

Nährstoffkreislauf und Stoffflüsse in einem Grünland-Ökosystem

A. BOHNER, G. EDER und M. SCHINK

Abstract

The results of a four-year lysimeter study show, that nutrient leaching losses from a permanent meadow with three cuts per year (*Alchemillo monticolae-Arrhenatheretum elatioris*) are in general relatively low. This is in accordance with results obtained under different climatic conditions, grassland management, and botanical composition of the sward. From grassland soils, receiving zero nitrogen fertilizer, the annual leaching losses of nitrogen are less than 5 kg nitrogen per hectare. This amount seems to be the natural background load of a permanent meadow with no fertilizer nitrogen. Nitrogen leaching from this grassland ecosystem occurs mainly in the form of nitrate. Also dissolved organic nitrogen substantially contributes to an export of nitrogen from the grassland soil. A low content of lactate-soluble potassium in topsoil and a permanent negative potassium budget (potassium input by mineral fertilizer < potassium removal by harvested plant biomass) gradually lead to a very low annual leaching of potassium (less than 1 kg potassium per hectare) from a deep, non-calcareous, freely drained brown earth with a loamy sand texture. From a grassland soil with a sufficient content of lactate-soluble phosphorus in topsoil and a slightly positive phosphorus budget (phosphorus input by mineral fertilizer > phosphorus removal by harvested plant biomass) the annual leaching losses of phosphorus are very low (less than 1 kg phosphorus per hectare). However, after heavy rainfalls the concentration of phosphorus in the seepage water in a depth of 1,5 m can increase for a short time, leading to an enhanced loss of phosphorus with seepage water. Grassland soils in the silicate buffer-range, receiving zero nitrogen fertilizer, are characterized by relatively high leaching

losses of sulphur, mainly as sulphate accompanied by calcium. In order to minimize the nutrient leaching to groundwater and surface water a tight sward without gaps, an annual mowing with removal of the harvested plant biomass, and a long-term well-balanced soil nutrient budget are necessary.

Zusammenfassung

Die vierjährigen Lysimeteruntersuchungen haben gezeigt, dass von einem regelmäßig bewirtschafteten Grünland (nährstoffärmere Ausbildung einer dreischnittigen Frauenmantel-Glatthaferwiese) im allgemeinen keine Gefährdung des Grundwassers mit Nähr- und Schadstoffen ausgeht. Damit werden Untersuchungsergebnisse, die unter anderen klimatischen Bedingungen sowie bei andersartigen Pflanzenbeständen und Bewirtschaftungsmaßnahmen erzielt wurden, bestätigt. Bei nicht mit Stickstoff gedüngten dreischnittigen Mähwiesen muss mit einer jährlichen Stickstoff-Auswaschung von weniger als 5 kg Stickstoff pro Hektar gerechnet werden; dies stellt die natürliche bodenbürtige Stickstoff-Basisfracht dar. Der Stickstoff-Austrag erfolgt größtenteils in Form von Nitrat-Stickstoff; auch der gelöste organische Stickstoff trägt wesentlich zum Stickstoff-Export bei. Ein geringer CAL-löslicher Kalium-Vorrat im Oberboden (Gehaltsstufe A; sehr niedrig) und eine ständig negative Kalium-Bilanz (mineralische Kalium-Düngung < Entzug durch die Grünlandvegetation) lassen auf einer tiefgründigen carbonatfreien Braunerde mit der Bodenart lehmiger Sand die jährliche Kalium-Auswaschung allmählich auf Werte unter 1 kg Kalium pro Hektar absinken. Ein ausreichend mit Phosphor versorgter Grünlandboden (Gehaltsstufe C im Oberboden) weist sogar bei leicht positiver Phosphor-Bi-

lanz (mineralische Phosphor-Düngung > Entzug durch die Grünlandvegetation) eine geringe jährliche Phosphor-Auswaschung (unter 1 kg Phosphor pro Hektar) auf. Allerdings kann nach Starkregenereignissen die Phosphor-Konzentration im Sickerwasser in 1,5 m Bodentiefe kurzzeitig stark ansteigen und der verstärkte Sickerwasserabfluss kann zu einem erhöhten Phosphor-Austrag führen. Nicht mit Stickstoff gedüngte Grünlandböden im Silikat-Pufferbereich weisen einen relativ hohen jährlichen Schwefel-Austrag mit dem Sickerwasser auf; dieser erfolgt überwiegend in Form von Sulfat mit Calcium als wichtigstem begleitenden Kation. Zur Verminderung der Stoffeinträge in das Grundwasser und in Oberflächengewässer sind eine dichte, geschlossene Grasnarbe, eine regelmäßige Schnittnutzung mit Entfernung des Mähgutes und eine langfristig ausgeglichene Stoffbilanz des Grünlandbodens unbedingt erforderlich.

