

Sonderdruck aus

D I E B O D E N K U L T U R

Journal für landwirtschaftliche Forschung

Chefredakteur: o. Hochschulprofessor Dipl.-Ing. Dr. Otto Steineck
 Verantw. Redakteur: o. Hochschulprofessor Dipl.-Ing. Dr. Kurt Ehrensdorfer
 Österreichischer Agrarverlag, 1014 Wien I, Bankgasse 1-3

24. BAND

HEFT 3 (AUGUST 1973)

(Aus dem Institut für Pflanzenernährung der Technischen Universität München,
 D-805 Freising-Weihenstephan)

Wanderung der Pflanzennährstoffe im Boden und deren Bedeutung in einer umweltbewußten Landwirtschaft*

Von A. AMBERGER und P. SCHWEIGER

(Mit 4 Abbildungen)

Pflanzennährstoffe sind Mineralstoffe, mit deren Hilfe die Pflanze aus den energiereichen Stoffen CO_2 und H_2O durch Ausnutzung der Sonnenenergie eine Vielzahl von pflanzlichen Struktur- und Inhaltsstoffen aufbaut. Diese Mineralstoffe stammen entweder aus dem Boden selbst und werden durch Verwitterung bzw. mikrobiellen Abbau (Mineralisierung) von Abfallstoffen der pflanzlichen bzw. tierischen Produktion freigesetzt oder sie können in Form von anorganischen Düngesalzen dem Boden zugeführt werden. Pflanzennährstoffe liegen im Boden in verschiedenen Zustands- bzw. Bindungsformen vor, deren Veränderung durch die Begriffe Mobilisierung, Sorption, Fixierung usw. gekennzeichnet ist. Aus anorganischen und organischen Verbindungen bzw. Komplexen können Nährstoffe nachgeliefert, d. h. in die Bodenlösung freigesetzt werden; als solche sind sie dann pflanzenaufnehmbar, aber häufig auch leicht auswaschbar. Durch Sorption an den Oberflächen von Tonmineralen bzw. Humusstoffen bleiben die Nährstoff-Ionen nach wie vor pflanzenverfügbar (Gleichgewicht zwischen sorbierten und in der Bodenlösung befindlichen Ionen), sind aber nicht mehr unmittelbar auswaschungsfähig.

Pflanzenaufnehmbare Nährstoffe können darüber hinaus sogar fixiert, d. h. in anorganische oder organische Verbindungen mehr oder minder fest eingebaut werden (Ausfällung in Form von unlöslichen Salzen, starke chelatartige Bindung an die organische Substanz, Einbau in Zwischenschichten bestimmter Tonmineralien usw.); in diesem Zustand sind sie weder pflanzenaufnehmbar noch auswaschbar.

Die Wanderung der Mineralstoffe ist abhängig von der Mobilität der Nährionen und der Wasserbewegung im Boden. Für die Mobilität sind die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften des Bodens entscheidend, also z. B. Struktur und Anteil bestimmter Korngößen, Gehalt und Art der Tonminerale bzw. der organischen Substanz, pH, Redoxpotential, biologische Aktivität und nicht zuletzt der Grad der Durchwurzelung des Bodens, als die aktive Einflußnahme der Pflanzen auf den Boden. Der Transport der Pflanzennährstoffe im Boden erfolgt gelöst in Wasser als Ionen. Da unter unseren

* Nach einem Vortrag, gehalten am 13. Dezember 1972 beim Symposium „Umweltschutz durch intensive Pflanzenproduktion“ der Österreichischen Düngungsstelle Wien an der Hochschule für Bodenkultur Wien.

klimatischen Bedingungen die Wasserbewegung vorwiegend nach abwärts gerichtet ist (zum Unterschied vom ariden Klima!), haben wir mit einer mehr oder minder großen Mineralstoff-Auswaschung zu rechnen.

Je höher die Löslichkeit der Nährsalze und je geringer deren Sorption ist, um so größer ist die Gefahr der Auswaschung. Da der Ton-Humus-Komplex hauptsächlich negative Ladungen besitzt, werden vorwiegend Kationen sorbiert; eine Sorption der Anionen mit zunehmender Ladung kann an Fe-Oxiden bzw. bestimmten Humusstoffen erfolgen (das einwertige Nitration hat demnach z. B. die geringste Sorption gegenüber den Phosphationen!).

Das Wasser ist das Transportmittel für die Mineralstoffe. Beim Auftreffen des Regens auf den Boden läuft ein Teil ungenützt oberflächlich ab. Das in den Boden eindringende Wasser wird entweder als Haftwasser festgehalten oder es geht als Sickerwasser allmählich in das Grundwasser über und ist dort in der Mehrzahl der Fälle für die Pflanzenproduktion nur mehr beschränkt verfügbar. Übersteigt die Wassermenge die Pflanzenerzeugung nur mehr beschränkt verfügbar. Das Wasserhaltevermögen des Bodens (Feldkapazität), wird dem Boden also mehr Wasser zugeführt als durch Saugkräfte entgegen der Schwerkraft als „Haft- bzw. Kapillarwasser“ festgehalten werden kann, dann kommt es zur Sickerwasserbildung und es werden die darin gelösten Nährstoffe aus dem Wurzelbereich in tiefere Schichten des Bodens bzw. in den Untergrund abtransportiert. Von der Auswaschung sind also unmittelbar die mobilen Nährstoffe betroffen. Entscheidend ist die Menge an Sickerwasser, das aus dem Wurzelbereich austritt.

Sickerwasserbildung und Mineralstoffauswaschung hängen im wesentlichen ab von:

- Niederschläge (nach Menge und Verteilung);
- Bodeneigenschaften, und zwar insbesondere solchen, die das Wasserhaltevermögen betreffen, ferner von dem natürlichen Nährstoffgehalt, dem Sorptions- bzw. Bindungsvermögen, dem Grad der Durchwurzelung usw.;
- Wasserverbrauch der Pflanzen durch Transpiration (produktiv) sowie der Evaporation des Bodens (unproduktiv);
- Mineralstoffbedarf bzw. -entzug durch die Pflanzen;
- pflanzenbaulichen Maßnahmen (z. B. Bodenbedeckung, Kulturart, Düngung nach Höhe, Zeitpunkt usw.).

Der Umfang der Sickerwasserbildung und die Höhe der Mineralstoffauswaschung wird demnach durch Witterung, Bodeneigenschaften und pflanzenbauliche Maßnahmen bestimmt.

Die Messung des Sickerwasseranfalls bzw. der Mineralstoffauswaschung erfolgt in Lysimetern mit all ihren methodischen Vor- und Nachteilen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. Die auf diese Weise gewonnenen Ergebnisse lassen eine Abschätzung der maximalen Auswaschungsverluste zu und liefern durch Vergleiche entsprechender Parzellen brauchbare relative Aussagen.

