

ABSCHÄTZUNG DER CADMIUMAUFNAHME VON KULTURGRÄSERN AUS LANDWIRTSCHAFTLICH GENUTZTEN BÖDEN ANHAND EINES MODELLS

Jürgen Wesseler und Frank Darius

ABSTRACT

In Berlin (West) a regional investigation about the contamination of arable land with heavy metals was made. One of the agriculturally used areas turned out to be moderately contaminated by cadmium. As soil pH was neutral to slight acid it is of interest to which amount liming could lower the cadmium content of agricultural products. From field investigations (literature and own data) a model is derived for cadmium uptake of cultivated grasses. With the help of the model it is possible to estimate quantitatively the influence of the soil pH and the specific uptake ratio of soil Cd for crops. For standard conditions ($Cd_{soil} = 1$ ppm, $pH = 6$) an accumulation factor gives an easy estimate of the cadmium content in the cultivated grasses. For other soil conditions the model as a whole allows this estimation of cadmium content.

keywords: *cadmium uptake, cultivated grasses, model, pH dependence*

EINFÜHRUNG

In Berlin (West) wurde eine Untersuchung über die Belastung landwirtschaftlicher Nutzflächen mit den Schwermetallen Cadmium, Blei und Zink durchgeführt. In einem der Anbaugelände, westlich der Havel, wurde eine mäßige Belastung der Böden mit diesen Schwermetallen festgestellt, obwohl in diesem Anbaugelände nie eine Verrieselung von Abwässern stattgefunden hat. Vermutlich ist das früher übliche Ausbringen von Klärschlamm die Ursache dieser Belastung. Die erhöhten Schwermetallgehalte in den Böden spiegelte sich in einer erhöhten Belastung der Anbauprodukte wider. So wurde in den Körnern von Winterroggen im Durchschnitt des belasteten Gebietes 0,09 ppm Cadmium in der Frischmasse gemessen. Es stellt sich die Frage, ob diese Belastung, die etwa in der Höhe des Richtwertes '86 (BUNDESGESUNDEHEITSAMT 1986) von 0,1 ppm liegt, durch bestimmte Bewirtschaftungsmaßnahmen gesenkt werden kann. Um eine mögliche Senkung der Cadmiumgehalte im Getreide abschätzen zu können, wurde ein mathematisch deskriptives Modell entwickelt.

METHODEN

Die Entwicklung des Modells erfolgte auf Grund von Daten aus der Literatur und selbst erhobenen Daten. Bei den Daten aus der Literatur ist die Methodik ihrer Erhebung z.T. nicht klar angegeben (z.B. pH-Messung in Wasser oder in $CaCl_2$ -Lösung bei SAUERBECK und STYPEREK 1988). Andere Daten wurden vor ihrer Veröffentlichung zu Mittelwerten zusammengefaßt (FEUEREISSEN 1986). Soweit es für die statistische Auswertung vertretbar schien, wurden jedoch auch solche Daten berücksichtigt. Zu einem kleinen Teil wurden auch Daten aus Graphiken entnommen und in Zahlenwerte rückgewandelt. Eine genaue Aufstellung, welche Daten für bestimmte Auswertungsschritte benutzt wurden, findet sich bei WESSELER (1991).

Die eigenen Meßergebnisse beziehen sich z.T. auf Misch-, z.T. auf Einzelproben. Die angegebenen Schwermetallgehalte sind Gesamtgehalte. Bei Bodenproben beziehen sich die Angaben auf den Feinerdeanteil. Sofern nicht anders angegeben, sind Schwermetallgehalte von Pflanzenproben immer auf Trockensubstanz bezogen. Für Angaben in Frischmasse (FM) wurde bei Roggenkörnern ein Wassergehalt von 15 % angenommen. Die pH-Messungen wurden in 0,01 M CaCl₂-Lösung vorgenommen. Genauere Angaben zur Methodik sind WESSELER (1991) zu entnehmen. Zur statistischen Auswertung wurden als Standardwerke KRAUSE und METZLER (1984) und SACHS (1984) herangezogen. Die rechnerische Auswertung erfolgte mit Hilfe eines Tabellenkalkulations-Programms.

DAS MODELL

Es sollen zunächst die Kriterien dargestellt werden, die bei der Entwicklung des Modells berücksichtigt wurden:

- 1) Ein deskriptives Modell (vgl. WISSEL 1989) soll den Zusammenhang zwischen edaphischen Größen (wie Schwermetallgehalt und pH-Wert) und dem Schwermetallgehalt von Kulturgräsern beschreiben.
- 2) Als Ergebnis soll das Modell anschauliche Zahlen liefern, die einen einfachen Vergleich zwischen der Schwermetallaufnahme einzelner Kulturgräser oder ihrer Pflanzenteile ermöglicht.
- 3) Auch für unterschiedliche Untersuchungen soll der Schwermetallgehalt in Kulturgräsern durch das Modell weitgehend herleitbar sein.
- 4) Die Güte des Modells soll mit statistischen Methoden überprüfbar sein.

Für das Schwermetall Cadmium sollte in Gebieten mit normaler Immissions-Situation ($Cd < 2 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) die Aufstellung eines solchen Modells, das von edaphischen Einflußgrößen bestimmt ist, möglich sein: Denn "als Einflußfaktoren für die Schwermetallgehalte verschiedener Pflanzen sind bei Cadmium ... der Schwermetallbodgehalt mit gehaltssteigender und der pH-Wert mit mindernder Wirkung vorherrschend" (KÖNIG 1986). Auch nach OCKER und BRÜGGEMANN (1989) wird Cadmium überwiegend durch die Pflanzenwurzeln aus dem Boden aufgenommen.

Als Grundlage für das Modell wurde eine Gleichungsform von BROWNE et al. (1984) übernommen:

$$\lg(Cd_p) = b \cdot \lg(Cd_{\text{soil}}) + a \quad (1)$$

\lg : Logarithmus zur Basis 10, Cd_p : Cadmiumgehalt in der Pflanze (ppm), Cd_{soil} : Cadmiumgehalt im Boden (ppm), b und a : Regressionsparameter (leicht verändert, nach BROWNE et al. 1984).