Einleitung

Die landwirtschaftlich genutzte Fläche beträgt in Österreich insgesamt 3,258.708 ha. Auf das Wirtschaftsgrünland (mehrmähdige Wiesen und Kulturweiden) entfallen 909.407 ha oder 28 %. Das Extensivgrünland (einmähdige Wiesen, Streuwiesen, Hutweiden, Almen und Bergmähder) erreicht ebenfalls einen Anteil von knapp 28 % an der landwirtschaftlich genutzten Fläche; dies entspricht 900.980 ha (GRÜNER BERICHT, 2006). Das Grünland hat somit hinsichtlich flächenmäßiger Verbreitung eine große Bedeutung in Österreich. Für die jährliche Grundwasserneubildung ist vor allem das Grünland im kühlen, niederschlagsreichen Berggebiet enorm wichtig.

Das oberste Ziel der Wasserwirtschaft ist die nachhaltige Sicherung der Trinkwas-

Autoren: Dr. Andreas BOHNER und Martina SCHINK, Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft (HBLFA) Raumberg-Gumpenstein, Abteilung für Umweltökologie, Raumberg 38, A-8952 IRDNING, andreas.bohner@raumberg-gumpenstein.at, Dr. Gerfried EDER, Falkenberg 133, A-8952 IRDNING

serversorgung. Das Grundwasser bildet die Basis für die Trinkwasserversorgung. In der Steiermark beispielsweise erfolgt die Trinkwasserversorgung zu 65 % aus dem Grundwasser, die restlichen 35 % entfallen auf Quellen (mündliche Auskunft der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung 19A Wasserwirtschaftliche Planung und Siedlungswasserwirtschaft). Die EU-Wasserrahmenrichtlinie plädiert daher für einen flächendeckenden Grundwasserschutz und für eine gute chemisch-biologische Qualität des Grundwassers. Die EU-Wasserrahmenrichtlinie fordert, neben dem generellen Verschlechterungsverbot von Grundwasser, auch die Gefährdung eines Grundwasserkörpers gegenüber Verschmutzungen einzuschätzen und daraus entsprechende Sanierungsmaßnahmen abzuleiten.

Eine intensive Landwirtschaft führt gebietsweise zu diffusen Nährstoffeinträgen in das oberflächennahe Grundwasser (WOLFF, 2003). Ernstzunehmende Gefahren bezüglich der Trinkwasserqualität gehen in erster Linie von Grundwasser-gefährdenden Kulturarten wie beispielsweise Silo- und Körnermais, düngungsintensive Sonderkulturen oder Fruchtfolgen mit hohem Hackfruchtanteil aus (AMBERGER, 1983). Dem Dauergrünland hingegen wird in der internationalen Literatur bei standortangepasster Bewirtschaftung im allgemeinen ein geringes Grundwasser-Gefährdungspotential attestiert (JUNG, 1972; CZERATZKI, 1972, 1973; WOODMANSEE, 1978; VETTER und STEFFENS, 1981; STREBEL und RENGER, 1982; JAGNOW und SÖCHTIG, 1983; SCHEFFER et al., 1984; EDER, 1985; MEISSNER et al., 1991; SPIESS und STAUFFER, 2002; DIEPOLDER et al., 2006; BOHNER und EDER, 2006). Aufgrund der großen flächenmäßigen Verbreitung in Österreich, wegen der unterschiedlichen Bewirtschaftungsarten (Wiese, Weide, Mähweide), Bewirtschaftungsmaßnahmen (Düngung, Bestandespflege) und Nutzungsintensitäten, aber auch aufgrund der weiten Amplitude der Grünlandstandorte ist es weiterhin notwendig, die von einer Grünlandbewirtschaftung ausgehenden potentiellen Belastungen des Grundwassers und der Oberflächengewässer mit Nähr- und Schadstoffen unter verschiedenen

österreichischen Standortsverhältnissen und Pflanzenbeständen zu untersuchen und darzustellen.

Obwohl zahlreiche Studien zum Nährstoffaustrag aus Grünland-Ökosystemen in den vergangenen Jahren erschienen sind (s.o.), gibt es noch viele offene Fragen, die gelöst werden sollten. Dazu zählen u.a. die Bedeutung des gelösten organischen Stickstoffs und Kohlenstoffs für den Stoffaustrag aus einem Grünland-Ökosystem. Der Anteil des gelösten organischen Stickstoffs an der Stickstoff-Gesamtfracht ist bisher in Grünland-Ökosystemen noch immer sehr schlecht mit Daten dokumentiert. Meist wird angenommen, dass die Stickstoff-Auswaschung überwiegend in Nitratform erfolgt. In Wald-Ökosystemen hingegen ist der gelöste organische Stickstoff verantwortlich für den Großteil des Stickstoff-Austrages mit dem Sickerwasser (PERAKIS und HEDIN, 2002; SIEMENS und KAUPENJOHANN, 2002). Für die Bewertung des chemischen Zustandes des Sickerwassers ist - neben dem Stickstoff - auch der gelöste Kohlenstoff ein wichtiger Güteparameter. Der gelöste Kohlenstoff ist ein Maß für das Denitrifikationspotential des Bodens; der wasserlösliche organische Kohlenstoff stellt nämlich den denitrifikationslimitierenden Faktor dar (EL-DEMERDASH und OTTOW, 1983). Die Denitrifikationskapazität in der ungesättigten Bodenzone ist von großer Bedeutung für die Abschätzung der Nitratbelastung des Grundwassers, denn durch Denitrifikation kann die Auswaschung von Nitrat ins Grundwasser minimiert werden.

