

Nährstoffverluste

aus landwirtschaftlichen Betrieben
mit einer Bewirtschaftung nach
guter fachlicher Praxis

Nährstoffverluste

aus landwirtschaftlichen Betrieben mit einer Bewirtschaftung nach guter fachlicher Praxis

Arbeitsgruppe:

Dr. Gerhard Baumgärtel, Landwirtschaftskammer Hannover

Dr. Thomas Ebertseder, derzeit Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Dr. Reinhold Gutser, Technische Universität München, Weihenstephan

Ulrich Hege, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Dr. Jörg Hüther, Hess. Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und
Verbraucherschutz

Dr. Frank Lorenz, LUFA Nord-West

Dr. Kristian Orlovius, K+S KALI GmbH

Joachim Pollehn, Düngekalk-Hauptgemeinschaft

Dr. Dietrich Pradt, Bundesarbeitskreis Düngung (BAD)

Dr. Martin Rex, Thomasdünger GmbH, Landwirtschaftliche Beratung

Dr. Hans-Peter Wodsak, Hydro Agri GmbH & Co. KG

Herausgeber: Bundesarbeitskreis Düngung (BAD)
Karlstraße 21, 60329 Frankfurt/Main
Tel.: (0 69) 25 56-12 65, Fax: (0 69) 25 56-12 98

Redaktion: Dr. Hagen Trott, BAD, Frankfurt/Main

November 2003

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Definition	3
3	Methodik und Abschätzung unvermeidbarer Nährstoffverluste	5
3.1	Stickstoff	5
3.1.1	Auswaschung	6
3.1.1.1	Standort	6
3.1.1.2	Zusätzliche Verluste aus Ackerflächen	6
3.1.2	Ammoniakverluste	9
3.1.3	Sonstige Verluste	10
3.1.4	Denitrifikationsverluste bei Weidehaltung	10
3.1.5	Orientierungswerte für betriebstypabhängige unvermeidbare N-Verluste bei nachhaltiger Pflanzenernährung und Bodenfruchtbarkeit	11
3.2	Phosphor	14
3.2.1	Oberflächenabtrag	14
3.2.2	Verlagerung aus dem durchwurzelten Bodenraum	15

3.3 Kalium	17
3.3.1 Standort	17
3.3.2 Zusätzliche Verluste aus Ackerflächen	18
3.4 Kalk	19
3.5 Magnesium	21
3.6 Schwefel	22
3.6.1 Standort	23
3.6.2 Zusätzliche Verluste aus Ackerflächen	23
Literaturhinweise Stickstoff	26
Literaturhinweise Phosphor	28
Literaturhinweise Kalium	31
Literaturhinweise Kalk, Magnesium, Schwefel	33

Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

Tabelle 1:	Unvermeidbare N-Auswaschung bei standortspezifisch optimaler Bewirtschaftung nach guter fachlicher Praxis: Ackerland: ohne Kulturen mit erhöhtem Verlustpotenzial und ohne Tierhaltung; Grünland: mit mittlerer Tierhaltung von ca. 1,5 GV/ha	6
Tabelle 2:	Anstieg der standortspezifisch unvermeidbaren N-Auswaschung aufgrund der N-Anreicherung des Bodens durch langjährige Ausbringung von Wirtschaftsdüngern	7
Tabelle 3:	Anstieg der standortspezifisch unvermeidbaren N-Auswaschung aufgrund der N-Anreicherung des Bodens durch langjährige Ausbringung von Sekundärrohstoffdüngern.....	8
Tabelle 4:	Anstieg der standortspezifisch unvermeidbaren N-Auswaschung aufgrund des Anbaus von Pflanzenarten mit kulturspezifisch hohen positiven N-Salden (Raps, Körnerleguminosen, Feldgemüse).....	8
Tabelle 5:	Unvermeidbare Ammoniakverluste aus der Tierhaltung (Summe aus Stall, Lagerung, Ausbringung und kurzfristigen N-Verlusten nach der Ausbringung).....	9
Tabelle 6:	Unvermeidbare Ammoniakverluste nach Ausbringung N-haltiger Sekundärrohstoffdünger mit höheren Ammoniumgehalten	10
Tabelle 7:	Orientierungswerte für betriebstypabhängige unvermeidbare N-Verluste bei nachhaltiger Pflanzenernährung und Bodenfruchtbarkeit im mehrjährigen Mittel.....	11

Tabelle 8: Unvermeidbare P-Verluste durch Auswaschung in landwirtschaftlichen Betrieben auf Böden in Gehaltsstufe 'C'	16
Tabelle 9: Unvermeidbare K-Auswaschung für Ackerflächen (Böden in Gehaltsstufe 'C' sowie Düngung nach Abfuhr)	17
Tabelle 10: Zusätzliche K-Verluste bei Herbst-Ausbringung von wirtschaftseigenen Düngern oder Sekundärrohstoffdüngern bzw. Ernterückständen (in % der im Herbst ausgebrachten K-Menge)	18
Tabelle 11: Unvermeidbare Kalkverluste durch Neutralisation und Auswaschung in Abhängigkeit von der Bodennutzung und der Niederschlagsmenge auf Böden in pH-Klasse 'C'	19
Tabelle 12: Unvermeidbare Mg-Auswaschung auf Böden der Gehaltsklasse 'C'	21
Tabelle 13: Unvermeidbare S-Auswaschung bei standortspezifisch optimaler Bewirtschaftung nach guter fachlicher Praxis: Ackerland: ohne Tierhaltung und ohne Einsatz von Sekundärrohstoffdüngern; Grünland: mit mittlerer Tierhaltung von ca. 1,5 GV/ha	23
Tabelle 14: Anstieg der standortspezifisch unvermeidbaren S-Verluste aufgrund der S-Anreicherung des Bodens durch langjährige Ausbringung von Wirtschaftsdüngern	24
Tabelle 15: Anstieg der standortspezifisch unvermeidbaren S-Verluste aufgrund der S-Anreicherung des Bodens durch langjährige Ausbringung von Sekundärrohstoffdüngern.....	24

Abbildung 1: Beispiel für die Ermittlung der Orientierungswerte für
unvermeidbare N-Verluste im rinderhaltenden Acker-
baubetrieb (Datenbasis Tabelle 7) 13

1. Einleitung

Im Gegensatz zu anderen Wirtschaftsbereichen findet die landwirtschaftliche Produktion in der Natur und damit weitgehend in einem offenen System statt. Daraus resultiert zwangsläufig, dass Nährstoffverluste auftreten, die auch bei guter fachlicher Praxis nicht vermieden werden können. Dies gilt für alle Bewirtschaftungsformen und Produktionsintensitäten. Selbst bei unbewirtschafteten, naturbelassenen Flächen treten Nährstoffverluste auf. Da es keine verlustfrei arbeitende Landwirtschaft gibt, geht es unter Umweltsichtspunkten darum, Nährstoffverluste im Rahmen der gegebenen Standort- und Bewirtschaftungsbedingungen zu minimieren.

Obwohl die „Unvermeidbaren Nährstoffverluste“ seit längerem in der fachlichen Diskussion stehen und mit dem Inkrafttreten der Düngeverordnung 1996 und der damit verbundenen Erstellung des Vergleichs von Nährstoffzu- und -abfuhr in landwirtschaftlichen Betrieben eine zunehmende Bedeutung erhalten haben, gibt es noch keine allgemein verbreitete Definition und Kalkulationsgrundlage zur Ermittlung der unvermeidbaren Nährstoffverluste.

