cu	Cu	Ni	Ni	Ni	V	V	V	Zn	Zn	Zn
Weyersdorf	Kontrolle	0,1	0,10	0,01	1,3	1,7	0,9	0,17	0,79	0,14	<0,5	<0,5	<0,5	35,75	36,0	37,0
	1	1,0	0,92	1,87	5,7	6,3	3,1	0,82	2,93	0,98	<0,5	<0,5	0,6	89,75	62,5	142,5
	2	5,1	1,68	3,76	8,1	6,7	3,7	5,57	9,01	1,00	<0,5	<0,5	0,9	298,15	104,2	312,3
	3	8,7	2,81	8,66	13,1	10,9	13,3	17,82	36,6	8,70	<0,5	<0,5	3,8	565,45	142,7	648,4
Untertiefen bach	Kontrolle	0,1	0,11	0,04	2,8	4,1	1,9	0,57	1,51	0,22	<0,5	<0,5	<0,5	37,25	46,6	38,5
	1	0,4	0,40	0,49	5,1	5,7	1,9	0,61	1,81	0,19	<0,5	<0,5	<0,5	67,05	53,5	65,9
	2	0,6	0,76	0,96	5,9	5,9	2,5	1,31	3,25	0,29	<0,5	<0,5	<0,5	99,85	67,6	122,6
	3	1,7	0,70	1,69	9,9	7,2	3,8	3,47	5,78	0,78	<0,5	<0,5	0,7	211,75	78,2	203,6
Reisenberg	Kontrolle	0,1	0,05	0,29	3,3	4,8	1,4	0,21	1,14	0,28	<0,5	<0,5	<0,5	39,15	45,8	32,9
	1	0,4	0,38	0,56	6,1	6,3	3	1,19	3,73	0,30	<0,5	<0,5	<0,5	99,45	55,9	86,4
	2	0,6	0,43	1,07	10	8,3	6,8	3,69	7,24	1,31	<0,5	<0,5	0,8	167,55	73,0	209,1
	3	2,4	0,70	1,90	23,5	11,0	17,7	7,13	10,74	2,55	<0,5	<0,5	1,7	575,45	93,2	434,2
Brixlegg 1		0,8	0,38	0,43	10,7	8,0	5,3	0,53	1,00	0,20	<0,5	<0,5	<0,5	102,5	73,5	64,6
Brixlegg 2		0,4	0,43	0,90	9,0	8,0	6,7	1,60	1,20	0,32	<0,5	<0,5	<0,5	118,35	60,7	99,1

Abb. 6
Cd-Gehalte in Sommerweizen (Korn, Stroh) und in Ammonium-Acetat-Auszügen der Versuchsböden / Proben 7/92.



starke Immobilisierung der beiden Metalle, die ja über einen Zeitraum von vielen Jahrzehnten in Form von Immissionen eingetragen wurden.

Die folgenden Abbildungen veranschaulichen die Akkumulation des jeweiligen Metalles im Weizenstroh und Weizenkorn sowie die leicht mobilisierbaren Schwermetallanteile in den Versuchsböden. Vanadium wurde aufgrund seiner extrem niedrigen Konzentrationen innerhalb der Pflanzen, die häufig unter der Bestimmungsgrenze lagen, nicht in die Abbildungen aufgenommen:

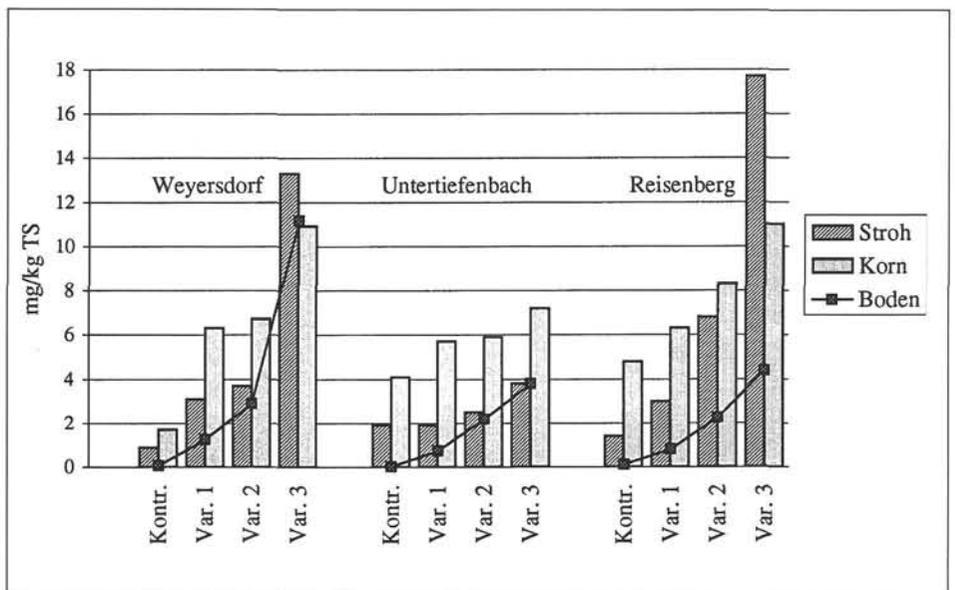
Die Cd-Konzentrationen im Korn liegen durchwegs unter jenen im Stroh, mit Ausnahme der Kontrollstufen Weyersdorf und Untertiefenbach (Abb. 6). Die stärkste Cadmiumaufnahme findet in Pflanzen auf der schwach sauren Felsbraunerde aus Weyersdorf statt. Cadmium ist in seiner Mobilität stark pH-abhängig und zeigt dementsprechend auf diesem Boden die höchste Anreicherung. Der hohe Gehalt an potentiell pflanzenverfügbaren Schwermetallen dürfte bei Variante Weyersdorf 3 bereits zu einer Schädigung der Plasmamembran in der Wurzelrinde geführt haben, wodurch Translokationsbarrieren zusammenbrechen und es zu einem ungehinderten Eintreten der Metalle in die Pflanze kommt. Allerdings spielt si-

cherlich auch ein Konzentrationseffekt infolge verminderter Substanzproduktion der Pflanzen der hohen Belastungsstufen eine Rolle. Damit wäre der hohe Cd-Gehalt von 8,66 mg/kg TS im Weizenstroh (Tab. 3) zu erklären.

Im Gegensatz zu Cd wird Cu stärker im Weizenkorn angereichert als im Stroh (Abb. 7). Sehr hohe Konzentrationen sind allerdings im Stroh der Varianten 3 der Böden Weyersdorf und Reisenberg zu finden (13,3 bzw. 17,7 mg Cu/kg TS; vergl. Tab. 3), was ebenfalls auf die oben angeführten Konzentrationseffekte zurückzuführen ist. Der hohe pH-Wert des Bodens Reisenberg führt zu vermehrter Bildung organischer Komplexe. Es kommt trotzdem zu einer starken Anreicherung des Metalles in der Pflanze, da wahrscheinlich auch das komplexierte Kupfer für die Pflanze eine Rolle spielt (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL, 1989).

Zink wird vor allem mit dem Transpirationsstrom innerhalb der Pflanze verlagert und verbleibt bei hohem Angebot vorwiegend im vegetativen Teil. Die Konzentrationen steigen im Weizenstroh mit zunehmenden Bodengehalten deutlich an (Abb. 8), während die Akkumulation im Korn relativ gering ist. Die Variante Weyersdorf 3 zeigt mit ca. 648 mg Zn/kg Stroh die höchste Konzentration. Während im neutralen pH-Bereich

Abb. 7
Cu-Gehalte in Sommerweizen (Korn, Stroh) und in Ammonium-Acetat-Auszügen der Versuchsböden / Proben 7/92.