Es wurde diese durch die logarithmischen Transformationen etwas kompliziert erscheinende Modellgrundlage gewählt, da sie dem Kriterium der statistischen Überprüfbarkeit sehr entgegenkommt: Zur Modellanpassung mit Hilfe der Regressionsanalyse und zur Güteabschätzung des Modells mit Hilfe des Bestimmtheitsmaßes müssen nämlich die verwendeten Daten (oder besser ihre Grundgesamtheiten) normalverteilt sein (vgl. SACHS 1984 und KRAUSE und METZLER 1984). Die Cadmiumgehalte in Bodenproben des mäßig belasteten Anbaugesbietes sind aber stark linkssteil verteilt. In Abb. 1 sind diese Cadmiumgehalte nach der logarithmischen Transformation eingetragen. Sie folgen nun gut einer Normalverteilung (Chi-Quadrat-Test, 10 %), die zum optischen Vergleich ebenfalls dargestellt ist. Ähnliche linkssteile Verteilungen von Cadmiumgehalten in Bodenproben wurden auch von anderen Autoren festgestellt (BRÜNE und ELLINGHAUS 1981, HOFFMANN et al. 1981). Auch die Cadmiumgehalte in den untersuchten Pflanzenteilen von Winterroggen (Korn, Blatt, Halm) folgen Lognormalverteilungen. Dies steht in guter Übereinstimmung mit den linkssteilen Verteilungen von Cadmium in Weizenmehl, die OCKER (1986) feststellte. Die Anwendung der statistischen Methoden von Regressions- und Korrelationsanalyse ist mit den logarithmisch transformierten Daten für die Modellgrundlage (Gleichung 1) möglich.

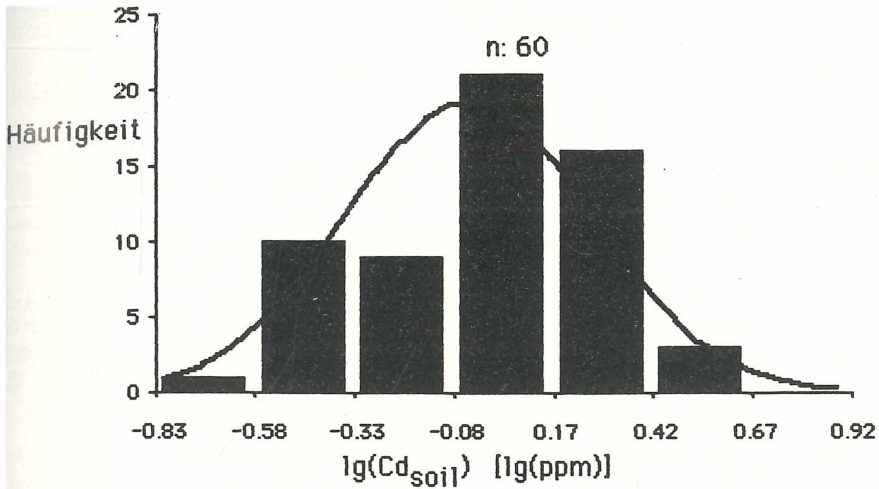


Abb. 1: Histogramm der Cadmiumgehalte von Bodenproben des mäßig belasteten Anbaugebietes in Berlin (West) nach logarithmischer Transformation.

Damit das Modell anschaulich ist, müssen die Parameter b und a eine interpretierbare Bedeutung besitzen. Wegen des besseren Verständnisses sei deshalb die Gleichung 1 hier in ihrer linearen Form (1b) wiedergegeben und an konkreten Berechnungsergebnissen von BROWNE et al. (1984), Tab. 1, diskutiert.

$$Cd_p = (Cd_{soil})^b \cdot 10^a \quad (1b)$$

10^a ist ein Faktor, der die unterschiedliche Höhe der Cadmiumaufnahme verschiedener Pflanzenarten oder ihrer Gewebe beschreibt. Die Tatsache, daß z.B. Tomaten weniger Cadmium akkumulieren als Salatköpfe, spiegelt sich in einem kleinen a (s. Tab. 1) wider. Der Parameter a wird deshalb im weiteren Akkumulationsfaktor genannt.

Tab. 1: Berechnungsergebnisse der Parameter b und a der Cadmiumaufnahme für unterschiedliche Pflanzen und Pflanzengewebe nach Gleichung 1 (BROWNE et al. 1984). r: Korrelationskoeffizient. Felduntersuchungen mit cadmiumangereichertem Klärschlamm auf kalkhaltigen Böden.

Pflanze	Pflanzenteil	b	a	r
Weizen	Korn	0.52	0.25	0.948
Mais	Korn	0.60	-0.37	0.976
Spinat	Blatt	0.64	1.60	0.951
Salat	Kopf	0.63	1.16	0.960
Mohrüse	Wurzel	0.44	0.74	0.978
Sojabohne	Bohne	0.62	0.53	0.980
Tomate	Frucht	0.46	-0.07	0.996

Um den Effekt des Parameters b zu veranschaulichen, sind im folgenden Beispiel die konkreten Parameter b und a für Weizenkörner (Tab. 1) in die Gleichung 1b eingesetzt:

$$Cd_p = 10^{0,25} \cdot Cd_{soil}^{0,52}$$

Verdoppelt man den Cadmiumgehalt im Boden, so erhöht sich rechnerisch der Cadmiumgehalt im Weizenkorn lediglich um einen Faktor von 1,4, die Cadmiumaufnahme aus dem Boden ist gedämpft. Der Parameter b charakterisiert also, wie stark die Pflanzenart auf eine Änderung des Cadmiumgehaltes im Boden reagiert. Er wird deshalb im folgenden Sensibilitätsparameter genannt. Aus Tab. 1 geht hervor, daß diese Sensibilitätsparameter b häufig sehr ähnlich sind, obwohl hier unterschiedliche Pflanzen und Pflanzenteile untersucht wurden.

So wurde zunächst die Frage bearbeitet, ob für bestimmte Pflanzengruppen oder ihre Gewebe ein gemeinsamer Sensibilitätsparameter β gefunden werden kann. Der griechische Buchstabe β steht für einen verschiedenen Untersuchungen gemeinsamen Sensibilitätsparameter, während der oben definierte lateinische Buchstabe b für einen diskreten, aus einer Untersuchung berechneten Sensibilitätsparameter steht.