Um zu diesem wichtigen Thema ein möglichst breit getragenes Verständnis herbeizuführen, wurde auf Initiative des Bundesarbeitskreis Düngung (BAD) eine entsprechende Arbeitsgruppe aus Mitgliedern des Verbandes der Landwirtschaftskammern (VLK), der Landesanstalten, der Wissenschaft, der Administration sowie dem BAD gegründet. Ziel war es, eine Definition der „Unvermeidbaren Nährstoffverluste“ vorzunehmen sowie eine einfach verwendbare, gleichzeitig aber fachlich gut begründete und methodisch nachvollziehbare Kalkulationsgrundlage zur Ermittlung der Größenordnung unvermeidbarer Verluste zu erarbeiten, um das Ergebnis anschließend zur Diskussion zu stellen. Dabei wurden alle wesentlichen standörtlichen Gegebenheiten mit Einfluss auf die Nährstoffverluste berücksichtigt. Die Kal-

kulation muss zwangsläufig pauschalierend erfolgen und kann somit nicht immer alle spezifischen Besonderheiten des Betriebes abdecken. Die ermittelten Werte für unvermeidbare Nährstoffverluste sind daher als Orientierungswerte beispielsweise für Berater oder Landwirte zu verstehen. Darüber hinaus soll die vorgeschlagene Methodik zu einer sachlich begründeten Einheitlichkeit bei der Ermittlung der unvermeidbaren Nährstoffverluste beitragen. Die einzelnen Kapitel sind jeweils in Form eines Schätzrahmens aufgebaut, der eine rasche und einfache Kalkulation unvermeidbarer Nährstoffverluste im Betrieb ermöglicht.

Mit der vorliegenden Broschüre werden die Ergebnisse der Arbeitsgruppe für die Nährstoffe Stickstoff, Phosphat, Kalium, Kalk, Magnesium und Schwefel vorgestellt.

2. Definition

Der Begriff „**Unvermeidbare Nährstoffverluste**“ wird wie folgt definiert:

„Nährstoffverluste sind unvermeidbar, wenn sie trotz der Ausnutzung aller im Sinne einer guten fachlichen Praxis verfügbaren pflanzenbaulichen Maßnahmen zur Erzielung optimaler Erträge und ausreichender Produktqualitäten auftreten.“

Damit wird der Definition des Begriffes Nachhaltigkeit der Brundtland-Kommission entsprochen, wonach zur Sicherung einer nachhaltigen Entwicklung ökologische, ökonomische und soziale Aspekte in Einklang gebracht werden müssen. Mit dieser Definition wird auch dem wirtschaftlichen Interesse des Landwirts, auf seinen Flächen mit Hilfe eines optimierten Nährstoffeinsatzes optimale Erträge und marktkonforme Qualitäten zu erzeugen, bewusst Rechnung getragen.

Eine suboptimale Düngung hat sich in vielen Versuchen als nicht geeignet zur Reduzierung von Nährstoffverlusten erwiesen. So verringert beispielsweise eine suboptimale N-Düngung die Nitratauswaschung kaum, hat jedoch deutliche Ertragsrückgänge und damit finanzielle Einbußen zur Folge.

Festlegungen von Nährstoffen im Boden sind keine Verluste im Sinne obiger Definition.

Bestimmte Bewirtschaftungsbedingungen können zu einer Erhöhung der unvermeidbaren Verluste führen. So steigen beispielsweise die unvermeidbaren N-Verluste mit steigenden Ausbringungsmengen organischer Dünger auch bei Beachtung aller Regeln der guten fachlichen Praxis an und können aus Sicht des Umweltschutzes ein nicht akzeptables Niveau erreichen. Um diesem Aspekt Rechnung zu tragen, verständigte sich die Arbeitsgruppe auf eine Obergrenze für die Orientierungswerte, die aus Sicht einer

nachhaltigen Landwirtschaft als tolerable Nährstoffverluste verstanden werden können.

3. Methodik und Abschätzung unvermeidbarer Nährstoffverluste

3.1 Stickstoff

Unvermeidbare N-Verluste durch Landwirtschaft sind in hohem Maße abhängig von den Standortvoraussetzungen (Boden, Klima) und der Bewirtschaftung (Tierhaltung, Fruchtfolge, Düngung). Bei der Düngung ist neben der kurzfristigen insbesondere auch die langfristige Wirkung über die Veränderung des N-Potenzials der Böden zu berücksichtigen.

Wesentliche N-Verluste entstehen durch Auswaschung und Ammoniakemissionen. Verluste an N_2 , NO_x oder N_2O sind betriebsspezifisch schwer zu erfassen und werden den eingetragenen N-Mengen über Deposition und asymbiotischer N-Fixierung gleichgesetzt. Bei Weidehaltung muss mit erhöhten Denitrifikationsverlusten gerechnet werden (siehe 3.1.4).

Die nachfolgenden Positionen 3.1.1 bis 3.1.4 beinhalten die Abschätzung systembedingter Einzel- und Gesamtverluste. Position 3.1.5 enthält Orientierungswerte für betriebstyp- und standortabhängige Gesamtverluste auf Basis einer nachhaltig optimalen, am Nährstoffbedarf ausgerichteten Ernährung der Pflanzen.

3.1.1 Auswaschung

3.1.1.1 Standort

Tabelle 1: Unvermeidbare N-Auswaschung bei standortspezifisch optimaler Bewirtschaftung nach guter fachlicher Praxis:

Ackerland: ohne Kulturen mit erhöhtem Verlustpotenzial und ohne Tierhaltung; Grünland: mit mittlerer Tierhaltung von ca. 1,5 GV/ha

Bodennutzung	Ackerzahl	N-Auswaschung (kg/ha und Jahr)		
		Niederschlag (mm)		
		< 600	600-750	> 750
Acker	< 45	30	35	40
	45-65	25	30	35
	66-85	15	20	25
	> 85	5	10	15
Grünland	- Grundwasserbeeinflusste Böden		30	
	- Übrige Böden		20	

3.1.1.2 Zusätzliche Verluste aus Ackerflächen

Zusätzliche Verluste treten als Folge bewirtschaftungsbedingter N-Anreicherung der Böden und spezifischer Düngungsbedürfnisse einzelner Kulturen auf. Sie werden durch Zuschläge zu der unvermeidbaren Auswaschung nach Tabelle 1 berücksichtigt. Die Kalkulation schließt Intensitäten der organischen Düngung in der Vergangenheit mit ein, die nach heutiger Auffassung und Rechtslage nicht der guten fachlichen Praxis entsprechen.

Hinweis: In Tabelle 2 werden N-Verluste in Abhängigkeit von der N-Ausscheidung bzw. dem GV-Besatz angegeben, da diese Größen aus den Beratungsunterlagen zur Düngeverordnung entnommen werden können.

Der Zuschlag für N-Verluste in den Tabellen 2 und 3 unterscheidet sich, da die N-Ausscheidung aufgrund der gasförmigen N-Verluste in Stall und Lager nicht der mit Wirtschaftsdüngern ausgebrachten N-Menge entspricht.

a) Verluste aufgrund langjähriger Ausbringung von Wirtschaftsdüngern (Verluste aus dem N-Vorrat des Bodens)

Auszugehen ist vom durchschnittlichen Viehbesatz über einen längeren Zeitraum (ca. 10 bis 20 Jahre).

Tabelle 2: Anstieg der standortspezifisch unvermeidbaren N-Auswaschung aufgrund der N-Anreicherung des Bodens durch langjährige Ausbringung von Wirtschaftsdüngern

N-Ausscheidung (kg N/ha und Jahr)	< 50	50-100	101-150	151-200	201-250	> 250
Tierhaltung (ca. GV/ha)	< 0,5	0,5-1,0	1,1-1,5	1,6-2,0	2,1-2,5	> 2,5
Zuschlag für N-Verluste (% der N-Verluste aus Tab. 1)	0	10	20	30	45	60

b) Verluste aufgrund langjähriger Ausbringung sonstiger organischer Dünger (Verluste aus dem N-Vorrat des Bodens)

Auszugehen ist von durchschnittlichen jährlichen Ausbringmengen an organischen Düngern über einen längeren Zeitraum (ca. 10 bis 20 Jahre). Gelegentliche Applikationen, die im Schnitt der Jahre 50 kg N/ha und Jahr nicht übersteigen, führen zu keiner wesentlichen Erhöhung des N-Gehalts von Böden.