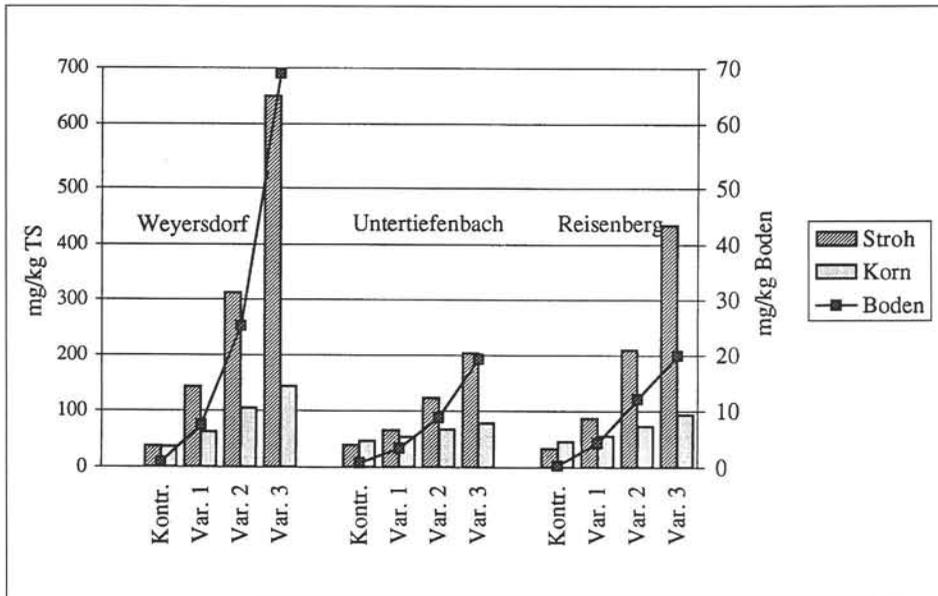


Abb. 8
Zn-Gehalte in Sommerweizen (Korn, Stroh) und in Ammonium-Acetat-Auszügen der Versuchsböden / Proben 7/92.

die adsorptive Bindung des Metalles im Boden durch geringere Verfügbarkeit in Erscheinung tritt, zeigt sich Zink auf dem leicht sauren Weyersdorfer Boden äußerst mobil.

Nickel akkumuliert bevorzugt in den Weizenkörnern; geringere Konzentrationen finden sich im Stroh (Abb. 9). Offensichtlich wird Nickel mit dem Nährstoffstrom der Siebröhren (Phloemtransport) in die generativen Organe verlagert, es findet also ein gerichteter Transport statt. Die stärkste Konzentrationszunahme findet man bei Pflanzen auf dem leicht sauren Boden Weyersdorf.

Es wurden allgemein gute Korrelationen zwischen den ammoniumacetatlöslichen Schwermetallfraktionen und den Konzentrationen in den Pflanzen erzielt. Diese waren deutlich besser als bei Verwendung von Königswasser als Extraktionsmittel. Regressionsanalysen zwischen den Konzentrationen an Cd, Cu, Ni und Zn in den Weizenkörnern und den leicht mobilisierbaren Fraktionen ergaben spezifische Akkumulationsmuster für die untersuchten Metalle (Abb. 10-13): Für Nickel ergibt sich eine lineare Korrelation zwischen Boden- und Pflanzenwerten (Abb. 10). Dies spricht dafür, daß sowohl der Aufnahmevorgang als auch die Translokation in die Körner eindeutig von der verfügbaren Nickelmenge abhängt. Nickel

wird anscheinend nicht antagonistisch von anderen Metallen beeinflusst, beziehungsweise dominiert die Konkurrenz um Bindungsstellen an Komplexbildnern, die den für die Verlagerung in generative Organe erforderlichen Siebröhrentransport (Phloemtransport) vermitteln. Auch bei Zink konnte eine lineare Beziehung festgestellt werden (Abb. 11). Zn wird allerdings bei Überschubangebot nur zu einem geringen Teil in die generativen Organe verlagert, da sein Transport in erster Linie mit dem Transpirationsstrom (Xylemtransport) stattfindet, was zur Akkumulation in den Blättern führt. Bei Kupfer ergeben sich deutliche Abweichungen von der linearen Beziehung, deren Ursache im Transportverhalten des Elementes innerhalb der Pflanze zu suchen sein dürfte (Abb. 12). Wahrscheinlich beruht die verminderte Cu-Anreicherung bei höherem Angebot auf der antagonistischen Wirkung der anderen Metalle beim Eintritt in das Phloem. Obwohl Cadmium, so wie Zink, vor allem in den Blättern akkumuliert, werden dennoch beträchtliche Mengen in die Körner verlagert (Abb. 13). Pflanzen des Bodens Weyersdorf zeigen Cd-Konzentrationen in den Weizenkörnern bis über 3 mg/kg TS. Bezüglich einer Abgrenzung eines kritischen Wertes, der für Lebensmittel bei 0,1 mg Cd/kg liegt, müßten noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