Ohne zunächst auf eine pH-Abhängigkeit der Cadmiumaufnahme einzugehen, können Sensibilitätsparameter b aus solchen Untersuchungen berechnet werden, die bei konstantem pH-Wert durchgeführt wurden. Eine Fülle solcher Untersuchungen sind in einer Zusammenfassung von SAUERBECK und STYPEREK (1988) veröffentlicht. Aus diesen Daten wurde von uns die Cadmiumaufnahme der Kulturgräser nach dem Schema der Gleichung 1 noch einmal ausgewertet. Für die Bestimmung des Sensibilitätsparameters b für Körner von Kulturgräsern konnten 39 Untersuchungen verwendet werden (Anzahl der Datenpaare $n \geq 4$, jedes Untersuchungsjahr wurde als einzelne Untersuchung gewertet). Um die Auswertung zu veranschaulichen, sind drei dieser Untersuchungen in Abb. 2 dargestellt. Als grauer Bereich ist in dieser Abbildung jeweils der 95 %-Vertrauensbereich der Steigung b (Sensibilitätsparameter) eingetragen, d.h., die Steigung b liegt mit 95 % Wahrscheinlichkeit innerhalb dieses grauen Bereiches. Außerdem wurde der aus den Untersuchungen abgeschätzte gemeinsame Sensibilitätsparameter $\beta = 0,45$ eingetragen. Bei den drei dargestellten Beispielen liegt β innerhalb des 95 %-Vertrauensbereiches, d.h. die Hypothese, daß der diskrete Sensibilitätsparameter b nicht signifikant von dem geschätzten β abweicht ($b = \beta$), kann angenommen werden.

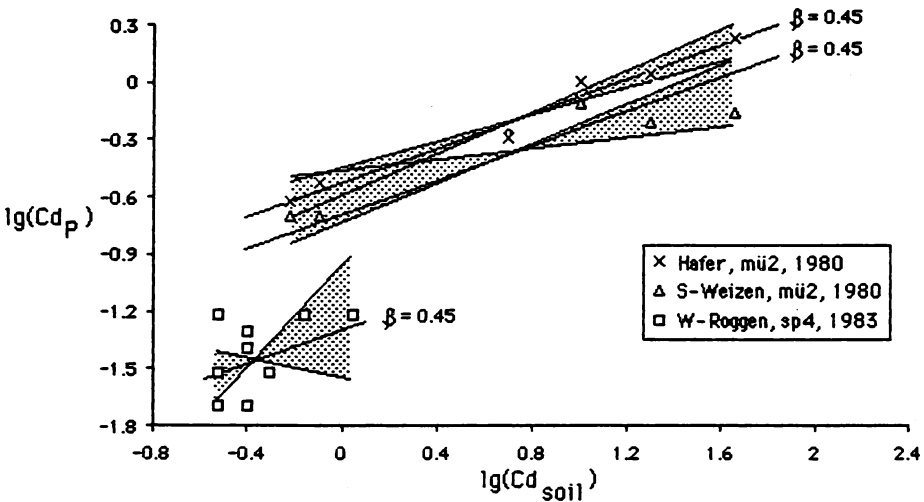


Abb. 2: Sensibilitätsparameter b aus drei Untersuchungen, dargestellt durch die 95 %-Vertrauensbereiche (grau) der Steigungen. Die drei dargestellten Beispiele stimmen mit der Hypothese überein, daß ein gemeinsamer Sensibilitätsparameter $\beta = 0,45$ gültig ist. Daten aus: SAUERBECK und STYPEREK (1988).

Damit die Abschätzung des gemeinsamen Sensibilitätsparameters $\beta = 0,45$ nachvollziehbar wird, sind die einzelnen Berechnungsergebnisse für b in Tab. 2 wiedergegeben. Ähnlich den Berechnungsergebnissen von BROWNE et al. (1984) sind die Werte für die Sensibilitätsparameter b in der Regel kleiner als 1, d.h., die Cadmiumaufnahme der Kulturgräser ist gedämpft.

Tab. 2: Berechnungsergebnisse des Sensibilitätsparameters b für Körner von einigen Kulturgräsern nach Gleichung 1. Daten aus: SAUERBECK und STYPEREK (1988), vgl. dort auch Abkürzungen für Standort.

Der mittlere Cadmiumgehalt im Boden wurde wegen der Lognormalverteilung als geometrisches Mittel berechnet. n : Anzahl der Datenpaare, e.B. (Reg.): einfaches Bestimmtheitsmaß der Regression, *: auf dem 5 %-Niveau signifikante Abweichung von der Hypothese $b = \beta$ mit $\beta = 0,45$, e.B. (β): einfaches Bestimmtheitsmaß bei Anwendung des Modellparameters β .

Pflanze	Standort	Hauptbodenart	Untersuchungsjahr	pH	Cd _{soll} (g.M.) ppm	n	e.B. (Reg.)	b	St.- abw. (b)	b= β ? =0.45	e.B. (β)
W-Roggen	mü2	S	78	5.8	6.7	6	0.98	0.59	0.05	*	0.92
W-Roggen	mü2	S	80	5.8	5.3	6	0.83	0.38	0.08		0.80
W-Roggen	mü2	S	81	5.8	3.4	6	0.92	0.45	0.06		0.92
W-Roggen	mü2	S	82	5.8	3.4	6	0.89	0.38	0.07		0.86
W-Roggen	sp4	S	83	6.8	0.4	10	0.23	0.55	0.35		0.23
S-Gerste	gi3	L	81	5.9	0.5	6	0.89	0.43	0.08		0.87
S-Gerste	mü2	S	78	5.8	6.7	6	0.87	0.56	0.11		0.83
S-Gerste	mü2	S	79	5.8	5.3	6	0.97	0.40	0.04		0.95
S-Gerste	mü2	S	80	5.8	14.6	4	0.84	0.17	0.05	*	-1.42
S-Gerste	mü2	S	81	5.8	3.4	6	0.89	0.49	0.09		0.88
S-Gerste	mü2	S	82	5.8	3.4	6	0.93	0.31	0.04	*	0.74
W-Weizen	bn1	L	82	6.5	0.5	8	0.65	1.63	0.49		0.31
W-Weizen	bn2	L	82	5.6	0.9	10	0.39	-1.40	0.62	*	-0.29
W-Weizen	gi1	L	83	6.6	0.6	4	0.45	0.15	0.12		-1.42
W-Weizen	sp1	S	83	6.2	0.3	7	0.14	0.22	0.24		-0.01
W-Weizen	sp2	S	82	5.5	0.7	8	0.25	0.55	0.39		0.24
W-Weizen	sp2	S	84	5.5	0.7	8	0.21	0.41	0.32		0.21
W-Weizen	sp3	S	83	6.8	0.4	12	0.01	0.19	0.54		-0.01
S-Weizen	gi2	L	83	6.2	0.2	5	0.76	0.57	0.19		0.72
S-Weizen	gi3	L	82	5.9	0.5	6	0.80	0.77	0.19		0.67
S-Weizen	mü2	S	78	5.8	5.3	6	0.82	0.43	0.10		0.82
S-Weizen	mü2	S	80	5.8	5.3	6	0.86	0.33	0.07		0.74
S-Weizen	mü2	S	81	5.8	3.4	6	0.90	0.45	0.08		0.90
S-Weizen	mü2	S	82	5.8	3.4	6	0.96	0.43	0.04		0.96
Hafer	gi1	L	82	6.6	0.6	4	0.53	0.59	0.40		0.50
Hafer	gi2	L	82	6.2	0.2	5	0.74	0.66	0.23		0.66
Hafer	mü2	S	78	5.8	6.7	6	0.95	0.84	0.10	*	0.74
Hafer	mü2	S	79	5.8	5.3	6	0.98	0.63	0.04	*	0.90
Hafer	mü2	S	80	5.8	5.3	6	0.98	0.44	0.04		0.98
Hafer	mü2	S	81	5.8	3.4	6	0.89	0.56	0.10		0.86
Hafer	mü2	S	82	5.8	3.4	6	0.96	0.45	0.04		0.96