Tabelle 3: Anstieg der standortspezifisch unvermeidbaren N-Auswaschung aufgrund der N-Anreicherung des Bodens durch langjährige Ausbringung von Sekundärrohstoffdüngern

N-Ausbringung (kg N/ha und Jahr)	< 50	50-100	101-150	151-200	> 200
Zuschlag für N-Verluste (% der N-Verluste aus Tab. 1)	0	20	30	40	60

c) Verluste aufgrund der Fruchtfolge

Tabelle 4: Anstieg der standortspezifisch unvermeidbaren N-Auswaschung aufgrund des Anbaus von Pflanzenarten mit kulturspezifisch hohen positiven N-Salden (Raps, Körnerleguminosen, Feldgemüse)

Anteil von Raps, Körnerleguminosen, Feldgemüse* in der Fruchtfolge (%)	< 20	20-45	46-70	> 70
Zuschlag für N-Verluste (% der N-Verluste aus Tab. 1)	0	30	50	80

* gilt nicht für Betriebe mit überwiegendem Feldgemüseanbau

3.1.2 Ammoniakverluste

a) Verluste aus der Tierhaltung

Tabelle 5: Unvermeidbare Ammoniakverluste aus der Tierhaltung (Summe aus Stall, Lagerung, Ausbringung und kurzfristigen N-Verlusten nach der Ausbringung)

Tierart	Haltung	NH ₃ -N-Verluste (% der N-Ausscheidung)		
		Gülle		Stallmist
		Standardtechnik	bestmögliche Lagerungs- und Ausbringtechnik	
Rinder		30	25	35
Schweine	Mast	50	35	45
	Zucht	40	30	40
Legehennen	Käfighaltung mit Kotband-trocknung			35
	Volierenhaltung			40
	Bodenhaltung			55
Masthähnchen				45
Puten, Enten				55

b) Verluste aus der Ausbringung von N-haltigen Sekundärrohstoffdüngern mit höheren Ammoniumgehalten

Höhere Ammoniumgehalte sind dann gegeben, wenn mehr als 20 % des Gesamt-N als NH₄-N vorliegen.

Tabelle 6: Unvermeidbare Ammoniakverluste nach Ausbringung N-haltiger Sekundärrohstoffdünger mit höheren Ammoniumgehalten

N-Ausbringung (kg N/ha und Jahr)	< 50	50-100	101-150	151-200	201-250	> 250
NH₃-Verluste (kg N/ha und Jahr)	5	10	15	20	25	30

c) Verluste aus der Mineraldüngung (kurzfristig nach der Ausbringung)

Im Mittel sind **2 % des Mineraldüngeraufwandes** anzusetzen.

3.1.3 Sonstige Verluste

Pauschal werden **4 kg N/ha und Jahr** berücksichtigt (z. B. N-Verluste aus Pflanzenmaterial, besonders bei Mulchwirtschaft).

3.1.4 Denitrifikationsverluste bei Weidehaltung

Bei Weidehaltung treten höhere Denitrifikationsverluste als in anderen Landnutzungssystemen (Acker, schnittgenutztes Grünland) auf, so dass folgende zusätzliche Austräge in Abhängigkeit von Tierbesatzdichte und Nutzungshäufigkeit als unvermeidbar angesetzt werden können:

niedrige Nutzungsintensität: **20 kg N/ha und Jahr**

hohe Nutzungsintensität: **40 kg N/ha und Jahr**

3.1.5 Orientierungswerte für betriebstypabhängige unvermeidbare N-Verluste bei nachhaltiger Pflanzenernährung und Bodenfruchtbarkeit

Tabelle 7: Orientierungswerte für betriebstypabhängige unvermeidbare N-Verluste bei nachhaltiger Pflanzenernährung und Bodenfruchtbarkeit im mehrjährigen Mittel

Orientierungswerte für unvermeidbare N-Verluste (kg N/ha und Jahr)					
Nutzung Standortgruppen (Einteilung nach Tab. 1, N-Auswaschung)	Viehlose Betriebe *	Viehhaltende Betriebe bzw. Betriebe mit äquivalenter N-Zufuhr über Sekundärrohstoffdünger			
		N-Ausscheidung ≤ 100 kg/ha u. Jahr		N-Ausscheidung > 100 kg/ha u. Jahr	
		Rind	Schwein und Geflügel	Rind	Schwein und Geflügel
Ackerland					
I (5 bis 15 kg N/ha)	25	60	70	80	90
II (20 bis 30 kg N/ha)	40	75	85	95	105
III (35 bis 40 kg N/ha)	55	90	100	110	120
Grünland**					
überwiegend Schnitt- nutzung***	--	60		90	
überwiegend Weide- nutzung****	--	80		130	

* gilt nicht für Betriebe mit überwiegendem Feldgemüseanbau

** auf Grünland überwiegen NH₃- und Denitrifikationsverluste (Weide, siehe Kapitel 3.1.4)

*** mehr als 60 % Schnittnutzung

**** mehr als 40 % Weidenutzung

Basis der Ermittlung standort- und betriebstypabhängiger Orientierungswerte für unvermeidbare Gesamt-N-Verluste ist die gute fachliche Praxis, die eine optimale Produktionsintensität bezüglich Ertrag und monetärem Betriebserfolg gewährleistet. In Abhängigkeit von Wirtschaftsweise und Tierhaltung können sich im Einzelbetrieb u. U. hohe unvermeidbare N-Verluste ergeben. Aus Sicht einer bedarfsgerechten Pflanzenernährung und zur Aufrechterhaltung einer optimalen Bodenfruchtbarkeit sind diese, wenn auch nach guter fachlicher Praxis unvermeidbar, aus ökologischen Gründen keinesfalls erwünscht.

Ursachen für hohe unvermeidbare Verluste sind neben unausgewogenen Wirtschaftsweisen häufig höhere Tierdichten. Anzustreben sind ausgeglichene Nährstoffsalden für Phosphor oder Kalium (Zufuhr durch Wirtschaftsdünger - Abfuhr mit Ernteprodukten). Diese werden in Abhängigkeit von Fruchtfolge und Tierart in der Regel bei einer N-Ausscheidung von 120 bis 150 kg/ha und Jahr erreicht (Annahme: Verwertung der Wirtschaftsdünger auf betriebseigenen Flächen). Damit stehen den Pflanzen aus wirtschaftseigenen Düngern N-Mengen von 100 bis 120 kg/ha und Jahr zur Verfügung, so dass für die mineralische Ergänzungsdüngung im Sinne einer bedarfsgerechten Nährstoffversorgung ausreichend Steuerungsmöglichkeiten zur Optimierung des Pflanzenwachstums verbleiben.

Die in Tabelle 7 aufgeführten Orientierungswerte stellen unter diesen Gesichtspunkten Obergrenzen für unvermeidbare N-Verluste im Einzelbetrieb dar.

Aus den in Tabelle 7 enthaltenen Basisdaten kann der spezifische Orientierungswert für den Einzelbetrieb abgeleitet werden (Abbildung 1, Beispiel für rinderhaltende Ackerbaubetriebe).

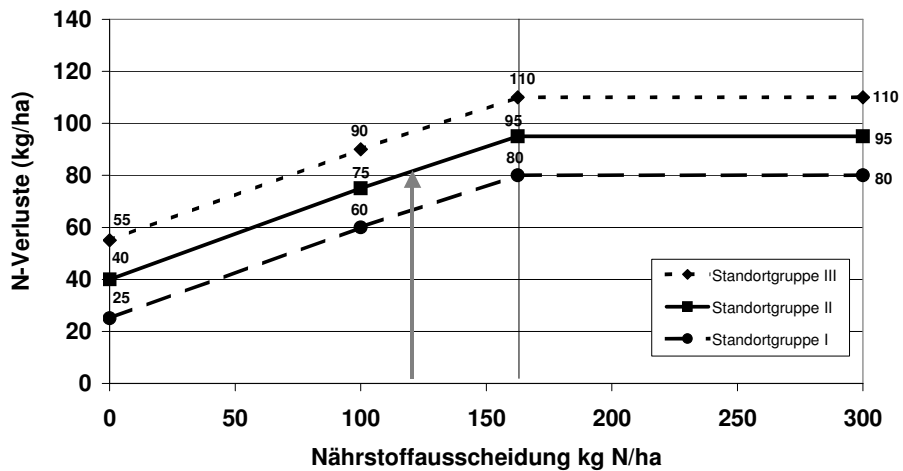


Abbildung 1: Beispiel für die Ermittlung der Orientierungswerte für unvermeidbare N-Verluste im rinderhaltenden Ackerbaubetrieb (Datenbasis Tabelle 7)

3.2 Phosphor

Die mengenmäßig stärksten Phosphorverluste entstehen durch Oberflächenabtrag: in partikulärer Form als erosiver Bodenabtrag oder in gelöster Form als Oberflächenabfluss.