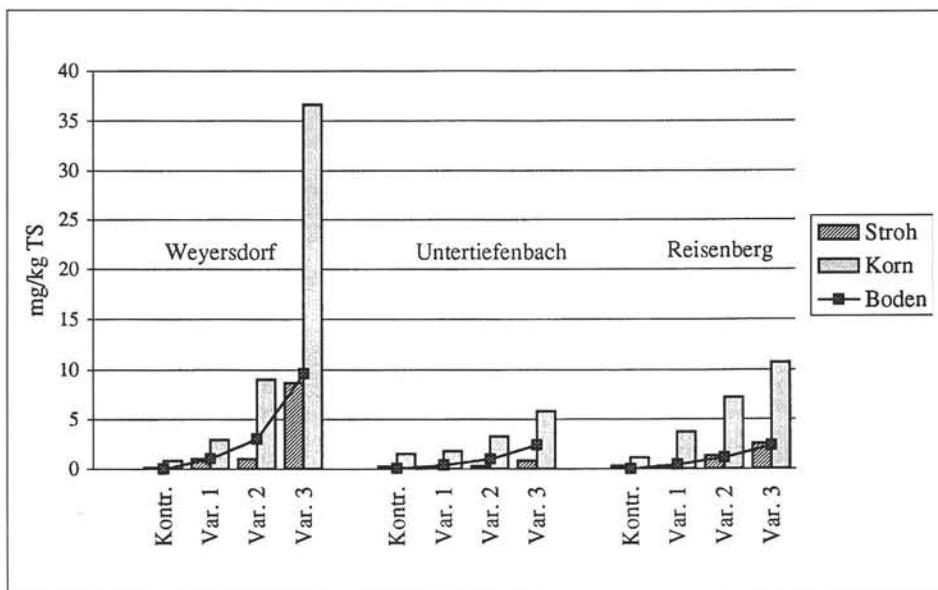


Abb. 9
Ni-Gehalte in Sommerweizen (Korn, Stroh) und in Ammonium-Acetat-Auszügen der Versuchsböden / Proben 7/92.

Abb. 10

Zusammenhang zwischen dem Ni-Gehalt im Weizenkorn und den leicht mobilisierbaren Anteilen in den Versuchsböden.