Für Felduntersuchungen, bei denen der pH-Wert des Bodens variiert, muß der pH-Wert in das Modell integriert werden, da er die Cadmiumaufnahme der Kulturgräser mitbestimmt. BROWNE et al. (1984) haben den pH-Wert in der folgenden Weise in die Gleichung 1 eingeführt, die wir hier allgemein formuliert vorstellen möchten:

$$\lg(\text{Cd}_p) = b \cdot \lg(\text{Cd}_{\text{soil}}) + f \cdot \text{pH} + C \quad (2)$$

Der pH-Wert erscheint in dieser Gleichung linear. Es sei deshalb daran erinnert, daß es sich auch beim pH-Wert um eine logarithmisch transformierte Konzentrationsangabe handelt. Die pH-Werte in den untersuchten Bodenproben Berliner Ackerstandorte genügen einer Normalverteilung. Da in der Gleichung 2 der Akkumulationsfaktor a nicht mehr auftaucht, haben wir in unser Modell einen Standard-pH-Wert (CaCl_2) von 6 eingeführt, der es erlaubt, einen auf diesen pH-Wert standardisierten Akkumulationsfaktor a' zu berechnen:

$$\lg(\text{Cd}_p) = b \cdot \lg(\text{Cd}_{\text{soil}}) + f \cdot (\text{pH} - 6) + a' \quad (3)$$

Die Bedeutungen der Parameter b und a' entsprechen den bei Gleichung 1 diskutierten, nur daß der Akkumulationsfaktor a' nun auf einen Standard pH-Wert normiert ist und dadurch für unterschiedliche Untersuchungen vergleichbar wird. Voraussetzung ist allerdings, daß der Parameter f , der die Abhängigkeit der pflanzlichen Cadmiumaufnahme vom pH-Wert des Bodens beschreibt, bekannt ist.

Unter der Annahme, daß der bereits abgeschätzte gemeinsame Sensibilitätsparameter $\beta = 0,45$ gültig ist, kann die pH-Abhängigkeit f durch Regression nach Gleichung 2b bestimmt werden:

$$\lg(\text{Cd}_p) - \beta \cdot \lg(\text{Cd}_{\text{soil}}) = f \cdot \text{pH} + C \quad (2b)$$

Zur Veranschaulichung dieser Berechnung sind in Abb. 3 drei Beispiele dargestellt. Als grauer Bereich sind die 95 %-Vertrauensbereiche des jeweiligen Regressionskoeffizienten f (pH-Abhängigkeit) eingezeichnet. Zum Vergleich wurde auch die abgeschätzte gemeinsame pH-Abhängigkeit $\psi = -0,2$ eingetragen.

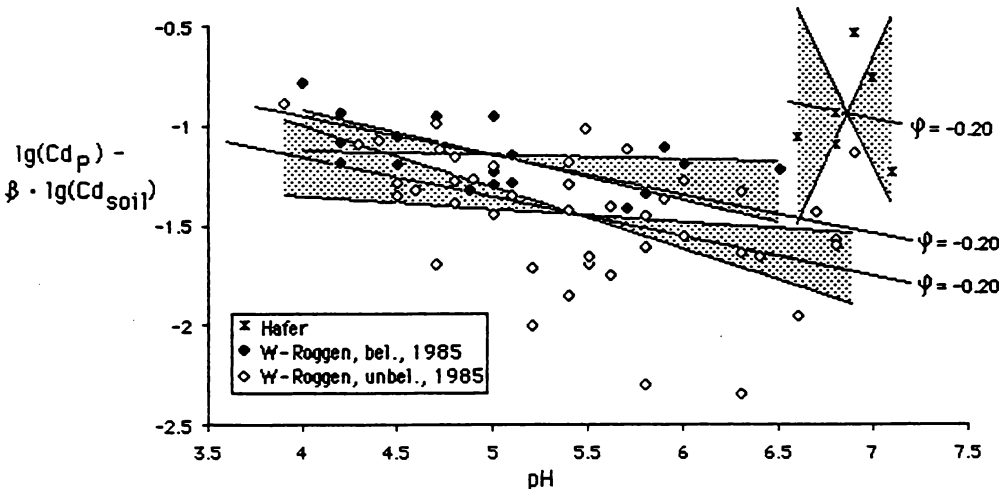


Abb. 3: pH-Abhängigkeit f aus drei Untersuchungen, dargestellt durch die 95 %-Vertrauensbereiche (grau) der Steigungen. Die drei dargestellten Beispiele stimmen mit der Hypothese überein, daß eine gemeinsame pH-Abhängigkeit $\psi = -0,20$ gültig ist. Daten für Hafer aus: SOMMER und MARSCHNER (1986), für Roggen aus: DREPPER (1990).

Die Abschätzung des Parameters φ wurde auf Grund von 37 Untersuchungen ($n > 4$) verschiedener Autoren, die sich auf vegetative Pflanzenteile und Gefäßkultur-Versuche bezogen, vorgenommen (SOMMER und MARSCHNER 1986, LAGERWERFF et al. 1977, SCHÖNHARD 1979, PLUQUET 1984). In Tab. 3 sind jedoch nur die Berechnungsergebnisse aus Felduntersuchungen aufgeführt.

Tab. 3: Berechnungsergebnisse der pH-Abhängigkeit f für Kulturgräser nach Gleich 2b. Daten aus: So = SOMMER und MARSCHNER (1986); Dr = diese Veröffentlichung; bel. = mäßig belastetes Anbaugelände; unbel. = "unbelastete" Anbaugelände; eh.R. = ehemalige Rieselfelder; n = Anzahl der Datenpaare; p.B. (Reg.): partielles Bestimmtheitsmaß der Regression unter Anwendung des Modellparameters β ; * = auf dem 5 %-Niveau signifikante Abweichung von der Hypothese $f = \varphi = -0,20$, p.B. (φ) = partielles Bestimmtheitsmaß von φ unter Anwendung des Modellparameters β .