Nach diesen theoretischen Überlegungen sollen nun Sickerwasserbildung und Mineralstoffauswaschung an Hand der Lysimeterergebnisse in Weihenstephan besprochen werden. In einzelnen Abschnitten sind Zahlen aus einer kurzen Mitteilung von HOFFMANN (1967) angeführt; die nunmehr über insgesamt 35 Jahre laufenden Versuche werden zur Zeit zusammenfassend ausgewertet (SCHWEIGER 1973). Wir haben versucht, aus einem größeren Zeitabschnitt die Einflußgrößen zu quantifizieren, die die Sickerwasserbildung und Mineralstoffauswaschung bewirken.

I. Sickerwasserbildung

1. Bodendaten — Weihenstephan (Tabellen 1 und 2)

Tabelle 1

Bodenart und Sickerwasseranfall — Lysimeterversuch Weihenstephan
Jährliche Niederschlagsmenge: 810 mm (30-jähriger $\bar{\phi}$)

Boden	Miozänsand	Humoser Kalklehm	Lehm
Sickerwassermenge in % der Niederschläge	57	33	35
Korngrößenzusammensetzung:			
Ton (< 2 μ)	5	16	22
Schluff (2 bis 63 μ)	7	33	54
Feinsand (63 bis 200 μ)	15	16	5
Grobsand (200 bis 2000 μ)	73	30	21

Tabelle 2

Bodendaten — Lysimeterversuch Weihenstephan

Boden	pH (KCl)	Gesamt C% N%	T-Wert mval	Max. Wasserkapazität %	CaCO ₃ %	DL-Werte je 100 g B. P ₂ O ₅ K ₂ O
Miozänsand	6,0	0,12	0,03	4,7	27,5	— 10 8
Humoser Kalklehm	7,0	2,18	0,24	22,5	46,8	19,4 18 8
Quartärer Lehm	6,8	0,85	0,14	17,3	45,3	— 22 12

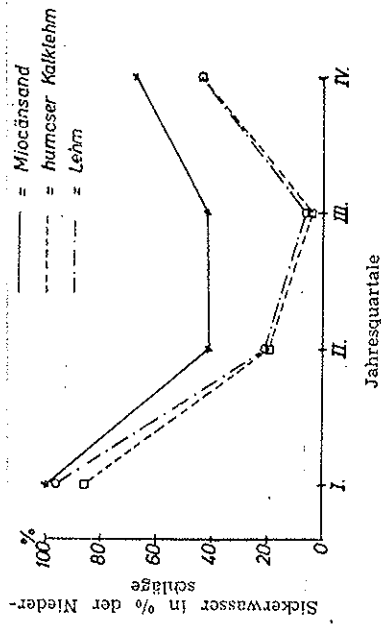
Durch den reinen Sandboden versickert also mehr als die Hälfte der jährlichen Niederschläge ungenutzt in den Untergrund (bedingt durch lockeres Elementargefüge, sehr schwachen Sorptionskomplex und geringes Wasserhaltevermögen). Dagegen werden auf den beiden Lehmböden mit hohem Tongehalt und hoher Wasserkapazität etwa zwei Drittel der Niederschläge durch die Pflanzen verwertet.

2. Sickerwasseranfall und Jahreszeit (Abb. 1)

Während in den Monaten Jänner bis März der mit Wasser gesättigte Boden 100 bis 85 % des Niederschlags wieder abgibt, beträgt der Sickerwasseranfall im zweiten Quartal nur 40 bis 20 % und sinkt in den Sommermonaten auf dem humosen Kalklehm und Lehm auf einen bedeutungslosen Wert ab. Im Spätherbst/Winter dagegen, wenn die Kulturpflanzen das Feld geräumt haben, also der Verbrauch durch die Transpiration entfällt (zur Bildung von 1 kg TS sind etwa 300 bis 600 kg Wasser nötig!), steigt der Sickerwasseranfall wieder auf 40 bis 60 % der Niederschläge an.

Der Sickerwasseranfall ist also in erster Linie von der Jahreszeit bzw. Vegetationszeit und in zweiter Linie vom Boden abhängig; oder anders ausgedrückt: Der Einfluß der Bodeneigenschaften auf die Sickerwassermenge tritt nur unter

Abb. 1: Einfluß von Bodenart und Jahreszeit auf die relativen Sickerwassermengen ($\bar{\phi}$ von 13 Jahren)



extremen Bedingungen (z. B. sehr leichter Sand) besonders hervor; entscheidend ist der Wasserverbrauch bzw. nutzbare Wasserrückzug durch den Pflanzenaufwuchs (Transpiration) neben der Evaporation (des Bodens).

3. Sickerwasseranfall und Niederschlagsmenge (Abb. 2)

Die Beziehung zwischen Jahresniederschlagsmenge und Sickerwassermenge ist teilweise statistisch gesichert, teils liegt sie knapp unter der Signifikanzgrenze.

Daraus folgt, daß der Sickerwasseranfall sehr wesentlich durch die Niederschlagsmenge des Jahres bestimmt wird. Je größer also das Wasserangebot ist, um so schneller ist das Wasserhaltevermögen des Bodens erschöpft und um so schneller tritt Sickerwasserbildung auf, insbesondere dann, wenn kein Wasserverbrauch durch die Kulturpflanzen erfolgt (vegetationslose Jahreszeit!).

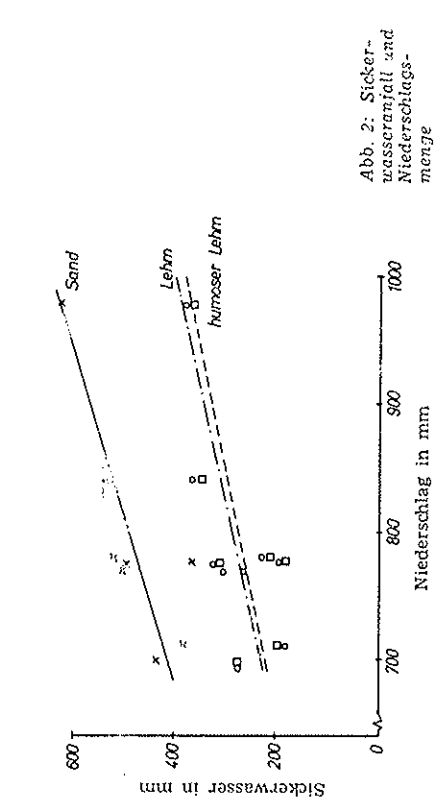


Abb. 2: Sickerwasseranfall und Niederschlagsmenge

4. Sickerwasseranfall und Wasserkapazität (Tabelle 3)

Tabelle 3
Wasserkapazität der Böden und Sickerwassermengen in den Quartalen
(j. aus 8 Jahren)