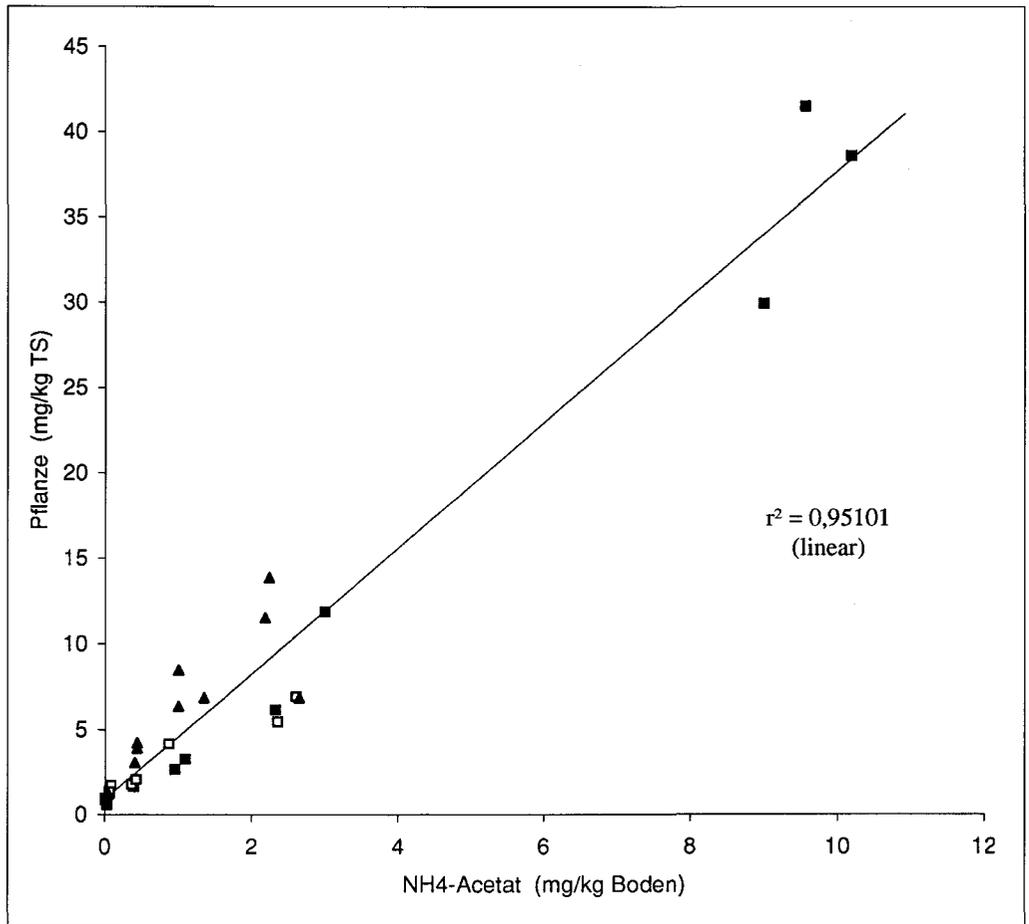
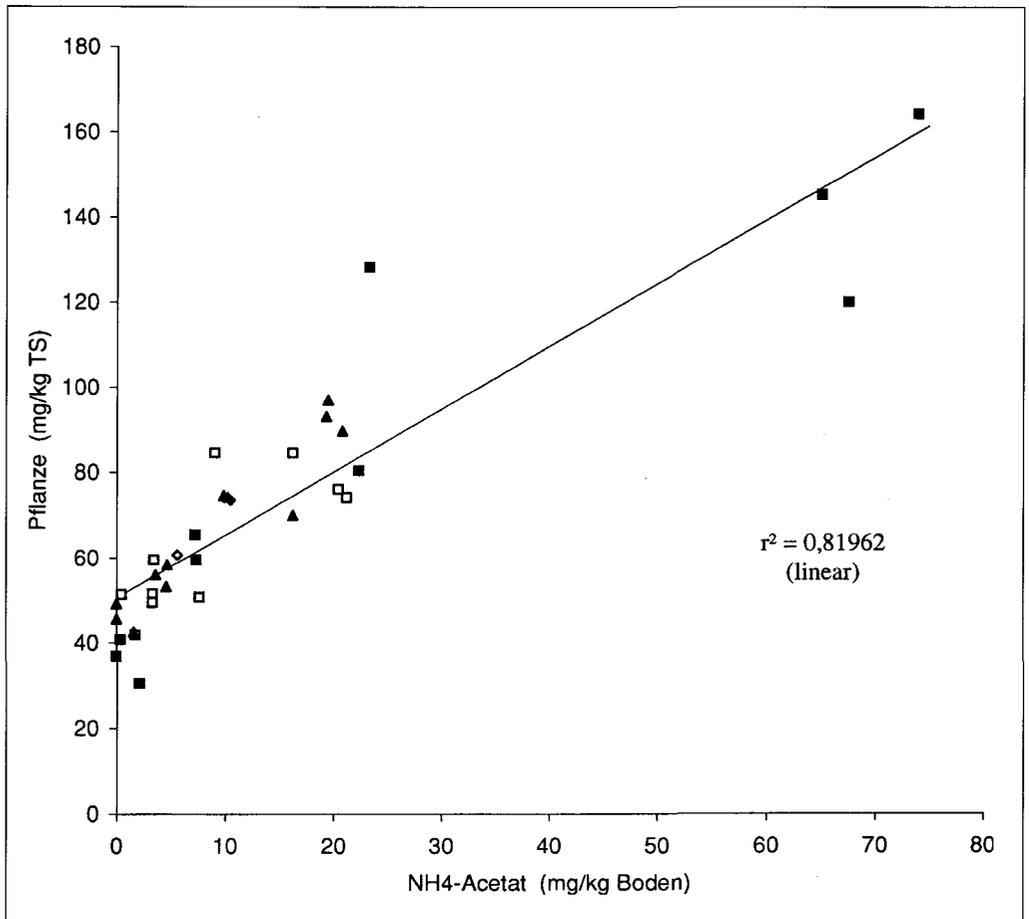


Abb. 11

Zusammenhang zwischen dem Zn-Gehalt im Weizenkorn und den leicht mobilisierbaren Anteilen in den Versuchsböden.