Autor	Pflanze	Pfl.-teil	Standort	Haupt- bod.-art	Unt.-such.-jahr	pH (a.M.)	Cd _{soll} (g.M.) ppm	n	p.B. (Reg.)	f	St.-abw. (f)	f= φ ? (-0.2)	p.B. (φ)
generative Pflanzenteile, $\beta = 0.45$													
Dr	W-Roggen	Korn	bel.	S	85	5.0	0.6	18	0.30	-0.13	0.05		0.19
Dr	W-Roggen	Korn	bel.	S	86	5.4	0.7	12	0.00	-0.01	0.10		-0.34
Dr	W-Roggen	Korn	eh.R.	S	85	5.2	1.9	4	0.71	-0.19	0.09		0.71
Dr	W-Roggen	Korn	eh.R.	S	86	5.6	1.4	6	0.11	-0.23	0.32		0.11
Dr	W-Roggen	Korn	unbel.	S	85	5.5	0.2	43	0.20	-0.19	0.06		0.20
Dr	W-Roggen	Korn	bel.	S	89	5.4	1.4	26	0.10	-0.16	0.10		0.09
So	S-Gerste	Korn		L	81	6.9	0.5	6	0.05	0.15	0.31		-0.24
So	W-Weizen	Korn		L	80	6.9	0.5	6	0.63	1.59	0.61	*	-0.17
So	Hafer	Korn		L	79	6.9	0.5	6	0.00	0.07	0.72		-0.03
vegetative Pflanzenteile, $\beta = 0.55$													
Dr	W-Roggen	Blatt	bel.	S	85	5.0	0.6	21	0.54	-0.36	0.08	*	0.44
Dr	W-Roggen	Halm	bel.	S	85	5.1	0.8	13	0.82	-0.34	0.05	*	0.68
Dr	W-Roggen	Blatt	bel.	S	86	5.3	0.7	12	0.60	-0.37	0.10		0.48
Dr	W-Roggen	Halm	bel.	S	86	5.2	0.7	11	0.21	-0.18	0.12		0.21
Dr	W-Roggen	Blatt	unbel.	S	85	5.4	0.2	38	0.34	-0.19	0.04		0.33
Dr	W-Roggen	Halm	unbel.	S	85	5.5	0.2	31	0.13	-0.20	0.10		0.13
So	S-Gerste	Stroh		L	81	6.9	0.5	6	0.29	-0.35	0.28		0.24
So	W-Weizen	Stroh		L	80	6.9	0.5	6	0.48	-0.63	0.33		0.26
So	Hafer	Stroh		L	79	6.9	0.5	6	0.04	0.17	0.40		-0.16

Mit dem bekannten Sensibilitätsparameter $\beta = 0,45$ und der pH-Abhängigkeit $\varphi = -0,2$ können die standardisierten Akkumulationsfaktoren a' für die einzelnen Kulturgräser nach Gleichung 4 berechnet werden:

$$\lg(Cd_p) - \varphi \cdot (pH - 6) = \beta \cdot \lg(Cd_{soll}) + a' \quad (4)$$

Auch die Berechnung des Akkumulationsfaktors a' kann graphisch veranschaulicht werden, da die Akkumulationsfaktoren als y-Achsenabschnitte darstellbar sind. In Abb. 4 sind beispielhaft die 6 Datensätze, die bereits in Abb. 2 und Abb. 3 vorgestellt wurden, gemäß Gleichung 4 dargestellt. Am rechten Rand der Graphik sind noch einmal die jeweiligen y-Achsenabschnitte und die dazugehörigen 95 %-Vertrauensbereiche herausgezeichnet. Die 95 %-Vertrauensbereiche veranschaulichen den statistischen Test, ob die berechneten Akkumulationsfaktoren a' einem gemeinsamen Akkumulationsfaktor α' zugehörig sein können. Dabei haben sich für ver-

schiedene Kulturgräser unterschiedliche Akkumulationsfaktoren α' ergeben. Um wiederum die Abschätzung der Akkumulationsfaktoren α' nachvollziehbar zu machen, sind in Tab. 4 die Berechnungsergebnisse für die Körner von Roggen und Hafer aus Felduntersuchungen ($n \geq 3$) aufgeführt.

Auf diese Weise ist unser Modell vollständig aufgestellt und soll noch einmal zusammenfassend als Gleichung 5 mit den dazugehörigen Parametern (Tab. 5) dargestellt werden.

$$\lg(\text{Cd}_p) = \beta \cdot \lg(\text{Cd}_{\text{soil}}) + \psi \cdot (\text{pH} - 6) + \alpha' \quad (5)$$

Da die Akkumulationsfaktoren α' unter der Voraussetzung, daß der jeweilige Sensibilitätsparameter β gültig ist, berechnet wurden, muß ihre Vergleichbarkeit zwischen generativen und vegetativen Pflanzenteilen erläutert werden. Gemäß Abb. 4 entsprechen die Akkumulationsfaktoren y-Achsenabschnitten an der Stelle $\lg(\text{Cd}_{\text{soil}}) = 0$ mit $10^0 = 1$ ppm. Die Akkumulationsfaktoren α' sind insofern nicht nur auf einen Standard-pH-Wert von 6, sondern darüber hinaus auf einen Standardbodengehalt von 1 ppm Cadmium bezogen. Unter diesen Standardbedingungen können deshalb die Akkumulationsfaktoren direkt verglichen werden und haben auch eine einfache absolute Bedeutung: Der Erwartungswert für den Cadmiumgehalt von Roggenkörnern beträgt hier $10^{\alpha'} = 10^{-1,20} = 0,06$ ppm (vgl. Tab. 5). In den vegetativen Pflanzenteilen ist der unter den Standardbedingungen zu erwartende Cadmiumgehalt höher: $10^{-0,67} = 0,21$ ppm.

