

(Aus der Hauptabteilung Agrarforschung und Biotechnologie des Österreichischen Forschungszentrums Seibersdorf Ges.m.b.H., Leiter: Univ.-Doz. Dr. Othmar Horak)

Über den Einfluß der organischen Substanz auf die Aluminiumtoxizität bei Mais (*Zea mays* L.)

VON P. L. OLIVEIRA DE ALMEIDA MACHADO UND M. H. GERZABEK

(Mit 1 Abbildung)

1. Einleitung

Neben geringen verfügbaren Gehalten an Ca, Mg und K führen insbesondere hohe Al-Konzentrationen in der Bodenlösung im Rahmen der Bodenversauerung zu starken Wachstumsreduktionen von Pflanzen. Die Löslichkeit des Aluminiums wird vom pH-Wert des Bodens, dem vorherrschenden Tonmineral, der Salzkonzentration und den Reaktionen mit organischen Verbindungen beeinflusst (BELL und EDWARDS 1986). Nach Foy (1974 und 1988) kann angenommen werden, daß bei pH-Werten unter 5,5 die Aluminiumtoxizität zumeist der Hauptgrund für Einschränkungen des pflanzlichen Wachstums ist. Dies stellte sich auch im Rahmen eines Großprojektes heraus, das den Einfluß saurer Niederschläge auf die Aluminiumtoxizität in Waldökosystemen Nordostamerikas und Nordeuropas untersuchte (CRONAN und Ma. 1989).

Die ersten Toxizitätssymptome durch Al-Überschuß sind an den Wurzeln zu beobachten. Im Sproß werden die Schadsymptome von Nährstoffmangelerscheinungen, wie z. B. Phosphormangel verursacht (BERGMANN 1988). Wurzeln, die durch Aluminium beeinträchtigt sind, nehmen Wasser und Nährstoffe in ungenügender Menge auf. So ist zum Beispiel die hohe Al-Sättigung und der Ca-Mangel in tieferen Bodenhorizonten die wichtigste chemische Begrenzung für die Durchwurzelbarkeit von Oxisolen und Ultisolen. Besondere Probleme entstehen dadurch im brasilianischen Cerrado-Gebiet (RITCHEY und Ma. 1980) und im Südwesten der USA (O'BRIEN und SUMNER 1988). Als Lösung bietet sich einerseits die Verwendung toleranter Kulturpflanzensorten an, andererseits kann eine tiefe Kalkeinbringung in den Boden Abhilfe schaffen, wobei dies oft ökonomisch unrentabel ist.

Die physiologischen und biochemischen Wirkungen des Aluminiums in der Pflanze wurden von vielen Autoren aufgezeigt (WRIGHT 1943, REES und SIDRAK 1961, NAIDOO und Ma. 1978, ZHAO und Ma. 1987, McQUATTIE und SCHIER 1990). Die Mechanismen, wodurch Aluminium die Zellfunktionen beeinflussen kann, sind folgende:

- die Störung der Membranfunktionen (ZHAO und Ma. 1987);
- die Hemmung der DNA-Synthese und der Zellteilung (REES und SIDRAK 1961, NAIDOO und Ma. 1978, MATSUMOTO und MORIMURA 1980);

- die Hemmung der Zellstreckung (JARVIS und HATCH 1986, McQUATTIE und SCHIER 1990);
- die Störung der Nährstoffaufnahme und des Nährstoffhaushaltes (MATSUMOTO und YAMAYA 1986, GERZABEK und EDELBAUER 1986).

Die Aluminiumkonzentration in der Bodenlösung wird von vielen Autoren in ihrer Aussagekraft bezüglich Pflanzentoxizität geringer eingeschätzt als die Al-Aktivität (ADAMS und LUND 1966, BRENES und PEARSON 1973, PAVAN und Ma. 1982, BLAMEY und Ma. 1983, ALVA und Ma. 1986, SHUMAN und Ma. 1990). ADAMS und HATHCOCK (1984) haben jedoch keine Korrelation zwischen Al^{3+} -Aktivität und Phytotoxizität gefunden. Es wurden zahlreiche Extraktionsmittel und Modelle zur Bestimmung des Al-Gehaltes im Boden entwickelt (LIN und COLEMAN 1960, PRATT und BLAIR 1961, BLOOM und Ma. 1978, RENGASAMY und OADES 1978, BERSILLO und Ma. 1980, DRISCOLL 1984, SHUMAN 1990). Es zeigt sich, daß Al-Verfügbarkeit und -Toxizität von zahlreichen biotischen und abiotischen Faktoren beeinflusst werden (ANDERSSON 1988). Ein bis dato zuwenig beachteter Faktor scheint die organische Bodensubstanz zu sein (HARGROVE und THOMAS 1981, 1982). Exakte Laborversuche dazu fehlen.

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung des Einflusses steigender Torfmengen auf die Auswirkung erhöhter Aluminiumkonzentrationen auf Mais (*Zea mays* L.) im Stehnährlösungsversuch.