Daneben spielt die vertikale Verlagerung aus dem durchwurzeltten Bodenraum eine Rolle: in gelöster Form durch Auswaschung und Austrag mit dem Grund- und Dränwasser sowie in partikulärer Form durch Verlagerung in Grobporen und Schrumpfrissen.

3.2.1 Oberflächenabtrag

Der durch Erosion verursachte P-Verlust hängt ab von dem Gesamtbodenabtrag und dem Phosphorgehalt im Boden. Durch eine Bewirtschaftung nach guter fachlicher Praxis soll der Bodenabtrag durch entsprechende acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen minimiert werden. Gleichzeitig sollte die P-Anreicherung im Boden auf die Versorgungsstufe 'C' ausgerichtet sein. Durch geeignete Wahl von Applikationsform und -termin mineralischer und vor allem organischer Dünger wird der Verlust durch Oberflächenabfluss vermindert.

Bei Einhaltung dieser Rahmenbedingungen kann für den durchschnittlichen Gesamt-P-Austrag durch Erosion und Oberflächenabfluss ein mittlerer Wert von **1 kg P₂O₅/ha und Jahr** angenommen werden. Allerdings können unter extremen Bedingungen (z. B. starke Niederschläge in Hanglagen), trotz Einhaltung der guten fachlichen Praxis, auch deutlich höhere Austräge gegeben sein.

Schwierig zu erfassen ist jedoch, welche P-Fracht tatsächlich den Schlag verlässt, insbesondere bei stark unterschiedlicher Topographie innerhalb des Schlages.

3.2.2 Verlagerung aus dem durchwurzelten Bodenraum

Durch die starke sorptive Bindung des Phosphors an Boden- und Humuskomplexe sind die unvermeidbaren P-Verluste durch Auswaschung auf dem überwiegenden Teil der Böden gering und liegen **unter 1 kg P₂O₅/ha und Jahr**. Auf Standorten unter besonderen Bedingungen können jedoch auch höhere Verluste auftreten.

Auf tonigen Böden werden durch Grobporen oder das Auftreten von Schrumprissen P-Austräge in tiefere Bodenschichten ermöglicht. Hier ist die Düngung, insbesondere mit flüssigen organischen Düngern, an die Gegebenheiten anzupassen. Höhere P-Austräge können auf sauren, stark humosen und organischen Böden mit geringem Grundwasserflurabstand auftreten. Starke Sickerwasserbildung und organische P-Düngung begünstigen den P-Austrag. Durch geeignete Bewirtschaftungsmaßnahmen kann hier der P-Verlust bereits stark eingeschränkt werden. So widerspricht etwa die Ackernutzung auf Hochmoor- und sauren Niedermoorböden der guten fachlichen Praxis und sollte vermieden werden.

Mittel- bis langfristig sind hohe und sehr hohe P-Gehalte auf austragungsgefährdeten Böden in den Bereich der Versorgungsstufe 'C' zurückzuführen.

Tabelle 8 zeigt stark verallgemeinernd die mittleren P-Verluste durch vertikalen Austrag aus dem durchwurzelbaren Bodenraum in Abhängigkeit von Boden und Nutzung unter Einhaltung einer standortgerechten Bewirtschaftung nach guter fachlicher Praxis.

Tabelle 8: Unvermeidbare P-Verluste durch Auswaschung in landwirtschaftlichen Betrieben auf Böden in Gehaltsstufe 'C'

P-Verluste		(kg P ₂ O ₅ /ha u. Jahr)
Allgemeiner Richtwert		0,5
Ausnahmen:		
a) Mineralische Böden		
Böden mit Schrumpfrissbildung über den durchwurzelbaren Bodenraum hinaus oder flachgründige Böden mit grobporenreichem Gesteinsuntergrund		5
Saure (< pH 5,5) und stark humose (> 8 % Humus) Böden mit geringen Grundwasserflurabständen und/oder hochliegenden Dränagen innerhalb des durchwurzelbaren Bodenraums		2
b) Organische Böden		
Niedermoor	pH-Werte ≥ pH 6,5	0,5
Niedermoor	pH-Werte < pH 6,5 (nur Grünlandnutzung, Weidebesatz < 2 GV/ha)	5
Hochmoor	Nur Grünlandnutzung (Weidebesatz > 2 GV/ha)	10

3.3 Kalium

Die in den Tabellen 9 und 10 angegebenen unvermeidbaren Kaliumverluste beziehen sich auf Ackerland. Unter Grünland liegen die Verluste in Folge ständigen Bewuchses, intensiver Durchwurzelung und längerer Vegetationsdauer um ca. 50 % niedriger.

3.3.1 Standort

Ähnlich wie bei Stickstoff hängen die unvermeidbaren Kaliumverluste wesentlich von Bodenart, Niederschlagshöhe und -verteilung sowie von der Bewirtschaftung ab. Nachfolgend wird ein Schätzrahmen zur Ermittlung dieser Verluste gegeben.

Tabelle 9: Unvermeidbare K-Auswaschung für Ackerflächen (Böden in Gehaltsstufe 'C' sowie Düngung nach Abfuhr)

Bodenart	K-Verluste (kg K ₂ O/ha und Jahr)		
	Jahresniederschlag		
	< 600 mm	600-750 mm	> 750 mm
S, Moor	30	40	50
l'S, uS	20	30	40
IS*	10	15	20
übrige*	3	5	10

* bei durchlässigen Unterböden Verluste wie Sand- oder Moorböden (z. B. Schotterböden)

3.3.2 Zusätzliche Verluste aus Ackerflächen

Tabelle 10: Zusätzliche K-Verluste bei Herbst-Ausbringung von wirtschafts-eigenen Düngern oder Sekundärrohstoffdüngern bzw. Ernterückständen (in % der im Herbst ausgebrachten K-Menge)

Bodenart	Zusätzliche K-Verluste (% der ausgebrachten K-Zufuhr)		
	Jahresniederschlag		
	< 600 mm	600-750 mm	>750 mm
S, Moor	20	30	40
l'S, uS	10	15	20
IS*	5	10	15
übrige*	2	3	4

* bei durchlässigen Unterböden Verluste wie Sand- oder Moorböden (z. B. Schotterböden)

Eine mineralische K-Düngung im Herbst auf leichten Böden entspricht nicht der guten fachlichen Praxis. Ernterückstände oder organische Düngemittel, die zur N-Versorgung der Pflanzen nach Ernte der Hauptfrucht ausgebracht werden, können höhere K-Verluste durch Auswaschung verursachen.

3.4 Kalk

Neben der Lieferung von Nährstoffen (Calcium, Magnesium) liegt die Funktion des Kalkes insbesondere in der Sicherung eines guten physikalischen, chemischen und biologischen Zustandes des Bodens.

Der wesentliche Verbrauch an Kalk ist auf seine Bodenfunktion zurückzuführen. Die Kalkverluste sind eine Folge der Auswaschung und der Neutralisation der bei bodenversauernden Vorgängen freiwerdenden Protonen. Aus diesen Teilprozessen lässt sich für verschiedene Bodenarten der notwendige Kalkbedarf für die Erhaltung einer guten Kalkversorgung (pH-Klasse 'C') kalkulieren. Hierfür sind zudem spezifische Ansprüche der Pflanzen sowie des Standortes einzubeziehen (Tabelle 11).

Tabelle 11: Unvermeidbare Kalkverluste durch Neutralisation und Auswaschung in Abhängigkeit von der Bodennutzung und der Niederschlagsmenge auf Böden in pH-Klasse 'C'

Bodenart	Nutzungsform	Kalkverluste (kg CaO*/ha und Jahr)		
		Jahresniederschlag		
		< 600 mm	600-750 mm	> 750 mm
leicht (S, IS)	Acker	300	400	500
	Grünland	150	250	350
mittel (sL bis t'L)	Acker	400	500	600
	Grünland	200	300	400
schwer (tL, T)	Acker	500	600	700
	Grünland	250	350	450

* CaO-Äquivalente von basisch wirksamen Calcium- und Magnesiumverbindungen

Die unvermeidbaren Kalkverluste (Auswaschung und Neutralisation!) richten sich neben der Nutzungsform (Acker, Grünland) vor allem nach der Bodenart (Aufkalkungsziel) sowie nach der Niederschlagsmenge. Tabelle 11 ermöglicht eine ungefähre Einschätzung der Kalkverluste. Die aufgeführten Kalkmengen entsprechen auf carbonatfreien Böden der für die Erhaltung des anzustrebenden pH-Wertes (pH-Klasse 'C') benötigten Kalkdüngung.