Boden	Wasserkapazität Gew.-%			Sickerwassermengen (mm) im Quartal				
	1.	2.	3.	4.	1.	2.	3.	4.
Sand	28	156	106	113	99			
Murloser Kalklehm	47	139	57	9	68			
Lehm	45	143	57	9	65			

Unter den festgestellten Bodeneigenschaften kommt der Wasserkapazität (bzw. Feldkapazität) die größte Bedeutung zu. Im ersten Quartal, d. h. nach vollständiger Wassersättigung des Bodens im Herbst/Winter liefern alle Böden nahezu gleiche Sickerwassermengen, im zweiten, dritten und vierten Quartal liegt der Sickerwasseranfall des Sandes etwa auf gleicher Höhe, d. h. das maximale Wasserhaltevermögen des Sandes wird durch die Niederschläge in allen Quartalen ständig überschritten. Kalklehm und Lehm dagegen bringen im zweiten und vierten Quartal nur etwa die Hälfte bis zwei Drittel der Sickerwassermenge des Sandes; im dritten Quartal ist die Versickerung unbedeutend, d. h. die anfallenden Niederschläge können gespeichert bzw. von den Pflanzen genutzt werden.

Der unproduktive Wasserverlust ist aber um so geringer, je mehr das im Boden gespeicherte Wasser durch Transpiration — also über die Pflanze nutzbringend verwertet wird. Ein optimal mit Mineralstoffen versorgter Pflanzenbestand nutzt demnach das im Boden gespeicherte Wasser zu erhöhter Produktion aus.

II. Mineralstoffauswaschung

Wir haben eingangs festgestellt, daß die Höhe des Sickerwasseranfalls letztlich entscheidend ist für die Höhe der Mineralstoffauswaschung.

1. Stickstoff-Auswaschung

Der Stickstoffgehalt des landwirtschaftlich genutzten Oberbodens beträgt etwa 900 bis 9000 kg/ha; jährlich werden davon durchschnittlich 40 bis 100 (maximal 200) kg N/ha mineralisiert. Die Mineralisierungsquote ist ein von den jeweiligen Standortbedingungen abhängiger Erfahrungswert (1 bis 2% des Gesamt-N). Der mineralisierte Bodenstickstoff ebenso wie der Düngerstickstoff werden zunächst als Ammonium am Sorptionskomplex gebunden (und sind damit vor Auswaschung geschützt), später aber nitrifiziert; das Nitrat in der Bodenlösung ist in hohem Maße auswaschungsgefährdet.

a) N-Auswaschung — Jahreszeit — Boden (Tabelle 4)

Tabelle 4
Stickstoffauswaschung in Abhängigkeit von Bodenart und Jahreszeit

Quartal	Sand (0,03% N)		Kalklehm (0,24% N)		Lehm (0,14% N)		Mittel
	kg N/ha	%*	kg N/ha	%*	kg N/ha	%*	
4.	15	20	26	26	12	19	18
1.	24	32	55	53	37	57	58
2.	13	18	20	20	15	23	16
3.	22	30	2	1	1	1	8
Σ	74	100	103	100	65	100	—

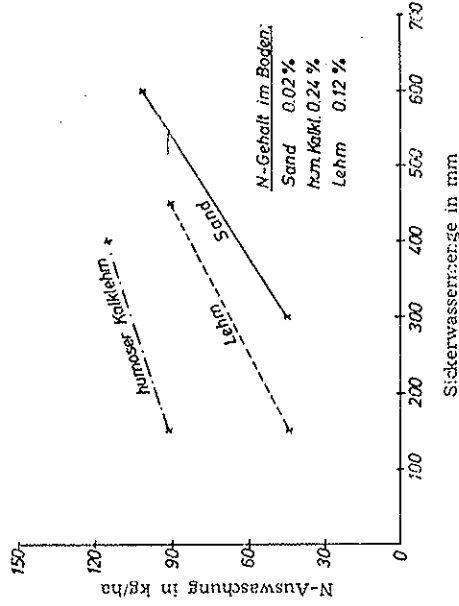
* Von der Gesamtmenge.

Der sehr leichte N-arme Sandboden zeigt eine relativ hohe (74 kg N/ha), in allen Quartalen ziemlich gleichbleibende N-Auswaschung (18 bis 32%), bedingt durch die große Sickerwasserrate über das ganze Jahr hinweg. Aus dem N-reichen Kalklehm werden insgesamt zwar mehr (103 kg N/ha), davon aber 79% in der vegetationslosen Jahreszeit (viertes und erstes Quartal) ausgewaschen. Das gleiche (76%) gilt für den Lehm Boden bei allerdings geringerer Jahressumme (65 kg N/ha).

Im zweiten Quartal können durch plötzlichliches Überangebot an Wasser (starke Regen) bzw. durch geringen Wasserverbrauch der Kulturpflanzen (z. B. unter ungünstigen Wachstumsbedingungen) merkbare N-Auswaschungen zustande kommen, insbesondere dann, wenn ein hoher Vorrat an mineralisiertem Bodenstickstoff bzw. ein hohes Düngerangebot im Frühjahr vorliegt.

Im dritten Quartal ist der Vorrat an Wasser und verfügbarem Stickstoff beider Böden durch den Pflanzenaufwuchs erschöpft; die N-Auswaschung ist daher unbedeutend.

b) N-Auswaschung — Sickerwassermenge — Böden (Abb. 3)



Die Stickstoffauswaschung nimmt mit steigendem Sickerwasseranfall zu; der Anstieg kann auf dem N-armen Sandboden mehr als 100% betragen (bei einem N-Gehalt des Sickerwassers von 15 bis 20 mg/l). Ähnlich verläuft die Stickstoffauswaschung aus dem Lehm unter dem Einfluß zunehmender Niederschläge (N-Gehalt des Sickerwassers 20 bis 25 mg/l). Die Auswaschung aus dem stickstoffreichen humosen Kalklehm liegt dagegen insgesamt gesehen auf einem viel höheren Niveau; der N-Gehalt des Sickerwassers aus dieser Bodenart beträgt über das ganze Jahr hinweg 28 bis 35 mg N/l und wird durch die Höhe der Sickerwassermenge nur relativ wenig beeinflusst.

Aus der Abbildung 3 ist ferner ersichtlich, daß unter der Voraussetzung gleicher Gaben an Düngerstickstoff durch hohe Niederschläge und folglich hohe Sickerwassermengen aus dem N-armen Sandboden genauso viel Stickstoff (in

erster Linie wohl Düngestickstoff) ausgewaschen werden kann wie aus dem N-reichen Kalklehm, dessen Sickerwasseranfall ja — wie eingangs erwähnt — wesentlich niedriger liegt.