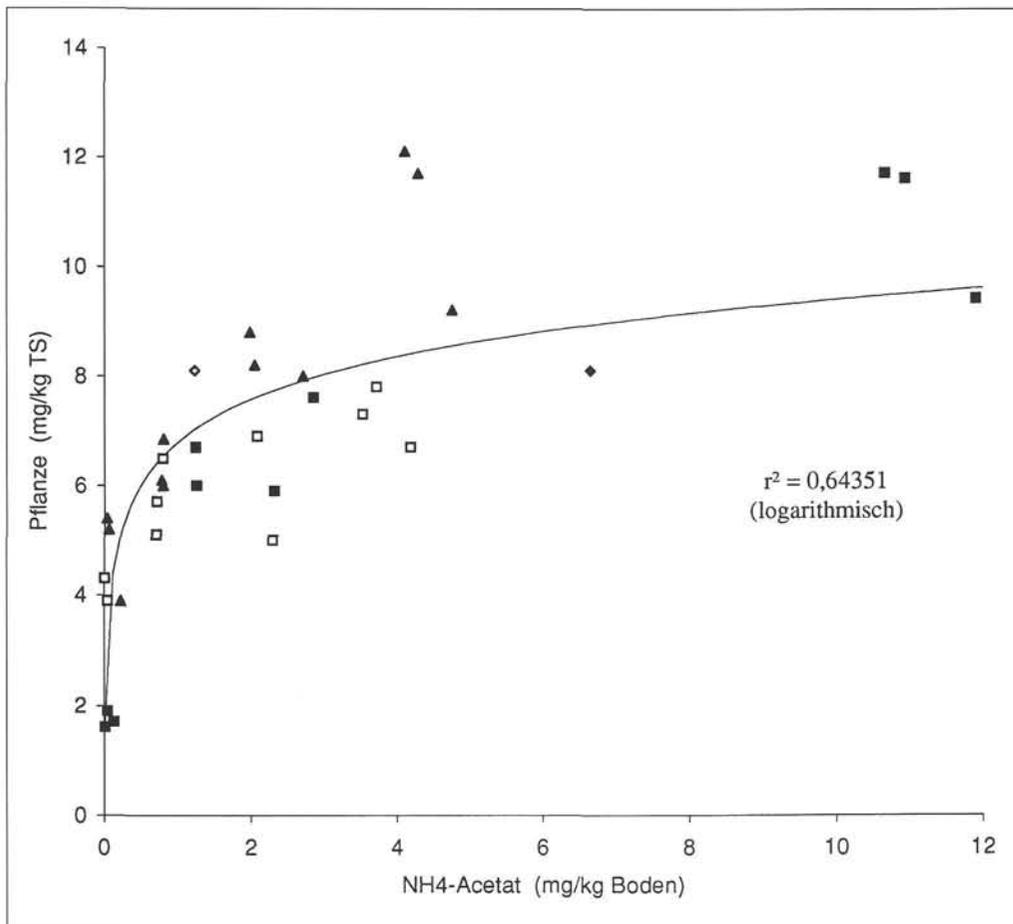


Abb. 12
Zusammenhang zwischen dem Cu-Gehalt im Weizenkorn und den leicht mobilisierbaren Anteilen in den Versuchsböden.