2. Material und Methoden

Starke Fällungsreaktionen des Aluminiums mit Fulvo- und Huminsäuren machen Wechsellösungsversuche, wie sie bei Schwermetallen möglich sind (GERZABEK und ULLAH 1990, ULLAH und GERZABEK 1991), unpraktikabel. Daher wählte man einen Sandkulturversuch mit Stehnährlösung. Ein ähnlicher Versuchsaufbau wurde von GERZABEK und PATZELT (1988) zur Untersuchung der Zinktoxizität angewandt. Dabei werden unterschiedliche Gehalte an organischer Substanz durch steigende Torfgehalte des Substrates (säuregewaschener Quarzsand) simuliert.

Die Kulturgefäße, die Nährlösung, sowie die sonstigen Kulturbedingungen im Glashaus sind bei PATZELT (1989) in detaillierter Form beschrieben.

Der verwendete Torf wurde nach Standardmethoden (BLUM und Ma. 1986) charakterisiert (Tabelle 1). Folgende Behandlungsstufen legte man in vierfacher Wiederholung vollfaktoriell an:

Torf (Gewichts-%)	0,0	0,5	1,5	3,0
Aluminium (mg/l)	0	25	50	75

Tabelle 1

Analysendaten des Torfes

mval Mg (BaCl ₂)/100 g	2,35
mval Ca (BaCl ₂)/100 g	5,96
mval K (BaCl ₂)/100 g	0,21
mval Na (BaCl ₂)/100 g	0,17
mval Al (BaCl ₂)/100 g	0,89
pH (0,01M CaCl ₂)	2,82

Die im Vergleich zu Wechsellösungsversuchen (GERZABEK und EDELBAUER 1986) wesentlich höheren Aluminiumkonzentrationen waren aufgrund der nur einmaligen Zugabe notwendig.

Die Maispflanzen (*Zea mays* L.) Sorte Mirna 340, wurden fünf Tage in säure-

gewaschenem Quarzsand unter Zugabe von deionisiertem Wasser vorgezogen. Sieben Tage nach dem Versetzen der Pflanzen in die Versuchsgefäße (2 Pflanzen/Gefäß) wurde Aluminium in Form von $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ zugesetzt. Den pH-Wert der Nährlösung korrigierte man alle zwei bis drei Tage mittels 0,1 N H_2SO_4 bzw. 1 N NaOH auf 3,8. An jedem dritten Tag wurde die auf 3,3 l fehlende Nährlösungsmenge mit entsalztem Wasser ergänzt. Die Ernte der Pflanzen erfolgte am 30. Tag nach dem Versetzen in die Versuchsgefäße bzw. am 23. Tag nach dem Beginn der Aluminiumbehandlung. Die geernteten Pflanzen wurden in Wurzel und Sproß getrennt und die Frischsubstanz bestimmt. Das Pflanzenmaterial wurde getrocknet, gewogen, vermahlen und einer Naßveraschung (65%ige HNO_3 : 70%ige $\text{HClO}_4 = 5:1$) zugeführt. Die Gehalte an Al, Ca, Mg, K und P ermittelte man mittels Plasmaemissionsspektrometer (Perkin Elmer Plasma II).

3. Ergebnisse und Diskussion

Die Sproßproduktion von Mais wurde in allen Torfvarianten durch steigende Aluminiumgaben signifikant vermindert (Abb. 1). Allerdings war die Reduktion in der 75 ppm Al-Stufe gegenüber der jeweiligen Kontrolle bei den höheren Torfgaben mit 43 % (1,5 % Torf) bzw. 45 % (3 % Torf) geringer als bei der reinen Sandvariante (56 %) und der 0,5 % Torfstufe (58 %). Unabhängig von der Aluminiumbehandlung wirkte sich die Torfsteigerung signifikant positiv auf das Sproßwachstum aus. Dies ist wahrscheinlich vor allem auf die bessere Verfügbarkeit der

Tabelle 2

Analyse der Streuungsursachen (Frischgewicht Sproß und Wurzel, Al- und Mg-Gehalte);
FG₂ = 48

Variable	Streuungsursache	FG ₁	F-Wert (SQ-Fehler)	P
FS-Sproß	Al	3	125,08	< 0,001
	Torf	3	56,41	< 0,001
	Al*Torf	9	2,43 (6031,20)	0,02
FS-Wurzel	Al	3	19,96	< 0,001
	Torf	3	57,53	< 0,001
	Al*Torf	9	4,01 (1954,54)	< 0,001
Al-Gehalt-Sproß	Al	3	22,14	< 0,001
	Torf	3	35,69	< 0,001
	Al*Torf	9	8,00 (1058,39)	< 0,001
Al-Gehalt-Wurzel	Al	3	128,39	< 0,001
	Torf	3	16,43	< 0,001
	Al*Torf	9	17,66 (2893317,00)	< 0,001
Mg-Gehalt-Sproß	Al	3	173,14	< 0,001
	Torf	3	50,58	< 0,001
	Al*Torf	9	34,61 (0,00193)	< 0,001
Mg-Gehalt-Wurzel	Al	3	2,32	0,09
	Torf	3	25,34	< 0,001
	Al*Torf	9	19,34 (0,0741)	< 0,001