Die Angabe als CaO lässt den Eindruck entstehen, dass der Kalk den Boden ungenutzt durchlaufe, was aber nicht der Fall ist. Während andere Nährstoffe durch Auswaschung ungenutzt, d. h. ohne produktive Wirkung in den Unterboden und später ins Grundwasser verlagert werden, hat der Kalk nach der Passage des Bodenkörpers seine Wirkung bereits getan. Er hat mit den im Boden vorhandenen oder gebildeten Säuren zum Neutralsalz reagiert und die betreffende Säure auf diese Weise neutralisiert. Die Auswaschung des Ca^{++} -Ions erfolgt dann z. B. als Sulfat, Chlorid oder Nitrat. Die analytische Erfassung erfolgt als Calcium (Ca^{++}) und wird lediglich rechnerisch als CaO dargestellt, obwohl der Kalk den Boden nicht in basisch wirksamer Form (Carbonat, Oxid, Silikat) verlässt.

Ausgewaschener Kalk ist also nicht einfach nur „verloren“, so dass man besser von „produktivem Kalkverbrauch“ spricht. Der Auswaschungsvorgang selbst ist allerdings so gut wie nicht beeinflussbar.

3.5 Magnesium

Kenntnisse über unvermeidbare Magnesiumverluste dienen in erster Linie der Sicherstellung der Magnesiumernährung der Pflanzen. Die Bedeutung des Magnesiums für den Basenhaushalt des Bodens (siehe Kalkwirkung) ist hierbei nachrangig, wenngleich die Mg-Zufuhr neben Neutralsalzen (Magnesiumsulfat) auch wesentlich über Kalkdünger gesteuert werden kann.

Die unvermeidbaren Verluste an Magnesium unterliegen erheblichen Schwankungen. Sie hängen wesentlich vom geologischen Ausgangsmaterial sowie von den Witterungsbedingungen ab.

Auf Böden mit magnesiumreichem Ausgangsgestein können diese Verluste erheblich höher sein; diese Austräge sind durch die Bewirtschaftung nur wenig beeinflussbar und bedürfen keiner Berücksichtigung bei der Düngerbemessung. Die in Tabelle 12 enthaltenen Orientierungswerte dienen einer Grobschätzung der Magnesiumverluste.

Tabelle 12: Unvermeidbare Mg-Auswaschung auf Böden der Gehaltsklasse 'C'

Boden	Mg-Auswaschung (kg MgO/ha und Jahr)		
	Jahresniederschlag		
	< 600 mm	600-750 mm	> 750 mm
leicht	35	40	45
mittel und schwer	40	60	80

3.6 Schwefel

Unvermeidbare S-Verluste durch Landbewirtschaftung sind ähnlich wie N-Verluste abhängig von den Standortvoraussetzungen (Boden, Klima) und der Bewirtschaftung (Tierhaltung, organische Düngung). Bei der Düngung ist neben der kurzfristigen insbesondere auch die langfristige Wirkung über die Veränderung des S-Potenzials der Böden zu berücksichtigen. Wesentliche S-Verluste entstehen insbesondere durch Auswaschung.

Aktuelle Daten zur S-Auswaschung (Rückgang der S-Immissionen, Einfluss des Viehbesatzes) liegen nur in relativ geringem Umfang vor. Aus dem bekannten Verhalten von Schwefel im Boden lassen sich jedoch in Analogie zum Stickstoff Auswaschungsverluste schätzen. Aufgrund diverser Unterschiede zwischen N- und S-Umsatz sind die nachfolgenden Schätzwerte für unvermeidbare S-Verluste jedoch als vorläufig zu betrachten.

Gasförmige S-Verluste sind betriebsspezifisch schwer zu erfassen und verglichen mit der möglichen Schätzgenauigkeit der Auswaschungsverluste gering (Fehlerbereich). Sie bleiben daher unberücksichtigt.

3.6.1 Standort

Tabelle 13: Unvermeidbare S-Auswaschung bei standortspezifisch optimaler Bewirtschaftung nach guter fachlicher Praxis:

Ackerland: ohne Tierhaltung und ohne Einsatz von Sekundärrohstoffdüngern; Grünland: mit mittlerer Tierhaltung von ca. 1,5 GV/ha

Bodennutzung	Ackerzahl	S-Auswaschung (kg S/ha und Jahr)		
		Jahresniederschlag		
		< 600 mm	600-750 mm	> 750 mm
Acker	< 45	10	15	20
	45-65	7	10	15
	66-85	5	7	10
	> 85	3	5	7
Grünland		5		

3.6.2 Zusätzliche Verluste aus Ackerflächen

Zusätzliche S-Verluste treten als Folge bewirtschaftungsbedingter S-Anreicherung (Humusanreicherung) der Böden auf. Sie werden durch Zuschläge zu den standortspezifisch unvermeidbaren Verlusten nach Tabelle 13 berücksichtigt. Die Kalkulation schließt auch hohe Intensitäten der organischen Düngung in der Vergangenheit mit ein, die nach heutiger Auffassung und Rechtslage nicht der guten fachlichen Praxis entsprechen.

Hinweis: In Tabelle 14 und 15 werden S-Verluste in Abhängigkeit von der N-Ausscheidung bzw. der N-Ausbringung mit Sekundärrohstoffdüngern angegeben, da diese Größen aus den Beratungsunterlagen zur Düngeverordnung entnommen werden können und die S-Gehalte organischer Dünger i. d. R. mit deren N-Gehalten korrelieren.

**a) Verluste aufgrund langjähriger Ausbringung von Wirtschaftsdüngern
(Verluste aus dem S-Vorrat des Bodens)**

Auszugehen ist von einem durchschnittlichen Viehbesatz über einen längeren Zeitraum (ca. 10 bis 20 Jahre). Die Vorgaben der Düngeverordnung sind davon unberührt.

Tabelle 14: Anstieg der standortspezifisch unvermeidbaren S-Verluste aufgrund der S-Anreicherung des Bodens durch langjährige Ausbringung von Wirtschaftsdüngern

N-Ausscheidung (kg N/ha und Jahr)	< 50	50-100	101-150	151-200	201-250	> 250
Zuschlag für S-Auswaschung (% der S-Auswaschung aus Tab. 13)	0	20	30	40	50	70

b) Verluste aufgrund langjähriger Ausbringung sonstiger organischer Dünger (Verluste aus dem S-Vorrat des Bodens)

Tabelle 15: Anstieg der standortspezifisch unvermeidbaren S-Verluste aufgrund der S-Anreicherung des Bodens durch langjährige Ausbringung von Sekundärrohstoffdüngern

N-Ausbringung (kg N/ha und Jahr)	< 50	50-100	101-150	151-200	> 200
Zuschlag für S-Auswaschung (% der S-Auswaschung aus Tab. 13)	0	20	30	40	60

Auszugehen ist von durchschnittlichen jährlichen Ausbringmengen an organischen Düngern über einen längeren Zeitraum (ca. 10 bis 20 Jahre). Gelegentliche Applikationen, die im Schnitt der Jahre 5 kg S/ha und Jahr nicht übersteigen, führen zu keiner wesentlichen Erhöhung des S-Gehalts von Böden.