Auf Böden mit einem relativ geringen N-Gehalt (Sand und Lehm) wird also die N-Auswaschung in erster Linie durch die Menge des anfallenden Sickerwassers und damit indirekt wiederum durch Niederschläge und Bodeneigenschaften bestimmt, während auf humosem Boden der hohe natürliche N-Gehalt für die Höhe der N-Auswaschung entscheidend ist.

c) N-Auswaschung — mineralische N-Düngung

Über den Einfluß der mineralischen N-Düngung auf die N-Auswaschung finden sich in der Literatur zahlreiche Angaben (SCHWEIGER 1973), von denen hier nur einige wenige zitiert werden können (Abb. 4, Tabelle 5).

Frühkartoffeln/Mais 1955/57
Winterroggen/Wachbau 1955/57

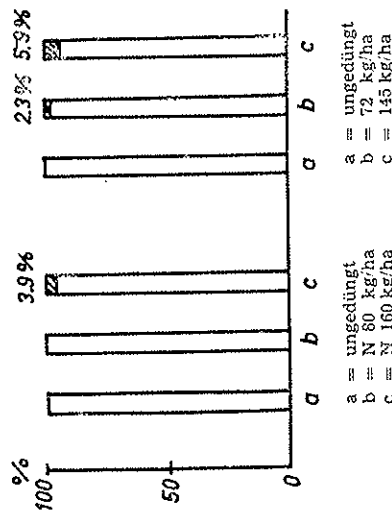


Abb. 4: Anteil des ausgewaschenen Düngers-N an der N-Zufuhr in einem zehnjährigen Lysimeterversuch (nach PFAFF)

Tabelle 5

N-Versickerung auf Leifböden (Rauischholthausen)

(nach VOMEL 1970)

	N-Düngung (kg/ha)		N-Auswaschung (kg/ha)	
	26 cm*	50 cm*	26 cm*	50 cm*
Brache	—	—	—	—
Hafer	47	33	83	30
Hafer	59	18	21	—
Hafer	117	19	18	—
Hafer	176	24	23	—

* Lysimetertiefe.

Selbst unter den sehr ungünstigen Standortbedingungen (sehr leicht. r Sand) des Limburgerhofes wurden nur 2 bis 6% des verabreichten mineralischen N ausgewaschen (PFAFF 1963). Vorausgesetzt, daß die Applikation des Stickstoffs richtig erfolgt, dürrten daher selbst bei sehr hohen N-Gaben keinesfalls mehr als 10% ausgewaschen werden.

Auch die Untersuchungen von VOMEL (1970) zeigen, daß die N-Versickerung durch die Höhe der N-Düngung praktisch nicht erhöht wurde; dagegen ist die N-Auswaschung unter Brache sehr hoch.

Unter den Bedingungen des Standortes Weihenstephan betrug die Stickstoff-Auswaschung also im Mittel 60 bis 80 kg N/ha und Jahr und ist zum größten Teil das Ergebnis der im Herbst/Winter ablaufenden Mineralisation, deren Höhe von Temperatur, Menge und Verteilung der Niederschläge während der vegetationslosen Jahreszeit usw. abhängt. Dagegen wird die während der Vegetationszeit auftretende, wesentlich geringere N-Auswaschung vor allem durch den unterschiedlichen Wasser- bzw. N-Bedarf der Kulturpflanzen unter den gegebenen Witterungsverhältnissen bzw. dem Entwicklungszustand bestimmt. Bei möglicherweise ungünstigen Wachstumsbedingungen und hoher Nitratkonzentration der Bodenlösung im Frühjahr muß aber mit höheren Auswaschungsverlusten gerechnet werden. Im Hochsommer tritt dagegen normalerweise keine N-Auswaschung auf.

Da die Höhe der Erträge bekanntlich sehr von der zur Verfügung stehenden Wassermenge bestimmt wird und die N-Auswaschung in erster Linie vom Sickerwasseranfall abhängt, führt jede Düngungsmaßnahme, die von einer Ertragssteigerung begleitet ist, auch zu einer Verbesserung der Wasserausnutzung und damit zu geringerem Sickerwasseranfall und geringerer N-Auswaschung.

2. Phosphat-Auswaschung

Der Gesamt-P-Gehalt des Oberbodens beträgt zwischen 0,02 und 0,2%, etwa die Hälfte davon liegt in organischer gebundener Form vor. Phosphor wird in wesentlich geringerem Maße mineralisiert als Stickstoff. Das Phosphat-Ion ist im Boden äußerst immobil, es wird daher stark sorbiert bzw. unter ungünstigen pH-Bedingungen ausgefällt. Demnach beträgt auch die Konzentration der Bodenlösung nur 0,02 bis 1 mg P/l. Dagegen ist der P-Bedarf der Ernte etwa hundertmal größer als das Angebot aus der Bodenlösung.

a) Mineralstoff-Auswaschung — Ergebnisse verschiedener Lysimeterstationen (Tabelle 6)

Tabelle 6

Zusammenstellung von Ergebnissen der Nährstoffversickerung verschiedener Lysimeterstationen

Boden	NW: l/m	SW: %	Ertrag ¹ dz/kg	Nährstoffauswaschung in kg/ha					
				N	K	P	Na	Ca	
Bromberg 1907—1918									
Pentokowo, schwerer humoser Lehmboden	31	66	31	29	0	—	—	170	16
Kaiserfelde	18	74	26	14	0	—	—	153	18
humusarmer sandiger Lehm	13	107	137	15	0	—	—	530	124
Lojewo									
Niederungsmoor	670	40	16	6	—	—	—	296	35
Halle 1905—1910 sandiger Lehm Boden	47	24	16	28	0,8	—	—	302	—
Zürich-Oerlikon 1922—1924 ⁴ schw. mergel. (ungegüht)	1032	40	80	45	84	0,9	—	41,5	—
sand. Lehm (+ Gülle)									

Fortsetzung von Tabelle 6

Boden	NW ¹ mm	SW ² %	Ettrag ³ dz/kg	Nährstoffauswaschung in kg/ha						
				N	K	P	Na	Ca	Mg	
Limburgerhof 15jährig										
Sandboden E, pH 7		96	38	22	5,3	74	242	13		
Sandboden D, pH 4-5		96	27	23	3,4	52	165	14		
mittl. Lehm Boden (aufgekalkt)	570	85	20	18	1,7	58	172	15		
Lehm C (+ Stallmist)		100	56	18	2,1	79				
Rauischholzhausen 1959-1964										
Düngung II		49	97	32	13	0	31	163	25	
Groß-Gerreu: humoser Sand		29	139	22	6	0	26	85	29	
Gießen: alluv. Lehm	600	23	132	12	6	0	25	74	12	
R.H.: degrad. Löß		34	1,3	25	5	0	25	160	22	
R.H.: Ton										

- ¹ ♂ jährlicher Niederschlag.
- ² ♂ jährliches Sickerwasser in % von Nmm. I.
- ³ Trockenmasse.
- ⁴ Gefäße nur 50 cm tief.