Die Boden- und Grundwasserbelastung sowie der Düngerbedarf werden sehr häufig aufgrund von Nährstoffbilanzen beurteilt. Dazu sind sowohl Daten über die Nährstoffausträge mit dem Sickerwasser als auch Daten über die Nährstoffeinträge aus der Atmosphäre durch nasse Deposition unbedingt erforderlich.

Zur Beurteilung einer möglichen Grundwasserbelastung durch vertikale Verlagerung gelöster Stoffe im Boden benötigt man Daten über die Qualität und Quantität des Sickerwassers unterhalb des Wurzelraumes. Monolithische Feldlysimeter eignen sich besonders gut, Stoffverlagerungen im Boden zu verfolgen. Nur die Lysimetertechnik bietet die

Möglichkeit, den Stoffaustrag mit dem Sickerwasser unter weitgehend natürlichen Standortsbedingungen zu quantifizieren (MEISSNER et al., 2000). Daher wurde diese Untersuchung an einem repräsentativen österreichischen Grünlandstandort mit Hilfe eines monolithischen Feldlysimeters durchgeführt.

Mit der vorliegenden Lysimeterstudie werden folgende Ziele verfolgt:

- Bereitstellung von Daten über die jährlichen und jahreszeitlichen Schwankungen der Sickerwassermenge und -qualität
- Analyse der chemischen Zusammensetzung des Niederschlagswassers sowie Quantifizierung der jährlichen Stoffeinträge aus der Atmosphäre durch nasse Deposition
- Ermittlung der chemischen Zusammensetzung des Sickerwassers in der ungesättigten Bodenzone unterhalb des Wurzelraumes sowie Beurteilung der Sickerwassergüte
- Untersuchungen über Ausmaß und jahreszeitlichem Verlauf der Auswaschung von gelöstem organischen Stickstoff und gelöstem totalen Kohlenstoff sowie Bewertung des kulturartenspezifischen Denitrifikationspotentials in der ungesättigten Bodenzone unterhalb des Wurzelraumes
- Quantifizierung der Stoffausträge mit dem Sickerwasser und Abschätzung der jährlichen Grundwasserneubildung
- Feststellung der Senken- und Quellenfunktion eines Grünlandbodens für ausgewählte Stoffe und Stoffgruppen
- Untersuchungen über die Nährstoffentzüge durch die Grünlandvegetation sowie Ermittlung ihrer Wasserausnutzungsrate und Nährstoffeffizienz
- Bereitstellung meteorologischer, vegetationskundlicher und bodenhydrologischer Primärdaten für die Validierung von Modellen
- Beurteilung der Belastungsgefahr für Grundwasser, Oberflächengewässer und Trinkwasser durch Grünlandbewirtschaftung.

Primäres Ziel ist es, Entscheidungsträger in der Politik und Verwaltung, Interessensvertreter, Meinungsmacher, Landnutzer, Wasserversorger und Wissenschaftler über die Ergebnisse des

mehrfährigen Lysimeterversuches zu informieren, und somit eine Hilfestellung bei der sachgerechten Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie in Österreich zu leisten. Die Untersuchungsergebnisse können für die Beratung und Förderungspraxis genutzt werden.

Material und Methoden

Die Untersuchungen wurden an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein durchgeführt. Die Lysimeteranlage und die dazugehörigen Versuchsflächen befinden sich auf einer Eisrandterrasse in nahezu ebener Lage in 700 m Seehöhe. Die geographischen Koordinaten lauten 47°36.752' N und 14°30.874' E. Die Juli-Temperatur beträgt im langjährigen Mittel (1953-2005) 16,4 °C, die Jänner-Temperatur -3,5 °C und die Jahresmittel-Temperatur 6,9 °C. Der Jahres-Niederschlag macht im Durchschnitt 1035 mm aus. Die Niederschläge sind relativ gleichmäßig über das Jahr verteilt. In der Vegetationsperiode (April bis September) fallen etwa 63 % des Jahres-Niederschlages. Der Juli ist im langjährigen Mittel der niederschlagreichste Monat gefolgt vom August; im Februar fallen die geringsten Niederschlagsmengen. Die Schneedeckenperiode beträgt im langjährigen Mittel 101 Tage im Jahr und die frostfreie Zeit erstreckt sich über 173 Tage. Das Untersuchungsgebiet weist ein winterkaltes, sommerkühles, relativ niederschlag- und schneereiches, kontinental beeinflusstes Talbeckenklima auf (PILGER, 2005). Das vorherrschende Klima begünstigt die Grünlandwirtschaft und die Viehzucht. Im Untersuchungsgebiet ist daher der überwiegende Teil der landwirtschaftlich nutzbaren Fläche Dauergrünland, während der Ackerbau flächenmäßig eine geringe Bedeutung hat.