FS = Frischsubstanz
FG = Freiheitsgrad

SQ = Summe der Abweichungsquadrate
P = Wahrscheinlichkeit

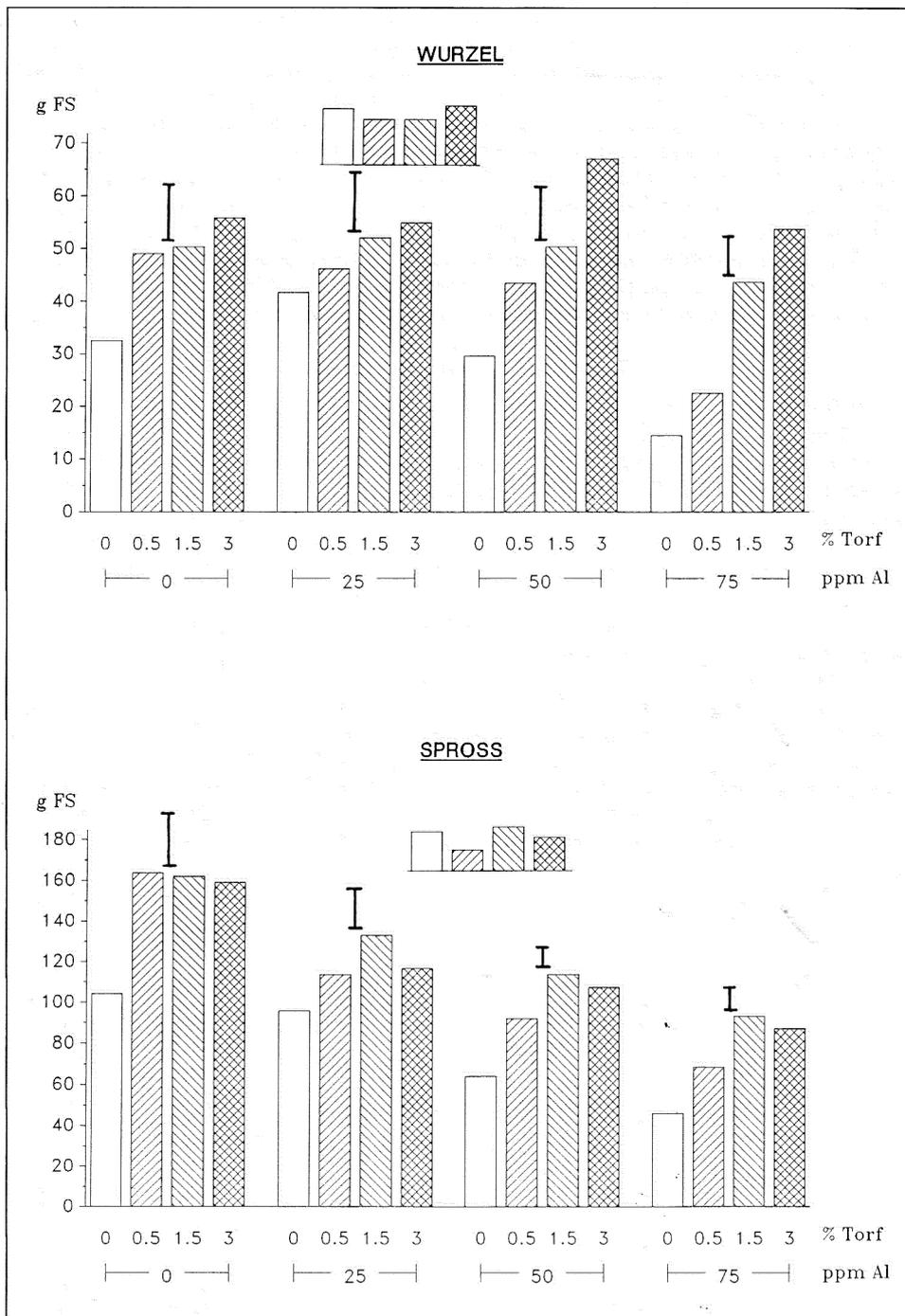


Abb. 1: Effekt einer Torf- und Al-Steigerung auf die Frischsubstanzproduktion von Mais (g/Gef.); $GD_{5\%}$: Histogramme gelten zwischen den Al-Stufen, Balken gelten innerhalb der Al-Stufen

Nährstoffe zurückzuführen (SCHNITZER und KHAN 1978). Die Wechselwirkung zwischen Aluminium- und Torfsteigerung waren signifikant (Tabelle 2), eine Toxizitätsverminderte Wirkung der organischen Substanz konnte daher konstatiert werden.

Noch deutlicher verhielten sich die Wurzeln (Abb. 1). Die Abnahme der Substanzproduktion durch die Aluminiumsteigerung war lediglich bei der reinen Sandvariante und der 0,5 % Torfstufe signifikant. Insbesondere im Falle der Wurzeln kann von einem Toxizitätsvermindernden Effekt der organischen Substanz gesprochen werden. Die entsprechenden Wechselwirkungen sind signifikant (Tabelle 2). Die statistische Auswertung der Trockensubstanzproduktion führte zu vergleichbaren Ergebnissen und wird daher an diese Stelle nicht diskutiert.