Nur in seltenen Fällen (alkalischer, sehr leichter Sand) erreicht die P-Auswaschung Werte > 1 kg P/ha und Jahr.

b) P-Auswaschung — Lysimeter Weihenstephan (Tabelle 7)

Tabelle 7

Quartal	Phosphatauswaschung — Weihenstephan (kg P/ha und Jahr)	
	Sand (T = 5 mval)	Lehm (T = 17 mval)
4.	1,0	0,05
1.	1,4	0,10
2.	1,2	0,07
3.	1,4	0,04
Σ	5,0	0,26

Die jährliche P-Auswaschung aus dem humosen Kaiklehm beträgt 0,26 kg und die aus Lehm kaum mehr als 1 kg P/ha; auf Sandboden werden dagegen Maximalwerte von 5 kg P/ha erreicht. Während aber die P-Verluste aus diesem Boden gleichmäßig über das ganze Jahr verteilt sind, tritt auf den beiden Lehmböden die höchste P-Auswaschung (zusammen mit den größten Sickerwassermengen) im ersten Quartal auf. Der P-Gehalt der Sickerwasser ist zwar je nach Bodenart unterschiedlich, über das ganze Jahr hinweg aber ziemlich gleich:

Sand	1 mg
Kaiklehm	0,1 bis 0,2 mg
Lehm	etwa 0,3 bis 0,5 mg P/l

Die P-Auswaschung ist also in erster Linie abhängig von den Bodeneigenschaften, und zwar vor allem dem Sorptionsvermögen (je höher der T-Wert, desto geringer die P-Auswaschung), und erst in zweiter Linie von der Sickerwassermenge (Jahreswitterung).

Da der P-Gehalt des Niederschlagswassers allein im Durchschnitt schon 0,01 bis 0,03 ppm P beträgt, ergibt sich auf diese Weise eine P-Zufuhr aus der Atmosphäre von 0,08 bis 0,24 kg P/ha und Jahr.

Tabelle 8

Einfluß mineralischer P-Düngung auf die P-Auswaschung
(nach PFAFF)

Düngung kg P/ha	0	35,0	70,0	105,0
Auswaschung kg P/ha	2,2	1,7	1,3	1,7

Nach den langjährigen Lysimeteruntersuchungen von PFAFF (1963) tritt durch Erhöhung der P-Düngung von 0 bis 105 kg P/ha sogar eine geringfügige Verringerung der P-Auswaschung (infolge höheren P-Entzuges durch größere Ernten) auf.

ERICKSON und ELLIS (1971) beziffern auf Grund von Messungen des P-Gehaltes von Dränwässern die P-Verluste mit 0,1 bis 1 kg P/ha und Jahr.

Tabelle 9

P-Verluste durch Drainagewässer
(nach ERICKSON und ELLIS 1971)

	P-Gehalt des Drainagewässers (ppm)		P-Verlust (kg/ha)
	1968 (♂)	1969	
Muck Farm	17,0	0,05	0,01—0,30
Ferden Farm	39,0	0,30	0,01—0,20
Davis Farm	50,0	?	0,01—0,10
Hey Farm	?	0,06	0,01—0,30
Sloan creek	?	0,76	0,01—0,30
Deer creek	?	0,12	0,01—0,30

Interessant sind neuere Untersuchungen des Leichweiß-Institutes Braunschweig an Dränwässern aus leichten Böden; danach beträgt der P-Gehalt maximal 0,2 mg P/l. Durch Steigerung der P-Düngung von 0 bis 105 kg P/ha konnte keine Zunahme des P-Gehaltes der Dränwässer festgestellt werden.

c) P-Verluste durch Erosion (Tabelle 10)

Es ist bekannt, daß Mineralstoffverluste nicht nur durch Auswaschung, sondern auch durch Erosion entstehen können, also durch oberflächliche Abschweemung mineralischer und organischer Boden- bzw. Düngerteilchen. Das Ausmaß der Erosion ist abhängig von der Menge und Intensität der Niederschläge sowie der Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens (Porenvolumen und -verteilung), Hangneigung usw.

Tabelle 10

Boden- und damit verbundener P₂O₅-Abtrag von unbezuchtem Boden während der Sommermonate

Standort	Bodenart	Gefälle %	Meßzeit		Regen mm	Abtrag kg/ha	kg P ₂ O ₅ /ha und Monat (bei 20 mg P ₂ O ₅ /100 g Boden)
			Tage/ Monate	338/12,0 230/7,7 181/5,0			
Albach	Lößlehm	11,0	338/12,0	366	55,50	0,925	
Erntebrück	schluff. Lehm	10,5	230/7,7	410	7,74	0,201	
Marburg	Ton	9,0	181/5,0	130	12,47	0,499	

In 15jährigen Versuchen auf verschiedenen Böden konnte PFAFF (1963) feststellen (Tabelle 12), daß eine Steigerung der K-Gabe auf Lehmböden von 0 bis 400 kg K₂O/ha in Form von Nitrophoska die K-Auswaschung nicht erhöht hat, wohl aber auf Sandböden. Damit ist bewiesen, daß die K-Auswaschung sehr wesentlich durch den Boden bestimmt wird.

4. Calcium- und Magnesium-Auswaschung (Tabelle 13)
 Unter unseren Klimabedingungen unterliegt das Calcium in höherem Maße der Auswaschung; es stammt aus den Sulfaten, Carbonaten sowie aus dem austauschbaren Ca des Sorptionskomplexes, der bekanntlich größtenteils mit Calcium-Ionen belegt ist. Der Gesamt-Mg-Gehalt der Böden liegt durchschnittlich bei 0,05 bis 0,5%, bedingt durch den Mg-Anteil von Silikaten und Tonmineralen bzw. Dolomit und Magnesit in Mg-reichen Böden.