Der Feldversuch mit der Kulturart Dauergrünland wurde 1992 in zweifacher Wiederholung angelegt und seitdem in gleichartiger Weise bewirtschaftet und gedüngt. Jede Versuchsparzelle hat eine Fläche von 20 m². Die Böden sind tiefgründige, carbonatfreie Braunerden aus fluvioglazialen Sedimenten mit der Bodenart lehmiger Sand. Der Wasserhaushalt ist frisch (ausgeglichen). Die Oberböden befinden sich im ökologisch günstigen Silikat-Pufferbereich. Das C_{org}:N_{tot}-

Tabelle 1: Allgemeine Bodenkennwerte (0-25 cm Bodentiefe)

CaCl ₂ pH	μS cm ⁻¹ eL	% Humus	% N _{tot}	C _{org} :N _{tot}	P _{CAL}	mg kg ⁻¹ K _{CAL}	Mg CaCl ₂
5,7	61	3,7	0,22	9,5	53	25	90

eL = elektrische Leitfähigkeit; P_{CAL} = lactatlöslicher Phosphor-Gehalt; K_{CAL} = lactatlöslicher Kalium-Gehalt; Mg CaCl₂ = CaCl₂-extrahierbarer Magnesium-Gehalt

Tabelle 2: Allgemeine Bodenkennwerte (0-25 cm Bodentiefe)

mval 100 g ⁻¹ KAK _{eff}	BS	Ca	% Mg	K	Na	S	% Z	T
9,1	97	81	13	1,1	1,1	39	55	6

KAK_{eff} = effektive Kationenaustauschkapazität (BaCl₂-Extrakt); BS = Basensättigung; S = Sand; Z = Schluff; T = Ton

Verhältnis ist ziemlich eng. Die Oberböden sind gut mit CaCl₂-extrahierbarem Magnesium, ausreichend mit lactatlöslichem Phosphor und sehr schlecht mit lactatlöslichem Kalium versorgt. Die Oberböden weisen eine überaus niedrige effektive Kationenaustauschkapazität (BaCl₂-Extrakt) sowie eine hohe Basensättigung auf. Aus pflanzenbaulicher Sicht ungünstig ist die sehr niedrige Kalium-Sättigung (Tabelle 1, 2). Die Dauerwiese wird dreimal pro Jahr gemäht. Gedüngt wird mit Hyperphosphat im Frühjahr (90 kg P₂O₅ pro Hektar; dies entspricht 39,3 kg P pro Hektar) sowie mit Patentkali im Frühjahr und nach dem ersten Schnitt (jeweils 100 kg K₂O pro Hektar; dies entspricht jeweils 83 kg K pro Hektar). Die Dauerwiese wurde 1992 mit einer Klee-grasmischung angesät. In einem Klee-reichen Pflanzenbestand ist der Jahres-Ertrag auch ohne Düngestickstoff im allgemeinen relativ hoch; daher wurde in diesem Feldversuch auf eine mineralische Stickstoff-Düngung verzichtet. Allerdings hat sich der Klee-Anteil während der vier ausgewerteten Untersuchungs-jahre kontinuierlich von 40 auf 18 % reduziert. Der eher lückenhafte Pflanzenbestand kann derzeit einer nährstoffärmeren Ausbildung der Frauenmantel-Glatthaferwiese (*Alchemilla monticola*-*Arrhenatheretum elatioris*) zugeordnet werden. Die Frauenmantel-Glatthaferwiese ist im Untersuchungsgebiet eine typische Pflanzengesellschaft der zwei- bis dreischnittigen Mähwiesen. Der Boden und der Pflanzenbestand des Lysimeters sind mit jenen der Versuchspartellen identisch. Der auf dem Versuchsgelände der HBLFA Raumberg-Gumpenstein angelegte kombinierte Feld-Lysimeterversuch repräsentiert in

klimatischer, pedologischer und vegetationskundlicher Hinsicht einen charakteristischen österreichischen Grünlandstandort. Somit sind die Untersuchungsergebnisse mit gewissem Vorbehalt auch auf andere Grünlandgebiete im österreichischen Alpenraum übertragbar.

Für diese Lysimeterstudie wurden die Versuchsjahre 2002 bis 2005 aufgrund der sehr unterschiedlichen Jahreswitterung ausgewertet. Die Jahre 2002 und 2003 waren im Untersuchungsgebiet aus klimatischer Sicht Extremjahre. Das Jahr 2002 war sowohl in der Vegetationsperiode (April bis September) als auch im gesamten Jahresverlauf deutlich niederschlagreicher und wärmer als das langjährige Mittel (1953-2005). Das Jahr 2003 hingegen war sowohl in der Vegetationsperiode als auch im gesamten Jahresverlauf beträchtlich niederschlagärmer und wärmer als das langjährige Mittel. Das Jahr 2004 war über das Jahr betrachtet aus klimatischer Sicht annähernd ein Durchschnittsjahr, wobei allerdings die Niederschlagsmenge während der Vegetationsperiode über und das Temperaturmittel unter dem langjährigen Mittelwert lagen. Das Jahr 2005 war sowohl in der Vegetationsperiode als auch im gesamten Jahresverlauf niederschlagreicher und kühler als das langjährige Mittel. Die Zahl der Tage mit Schneedeckung stieg während der vierjährigen Untersuchungsperiode kontinuierlich an; sie war 2002 unterdurchschnittlich und 2005 überdurchschnittlich hoch.