Die Al-Gehalte im Sproß waren im Vergleich zu einem früher durchgeführten Wechsellösungsversuch niedrig (GERZABEK und EDELBAUER 1986) und zeigten keine gerichtete Beeinflussung durch die verschiedenen Behandlungen (Tabelle 3).

Die Al-Gehalte der Wurzeln wurden durch die Al-Steigerung bis auf 1189 % der Kontrolle gesteigert (reine Sandvariante). Die Torfsteigerung verminderte die Al-Konzentration ab der 50 mg Al/l-Stufe signifikant, wobei zwischen den Torfbehandlungen lediglich bei der höchsten Al-Variante statistisch sicherbare Unterschiede auftraten. Die Wechselwirkungen zwischen Al- und Torf-Steigerung waren signifikant (Tabelle 2). Die Al-Absolutgehalte waren auch im Falle der Wurzeln wesentlich geringer als in dem bereits zitierten Wechsellösungsversuch (GERZABEK und EDELBAUER 1986). Bezüglich Wurzel-Sproß Translokation zeigte sich im vorliegenden Fall keine Korrelation zwischen Wurzel- und Sproß-Al-Gehalten. Dies wird in der Literatur (FOY 1988) auch nicht als zwingendes Merkmal für Aluminiumtoxizität angesehen. Diese Feststellung gilt insbesondere für Al-tolerante Pflanzen, wie z. B. Mais, die über Sperrmechanismen verfügen, die die Wurzel-Sproß-Translokation einschränken (FOY und MA 1978).

Diese Tatsache wird auch dadurch unterstrichen, daß der Al-Sproßgehalt der Kontrollvariante den zweithöchsten beobachteten Wert darstellte (Tabelle 3). Auch in Nährlösungsversuchen mit Reis (TANAKA und NAVASERO 1966), Ackerbohne, Lupine, Gerste und Roggen (HORST und GÖPPEL 1986) wurden bei Varianten ohne Aluminium relativ hohe Al-Gehalte im Sproß gemessen, wobei die letzt-

Tabelle 3

Einfluß einer Torf- und Al-Steigerung auf die Al-Gehalte von Sproß und Wurzel (mg/kg)

Al (mg/l)	Torf (%)			
	0,0	0,5	1,5	3,0
	Sproß (GD _{5%} = 6,8)			
0	37,7	9,8	8,8	13,5
25	15,0	9,6	9,0	6,0
50	12,8	12,2	11,8	7,2
75	39,2	24,8	12,8	11,8
	Wurzel (GD _{5%} = 349,0)			
0	227,5	229,0	303,5	317,3
25	360,0	299,3	550,0	680,8
50	1415,3	616,5	764,8	617,0
75	2705,8	2552,3	1235,0	849,8

genannte Pflanze trotz geringerer Al-Steigerung Al-Konzentrationen von ca. 80 mg Al/kg TS aufwies. Die Autoren sind der Ansicht, daß die Al-Gehalte im Sproß keinerlei Rückschluß auf die Höhe des Al-Angebotes erlauben.

Zwölf Tage nach dem Beginn der Aluminiumexposition zeigten insbesondere die torffreien Varianten starke Magnesiummangelsymptome. Diese Beobachtung korrespondiert mit dem starken Rückgang der Magnesiumgehalte im Sproß mit steigenden Aluminiumkonzentrationen (Tabelle 4). BERGMANN (1988) gibt als Mg-Mindestgehalt von voll entwickelten Blättern 0,25 % i.d. TS an. Auch wenn dieser Wert nur bedingt als Vergleich verwendbar ist, kann dennoch auf akute Al-induzierte Magnesiummangelsymptome geschlossen werden (Tabelle 4). GRIMME (1981, 1983) kam bei Hafer und Sommergerste zu ähnlichen Ergebnissen. CLARK (1977) führt die Al-Toleranz bei Mais auf das relativ gute Aufnahmevermögen für Magnesium zurück. Die Torfbehandlungen bewirkten eine deutliche Verbesserung der Magnesiumgehalte im Sproß der aluminiumbehandelten Varianten und somit eine wesentliche Verminderung der Magnesiummangelsymptome. Die entsprechenden Wechselwirkungen sind signifikant (Tabelle 2). Die Mg-Gehalte der Wurzeln nahmen in der torffreien Stufe mit steigenden Al-Konzentrationen in der Nährlösung signifikant ab. Die Torfbehandlungen führten im Falle der 75 mg Al/l-Stufe zu einer deutlichen Zunahme der Magnesiumgehalte der Wurzeln. Die 0 bis 50 mg Al/l-Varianten zeigten eher eine Abnahme der Magnesiumgehalte. Dieser Befund scheint zunächst im Widerspruch zu den zuvor diskutierten Ergebnissen der Sproß-Mg-Gehalte zu stehen. Die Ursache dafür dürfte die deutliche Verbesserung der Magnesiumtranslokation von der Wurzel in den Sproß durch die Torfbehandlung sein (Tabelle 4).