Tabelle 13
 Ca- und Mg-Auswaschung — Weißenstephan
 (6jähriger ♂)

	Sand	Kalklehm	Lehm
Sickerwassermenge in % der Niederschläge	57	33	35
Auswaschung: kg Ca/ha und Jahr	574	431	325
davon (%): April bis September	49	27	27
Oktober bis März	51	73	73
Auswaschung: kg Mg/ha und Jahr	64	58	73
davon (%): April bis September	50	25	25
Oktober bis März	50	75	74

Die Ca-Auswaschung ist am höchsten aus Kalklehm, der 18% freien Kalk enthält, mit 431 kg Ca/ha und Jahr. Auf Sand liegt die Auswaschung höher (374 kg Ca/ha) trotz niedrigerem Gehalt des Sickerwassers (80 mg Ca/l) als auf Lehm (325 kg Ca/ha und 100 mg Ca/l Sickerwasser). Die Ca-Auswaschung aus dem Sandboden findet zu 51%, aus Kalklehm und Lehm zu 73% in der vegetationslosen Jahreszeit statt.

Die Unterschiede in der Mg-Auswaschung sind von Boden zu Boden relativ gering, die Hälfte (Sand) bis drei Viertel (Kalklehm und Lehm) fallen im Winter an.

Interessant ist, daß der Ca- und Mg-Gehalt der Lysimeterwässer oft niedriger liegt als z. B. der des öffentlichen Wassernetzes eines 50 m tiefen Brunnens zur Feldberegnung (JUNG und DRESSEL 1969, PFAFF 1963.)

5. Cl-, SO₄-HCO₃-Auswaschung (Tabelle 14)

Tabelle 14

Cl-, SO₄- und HCO₃-Auswaschung — Lysimeterversuch Weißenstephan

	Sand	Kalklehm	Lehm
Sickerwassermenge in % der Niederschläge	57	33	35
Cl-Auswaschung: kg Cl/ha und Jahr	93	52	44
davon (%): April bis September	60	22	25
Oktober bis März	40	78	75
SO ₄ -Auswaschung: kg SO ₄ /ha und Jahr	363	349	361
davon (%): April bis September	43	21	22
Oktober bis März	55	79	78
HCO ₃ -Auswaschung: kg HCO ₃ /ha und Jahr	522	647	543
davon (%): April bis September	51	27	25
Oktober bis März	49	73	74

Diese Ergebnisse decken sich mit denen amerikanischer Autoren, die durch Erosion auf P-Verluste von maximal 1 kg P/ha und Jahr kommen, je nach Hangneigung.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die P-Dynamik der Böden im Hinblick auf eine mögliche Auswaschung des Phosphors keine Gefahr bedeutet. Faßbare Auswaschungsverluste können daher nur auf grobkörnigen Sandböden mit geringem Gehalt an Tonmineralen, Al- und Fe-Oxiden und demnach geringen Sorptionsmöglichkeiten auftreten.

3. Kalium-Auswaschung

Der Gesamt-K-Gehalt der Böden ist relativ hoch (0,2 bis 3,3%), meist in silikatischer Form vorliegend.

Das Dünger-Kalium liegt entweder als Ion in der Bodenlösung vor oder es ist an Tonmineralen sorbiert und damit vor Auswaschung geschützt. Aufweilbare Illite, Vermiculite und Montmorillonite mit hoher Schichtladung vermögen Kalium stark zu fixieren, dagegen kann es an die organische Substanz kaum gebunden werden. In organischen Böden verbleibt Kalium daher vornehmlich in der Bodenlösung und ist dort auswaschungsgefährdet.

Tabelle 11

Kaliumauswaschung und Jahreszeit (% der Jahresmenge)

Lysimeter — Weißenstephan

Quartal	Sand		Kalklehm		Lehm	
	kg K/ha	%	kg K/ha	%	kg K/ha	%
4.	6,1	22	2,2	34	3,0	34
1.	7,5	27	2,8	43	3,7	42
2.	5,5	20	1,2	19	1,9	20
3.	8,5	31	0,3	4	0,2	4
Σ	27,6	100	6,5	100	8,8	100

Die Kalium-Auswaschung (Tabelle 11) auf Kalklehm und Lehm ist insgesamt gesehen relativ gering (7 bis 9 kg K/ha und Jahr) bei einem K-Gehalt des Sickerwassers von 2 bis 3 mg K/l. Drei Viertel der gesamten K-Auswaschung fallen in die vegetationslose Jahreszeit. Auf Sandböden betragen die Auswaschungswerte ca. 28 kg K/ha und Jahr und verteilen sich ziemlich gleichmäßig über alle vier Quartale hinweg (20 bis 31%) bei einem hohen K-Gehalt des Sickerwassers von 6 bis 7 mg/l.

Die Höhe der K-Auswaschung wird demnach vornehmlich durch die Bodeneigenschaften (K-Vorrat, Sorptionsvermögen, K-Dynamik) bestimmt.

Tabelle 12

K-Düngung und K-Auswaschung

(nach PFAFF, ♂ aus 15jährigem Versuch)

Jährliche K-Gabe kg/ha: mineralisch 159; Stallmist 97

Bodenart	pH (KCl)	Ton %	Bodenkennwerte		Auswaschung kg K/ha und Jahr	
			DL mg K ₂ O je 100 g B.	ohne mineralische Düngung	NPK + Stallmist	
Lehm C	7	25	47	19	19	—
Sand A, E	7	6	14	15	22	37
Sand D	4	9	13	17	23	29

Die HCO_3^- bzw. SO_4^{2-} -Auswaschung ist auf allen Böden sehr hoch, demgegenüber liegt die Cl^- -Auswaschung insgesamt, besonders aber aus Kalklehm und Lehm, wesentlich niedriger. Drei Viertel dieser untersuchten Anionen werden aus den Lehmböden im Herbst/Winter, aus dem Sandboden dagegen wiederum die Hälfte während der Vegetationszeit, der Rest im Herbst/Winter ausgewaschen.

III. Bedeutung der Mineralstoffauswaschung im Zeichen des Umweltschutzes

Jede Art von Nährstoffauswaschung stellt für den rechnenden Landwirt einen ausgesprochenen Verlust dar, kann darüber hinaus aber auch zu einer Belastung des Grundwassers (Trinkwassers) bzw. der Oberflächengewässer (durch Beschleunigung der Eutrophierung) führen. Nitrate und Phosphate sind die wesentlichsten, die Gewässer belastenden Mineralstoffe, während andere Ionen, wie K, Ca, Mg, SO_4 und Cl kaum zu Beanspruchungen führen (ANBACHER 1972).