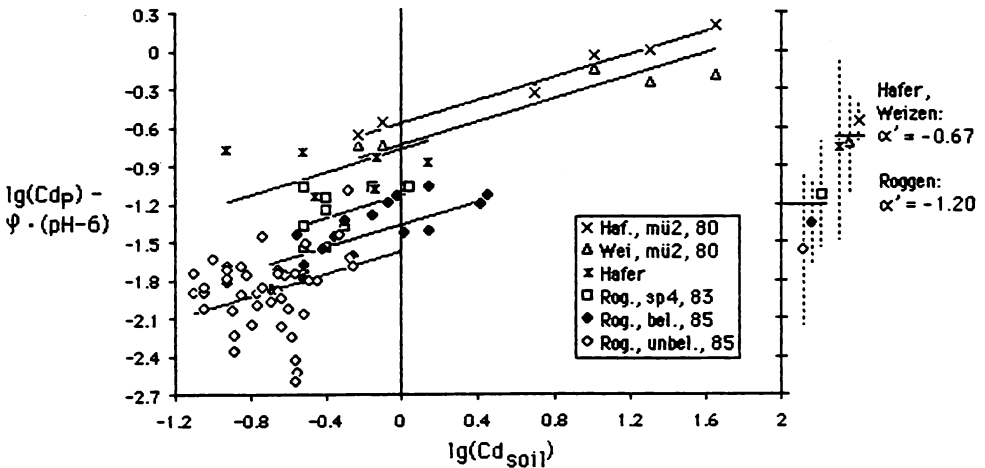


Abb. 4: Standardisierte Akkumulationsfaktoren α' , dargestellt als y-Achsenabschnitte an der Stelle $\lg(\text{Cd}_{\text{soil}}) = 0$. Um die 95 %-Vertrauensbereiche der Achsenabschnitte darzustellen, sind sie rechts noch einmal herausgezeichnet. Herkunft der Daten vgl. Abb. 2 und Abb. 3.

Tab. 4: Berechnungsergebnisse der standardisierten Akkumulationsfaktoren a' für Körner von Roggen und Hafer nach Gleichung 4. Daten aus: Fe = FEUEREISSEN (1986); Sa = SAUERBECK und STYPEREK (1988); So = SOMMER und MARSCHNER (1986); Dr = WESSELER (1991). Hauptbodenart und pH = ve1 (S. 6.1), ve2 (L. 5.8), ve3 (S. 6.3), sonst vgl. Tab. 2 und 3; n = Anzahl der Datenpaare; * = auf dem 5 %-Niveau signifikante Abweichung von der Hypothese $a' = \alpha'$ (Roggen $\alpha' = -1,20$, Hafer $\alpha' = -0,67$).

Aut. Sta.-ort	Unt.-such.-jahr	Cd _{soil} (g.M.) ppm	n	a'	St.-abw. (a')	$a'=\alpha'?$ --1.2	Aut. Sta.-ort	Unt.-such.-jahr	Cd _{soil} (g.M.) ppm	n	a'	St.-abw. (a')	$a'=\alpha'?$ --0.67
Roggen							Hafer						
Dr bel.	85	0.6	18	-1.35	0.15		Fe Pb	82	0.3	3	-0.68	0.17	
Dr bel.	86	0.7	12	-1.17	0.31		Sa gi1	82	0.6	4	-1.39	0.11	*
Dr eh.R.	85	1.9	4	-0.93	0.07		Sa gi2	82	0.2	5	-1.03	0.14	
Dr eh.R.	86	1.4	6	-0.75	0.42		Sa mü2	78	6.7	6	-0.65	0.28	
Dr unbel.	85	0.2	43	-1.56	0.29		Sa mü2	79	5.3	6	-0.60	0.15	
Dr bel.	89	1.4	26	-0.96	0.18		Sa mü2	80	5.3	6	-0.56	0.05	
Sa mü2	78	6.7	6	-1.11	0.11		Sa mü2	81	3.4	6	-0.43	0.15	
Sa mü2	80	5.3	6	-0.98	0.14		Sa mü2	82	3.4	6	-0.49	0.06	*
Sa mü2	81	3.4	6	-0.87	0.09	*	Sa ve1	75	0.4	3	-0.72	0.01	
Sa mü2	82	3.4	6	-1.01	0.10		Sa ve1	76	0.5	3	-0.66	0.13	
Sa sp4	83	0.4	10	-1.13	0.18		Sa ve1	77	0.4	3	-0.97	0.18	
Sa ve2	81	0.7	3	-1.31	0.27		Sa ve1	79	0.5	3	-0.99	0.11	
Sa ve2	82	0.7	3	-1.43	0.59		Sa ve2	75	0.4	3	-0.41	0.10	
Sa ve2	83	0.7	3	-0.90	0.17		Sa ve2	76	0.6	3	-0.50	0.16	
							Sa ve2	77	0.6	3	-0.59	0.12	
							Sa ve2	78	0.7	3	-0.94	0.03	
							Sa ve2	79	0.7	3	-0.66	0.12	
							Sa ve3	75	0.4	3	-0.60	0.18	
							Sa ve3	76	0.4	3	-0.60	0.11	
							Sa ve3	77	0.4	3	-0.84	0.10	
							Sa ve3	78	0.5	3	-0.56	0.07	
							Sa ve3	79	0.5	3	-0.75	0.09	
							So	79	0.5	6	-0.77	0.26	

Tab. 5: Parameter ψ , β , α' des Modells nach Gleichung 5 für die Cadmiumaufnahme von Kulturgräsern aus Felduntersuchungen. nU = Anzahl der für die Bestimmung dieses Parameters benutzten Untersuchungen, *% = prozentualer Anteil der Untersuchungen, die von dem angegebenen Parameter auf dem 5 %-Niveau abweichen.

ψ	nU	*%	Gewebe	β	nU	*%	Art	α	nU	*%
-0.2	37	11	vegetativ	0.55	43	14	Roggen	-0.67	80	6
							Gerste			
							Weizen			
							Hafer			
							Mais			
			generativ	0.45	31	19	Roggen	-1.20	14	7
							Gerste			
							Weizen			
							Hafer			
							Mais			
				0.17	8	0	Mais	-1.35	9	22

GÜTE UND GRENZEN DES MODELLS

Das hier vorgestellte Modell der Cadmiumaufnahme von Kulturgräsern aus landwirtschaftlich genutzten Böden bezieht sich auf Felduntersuchungen unter Ausschluß solcher Versuche, bei denen eine künstliche Schwermetallanreicherung in Böden mit Salzen vorgenommen wurde. Darüber hinaus ist es nur in Gebieten ohne eine besondere Immissionsbelastung anwendbar (Immission $< 2 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), so daß die Cadmiumaufnahme aus dem Boden die Belastung der Pflanzen auf dem Luftweg übertrifft.