Tabelle 4

Einfluß einer Torf- und Al-Steigerung auf die Mg-Gehalte von Maissproß und -wurzel und auf die Wurzel-Sproß Translokation

Al (mg/l)	Torf (%)				Torf (%)			
	0,0	0,5	1,5	3,0	0,0	0,5	1,5	3,0
	Sproß (%Mg) GD _{5%} = 0,02				% Mg-Sproß / % Mg-Wurzel			
0	0,26	0,21	0,23	0,18	0,76	2,20	2,60	2,25
25	0,18	0,25	0,25	0,20	0,62	1,70	2,30	2,50
50	0,09	0,18	0,20	0,21	0,64	0,72	1,54	2,10
75	0,07	0,10	0,17	0,16	1,00	0,83	0,81	1,45
	Wurzel (% Mg) GD _{5%} = 0,05				Anteil des Mg-Entzuges im Sproß (%)			
0	0,34	0,10	0,09	0,08	71,0	86,0	89,0	87,0
25	0,29	0,15	0,11	0,08	62,0	79,4	93,4	84,2
50	0,14	0,25	0,13	0,10	61,2	64,7	80,2	78,6
75	0,07	0,12	0,21	0,11	75,1	69,0	69,2	73,0

Sowohl der Ca- als auch der P-Gehalt der Maispflanzen hat sich mit der Erhöhung des Al-Angebotes bei den torffreien Varianten reduziert (Tabelle 5), wobei die Konzentration von Calcium im Sproß um bis zu 50,2 % und von Phosphor um bis zu 80,6 % abgenommen hat.

Tabelle 5

Einfluß einer Torf- und Al-Steigerung auf die Ca- und P-Gehalte
von Sproß und Wurzel (%)

für Ca: $GD_{5\% \text{ Sproß}} = 0,03$ und $GD_{5\% \text{ Wurzel}} = 0,15$
für P: $GD_{5\% \text{ Sproß}} = 0,03$ und $GD_{5\% \text{ Wurzel}} = 0,05$

Al (mg/l)		Torf (%)			
		0,0	0,5	1,5	3,0
		Sproß			
0	Ca	0,42	0,33	0,25	0,25
	P	0,36	0,25	0,25	0,22
25	Ca	0,35	0,37	0,27	0,30
	P	0,09	0,13	0,15	0,15
50	Ca	0,26	0,34	0,29	0,31
	P	0,07	0,12	0,13	0,13
75	Ca	0,21	0,22	0,31	0,31
	P	0,12	0,14	0,14	0,12
		Wurzel			
0	Ca	0,85	0,57	0,41	0,36
	P	0,29	0,14	0,14	0,18
25	Ca	0,65	0,53	0,55	0,40
	P	0,11	0,07	0,11	0,14
50	Ca	0,44	0,70	0,58	0,38
	P	0,08	0,08	0,10	0,10
75	Ca	0,31	0,65	0,66	0,37
	P	0,13	0,15	0,12	0,08

Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen auch Foy und Ma. (1967) bei einem Nährlösungsversuch mit Weizen und Gerste und FAGERIA und Ma. (1989) mit Reis. Zwanzig Tage nach Beigabe des Aluminiums zur Nährlösung wiesen einige Blätter P-Mangelsymptome auf, die jedoch weniger intensiv als die Mg-Mangelsymptome ausgeprägt waren. Wie bei Magnesium, aber in geringerem Maße, gingen die Ca-Gehalte in der Pflanze bei 0 und 25 mg Al/l Nährlösung durch die Zugabe des Torfes zurück. Erst ab 50 mg Al/l kam es generell zu einem Anstieg der Ca-Konzentration im Sproß mit steigendem Anteil organischer Substanz im Substrat. Zwei gegenläufige Prozesse wären in diesem Zusammenhang denkbar. Einerseits scheint der Torf die Ca-Verfügbarkeit in der Nährlösung vermindert zu haben, andererseits könnten die zwei höchsten Al-Stufen eine Freisetzung von Calcium und somit eine Erhöhung der Verfügbarkeit bewirkt haben. Diese Hypothese wird dadurch unterstrichen, daß der geschilderte Effekt in den Wurzeln lediglich bei der 0,5 %- und 1,5 %-Torfstufe der beiden höchsten Aluminiumbehandlungen auftrat. In einer Studie über die Reaktionen zwischen Fulvosäuren und anorganischen Bodenbestandteilen hat SCHNITZER (1969) festgestellt, daß Al-Fulvosäure-Komplexe höhere Stabilitätskonstanten besitzen als Ca-Fulvosäure-Komplexe. Die geringere Wirkung der Torfzugabe auf die P-Aufnahme in Gegenwart von Aluminium dürfte auf die Komplexbildung zwischen organischen Säuren, Metallionen und Phosphat zurückzuführen sein (SCHNITZER 1969).