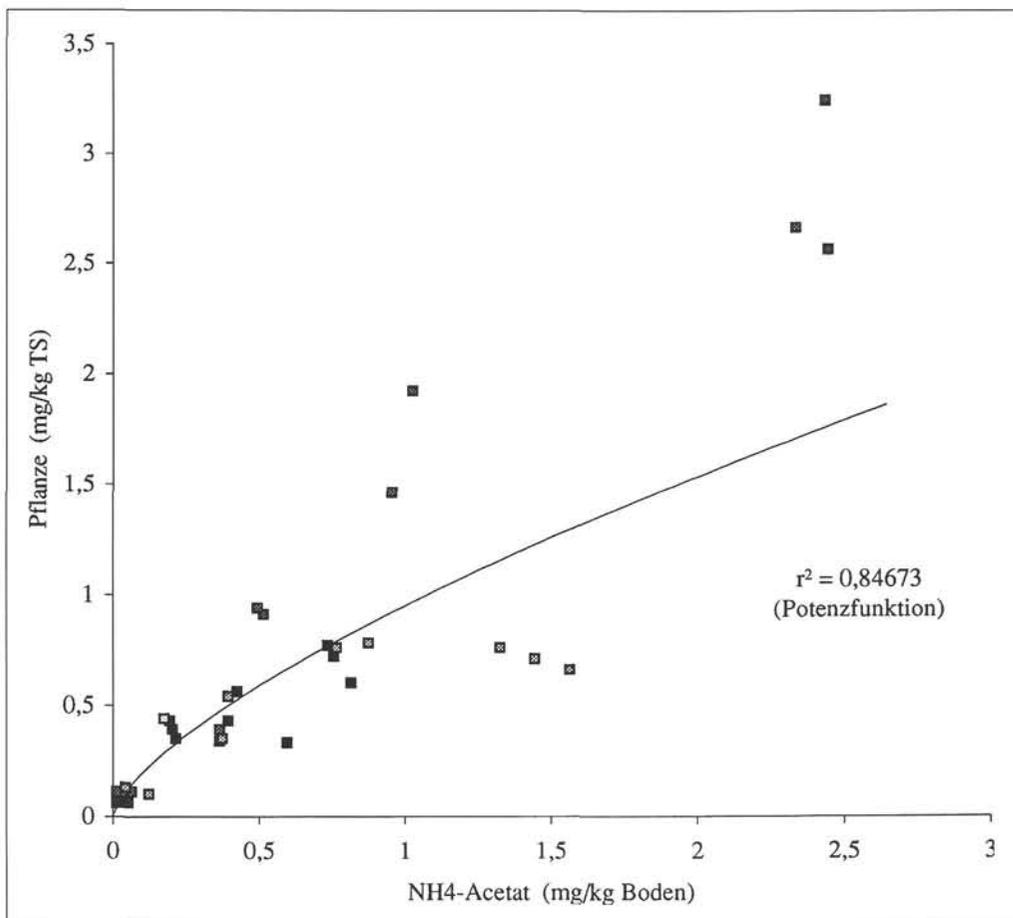


Abb. 13
Zusammenhang zwischen dem Cd-Gehalt im Weizenkorn und den leicht mobilisierbaren Anteilen in den Versuchsböden.

4. Schlußfolgerungen

Die unterschiedlichen Bindungskapazitäten für Schwermetalle der drei Versuchsböden spiegeln sich deutlich in den Schwermetallkonzentrationen innerhalb der Weizenpflanzen wider. Die Pflanzen des Bodens mit niedrigstem Ton und Humusanteil sowie niedrigstem pH-Wert zeigen die höchsten Schwermetallanreicherungen. Es ergeben sich positive Zusammenhänge zwischen der leicht mobilisierbaren Schwermetallfraktion (extrahiert mit 1 M Ammoniumacetat) und den Konzentrationen innerhalb der Pflanze (Korn und Stroh). Abweichungen zu höheren Pflanzengehalten sind durch Konzentrationseffekte infolge verminderter Substanzproduktion und Zusammenbruch von Translokationsbarrieren in der Pflanzenwurzel zu erklären.

Vergleicht man die Konzentrationen des jeweiligen Elementes im Korn und im Stroh, so wird ersichtlich, daß die relative Neigung zum Eintritt in generative Organe bei den im Überschuß aufgenommenen Schwermetallen von Ni über Cu zu Cd und Zn abnimmt. Der Transfer von Vanadium in die oberirdischen Pflanzenorgane ist gering.

Aus den Ergebnissen dieses Versuches ist ersichtlich, daß die Bodenextraktion mit 1 M Ammoniumacetat zur Abgrenzung eines kritischen Belastungsniveaus für Schwermetalle im Boden sinnvoll ist. Dafür spricht insbesondere die Tatsache, daß typische Beziehungen zwischen Bodengehalten und Konzentrationen im relevanten Pflanzenorgan unabhängig vom jeweiligen Boden erhalten wurden.

Unter Bezug auf früher durchgeführte Untersuchungen (HORAK und KAMEL, 1990) und die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse können Richtwerte für die pflanzentoxischen Elemente Zn und Cu im Boden auf der Basis Ammoniumacetat angegeben werden: Diese liegen bei 10 mg Zn/kg (unbelastet <1 mg/kg) und 1 mg Cu/kg (unbelastet ca. 0,1 mg/kg) und stimmen relativ gut mit den von PRÜESS (1992) angegebenen Werten auf Basis Ammoniumnitrat überein.