Inwieweit die einzelnen Untersuchungsergebnisse mit den Modellparametern übereinstimmen, muß an verschiedenen Gütemaßstäben gemessen werden. Für den Sensibilitätsparameter β wurde das einfache Bestimmtheitsmaß, e.B(β), berechnet. Dabei wurde die Berechnung der Restvarianz nicht mit dem Regressionskoeffizienten b (vgl. KRAUSE und METZLER 1984) sondern mit dem Sensibilitätsparameter β durchgeführt:

$$\text{e.B}(\beta) = 1 - \frac{\text{Restvarianz (lg(Cdp) - a - \beta \cdot \text{lg(Cd}_{\text{soil}}))}{\text{Gesamtvarianz (lg(Cdp))}} \quad (6)$$

Die in Tab. 2 aufgeführten e.B(β) zeigen, zu welchem Anteil der Sensibilitätsparameter $\beta = 0,45$ die Varianz der Untersuchungsergebnisse zu erklären vermag. Bei diesen, unter relativ konstanten Verhältnissen (fester pH-Wert) durchgeführten Felduntersuchungen liegt der durch den Sensibilitätsparameter β erklärte Anteil der Varianz meist über 50 % (e.B(β) $> 0,5$, vgl. Tab. 2). Einzelne negative Zahlen bedeuten, daß hier durch die Anwendung des Modells die Varianz erhöht wurde. Diese Fälle werden vom Modell nicht erklärt und weichen z.T. auch signifikant vom Modell ab.

Die in Tab. 3 aufgeführten Untersuchungen wurden unter weniger konstanten Umweltbedingungen durchgeführt. Obwohl es kaum signifikante Abweichungen von der pH-Abhängigkeit $\varphi = -0,20$ gibt, sind die partiellen Bestimmtheitsmaße $p.B(\varphi)$ meist klein ($< 0,5$), und z.T. widersprechen sie in ihrer Tendenz dieser pH-Abhängigkeit (negative Werte). Dies betrifft insbesondere die Korn-Untersuchungen von SOMMER und MARSCHNER (1986), die eine Erhöhung der Cadmiumaufnahme mit steigendem pH-Wert ($f > 0$) zeigen. Dies ist ein sehr ungewöhnliches Ergebnis, das durch das Modell nicht erklärt werden kann. Bei den vegetativen Pflanzenteilen bietet die pH-Abhängigkeit $\varphi = -0,20$ bessere Erklärungsmöglichkeiten für die Cadmiumaufnahme (vgl. $p.B(\varphi)$, Tab. 3).

Als Gütemaß für die Akkumulationsfaktoren α' kann das Bestimmtheitsmaß nicht herangezogen werden, da die Berechnung der Restvarianz (vgl. Gleichung 6) unabhängig vom Achsenabschnitt a ist. Hier wurde ein Signifikanztest (vgl. SACHS 1984), der in Tab. 4 für Roggen und Hafer aufgeführt ist, als Gütemaß berechnet. Die Abschätzung der Akkumulationsfaktoren α' konnte recht widerspruchsfrei vorgenommen werden (vgl. Tab. 4).

In der Tab. 5 (Modellparameter) ist der prozentuale Anteil der signifikant abweichenden Untersuchungen noch einmal zusammengefaßt. Zwischen 0 % und 20 % der Untersuchungen weichen von den Modellparametern ab. Das Modell steht also mit einem Großteil der ausgewerteten Untersuchungen im Einklang; es gibt jedoch auch Widersprüche, die anderer Erklärungen bedürfen:

Neben Zufälligkeiten bei der Probenahme und Analyse können andere Einflußgrößen die Cadmiumaufnahme systematisch beeinflussen: organische Substanz, Kationen-Austausch-Kapazität, Redoxpotential, Bodentextur, Witterung, Vorfrucht, Anbausorten, Immission. In unserer eigenen Untersuchung haben wir die organische Substanz des Bodens bestimmt, konnten jedoch keinen Zusammenhang zur Cadmiumaufnahme von Winterroggen feststellen. Auch zu Cadmium-Immissionsmessungen des SENATORS FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELTSCHUTZ (1985), der in den Berliner Anbaugebieten Cadmiumniederschläge zwischen $1 - 2 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ feststellte, konnte kein korrelativer Zusammenhang erkannt werden. Schwankungen der Cadmiumaufnahme von Jahr zu Jahr, die eventuell auch durch unterschiedliche Staubbiederschläge verursacht sein können, hat aber KÖNIG (1986) festgestellt. Das beschriebene Modell erhebt also keinen Anspruch auf Vollständigkeit, jedoch wurden die wichtigsten der einfach zu erfassenden Einflußgrößen berücksichtigt.

ANWENDUNG DES MODELLS

Im Durchschnitt des Untersuchungszeitraumes 1985, 1986 und 1989 wurde im mäßig belasteten Anbaugebiet westlich der Havel 0,09 ppm Cadmium (FM) in Körnern von Winterroggen gemessen (gewichtet nach Fläche der Flurstücke). Berechnet man den Cadmiumgehalt in den Körnern nach dem Modell aus dem Bodengehalt und Boden-pH-Wert, so erhält man 0,076 ppm (FM). In der Bundesrepublik Deutschland erfordert dieser Cadmiumgehalt des Roggens keine Maßnahmen von Seiten der Behörden, da er den Richtwert '86 von 0,1 ppm nicht überschreitet.

Ein weiterer, toxikologisch bedeutsamer Maßstab ist die mit der gesamten menschlichen Nahrung aufgenommene Cadmiummenge. Von der WORLD HEALTH ORGANISATION (FAO/WHO 1972) wurden 400 - 500 μg Cadmium pro Person als "provisional tolerable weekly intake" vorgeschlagen. Auch bei für den Verbraucher sehr vorsichtigen Annahmen wird dieser WHO-Wert durch die Produkte des belasteten Anbaugebietes (es wurde auch Gemüse analysiert) nicht überschritten. Die Cadmiumgehalte aus den Nahrungsmitteln des belasteten Anbaugebietes in Berlin (West) führen also nicht zu einer alarmierenden Belastung für die Bevölkerung.

Dennoch sind wir der Meinung, daß die Cadmiumgehalte der dort produzierten Nahrungsmittel verringert werden sollten. Grundsätzlich sollte jede Belastung des Menschen soweit als möglich reduziert werden, auch weil synergistische Effekte häufig nicht bekannt sind. Liegt eine Belastung unterhalb gesetzlicher Normen vor, wie in diesem Fall, so müssen mögliche Maßnahmen auch eine finanzielle Abwägung erfahren. Mit relativ geringem Aufwand könnte in dem belasteten Gebiet eine Kalkung der Ackerflächen durchgeführt werden.