Literaturhinweise Stickstoff

- BACH M. und FREDE H.-G. (1998) Agricultural nitrogen, phosphorus and potassium balances in Germany – methodology and trends 1970 to 1995. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 161, 385-393.
- BECKER R., BACH M. und FREDE H.-G. (1995) Begrenzung des Viehbesatzes als Maßnahme zur Reduzierung der landwirtschaftlichen Stickstoff-Emissionen (in Atmosphäre und Hydrosphäre). *Mittlg. Dt. Bodenk. Ges.*, 76, 1235-1238.
- BOBBINK R. und ROELOFS J.G.M. (1995) Nitrogen critical loads for natural and semi-natural ecosystems: the empirical approach. *Water Air Soil Poll.*, 58, 122-178.
- BOUWER W. (1995) Wasser- und Stickstoffumsatz im Boden- und Grundwasserbereich eines Wassereinzugsgebietes in Niedersachsen. *Boden und Landschaft, Band 6*, Gießen.
- BUSSINK D. W. und OENEMA O. (1998) Ammonia volatilization from dairy farming systems in temperate areas: a review. *Nutrient Cycling un Agroecosystems*, 51, 19-33.
- DOSCH P. (1996) Optimierung der Verwertung von Güllestickstoff durch Separiertechnik und kulturartspezifische Applikationstechniken. *Diss., TU München*.
- ECKERT H., BREITSCHUH G. und SAUERBECK D. (1999) Kriterien umweltverträglicher Landbewirtschaftung (KUL) – ein Verfahren zur ökologischen Bewertung von Landwirtschaftsbetrieben. *Agribiol. Res.*, 52, 57-76.
- ECKERT H., BREITSCHUH G. und SAUERBECK D. R. (2000) Criteria and standards for sustainable agriculture. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 163, 337-351.
- FLEISCHER E. (1998) Nutztierhaltung und Nährstoffbilanzen in der Landwirtschaft. *Angewandte Umweltforschung, Bd. 10, Analytica Berlin*, 166 S.
- GUTSER R. (1996) Klärschlamm und Kompost als Sekundärrohstoffdünger. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 44/1996, 29-43.
- GUTSER R. (1998) Zur Problematik von Stickstoffbilanzen. Die Düngeverordnung auf dem Prüfstand. DLG-Kolloquium vom 3.12.1997 in Kassel. *DLG, C98*, 27-45.

- GUTSER R. und CLAASSEN N. (1994) Langzeitversuche zum N-Umsatz von Wirtschaftsdüngern und kommunalen Komposten. *Mittlg. Dt. Bodenk. Ges.*, 73, 47-50.
- GUTSER R. und EBERTSEDER TH. (2001) Unvermeidbare Nährstoffverluste in der Landwirtschaft. *BAD-Broschüre Düngung, Baustein nachhaltiger Landwirtschaft*, 95-114.
- GUTSER R., LINZMEIER W. und KILIAN A. (2000) N₂O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen in Abhängigkeit der N-Düngung und des N-Potenzials der Böden. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 55/2000, Teil 2, 190-199.
- GUTSER R. und MATTHES U. (2001) Gute fachliche Praxis der Düngung aus Sicht der Ökonomie und Ökologie. *KTBL-Schrift*, 400, 91-102.
- HEGE U. (1995) Nährstoffbilanz als Kontrollinstrument ordnungsgemäßer Landbewirtschaftung (Feld-Stall-, Hoftor-Bilanz). In: *Bundesarbeitskreis Düngung (Hrsg.): Nährstoffbilanz im Blickfeld von Landwirtschaft und Umwelt*. Frankfurt/Main, 129-137.
- HEGE U., KRESSIERER E. und RAUPENSTRAUCH R. (1999) Nitratgehalte des Sickerwassers – Ergebnisse von Tiefenuntersuchungen. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 49/1998, 573-577.
- HERMSMEYER D. und VAN DER PLOEG R. R. (1996) Schätzung der Denitrifikation in landwirtschaftlich genutzten Böden. I. Grundlagen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 159, 437-443.
- HERMSMEYER D. und VAN DER PLOEG R. R. (1996) Schätzung der Denitrifikation in landwirtschaftlich genutzten Böden. II. Ergebnisse und Bewertung. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 159, 445-452.
- HEROLD L., KERSCHBERGER M. und HÖPFER E. (1996) Beziehungen zwischen N-Bilanz und N_{min}-Gehalt des Bodens im Herbst. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 44/1996, 587-590.
- HÜLSBERGEN K.-J. (1997) Analyse und Bewertung von Stoff- und Energieflüssen auf betrieblicher Ebene mit dem Computermodell REPRO. In: *Umweltbundesamt Österreich: Stoffbilanzierung in der Landwirtschaft*, CP-020, 13-38.

HÜLSBERGEN K.-J., RAUHE K., SCHARF H. und MATTHIES H. (1992) Langjähriger Einfluss organisch-mineralischer Düngung auf Ertrag, Humusgehalt und Stickstoffverwertung. *Kühn-Arch.*, 86, 2, 11-24.

Literaturhinweise Phosphor

AUERSWALD K. (1989) Prognose des P-Eintrags durch Bodenerosion in die Oberflächengewässer der BRD. *Mittlg. Dt. Bodenk. Ges.*, 59 II/1989, 661-664.

AUERSWALD K. (1998) P-Einträge in die Gewässer durch die Prozesse der Erosion und die P-Freisetzung aus dem Erosionsmaterial. *Vortrag bei der VDLUFA-Frühjahrssitzung der Fachgruppen I, II und X am 19.03.1998 in Oldenburg.*

AUERSWALD K. und WEISS K. (1997) Auswirkung einer umweltschonenden Landbewirtschaftung auf die stoffliche Belastung von Oberflächengewässern - Modellstudie Scheyern. *Mittlg. Dt. Bodenk. Ges.*, 85 III/1997, 1285-1286.

AUERSWALD K. und WEIGAND S. (1999) Eintrag und Freisetzung von P durch Erosionsmaterial in Oberflächengewässern. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 50/1999, 37-54.

DIEZ TH., LAMMEL J., RASP H. und SCHUY W. (1993) Landwirtschaft und Umwelt. In: *Hydro Agri (Hrsg.): Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau (12. Auflage)*. Münster-Hiltrup, 1993, S. 370.

FOERSTER P. (1973) Einfluss hoher Güllegaben und üblicher Mineraldüngung auf die Stoffbelastung (NO_3 , NH_4 , P und SO_4) im Boden und Grundwasser in Sandböden Nordwestdeutschlands. *Z. Acker- u. Pflanzenbau*, 137/1973, 270-286.

FOERSTER P. (1982) Dränwasseruntersuchungen in einer nordwestdeutschen Ackermarsch. *Kali-Briefe (Büntehof)*, 16(3)/1982, 159-174.

FOERSTER P. (1984) Stoffgehalte im Drän- und im Grundwasser und Stoffausträge in einem Sandboden Nordwestdeutschlands bei Mineraldüngung und bei zusätzlicher Gülledüngung. *Kali-Briefe (Büntehof)*, 17(5)/1984, 373-405.

- FOERSTER P. (1988) Stoffgehalte und Stoffausträge im Dränwasser bei Grünland- und bei Ackernutzung in der nordwestdeutschen Geest. *Kalibriefe (Büntehof)*, 19, 169-184.
- FOERSTER P. (1988) Stoffausträge im Oberflächenabfluss auf Gründland in der Marsch. *Z. Kulturtechnik Landentw.*, 39, 12-16.
- FOERSTER P., SCHEFFER B. und NEUHAUS H. (1985) Dränwassergüte und Nährstoffaustrag im nordwestdeutschen Raum auf Marsch, Moor und Geest. *Z. d. geologischen Ges.*, 136/1985, 497-504.
- FRIELINGHAUS M., KOCCMIT A., BORK H.-R. und SCHMIDT R. (1998) Tolerierbarer Bodenabtrag - Grenzen seiner Anwendbarkeit. *Mittlg. Dt. Bodenk. Ges.*, 88, 565-568.
- FRÜCHTENICHT K. (1999) Phosphorgehalt und Phosphorverlagerung nordwestdeutscher Böden. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 50/1999, 55-63.
- FRÜCHTENICHT K., STEFFENS G., MÄHLHOP R. und FEYEN A. (1995) Ermittlung von P-Grenzwerten im Boden. Persönliche schriftliche Mitteilung.
- ISERMANN K. (1997) (Un-)Vereinbarkeit der Einstufung der pflanzenverfügbaren P-Gehalte landwirtschaftlich genutzter Böden und entsprechende Düngungsempfehlung des VDLUFA sowie der Düngeverordnung (1996) mit den Erfordernissen einer umweltverträglichen und darüber hinaus nachhaltigen Landnutzung. *Vortrag bei der Sitzung der Fachgruppen I, II und X anlässlich des VDLUFA-Kongresses am 16.09.1997 in Leipzig.*
- KERSCHBERGER M. (1999) Vertikale Verteilung von DL-löslichem P in Ackerböden. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 50/1999, 95-102.
- KUNTZE H. und SCHEFFER B. (1979) Die Phosphatmobilität im Hochmoorboden in Abhängigkeit von der Düngung. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 142, 155-168.
- NÜTZMANN G. und TISCHNER T. (2000) Phosphorverlagerung im Boden: physikochemische und hydrologische Einflüsse. *Mittlg. Dt. Bodenk. Ges.*, 92/2000, 182-185.
- PIHL O. und WERNER W. (1993) Zur Interpretation von Quantitäts-/ Intensitäts-Quotienten als Kriterien vertikaler Phosphatverlagerung in Böden. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 37/1993, 99-102.