1. Im *Trinkwasser befindliches Nitrat* kann in Überdosis ($> 5 \text{ g}$ beim Erwachsenen) zu Durchfall, Krämpfen und Kreislaufstörungen führen; dagegen kann Nitrit schon in wesentlich geringeren Mengen (beim Erwachsenen $0,5 \text{ g}$, bei Kleinkindern schon sehr viel früher) Vergiftungssymptome hervorrufen. Das Hämoglobin (= Ferro-Protoporphyrin + Globin) ist bekanntlich für den Sauerstofftransport des Blutes zuständig; das Eisen liegt dabei in zweiwertiger Form vor. Nitrit ist nun ein starkes Oxidationsmittel und bewirkt somit die Oxidation von Hämoglobin (Fe^{2+}) \rightarrow Hämoglobin (Fe^{3+}) oder auch Methämoglobin genannt. Zum Unterschied vom Erwachsenen fehlt dem Säugling das Enzym Methämoglobin-Reduktase; durch An- bzw. Subazidität im Magen bzw. Dünnarm kommt es dann zu einer Verstärkung der Reduktion von Nitrat zu Nitrit und damit zu einer Behinderung bzw. Blockierung des Sauerstofftransportes (Zyanose, Blausucht). Der Grund, weshalb man dem Nitrat im Trinkwasser seit langem besonderes Augenmerk schenkt, ist die Tatsache, daß früher, als vorwiegend mit Abfallstoffen der tierischen Produktion gedüngt wurde, hohe Nitratwerte mit größter Sicherheit auf Verunreinigungen (hoher Keimgehalt und so weiter) schließen ließen.

2. In *Oberflächengewässern* führen höhere Nitrat-, insbesondere aber Phosphatgehalte zu einer beschleunigten Eutrophierung. Eutrophierung ist an sich ein völlig natürlicher Alterungsprozeß, der Übergang vom nährstoffarmen zum nährstoffreichen Gewässer. Üppiges Pflanzenwachstum hat erhöhte Produktion an Sinksstoffen zur Folge, bei deren Abbau zunehmende Sauerstoffverknappung und damit Übergang zu anaeroben Verhältnissen (\rightarrow Fäulnis) eintritt. Die meisten Oberflächengewässer sind nitratreich; erst durch ansteigenden Phosphatgehalt kommt es schließlich zum „Umkippen“.

Daher hat man der *Phosphat-Fracht* der Bäche und Flüsse, die in stehende Gewässer münden, in den letzten Jahren besonderes Augenmerk geschenkt. Von verschiedenen Seiten wurde oft unter Hinweis auf den in den letzten Jahren stark angestiegenen Düngerverbrauch die Landwirtschaft in erster Linie für die Eutrophierung der Gewässer und die Anreicherung von Nitrat im Grundwasser verantwortlich gemacht.

Was den *Anstieg des Stickstoffverbrauches* anlangt, so ist zu bedenken, daß erst eine optimale Versorgung der Kulturpflanzen mit Stickstoff entsprechend hohe Erträge zustande gebracht hat. Eine unter den jeweiligen Standortbedingungen zum richtigen Zeitpunkt verabreichte mineralische Stickstoffdüngung läßt aber eine hohe Ausnutzung und nur sehr geringe Auswaschungsverluste erwarten. Sehr viel schwieriger ist es dagegen, die Auswaschung des mineral-

isierten Stickstoffs aus dem Bodenverrat bzw. der zugeführten organischen Düngung (Stallmist usw.) zu kontrollieren. Damit soll freilich nicht gesagt sein, daß örtlich überhöhte Stickstoffmengen, insbesondere zu Sonderkulturen gegeben, nicht unter entsprechenden Standortbedingungen (lockere Schotterböden, tief rigolte Weinbergböden usw.) zu erheblichen Nitratgehalten im Grundwasser führen können. Die Brunnen an der Mosel sind ein häufig zitiertes Beispiel! Die landwirtschaftliche Beratung sollte aber Fälle, wo nachweislich verantwortungslos gehandelt wird, rücksichtslos anprangern. Fahrlässigkeit wird man zwar nie ganz vermeiden können, sie sollte aber stets als solche auch geahndet werden.

Was die *mineralischen P-Dünger* anlangt, so ist deren Anwendung im Hinblick auf eine Erhöhung des P-Gehaltes des Grundwassers bzw. der Oberflächengewässer völlig gefahr- und bedeutungslos. Selbst voll wasserlösliche Phosphate gehen bekanntlich schon nach wenigen Tagen in stabilere Bodenphosphate über. Landwirtschaftlich genutzte Böden sind vielmehr die besten natürlichen Phosphatfilter, zumal der Unterboden meistens phosphatarms ist und dadurch die Sorption des Phosphates noch erhöht wird. Darüber hinaus wird nur ein sehr geringer Teil an Phosphat durch Erosion abtransportiert.

Nach den neuesten Schätzungen dürfte der Anteil der Landwirtschaft an der P-Fracht durch mineralische und organische Düngung einschließlich Erosion in der Regel 10 % kaum übersteigen. Demgegenüber steht eine sehr hohe Belastung durch Wohnsiedlungsabwasser (3 g P je Einwohner und Tag durch menschlichen P-Stoffwechsel und P-haltige Reinigungs- bzw. Waschnetze) \approx ca. 1 kg P je Einwohner und Jahr). Eine Beseitigung dieses Phosphors ist aber nur über eine sogenannte dritte Reinigungsstufe der Abwässer, und zwar durch chemische Ausfällung möglich.

3. Welche Folgerungen ergeben sich daraus für eine umweltbewußte Landwirtschaft?

Eine gewisse Belastung der Oberflächengewässer durch die Landwirtschaft in Form von Nitrat und in sehr geringem Umfange auch durch Phosphat ist zwangsläufig gegeben; die Landwirtschaft arbeitet ja schließlich auf einem mineralstoffhaltigen Boden. Diese Mineralstoffverluste können aber durch verantwortungsbewußte Wirtschaftsweise sehr klein gehalten werden über verschiedene Maßnahmen, wie z. B. knappe Bemessung der Stickstoffdüngung im Herbst, optimale Frühjahrs-N-Gabe nach Zeit, Höhe und Stickstoffform unter Berücksichtigung der Mineralisationsrate des jeweiligen Standortortes. Durch Zugabe von Stroh kann eine zeitweilige Blockierung des Stickstoffs erreicht, durch Anbau von überwinternden Zwischenfrüchten bzw. Übergang zu Grünlandbewirtschaftung die Auswaschung ganz erheblich vermindert werden.

Im ganzen betrachtet kommt dem landwirtschaftlich genutzten Boden eine Entgiftungsfunktion in einer umweltbewußten Gesamtwirtschaft zu.

Zusammenfassung

Die Wanderung der Pflanzennährstoffe hängt ab von deren Mobilität und der Wasserbewegung im Boden. Wenn die Feldkapazität eines Bodens überschritten wird, kommt es zur Sickerwasserbildung und damit zum Abtransport der Mineralstoffe in das Grundwasser.