Zur Quantifizierung der Stoffausträge mit dem Sickerwasser wurden die Sickerwassermengen mit Hilfe eines monolithischen Feldlysimeters erfasst. Dieser hat eine kreisförmige Oberfläche von 1 m². Die Sickerwassergewinnung er-

folgte über Freiausläufe an der Lysimeterunterkante in 1,5 m Bodentiefe. Die Durchwurzelungstiefe beträgt im Untersuchungsgebiet unter Dauergrünland ca. 60 cm, wobei einzelne Grünland-Pflanzenarten allerdings auch maximale Wurzeltiefen von 1 m und mehr erreichen können (SOBOTIK, mündlich). Somit werden mit Hilfe des monolithischen Feldlysimeters die Stoffausträge mit dem Sickerwasser unterhalb der Wurzelzone erfasst. Die Stoffausträge wurden durch Multiplikation der Sickerwassermenge mit der Stoffkonzentration im Sickerwasser berechnet. Zur Quantifizierung der Stoffeinträge aus der Atmosphäre wurde die nasse Deposition mit einem Niederschlagssammler in 1 Meter Höhe erfasst. Der Niederschlagssammler hat eine Auffangfläche von 314 cm². Die nasse Deposition wurde als Produkt der Stoffkonzentration im Niederschlagwasser und der Niederschlagsmenge berechnet. Die Bestimmung der Stoffkonzentration im Niederschlag- und Sickerwasser erfolgte mit der Ionenchromatographie und mit dem Photometer. Analysiert wurden die Makronährstoffe Stickstoff, Phosphor, Schwefel (erst ab 2004), Kalium, Calcium und Magnesium, das Mikro-nährelement Chlorid (erst ab 2004) sowie das "nützliche" Element Natrium. Ab dem Jahr 2005 wurden auch der gesamte Kohlenstoff (organisch und anorganisch gebundener Kohlenstoff sowie elementarer Kohlenstoff) und der gesamte gebundene Stickstoff im Niederschlag- und Sickerwasser mittels MULTI N/C

2000 bestimmt. Der Trockenmasse-Ertrag und die Nährstoffgehalte in der landwirtschaftlich nutzbaren oberirdischen pflanzlichen Biomasse wurden mit den üblichen Methoden ermittelt. In der Nähe der Lysimeteranlage befindet sich eine Wetterstation. Hier werden entsprechend den Vorschriften und Methoden der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik alle wesentlichen, den Wärme- und Wasserhaushalt bestimmenden Klimaparameter gemessen und registriert.

Ergebnisse

In der *Tabelle 3* sind die jährlichen Stoffeinträge mit den Niederschlägen für die Jahre 2002 bis 2005 angeführt. Eine straffe Beziehung zur Jahres-Niederschlagssumme war nicht vorhanden. Auffallend ist allerdings, dass die Depositionsmengen bei Natrium und Chlorid im Winterhalbjahr (Oktober bis März) stets höher waren als im Sommerhalbjahr (April bis September), während bei Gesamt-Kohlenstoff, Gesamt-Stickstoff, Ammonium-Stickstoff, Nitrat-Stickstoff, Phosphor, Schwefel und Calcium die Einträge durch nasse Deposition ausnahmslos im Sommerhalbjahr höhere Werte aufwiesen. Der atmosphärische Stickstoff-Eintrag fand überwiegend in anorganischer Form statt (88 %). Das Verhältnis von Ammonium-Stickstoff zu Nitrat-Stickstoff variierte zwischen 0,8 und 3,0. Fallweise waren mit den Niederschlägen außergewöhnlich hohe Ammonium-Depositionen festzustellen. Diese bewirkten vor allem 2004 eine

höhere anorganische Stickstoff-Deposition mit dem Niederschlagwasser. Im Durchschnitt der Untersuchungsjahre lag der anorganische Stickstoff-Eintrag durch nasse Deposition bei knapp 12 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr. Dies entspricht rund 7 % des Stickstoff-Gehaltes in der landwirtschaftlich nutzbaren oberirdischen Phytomasse. Die Atmosphäre ist somit eine nicht zu unterschätzende Stickstoff-Quelle für Grünland-Ökosysteme. Daher führt eine Bewirtschaftungsaufgabe (Flächenstilllegung) in erster Linie zu einer Stickstoff-Selbsteutrophierung von brachgefallenen Grünland-Ökosystemen (BOHNER, 2001, 2003). Die gemessenen Calcium-Einträge durch nasse Deposition waren während der vierjährigen Untersuchungsperiode wahrscheinlich überhöht. Die Calcium-Depositionsmesswerte inkludierten vermutlich auch umverlagerten Kalk- bzw. Bodestaub von der benachbarten Zufahrtsstraße zur HBLFA Raumberg-Gumpenstein, von den umliegenden Versuchsfeldern und deren Feldwege. Auch die relativ hohen Magnesium-Depositionen mit dem Niederschlagwasser in den Jahren 2002 und 2003 dürften mit umverlagerten Bodestaub zusammenhängen. Die atmosphärischen Stoffeinträge deckten während der vierjährigen Untersuchungsperiode nur bei Natrium weitgehend den Entzug durch die Grünlandvegetation (*Tabelle 4*).