Unter den gegebenen Bedingungen konnte für Kalium kein deutlicher Einfluß durch die Al-Steigerung bei den torffreien Varianten festgestellt werden (Tabelle 6). Die Torfbehandlung ihrerseits führte ähnlich wie bei Calcium zu einer Verminderung der Kaliumgehalte. Dieser Effekt war insbesondere bei den

Maiswurzeln deutlich zu beobachten. Allerdings stiegen die Kaliumgehalte von Sproß und Wurzel innerhalb der einzelnen Torfvarianten mit höheren Al-Mengen in der Nährlösung signifikant an. Dies dürfte, analog zu Calcium, durch eine verbesserte K-Verfügbarkeit aufgrund von Desorptionsprozessen bewirkt sein.

Tabelle 6

Einfluß einer Torf- und Al-Steigerung auf die K-Gehalte von Sproß und Wurzel (%)

Al (mg/l)	Torf (%)			
	0,0	0,5	1,5	3,0
	Sproß (GD _{5%} = 0,52)			
0	3,77	2,35	2,08	2,15
25	2,80	2,94	2,30	2,55
50	2,84	3,43	2,63	2,76
75	3,67	3,57	3,18	2,97
	Wurzel (GD _{5%} = 0,42)			
0	1,87	0,58	0,70	0,70
25	1,45	0,74	0,84	0,88
50	1,84	1,16	0,81	0,79
75	1,97	1,60	1,17	0,82

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Einfluß der organischen Substanz auf die Aluminiumtoxizität bei Mais in einem Stehnährlösungsversuch. Dazu wurde ein Sandkulturversuch mit vier Torfsteigerungen (0, 0,5, 1,5 und 3,0 %) und vier Aluminiumsteigerungen (0, 25, 50 und 75 mg/l) in vierfacher Wiederholung angelegt. Nach 23 Tagen in Al-hältiger Nährlösung bzw. 30 Tage nach Versetzen in die Versuchsgefäße wurden die Pflanzen geerntet.

Die Al-Steigerung wirkte sich auf Sproß- und Wurzelwachstum negativ aus. Die Torfsteigerung zeigte einen signifikanten Toxizitätsvermindernden Effekt. Die Aluminiumgehalte der Sprosse wurden von den verschiedenen Behandlungen kaum gerichtet beeinflusst. Demgegenüber stand eine mehr als Verzehnfachung der Al-Wurzelgehalte in der reinen Sandvariante durch die höchste Aluminiumbehandlung. Ab der 50 mg Al/l-Variante verminderte die Torfsteigerung die Al-Gehalte der Maiswurzeln signifikant.

Der Nährstoffhaushalt der Pflanzen reagierte signifikant auf Aluminium in der Nährlösung. Die Mg-, P- und Ca-Gehalte von Sproß und Wurzel nahmen deutlich ab, wobei insbesondere auf die Interaktionen zwischen Al und Magnesium hinzuweisen ist. Bereits zwölf Tage nach Beginn der Aluminiumexposition zeigten sich in den torffreien Varianten deutliche Mg-Mangelsymptome. Torfbehandlungen bewirkten eine signifikante Verbesserung der Magnesiumgehalte in Sproß und Wurzel und somit eine wesentliche Verminderung der Magnesiummangelsymptome.

The Influence of Organic Matter on Aluminium Toxicity to Maize (*Zea mays* L.)

Summary

The importance of soil organic matter in alleviating the toxic effects of aluminium (Al) to plants has long been assumed. In order to investigate this influence on the growth of maize an experiment with sand culture was conducted. Four Al-treatments were applied: 0, 25, 50 and 75 mg Al/L. These were combined with four levels of peat, which was mixed to the sand: 0.0, 0.5, 1.5 and 3.0 % peat. The pH of the nutrient solutions was maintained at 3.8 ± 0.1 .

Increasing Al-concentrations in the nutrient solution in most cases resulted in a significant growth reduction of shoots and roots. Peat treatments clearly diminished these Al-toxicity effects. Al-concentrations in shoots were hardly influenced by the various treatments. Al-contents in maize roots were augmented more than tenfolds with increasing Al-concentration of the nutrient solution in peat free treatments. Peat in the growth medium decreased Al-contents of the roots significantly.

Shoot and root analyses reflected reductions in calcium, magnesium and phosphorus with increasing Al in the 0 % peat treatment. In the presence of organic matter these reductions were partly alleviated. Leaves of plants in peat-free pots showed symptoms of magnesium deficiency 12 days after addition of Al-treatments. Peat in the growth medium led to a higher Mg-level in shoots and roots and therefore to a reduction of Mg-deficiency.