Langjährige Lysimeterversuche in Weißenstephan wurden verglichen mit Ergebnissen aus der Literatur und brachten folgende Resultate: Die Höhe der Sickerwasserbildung hängt ab von den Niederschlägen und den Bodeneigen-

schaften (insbesondere der Wasserkapazität). Durch reinen Sandboden versickern mehr als die Hälfte, durch Lehmböden nur ein Drittel der gefallenen Niederschläge; der Sickerwasseranfall und damit auch die Mineralstoffauswaschung mittlerer Böden ist vor allem in der vegetationlosen Jahreszeit besonders groß. Die Stickstoffauswaschung hängt ab von der Sickerwassermenge und dem natürlichen Stickstoffgehalt des Bodens; drei Viertel der Jahresmenge (60 bis 80 kg/ha) gehen im Herbst/Winter verloren. Durch optimale und zeitlich richtig verarbeitete mineralische Stickstoffdüngung wird die N-Auswaschung nur sehr wenig erhöht. Die P-Auswaschung ist außerordentlich gering (in der Regel < 1 kg P/ha und Jahr) und wird durch mineralische P-Düngung nicht erhöht. Die Kaliumauswaschung hängt in erster Linie von den Bodeneigenschaften ab und beträgt aus Lehmböden 7 bis 9 kg K, aus Sandböden bis zu 28 kg K/ha. Die K-Düngung hat kaum Einfluß auf die K-Auswaschung. Sehr hoch ist die Ca-Auswaschung: 325 bis 430 kg Ca/ha und Jahr, abhängig von Sickerwassermenge und Kalkgehalt des Bodens. Calcium und Magnesium werden ebenfalls vornehmlich im Herbst/Winter ausgewaschen. Die Auswaschung an Sulfat beträgt 350 bis 360 kg/ha, die an Carbonat 520 bis 650 kg HCO₃⁻; wesentlich geringer sind die ausgewaschenen Chloromengen.

Die Mineralstoffauswaschung ist für die Landwirtschaft ein Verlust und kann zur Belastung von Grundwasser und Oberflächengewässer durch Nitrat und nur in sehr geringem Maße durch Phosphat führen. Sehr viel weniger als die mineralische Düngung kann die Auswaschung des aus dem Bodenvorrat bzw. der zugeführten organischen Düngung mineralisierten Stickstoffs kontrolliert werden; die sicherste Maßnahme ist eine produktiver Stickstoffentzug durch hohe Pflanzenerträge. Der Boden hat eine wichtige Entgiftungsfunktion in einer umweltbewußten Wirtschaft.

Summary

Migration of plant nutrients depends on their mobility and on the movement of water in soils. If field-capacity of a soil is exceeded, downward-transport of water and mineral-nutrients to the groundwater takes place.

Longtime lysimeter-experiments at Weihenstephan were compared with results from the literature and brought following conclusions: The rate of leaching depends on the amount of rain and the properties of soils (especially water-capacity). In pure sand more than half, in loam only one third of rain-water was lost. In most of the soils leaching is very high in the non-vegetation-period.

The amount of leached N depends on percolation-rate and on original N-content of the soil. Three quarters of the annual sum (60—80 kg N/ha.) are lost in autumn and winter. Optimal mineral N-fertilization concerning the amount and time of application, increases the rate of N-leaching only to a very little extent. P was leached out at very small amounts (less than 1 kg P/ha. and year) and is not influenced by rate of P-fertilization. K-leaching depends mainly on soil properties, that means rates of 7—9 kg/ha. from loam and up to 28 kg/ha. from sand respectively. K-fertilization has no effect on the amount of leached potassium. Ca-losses are very high (325—430 kg/ha and year) and depend on percolationrate and Ca-content of the soil. Ca und Mg moved down mainly in autumn and winter. Sulphate was leached out at about 350—360 kg/ha., carbonate (HCO₃⁻) at about 520—650 kg/ha. and year. Leaching rate of chloride is not so high.

Every sort of leaching and erosion means losses to agriculture and contaminates potentially ground- and surface-water respectively, especially by nitrate and to a very little extent also by phosphate. N-leaching from mineral fertilization is easier to control than that of natural mineralisation of soils or organic manure. The best means for preventing N-leaching is to improve nitrogen uptake by plants. Soil is a very important factor for decontamination in ecological systems.

Literatur

- AMBERGER, A.: Belastung und Entlastung der Oberflächengewässer durch die Landwirtschaft. Landw. Forschung 27, 1. SH. 13—24, 1972.
- ERICSSON, A. E. und B. G. ELLIS: The Nutrient Content of Drainage Water from agricultural Land. Michigan Agric. Exp. Sta. Res. Bull. 31, 1971.
- HOFFMANN, G.: Die Versickerung von Wasser und Nährstoffen in drei verschiedenen Bodenarten nach Messungen am Lysimeter des Agrarkulturchemischen Institutes Weihenstephan. Bayer. Landw. Jahrbuch 44, 3. SH. 258—263, 1967.
- JUNG, J. und J. DRESSEL: Ein zehnjähriger Lysimeterversuch über das Verhalten von Magnesium im Boden und in der Pflanze. Z. Acker- u. Pflanzenbau 130, 122—136, 1969.
- PEAFF, C.: Das Verhalten des Stickstoffs in langjährigen Lysimeterversuchen. Z. Acker- u. Pflanzenbau 117, 77—93, 1963.
- PEAFF, C.: Das Verhalten der Phosphorsäure und der Alkalien im Boden nach langjährigen Lysimeterversuchen. Z. Acker- u. Pflanzenbau 117, 94—113, 1963.
- PEAFF, C.: Über die Auswaschung von Calcium, Magnesium, Chlorid und Sulfat aus dem Boden (Lysimeterversuch). Z. Acker- u. Pflanzenbau 117, 117—128, 1963.
- SCHWIEGER, P.: Einfluß von Witterung, Bodeneigenschaften und pflanzenbaulichen Maßnahmen auf Sickerwasserbildung und Mineralstoffauswaschung im Weihenstephaner Lysimeter. Diss. TU-München-Weihenstephan 1973.
- VÖNDEL, A.: Der Versuch einer Nährstoffbilanz am Beispiel verschiedener Lysimeterböden. Z. Acker- u. Pflanzenbau 123, 153—188, 1966.
- VÖNDEL, A.: Nährstoffeinwaschung in den Unterboden und Düngestickstoffumsatz, dargestellt an Kleinlysimeterversuchen. Z. Acker- u. Pflanzenbau 132, 207—226, 1976.

(Manuskript eingelangt am 12. Februar 1973)

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. Anton AMBERGER und Dr. Paul SCHWIEGER, Institut für Pflanzenernährung der Technischen Universität München, D-805 Freising-Weihenstephan, BRD