In der *Tabelle 4* sind die zeitliche Entwicklung des landwirtschaftlich nutzbaren Jahres-Ertrages, die jährlichen Nähr-

Tabelle 3: Jährliche Stoffeinträge (kg ha⁻¹) mit den Niederschlägen an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein

Jahr	mm NS	kg ha ⁻¹													
		TC	TN	N _{anorg}	N _{org}	P	S	K	Ca	Mg	Na	Cl	NH ₄ -N:NO ₃ -N	N _{anorg} :N _{org}	
2002	1371			10,4		0,4		2,5	37,4	5,6	1,8			0,9	
2003	862			7,3		0,2		1,4	25,0	3,4	1,5	1,2		0,8	
2004	1090			18,0		0,4	3,5	1,1	42,6	0,6	1,3	2,3		3,0	
2005	1199	32,0	11,7	10,3	1,4	0,3	3,0	2,9	38,3	0,5	1,8	2,3		1,9	7,3

NS = Jahres-Niederschlag in mm; TC = gesamter Kohlenstoff; TN = gesamter gebundener Stickstoff; N_{anorg} = NH₄-N + NO₃-N + NO₂-N; N_{org} = TN - N_{anorg}

Tabelle 4: Trockenmasse-Erträge, Stoffgehalte in der landwirtschaftlich nutzbaren oberirdischen pflanzlichen Biomasse (3 Aufwüchse) und Nährstoffeffizienz

Jahr	dt ha ⁻¹ TM-Ertrag	kg ha ⁻¹										Nährstoffeffizienz				
		C	N	P	S	K	Ca	Mg	Na	N	P	S	K	Ca	Mg	
2002	95		197	40		198	87	31	2	48	238		48	109	307	
2003	82		197	35		223	83	32	1	42	234		37	99	256	
2004	78		160	31		192	64	24	2	49	252		41	122	325	
2005	73	3311	158	32	25	189	68	30	1	46	228	292	39	107	243	

Nährstoffeffizienz = Quotient aus erntbarer Phytomasse und deren Nährstoffgehalt

Tabelle 5: Jahres-Niederschläge, Jahresmittel-Temperaturen, Wasserausnutzungsraten, Stoffkonzentrationen im Sickerwasser in 150 cm Bodentiefe (arithmetischer Mittelwert) sowie wesentliche chemische Parameter zur Charakterisierung der Sickerwassergüte (arithmetischer Mittelwert) unter Dauergrünland

Jahr	mm NS	°C	WAR	pH	$\mu\text{S cm}^{-1}$ eL	TC		mg l ⁻¹		$\mu\text{g l}^{-1}$		mg l ⁻¹						
						TN	N _{org}	NO ₃	NH ₄	P	K	Ca	Mg	Na	SO ₄	Cl		
2002	1371	8,0	798	6,8	211			2,2	0,010	11	0,8	36	4,9	1,5				
2003	862	7,4	727	7,8	212			1,7	0,009	12	0,4	31	5,1	1,2	69			0,07
2004	1090	7,0	767	7,6	203	2,6	0,6	0,3	1,5	0,002	12	0,1	33	4,2	1,3	60		0,04
2005	1199	6,6	845	7,7	224	3,8	0,8	0,2	2,4	0,024	32	0,1	30	3,9	1,3	53		0,08

NS = Jahres-Niederschlag in mm; WAR = Quotient aus Wasserverbrauch (Jahres-Niederschlag - Sickerwassermenge) und landwirtschaftlich nutzbare oberirdische pflanzliche Biomasse; eL = elektrische Leitfähigkeit; TC = gesamter Kohlenstoff; TN = gesamter gebundener Stickstoff; N_{org} = TN - N_{anorg}

stoffentzüge durch die Grünlandvegetation und die Nährstoffeffizienz angeführt. Die Jahres-Erträge waren im Untersuchungszeitraum 2002 bis 2005 trotz gleich bleibender Grünlandbewirtschaftung vermutlich infolge Nährstoffmangels rückläufig, entsprachen aber immer noch dem durchschnittlichen Ertragsniveau von Dreischnittwiesen im Untersuchungsgebiet. Auch die jährlichen Entzüge an Stickstoff, Phosphor, Kalium und Calcium gingen infolge abnehmender Pflanzenverfügbarkeit und floristischer Veränderungen im Pflanzenbestand zurück. Von der Grünlandvegetation wurde während der vierjährigen Untersuchungsperiode 158 bis 197 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr in der landwirtschaftlich nutzbaren oberirdischen Phytomasse gespeichert. Dies entspricht einer jährlichen Stickstoff-Nettomineralisationsrate von etwa 2,4 bis 3,0 % des gesamten Stickstoff-Vorrates im Oberboden (0-25 cm). Die jährliche Phosphor-Zufuhr durch mineralische Düngung war ab 2003 etwas höher als der jährliche Phosphor-Entzug durch die Grünlandvegetation. Die jährliche Kalium-Zufuhr durch mineralische Düngung hingegen war im gesamten Untersuchungszeitraum niedriger als der jährliche Pflanzenentzug. Mit diesem ständigen Kalium-Bilanz-Defizit sind sowohl der schlechte Versorgungszustand des Grünlandbodens mit lactatlöslichem Kalium (Tabelle 1) als auch die kontinuierlich sinkenden Jahres-Erträge erklärbar. Die Nährstoffeffizienz ist definiert als Quotient aus erntbarer Phytomasse und deren Nährstoffgehalt. Die Nährstoffeffizienz war im warmen Trockenjahr 2003 und im kühlen, ertragschwachen Erntejahr 2005 am niedrigsten. Eine niedrige Nährstoffeffizienz zeigt an, dass die Grünlandpflanzen die Nährstoffe nicht besonders effizient für die oberirdische Biomasseproduktion

verwerten. Eine Ursache dafür dürfte Trockenheit und ausgeprägter selektiver Nährstoffmangel (insbesondere Kalium-Mangel) sein.