- PIHL O. und Werner W. (1995) Bodenchemische Parameter zur Prognose des vertikalen P-Austrags in Drän- und Grundwasser. *VDLUFASchriftenreihe*, 40/1995, 289-292.
- POTRATZ K.-U. (1993) Bedeutung von Feuchte und Struktur der Bodenoberfläche für die Bodenerosion. *Bodenkundliche Abhandlungen*, 11.
- RICHTER W. und SUNTHEIM L. (1993) Untersuchungen zur Fixierung von Phosphat in Verwitterungsböden auf Gneis. *VDLUFASchriftenreihe*, 37/1993, 609-612.
- RICHTER W. und SUNTHEIM L. (1997) Untersuchungen zur Phosphatfixierung an einem sächsischen Verwitterungsboden auf Gneis. *VDLUFASchriftenreihe*, 46/1997, 869-872.
- REX M. (1997) Veränderung der Phosphatgehalte im Boden in Abhängigkeit von der Phosphatbilanz und der Phosphatform. *VDLUFASchriftenreihe*, 46/1997, 787-790.
- RÖMER W. (1998) Sind oberhalb von 50 mg P₂O₅/100 g Boden schädliche Auswirkungen auf Gewässer zu erwarten? *Wasser und Boden*, 50/12, 58-62.
- SCHEFFER B. (1977) Stickstoff- und Phosphorverlagerung in nordwestdeutschen Niederungsböden und Gewässerbelastung. *Geol. Jb. F 4*, 203-221.
- SCHEFFER B. und BLANKENBURG J. (1983) Phosphorausstrag aus Niedermoorböden - Ergebnisse eines Lysimeterversuches ohne Pflanzenbewuchs. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 146/1983, 275-284.
- SCHEFFER B., KUNTZE H. und BARTELS R. (1990) Zur landbaulichen Verwertung von eisenhaltigen Industrieabfällen auf Hochmoorböden. *VDLUFASchriftenreihe*, 32/1990, 965-970.
- SCHEFFER B. und BARTELS R. (1993) Standortgerechte PK-Versorgung eines sauren Niedermoorbodens. *VDLUFASchriftenreihe*, 37/1993, 103-106.
- STROHBACH B. (2000) Prognose der P-Austragsgefährdung von ackerbaulich genutzten Standorten des Jungpleistozäns. *Mittlg. Dt. Bodenk. Ges.*, 92/2000, 194-197.
- SUNTHEIM L. (1990) Untersuchungen zur P-Dynamik im Boden und Schlussfolgerung für eine bedarfsgerechte P-Ernährung ausgewählter landwirtschaftlicher Nutzpflanzen. *Habilitationsschrift, Leipzig 1990*.

- WERNER W. (1994) Nährstoffbilanzen – ein Instrument der Düngeberatung? *Tagungsband der Fachtagung „Wissens- und Technologietransfer für integrierte Landbausysteme“ am 29./30. Juni 1994 in Soest*, 153-175.
- WERNER W. (1999) Die Eignung der P-Sättigung des Bodens und der P-Konzentration der Bodenlösung zur Prognose der P-Verlagerung im Profil. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 50/1999, 79-93.

Literaturhinweise Kalium

- ANONYMUS (1991) Kaliumemissionen auf Mais- und Grasland. In: *Informatie en Kennis Centrum Veehouderij* 23.
- BOYSEN P. (1977) Nährstoffauswaschung aus gedüngten und ungedüngten Böden in Abhängigkeit von Standorteigenschaften und Nutzung der Moränen- und Sandergebiete Schleswig-Holsteins. *Diss., Inst. für Pflanzenernährung und Bodenkunde, CAU Kiel*.
- CLAASSEN N., WULFF F. und JUNGK A. (1996) Erträge, K-Gehalte des Bodens sowie K-Auswaschungen infolge von K-Düngung auf Sandböden bei Walsrode. *Mittlg. Dt. Bodenk. Ges.*, 79, 279-282.
- DRESSEL J. und JUNG J. (1983) Nährstoffverlagerung in einem Sandboden in Abhängigkeit von der Bepflanzung und Stickstoffdüngung (Lysimeterversuche). *Landwirtschaftliche Forschung*, 36, Kongressband 1983.
- DRESSEL J., WEIGELT W. und MOCKEL D. (1993) Veränderungen des Nährstoffpotentials eines Bodens nach langjähriger Mineral- und Stallmistdüngung. *Agribiol. Res.*, 46.
- ELTUN R., FUGLEBERG O. und NORDHEIM O. (1996) The Apelsvoll cropping system experiment VII – Runoff losses of soil particles, phosphorus, potassium, magnesium, calcium and sulphur. *Norwegian Journ. of Agric. Sci.*, 10/4, 371-384.
- HANSCHMANN A., MÜLLER S. und BRIX B. (1991) Nährstoffbilanzen im Lysimeterversuch mit anlehmigem Sand, Löß und Lehm am Standort Leipzig. *Bodenkultur*, 42, 113-122.
- JUNG J. und DRESSEL J. (1970) Leserbrief: Zur Nährstoffauswaschung im Winterhalbjahr 1969/70. *Mitteilungen der DLG*, 26, S. 85.

- JUNG J. und DRESSEL J. (1969) Das Verhalten von Kalium in zwei unterschiedlichen Böden eines 10-jährigen Lysimeterversuches in Abhängigkeit vom Düngungstermin. *Z. Acker- u. Pflanzenbau*, 130, Sonderdruck, 33-44.
- JUNG J., DRESSEL J. und BUCHNER J. (1969) Das Verhalten der Nährstoffe im Boden in dem extrem nassen Jahr 1968. *BASF-Mitteilungen für den Landbau, Düngung*, 3/1969.
- JUSTE C., TAUZIN J., DUREAU P. und COURPRON C. (1982) Exportation des éléments fertilisants par lessivage en sol sableux des Landes de Gascogne. Résultats des 8 années d'observations en cases lysimétrique. *Agronomie*, 2, 91-98.
- KAYSER M., LANDWEHR B. und BENKE M. (1999) Kalium aus Gülledüngung auf Mähgrünland und Silomais: Erträge, K-Konzentrationen, K-Auswaschung und Bilanzierung. *Forschungs- und Studienzentrum für Veredelungswirtschaft, SG Grünland/Futterbau, Vechta*.
- KÖHNLEIN J. (1972) Nährstoffauswaschung aus der Ackerkrume bei unterschiedlicher Nutzung und Düngung. *Bayer. Landw. Jahrbuch*, 49, 392-424.
- KÖHNLEIN J. (1972) Vorgang und Geschwindigkeit der Kalkbewegung in versauerten bindigen Böden unter Dauergrünland – Untersuchungen auf Alter Marsch- und mesotropher Parabraunerde in Schleswig-Holstein. *Bayer. Landw. Jahrbuch*, 49, 702-736.
- LEFEVRE G. (1988) Lessivage du potassium. In: *Phosphorus and potassium – soil plant relations*, 1988, 53-78.
- MEISSNER R., RUPP H., SEEGER J. und SCHONERT P. (1995) Influence of Mineral Fertilizers and Different Soil Types on Nutrient Leaching: Results of Lysimeter Studies in East Germany. *Land Degradation Rehabilitation*, 6/3, 163-170.
- MISZTAL M. (1978) Leaching of nutritive components from rendzina in a lysimetric experiment. *Pol. J. of Soil Sci.*, 11/2, 103-111.
- PETERS M., BLUME H. P., GÖMPEL H. und SATTELMACHER B. (1990) Nährstoffdynamik und –bilanz eines Podsols unter konventioneller und alternativer Ackernutzung. *J. Agron. & Crop Sci.*, 165, 289-296.