5. Literatur

- BLUM, W. E. H., SPIEGEL, H. und WENZEL, W. W., 1989: Bodenzustandsinventur. 95 S. Hrsg.: Arbeitsgruppe Bodenzustandsinventur der Österr. Bodenkundlichen Gesellschaft, Wien.
- DEL CASTILHO, P. und RIX, I., 1993: Ammonium acetate extraction for soil heavy metal speciation; model aided soil test interpretation. – Intern. J. Environ. Anal. Chem., **51**, 59-64.
- DELSCHEN, T. und WERNER, W., 1989: Zur Aussagekraft der Schwermetallgrenzwerte in klärschlammgedüngten Böden. 1. Mitteilung: Einfluß verschiedener Bodenparameter auf die „tolerierbaren“ königswasserlöslichen Gesamtgehalte. – Landwirtsch. Forsch., **42**, 29-39.
- ERNST, W. H. O., 1974: Schwermetallvegetation der Erde. 194 S., Stuttgart (Gustav Fischer Verlag).
- HÄNI, H. und GUPTA, S., 1980: Ein Vergleich verschiedener methodischer Ansätze zur Bestimmung mobiler Schwermetallfraktionen im Boden. – Landwirtsch. Forsch. Sonderh., **37**, Kongreßband, 267-274.
- HERMS, U. und BRÜMER, G., 1984: Einflußgrößen der Schwermetalllöslichkeit und -bindung in Böden. – Z. Pflanzenern. Bodenkde. **147**, 400-424.
- HORAK, O. und KAMEL, A. A., 1990: Ein Langzeitversuch zur Untersuchung der Pflanzenverfügbarkeit von Schwermetallen. – VDLUFA-Schriftenreihe, **32**, Kongreßband, 803-808.
- HORAK, O. und KAMEL, A. A., 1991: Verhalten von Schwermetallen im System von Boden und Pflanze. – Der Förderungsdienst, **11**, 316-318.
- KAMEL, A. A. und HORAK, O., 1991: Untersuchungen über mobile Schwermetallfraktionen in belasteten Böden. – VDLUFA-Schriftenreihe, **33**, Kongreßband, 767-772.
- KANDELER, E., MENTLER, A., PFEFFER, M. und HORAK, O., 1990: Bodenbiologische Beurteilung der Toxizität von Schwermetallen in künstlich belasteten Böden. – VDLUFA-Schriftenreihe, **32**, Kongreßband, 621-626.
- KLOKE, A., 1980: Orientierungsdaten für tolerierbare Gesamtgehalte einiger Elemente in Kulturböden. – Mitt. d. VDLUFA, Heft **1**, 9-11.
- LUMMERSTORFER, E., KANDELER, E., KAMEL, A. und HORAK, O., 1992: Wirkung kombinierter Schwermetallgaben auf die Aggregatstabilität und die Aktivität von Mikroorganismen in verschiedenen Böden. – VDLUFA-Schriftenreihe, **35**, Kongreßband, 587-590.
- PRÜESS, A., TURIAN, G. und SCHEIKLE, V., 1991: Ableitung kritischer Gehalte an NH_4NO_3 -extrahierbaren ökotoxikologisch relevanten Spurenelementen in Böden SW-Deutschlands. – Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges., **66/I**, 385-388.
- PRÜESS, A., 1992: Vorsorgewerte und Prüfwerte für mobile und mobilisierbare, potentiell ökotoxische Spurenelemente in Böden. 148 S., Wendlingen (Ulrich E. Grauer).
- SAUERBECK, D., 1982: Welche Schwermetallgehalte in Pflanzen dürfen nicht überschritten werden um Wachstumsbeeinträchtigungen zu vermeiden? – Landwirtsch. Forsch. Sonderheft, **39**, Kongreßband, 108-129.
- SCHAEFFER, F. und SCHACHTSCHABEL, P., 1989: Lehrbuch der Bodenkunde, 12. Aufl. 491 S. Ferd. Enke Verlag, Stuttgart.

Manuskript eingegangen am: 10. 10. 1994 ●
 revidierte Fassung eingegangen am: 17. 03. 1997 ●
 Manuskript akzeptiert am: 14. 04. 1997 ●