In der Tabelle 5 sind die Wasserausnutzungsrate und die Stoffkonzentrationen im Sickerwasser (arithmetische Mittelwerte) sowie wesentliche chemische Parameter zur Charakterisierung der Sickerwassergüte in 1,5 m Bodentiefe angeführt. Die Wasserausnutzungsrate ist definiert als Menge verbrauchtem Wasser pro Einheit produzierter oberirdischer pflanzlicher Biomasse; sie dient zur Abschätzung des Wasserverbrauchs von Pflanzenbeständen. Die auf der Lysimeteranlage unter Feldbedingungen für Dauergrünland ermittelte Wasserausnutzungsrate lag während der vier Untersuchungsjahre zwischen 727 und 845 Liter Wasser pro kg produzierter landwirtschaftlich nutzbarer oberirdischer Phytomasse. Für die Erzeugung von 1 kg oberirdischer Trockenmasse benötigen die Grünlandpflanzen unter den Klimabedingungen des Untersuchungsgebietes somit etwa 700 bis 850 Liter Wasser. Der Silomais hingegen verbraucht am gleichen Standort für die Erzeugung von 1 kg Trockenmasse nur rund 250 Liter Wasser (BOHNER et al., 2005). Die Wasserausnutzung ist demnach beim Silomais deutlich günstiger als beim Dauergrünland. Das Wirtschaftsgrünland hat somit offensichtlich einen hohen kulturartenspezifischen Wasserbedarf. Geht man davon aus, dass zur Produktion von 1 kg oberirdischer Trockenmasse etwa 700 bis 850 Liter Wasser notwendig sind und jährlich 7300 bis 9500 kg Grünland-Trockenmasse pro Hektar produziert werden, dann sind dafür pro Jahr 5 bis 8 Millionen Liter Wasser oder 511 bis 808 Liter pro Quadratmeter notwendig. Die Wasserausnutzungsrate der Pflanzen ist sowohl vom Bodenzustand als auch vom Klima ab-

hängig (EHLERS, 1997). Sie war beim Dauergrünland im warmen Trockenjahr 2003 am günstigsten und im kühlen, niederschlagsreichen Jahr 2005 am ungünstigsten. Die Grünlandpflanzen nutzen offensichtlich bei geringerer Bodenfeuchtigkeit das pflanzenverfügbare Bodenwasser effizienter für die oberirdische Biomasseproduktion.

Die durchschnittliche jährliche Nährstoffkonzentration im Sickerwasser direkt unterhalb des effektiven Wurzelraumes war während der vierjährigen Untersuchungsperiode bei Kalium, Ammonium, Nitrat, Chlorid und Phosphor generell sehr niedrig. Von den Erdalkalimetallen trat Calcium, von den Alkalimetallen Natrium und von den anorganischen Anionen Sulfat als Hauptinhaltsstoff im Sickerwasser in 1,5 m Bodentiefe auf. Die durchschnittliche jährliche Nitrat-Konzentration war immer sehr niedrig und variierte zwischen 1,5 und 2,4 mg NO₃ pro Liter Sickerwasser. Der Höchstwert betrug 7,6 mg NO₃ pro Liter Sickerwasser. Der EU-Grenzwert für Trinkwasser (50 mg NO₃ pro Liter) und der Grundwasser-Schwellenwert (45 mg NO₃ pro Liter) wurden während der vierjährigen Untersuchungsperiode niemals überschritten. Auch die durchschnittliche jährliche Ammonium-Konzentration war mit 0,002 bis 0,024 mg pro Liter Sickerwasser immer äußerst niedrig (maximal 0,5 mg NH₄ pro Liter Sickerwasser). Der Nitrifikationsgrad im Sickerwasser in 1,5 m Bodentiefe variierte zwischen 94 und 98 %. Die durchschnittliche Jahreskonzentration an gelöstem organischen Stickstoff betrug 0,2 bis 0,3 mg pro Liter Sickerwasser. Die gelöste organische Stickstoff-Konzentration wurde berechnet aus der Differenz zwischen gelöstem totalen Stickstoff und gelöstem anorganischen Stickstoff (Summe aus NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N). Die durchschnittliche jährliche Phosphor-Konzentration war

Tabelle 6: Verdunstungs- und Sickerwassermengen sowie Stoffausträge mit dem Sickerwasser (kg ha⁻¹) unter Dauergrünland in 150 cm Bodentiefe