Literatur

- ADAMS, F. and P. J. HATHCOCK: Aluminum toxicity and calcium deficiency in acid subsoil horizons of two Coastal Plains soil series. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48, 1305–1309, 1984.
- ADAMS, F. and Z. F. LUND: Effect of chemical activity of solution aluminium on cotton root penetration of acid subsoils. *Soil Science* 101, 193–198, 1966.
- ALVA, A. K., F. P. C. BLAMEY, D. G. EDWARDS and C. J. ASHER: An evaluation of aluminum indices to predict aluminum toxicity to plants grown in nutrient solutions. *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.* 17, 1271–1280, 1986.
- ANDERSSON, M.: Toxicity and tolerance of aluminium in vascular plants. *Water, Air and Soil Pollut.* 39, 439–462, 1988.
- BELL, L. C. and D. G. EDWARDS: The role of aluminium in acid soil infertility. In: Lathan, M. (ed.): Proceedings of the first regional seminar on soil management under humid conditions in Asia and the Pacific. Phitsanulock, Thailand, 1986.
- BERGMANN, W.: Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Gustav-Fischer Verlag, Stuttgart 1988.
- BERSILLON, J. L., P. H. HSU and F. FIESSINGER: Characterization of hydroxy-aluminum solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 630–634, 1980.
- BLAMEY, F. P. C., D. G. EDWARDS and C. J. ASHER: Effects of aluminum, OH: Al and P: Al molar ratios, and ionic strength on soybean root elongation in solution culture. *Soil Sci.* 136, 197–207, 1983.
- BLOOM, P. R., R. M. WEAVER and M. B. McBRIDE: The spectrophotometric determination of aluminium with 8-hydroxyquinoline and butyl acetate extraction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42, 713–716, 1978.
- BLUM, W. E. H., O. H. DANNEBERG, G. GLATZEL, H. GRALL, W. KILLIAN, F. MUTSCH und D. STÖHR: Waldbodenuntersuchung; Geländeaufnahme, Probennahme, Analyse. *Mitt. d. österr. Bodenkdl. Gesell.* 31, 1–59, 1986.
- BRENES, E. and R. W. PEARSON: Root responses of three Gramineae species to soil acidity in an Oxisol and an Ultisol. *Soil Science* 116, 295–302, 1973.
- CLARK, R. B.: Effect of aluminum on growth and mineral elements of Al-tolerant and Al-intolerant corn. *Plant and Soil* 47, 653–662, 1977.
- CRONAN, C. S., R. APRIL, R. J. BARTLETT, P. R. BLOOM, C. T. DRISCOLL, S. A. GHERINI, G. S. HENDERSON, J. D. JOSLIN, J. M. Kelly, R. M. Newton, R. A. Parnell, H. H. Patterson, D. J. RAYNAL, M. SCHAEDEL, C. L. SCHOFIELD, E. I. SUCOFF, H. B. TEPPER and F. C. THORNTON: Aluminum toxicity in forests exposed to acidic deposition: The ALBIOS results. *Water, Air and Soil Pollut.* 48, 181–192, 1989.