Es wird abgeschätzt, daß durch eine Kalkung mit 3 t CaO/ha der gegenwärtige mittlere pH-Wert der Ackerflächen in dem belasteten Gebiet von 5,3 auf etwa 6,2 angehoben wird. Insbesondere extrem niedrige pH-Werte würden dadurch vermieden werden. Nach dem vorgestellten Modell würde dadurch der Cadmiumgehalt in den Körnern Winterroggen auf 0,05 ppm (FM) gesenkt. Für eine Kostenkalkulation muß die ca. 260 ha große Fläche des belasteten Anbaugebietes berücksichtigt werden. Bei einer Kalkung mit 3 t CaO/ha würden sich die Kosten für den Kalk z.Z. auf etwa 160.000,- DM belaufen. Dies wäre, wie wir meinen, eine gute Investition zur Qualitätsverbesserung der menschlichen Nahrung.

ZUSAMMENFASSUNG

Aus Literaturangaben sowie eigenen Daten wurde ein deskriptives Modell der Cadmiumaufnahme von Kulturgräsern aus Böden abgeleitet. Das Modell berücksichtigt die Abhängigkeit der Cadmiumaufnahme von dem Cadmiumgehalt des Bodens (Sensibilitätsparameter) sowie vom pH-Wert des Bodens (pH-Abhängigkeit). Für Standardbedingungen ($\text{Cd}_{\text{soil}} = 1 \text{ ppm}$, $\text{pH} = 6$) beschreiben Akkumulationsfaktoren die absoluten Cadmiumgehalte einzelner Kulturgräser oder ihrer Pflanzenteile. Durch die rechnerische Standardisierung der Akkumulationsfaktoren ist eine Vergleichbarkeit verschiedener Untersuchungen gegeben.

Einige der ausgewerteten Untersuchungen weichen statistisch signifikant von den Modellparametern ab. Dies sowie die vorhandene Reststreuung weisen auf weitere mögliche Einflußgrößen der Cadmiumaufnahme hin, die im Modell nicht berücksichtigt wurden.

Als Beispiel für die Anwendung des Modells wurde der Effekt einer pH-Wert-Anhebung durch Kalken auf den Cadmiumgehalt von Winterroggen in einem mäßig belasteten Anbaugebiet abgeschätzt.

LITERATUR

- BROWNE C.L., WONG Y.M., BUHLER D.R., 1984: A predictive model for the accumulation of cadmium by container-grown plants. - J. Environm. Quality 13 (2): 184-188.
BRÜNE H., ELLINGHAUS R., 1981: Schwermetallgehalte in landwirtschaftlich genutzten Ackerböden Hessens. - Landw. F., Sd.h. 38: 338-349.

- BUNDESGESUNDHEITSAMT, 1986: Richtwerte '86 für Blei, Cadmium und Quecksilber in und auf Lebensmitteln. - Bundesgesundheitsblatt 29, Nr. 1: 22-23.
- WESSELER J., 1991: Schwermetallbelastung landwirtschaftlicher Nutzflächen in Berlin (West). - Landschaftsentwicklung und Umweltforschung 82: 165 S.
- FAO/WHO, 1972: Evaluation of certain food additives and the contaminants mercury, lead and cadmium. - WHO Technical Report Series NO. 505.
- FEUERREIßEN S., 1986: Belastbarkeit von Böden mit Schwermetallen aus Klärschlamm in Hinblick auf Wachstum und Mineralstoffgehalt verschiedener Getreidearten. - Agrar- und Umweltforschung in Baden-Württemberg, Bd. 12.
- HOFFMANN G., SCHWEIGER P., SCHÖLL W., SCHMID R., 1981: Grundbelastung der Böden von Baden-Württemberg mit Schwermetallen. - Landw. F., Sd.h. 38: 324-337.
- KÖNIG W., 1986: Schwermetallbelastung von Böden und Kulturpflanzen im Einflußbereich verschiedener Belastungsursachen - Ergebnisse einer Erhebungsuntersuchung in Nordrhein-Westfalen. - VDLUFA-Kongreßband 1985: 239-247.
- KRAUSE B., METZLER P., 1984: Angewandte Statistik. - Berlin: 183-203.
- LAGERWERFF J.V., BIEDSDORF G.T., MILBERG R.P., BROWER D.L., 1977: Effects of incubation and liming on yield and heavy metal uptake by rye from sewage-sludged soil. - J. Environ. qual. 6/4: 427-431.
- OCKER H.D., 1986: Rückstände in Brotgetreide und Kartoffeln. - Agrarspectrum 11: 169-198.
- OCKER H.D., BRÜGGEMANN J., 1989: Rückstandssituation und Radioaktivität des Brotgetreides während der letzten Jahre. - VDLUFA-Kongreßband 1988, Teil II: 846-867.
- PLUQUET E., 1984: Die Bedeutung des Tongehaltes und des pH-Wertes für die Schwermetallaufnahme einiger Kulturpflanzen. - Texte Umweltbundesamt 1983, 40.
- SACHS L., 1984: Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden. - Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: 338-340.
- SAUERBECK D., STYPEREK P., 1988: Schadstoffe im Boden, insbesondere Schwermetalle und organische Schadstoffe aus langjähriger Anwendung von Siedlungsabfällen. - Teilbericht Schwermetalle -. Umweltbundesamt (Hrsg.), Texte 16/88.
- SCHÖNHARD G., 1979: Vergleich der Wirkung von Kalk und einem Kationenaustauscher bei der Festlegung von Schwermetallen im Boden. Landw. F. 32 (4): 395-404.
- SENATOR FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELTSCHUTZ (Hrsg.), 1985: Umweltaltlast Berlin.
- SOMMER B., MARSCHNER H., 1986: Pflanzenverfügbarkeit von Schwermetallen nach langjähriger Düngung mit Klärschlämmen. - Agrar- und Umweltforschung in Baden-Württemberg, Bd. 13.
- WISSEL C., 1989: Theoretische Ökologie: Eine Einführung. - Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo.

ADRESSE

Jürgen Wesseler
 Frank Darius
 Institut f. Ökologie
 Fachgebiet Botanik
 TU Berlin
 D-1000 Berlin

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

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

Jahr/Year: 1991

Band/Volume: [19_3_1991](#)

Autor(en)/Author(s): Darius Frank, Wesseler Jürgen

Artikel/Article: [Abschätzung der Cadmiumaufnahme von Kulturgräsern aus landwirtschaftlich genutzten Böden anhand eines Modells 197-208](#)