- PFAFF C. (1963) Das Verhalten der Phosphorsäure u. der Alkalien im Boden nach langjährigen Lysimeterversuchen. *Z. Acker- u. Pflanzenbau*, 117, 100-113.
- SCHWEIGER P. und AMBERGER A. (1979) Mg-Auswaschung und Mg-Bilanz in einem langjährigen Lysimeterversuch. *Z. Acker- u. Pflanzenbau*, 148, 403-410.
- SIMON J.-C. (1995) Lessivage de l'Azote Nitrique et des Cations – Accompagnateurs, une Situation de Référence: Le Climat Atlantique très Pluvieux; quelques Eléments de Comparaison avec les autres Situation Françaises. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 81/4, 55-70.
- VELTHOFF, VAN BEEK und VAN ERP (1999) Uitspoeling van calcium en magnesium (hardheid) uit bouwland en maisland op kalkloze zandgrond. *Meststoffen*, 60-66.
- WESSOLEK G., TIMMERMANN T. und VAN DER PLOEG R. (1983) Nährstoffverlagerung und Wasserbilanz einer Braunerde aus Löß-Kolluvium unter Acker-nutzung. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 146/6, 681-689.
- WULFF F., SCHULZ V. und JUNGK A. (1992) Kann die Kalium-Düngung auf Sandböden reduziert werden? *VDLUFA-Schriftenreihe*, 34/1992, 127-130.
- YLÄRANTA, UUSI-KÄMPPÄ und JAAKKOLA (1996) Leaching of Phosphorus, Calcium, Magnesium and Potassium in Barley, Grass and Fallow Lysimeters. *Acta. Agric. Scand. Sect. B, Soil and Plant Sci.*, 46, 9-17.

Literaturhinweise Kalk, Magnesium, Schwefel

- BLOEM E., HANEKLAUS S., DAEMMGEN U. und SCHNUG E. (1999) Sulfur balance in agroecosystems and its implantation into a model for the prediction of sulfur deficiency. Zit. in: BLOEM E., HANEKLAUS S., SCHROETTER S. und SCHNUG E. (2000) *Aspects of agronomical and physiological research on sulfur deficiency in agricultural crops. Landbauforschung Völkenrode*, Sh. 218, 11-15.

- BRAMM A. (1978) Wechselwirkungen zwischen neuzeitlichen Anbausystemen der landwirtschaftlichen Produktion und der Belastung von Sickerwasser durch anorganische und organische Substanzen. *Landbauforschung Völkenrode*, 2/1978.
- ERIKSEN J. (1997) Animal manure as S fertilizer. *Sulphur in Agriculture*, 20, 27-30.
- ERIKSEN J. und MORTENSEN J. (2000) Plant sulfur nutrition and sulfur cycling in danish agricultural soils. *Landbauforschung Völkenrode*, Sh. 218, 26-30.
- FOERSTER P. (1988) Stoffgehalte und Stoffausträge im Dränwasser bei Grünland- und Ackernutzung. *Kali-Briefe*, 19(2)/1988.
- GUTSER R. (2001) Nährstoffauswaschung im Weihenstephaner Lysimeter. Nicht publiziert.
- GUTSER R. und MANHART R. (2001) Grundsätzliches zur Optimierung der Schwefeldüngung – Welche Ansprüche stellt der Mais? *Mais*, 29, 2, 72-75.
- GUTSER R. und VON TUCHER S. (2000) Zur Schwefelwirkung von Wirtschafts- und Sekundärrohstoffdüngern. In: VDLUFA (Hrsg.): Schwefelernährung von Kulturpflanzen – Grundlagen, Düngebedarfsermittlung, Beratungsempfehlungen. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 53, 48-63.
- HENZE R. (1982) Kalkverluste – Kalkbilanz. *Z. Kulturtechnik u. Flurbereinigung*, 23/1982.
- JANZEN H.H. und EHLERT B.H. (1998) Sulfur dynamics in cultivated, temperate agroecosystems. In: MAYNARD D.G. (Hrsg.): *Sulfur in the environment*. Marcel Dekker, Inc., New York, 11-42.
- JUNG J., DRESSEL J. und BUCHNER A. (1970) Das Verhalten der Nährstoffe im Boden in dem extrem nassen Jahr 1968. *Landw. Forschung 1970, Kongressband*
- KICK H. und LOHSSE H. (1977) Verlagerung von Nährstoffen, insbesondere Stickstoff, in einer Parabraunerde auf Lößunterlage. *Landw. Forschung, Sonderheft 33/II 1977, Kongressband*.
- KIRCHMANN H., PICHLMAYR F. und GERZABEK H.H. (1996) Sulfur balances and sulfur-34 abundance in a long-term fertilizer experiment. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 174-178.

- KÖHNLEIN J. (1972) Nährstoffauswaschung aus der Ackerkrume bei unterschiedlicher Nutzung und Düngung. *Bayer. Landw. Jahrbuch*, 4/1972.
- KÖHNLEIN J. (1972) Vorgang und Geschwindigkeit der Kalkbewegung in versauerten bindigen Böden unter Dauergrünland Untersuchungen auf alter Marsch und mesotropher Parabraunerde in Schleswig-Holstein. *Bayer. Landw. Jahrbuch*, 6/1972.
- KÖHNLEIN J. und KNAUER, N.(1957) Wasser- und Nährstoffbewegung aus der Ackerkrume in den Unterboden. *Z. Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde* 81/1957.
- KÖHNLEIN J. und WEICHBRODT H.-H. (1971) Die Nährstoffauswaschung aus der Ackerkrume in den Unterboden und ihr Einfluss auf die Nährstoffbilanz. *Z. Acker- u. Pflanzenbau*, 134/1971.
- MAYNARD D. G. (1998) Sulfur in the environment. In: Marcel Dekker Inc., New York, S. 371.
- OEHMICHEN J. (1997) *Pflanzenproduktion, Bd. 1 Grundlagen*.
- PFAFF C. (1963) Über die Auswaschung von Calcium, Magnesium, Chlorid und Sulfat aus dem Boden (Lysimeterversuche). *Z. Acker- u. Pflanzenbau* 117/1963.
- PFAFF C. (1976) Verlagerung von Nährstoffen, insbesondere Stickstoff, in einer Parabraunerde auf Lößunterlage. In: *Landw. Forschung, SH 33/II 1977, Kongressband 1976*.
- PFULB K., WIECHENS E. und SCHOLL W. (1972) Neue Grenzwerte für die Beurteilung des Magnesiumgehaltes der Acker- und Grünlandböden. In: *Sonderdruck der LUFA Augustenberg*.
- PICHLMAIER U. (2000) Nettomineralisation von Stickstoff und Schwefel auf langjährig gedüngten Böden. *Diplomarbeit, Lehrstuhl für Pflanzenernährung, T.U. München-Weihenstephan*, nicht publiziert.
- SCHEFFER F. und SCHACHTSCHABEL P. (1998) *Lehrbuch der Bodenkunde, 14. Aufl.*
- SCHULZ und BAUMANN (1985) Modellvorstellung zum Vorgang der Kalklösung in natürlichen Sanden. *Z. d. Dt. Geolog. Ges.*, 136/1985.

- SLUIJSMANS C.M.J. (1970) Der Einfluss von Düngemitteln auf den Kalkzustand des Bodens. *Z. Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, 126/1970.
- SOMMER K. Die jährlichen Verluste an Calcium und Magnesium durch Auswaschung. In: *Grundlagen der Pflanzenernährung (BL 1.4)*, unveröffentlicht.
- VÖMEL A. (1970) Nährstoffeinwaschung in den Unterboden und Düngernstickstoffumsatz, dargestellt an Kleinlysimeterversuchen. *Z. Acker- u. Pflanzenbau*, 132/1970.
- WICHTMANN H. (1973) Jahreszeitliche Schwankungen im Nitratgehalt von Parabraunerde-Profilen. *Landw. Forschung 30/II. Sonderheft, Kongressband*.