- DRISCOLL, C. T.: A procedure for the fractionation of aqueous aluminum in dilute acidic waters. *Int. J. Envir. Anal. Chem.* 16, 267—283, 1984.
- FAGERIA, N. K., V. C. BALIGAR and R. J. WRIGHT: The effects of aluminum on growth and uptake of Al and P by rice. *Pesq. agrop. bras.* 24, 677—682, 1989.
- FOY, C. D.: Effects of aluminum on plant growth. In: Carson, E. W. (ed.): The plant root and its environment. Univ. Press of Virginia Charlottesville, VA, 1974.
- FOY, C. D.: Plant adaptation to acid, aluminum-toxic soils. *Commun. in Soil Sci. and Plant Analysis* 19, 959—987, 1988.
- FOY, C. D., R. L. CHANEY and M. C. WHITE: The physiology of metal toxicity in plants. *Ann. Rev. Plant Physiology* 29, 511—566, 1978.
- FOY, C. D., A. L. FLEMING, G. R. BURNS and W. H. ARMIGER: Characterization of differential aluminum tolerance among varieties of wheat and barley. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31, 513—521, 1967.
- GERZABEK, M. H. und A. EDELBAUER: Aluminium-Toxizität bei Mais (*Zea mays* L.). Einfluß des Aluminiums auf Substanzbildung und Nährstoffgehalt. *Die Bodenkultur* 37, 309—319, 1986.
- GERZABEK, M. H. und W. PATZELT: Einfluß steigender Torfmengen auf die Zn-Aufnahme durch *Zea mays* L. in einem Sandkulturversuch. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges.* 56, 147—152, 1988.
- GERZABEK, M. H. und S. M. ULLAH: Influence of fulvic and humic acids on Cd- and Ni- toxicity to *Zea mays* (L.). *Die Bodenkultur* 41, 115—124, 1990.
- GRIMME, H.: Wirkung einer Mg-Düngung im Gefäßversuch bei verschiedenen durch K- und Kalkdüngung veränderten Al-Konzentrationen in der Bodenlösung, Kali-Briefe (Büntehof) 15, 761—772, 1981.
- GRIMME, H.: Aluminium induced magnesium deficiency in oats. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 146, 666—676, 1983.
- HARGROVE, W. L. and G. W. THOMAS: Effect of organic matter on exchangeable aluminium and plant growth in acid soils. In: *Am. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Am.: Chemistry in the Soil environment*. Madison, Wisc., 1981.
- HARGROVE, W. L. and G. W. THOMAS: Titration properties of Al-organic matter. *Soil Sci.* 134, 216—225, 1982.
- HORST, W. J. und H. GÖPPEL: Aluminium Toleranz von Ackerbohne (*Vicia faba*), Lupine (*Lupinus luteus*), Gerste (*Hordeum vulgare*) und Roggen (*Secale cereale*). II. Mineralstoffgehalte in Sproß und Wurzeln in Abhängigkeit vom Aluminium-Angebot. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 149, 94—109, 1986.
- JARVIS, S. C. and D. J. HATCH: The effects of low concentrations of aluminium on the growth and uptake of nitrate-N by white clover. *Plant and Soil* 95, 43—55, 1986.
- LIN, C. and N. T. COLEMAN: The measurement of exchangeable aluminum in soils and clays. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 24, 444—446, 1960.
- MATSUMOTO, H. and S. MORIMURA: Repressed template activity of chromatin of pea roots treated by aluminium. *Plant and Cell Physiol.* 21, 951—959, 1980.
- MATSUMOTO, H. and T. YAMAYA: Inhibition of potassium uptake and regulation of membrane associated Mg^{2+} -ATPase activity of pea roots by aluminium. *Soil Sci. Plant Nutr.* 32, 179—188, 1986.
- MCQUATTIE, C. J. and G. A. SCHIER: Response of red spruce seedlings to aluminum toxicity in nutrient solution: alterations in root anatomy. *Can. J. For. Res.* 20, 1001—1011, 1990.
- NAIDOO, G., J. McD. STEWART and R. J. LEWIS: Accumulation sites of Al in snapbean and cotton roots. *Agronomy Journal* 70, 489—492, 1978.
- O'BRIEN, L. O. and M. E. SUMNER: Effects of Phosphogypsum on leachate and soil chemical composition. *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.* 19, 1319—1329, 1988.
- PATZELT, W.: Schwermetalle im Boden: Schwermetallgehalte im Huminstoffsystem unterschiedlich belasteter Böden und deren Beziehung zur Pflanzenaufnahme. Dissertation an der Universität für Bodenkultur, Wien 1989.
- PAVAN, M. A., F. T. BINGHAM and P. F. PRATT: Toxicity of aluminum to coffee in Ultisols and Oxisols amended with $CaCO_3$, $MgCO_3$ and $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46, 1201—1207, 1982.
- PRATT, P. F. and F. L. BLAIR: A comparison of three reagents for the extraction of aluminum from soils. *Soil Sci.* 91, 357—359, 1961.
- REES, W. J. and G. H. SIDRAK: Inter-relationship of aluminum and manganese toxicities towards plants. *Plant and Soil* 14, 101—117, 1961.
- RENGASAMY, P. and J. M. OADES: Interaction of monomeric and polymeric species of metal ions with clay surfaces. III. Aluminium (III) and Chromium (III). *Aust. J. Soil Res.* 16, 53—66, 1978.
- RITCHEY, K. D., D. M. G. SOUZA, E. LOBATO and O. CORREA: Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. *Agronomy Journal* 72, 40—44, 1980.

- SCHNITZER, M.: Reactions between fulvic acid, a soil humic compound and inorganic soil constituents. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 33, 75—81, 1969.
- SCHNITZER, M. and S. U. KHAN: Soil organic matter. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam — Oxford — New York 1978.
- SHUMAN, L. M.: Comparison of exchangeable Al, extractable Al, and Al in soil fractions, *Can. J. Plant Sci.* 70, 263—275, 1990.
- SHUMAN, L. M., E. L. RAMSEUR and R. R. DUNCAN: Soil aluminum effects on the growth and aluminum concentration of sorghum. *Agronomy Journal* 82, 313—318, 1990.
- TANAKA, A. and S. A. NAVASERO: Aluminum toxicity of the rice plant under water culture conditions. *Soil Sci. Plant Nutr.* 12, 9—14, 1966.
- ULLAH, S. M. and M. H. GERZABEK: Influence of fulvic and humic acids on Cu- and V-Toxicity to *Zea mays* (L.). *Die Bodenkultur* 42, 123—134, 1991.
- WRIGHT, K. E.: Internal precipitation of phosphorus in relation to aluminum toxicity. *Plant Physiology* 18, 708—712, 1943.
- ZHAO, X.-J., E. SUCOFF and E. J. STADELMANN: Al³⁺ and Ca²⁺ alteration of membrane permeability of *Quercus rubra* root cortex cells. *Plant Physiology* 83, 159—162, 1987.

(Manuskript eingelangt am 2. Juli 1991, angenommen am 6. September 1991)

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. Pedro L. OLIVEIRA DE ALMEIDA MACHADO und Dipl.-Ing. Dr. Martin H. GERZABEK,
Hauptabteilung Agrarforschung und Biotechnologie, Österreichisches Forschungszentrum
Seibersdorf Ges. m. b. H., A-2444 Seibersdorf