Jahr	mm V	mm SW	% SW	TC	TN	kg ha ⁻¹								
						N _{anorg}	N _{org}	P	S	K	Ca	Mg	Na	Cl
2002	758	613	45			3,5		0,06		4,4	217	31	8,8	
2003	596	266	31			1,4		0,03		1,0	85	14	3,8	
2004	598	492	45			1,7		0,06	98	0,2	152	21	6,3	0,1
2005	845	354	30	14	2,8	2,2	0,6	0,13	64	0,3	107	15	4,7	0,2

V = Verdunstung in mm (Jahres-Niederschlag - Sickerwassermenge); SW = Sickerwassermenge in mm; SW % = Sickerwassermenge in % des Jahres-Niederschlages; TC = gesamter Kohlenstoff; TN = gesamter gebundener Stickstoff; N_{anorg} = NH₄-N + NO₃-N + NO₂-N; N_{org} = TN - N_{anorg}

Tabelle 7: Stickstofffraktionen und Stoffverhältnisse im Sickerwasser unter Dauergrünland in 150 cm Bodentiefe im Untersuchungsjahr 2005

N _{anorg}	kg ha ⁻¹ N _{org}	TN	NO ₃ -N in % N _{anorg}	NO ₃ -N in % TN	N _{anorg} in % TN	TC:TN	TC:N _{anorg}	TC:N _{org}	N _{anorg} :N _{org}
2,2	0,6	2,8	98	77	79	5	6	23	4

N_{anorg} = NH₄-N + NO₃-N + NO₂-N; N_{org} = TN - N_{anorg}; TN = gesamter gebundener Stickstoff; TC = gesamter Kohlenstoff

im Untersuchungsjahr 2005 mit 32 µg pro Liter Sickerwasser deutlich höher als in den Jahren zuvor. Am 22.7.2005 wurde während der vierjährigen Untersuchungsperiode der Höchstwert von 485 µg Phosphor pro Liter Sickerwasser gemessen; gleichzeitig waren auch die Konzentration an totem gelöstem Kohlenstoff und die elektrische Leitfähigkeit stark erhöht. Diese kurzfristigen Konzentrationsanstiege in 1,5 m Bodentiefe lassen sich vermutlich mit Starkregenereignissen am 8., 10. und 11.7.2005 erklären. Im Jahr 2005 traten vor allem in den Monaten Juli und August (3. Quartal) zahlreiche Starkregenereignisse mit hohen Niederschlagssummen auf. Diese dürften zu den hohen Sickerwassermengen im dritten Quartal und zu den beträchtlichen Quartals-Frachten bei den einzelnen Stoffen geführt haben (Tabelle 8). Während des Untersuchungszeitraumes war eine kontinuierliche Abnahme der durchschnittlichen Jahreskonzentration bei Kalium von 0,8 auf 0,1 mg pro Liter Sickerwasser zu verzeichnen. Sie ist vermutlich auf das ständige Kalium-Bilanz-Defizit und auf einen fehlenden Ersatz durch Mineralverwitterung zurückzuführen. Der Grünlandboden verarmt bei regelmäßiger Schnittnutzung besonders leicht an Kalium, denn mit dem Erntegut wird in erster Linie Kalium aus dem Grünland-Ökosystem abgeführt (Tabelle 4) und die Kalium-Einträge aus der Atmosphäre durch nasse Deposition sind im Vergleich dazu äußerst gering (ca. 1 %). Die durchschnittliche jährliche Sulfat-Konzentration war während der gesamten Untersuchungsperiode

mit 53 bis 69 mg pro Liter Sickerwasser ungewöhnlich hoch; Sulfat war immer das dominierende anorganische Anion im Sickerwasser in 1,5 m Bodentiefe. Die durchschnittliche jährliche Chlorid-Konzentration hingegen war während der gesamten Untersuchungsperiode mit 0,04 bis 0,08 mg pro Liter Sickerwasser extrem niedrig. Chloride sind leicht wasserlöslich und sie werden als monovalente Anionen mit großem effektiven Ionenradius im Grünlandboden normalerweise schlecht adsorbiert. Eine Erklärung für die extrem niedrige Chlorid-Konzentration im Sickerwasser in 1,5 m Bodentiefe könnte der absolute und relative Sulfat-Überschuss sein. Der pH-Wert lag während der vierjährigen Untersuchungsperiode im schwach sauren bis alkalischen Bereich. Die elektrische Leitfähigkeit betrug im jährlichen Durchschnitt 203 bis 224 µS cm⁻¹. Die durchschnittliche jährliche Stoffkonzentration im Sickerwasser war von der jährlichen Sickerwassermenge weitgehend unabhängig; eine generelle Verdünnung oder Aufkonzentrierung der einzelnen Stoffe je nach Sickerwassermenge konnte während der vier ausgewerteten Untersuchungsjahre nicht festgestellt werden.

In der Tabelle 6 sind die Verdunstungs- und Sickerwassermengen sowie die Stoffausträge mit dem Sickerwasser für die Jahre 2002 bis 2005 angeführt. Die Sickerwassermenge unterhalb des Wurzelraumes ist entscheidend für die Grundwasserneubildung; sie stellt im wesentlichen die Grundwasserneubildungsrate dar. Die jährliche Gesamtver-

dunstung wurde als Differenz von Jahres-Niederschlag und Jahressumme der Sickerwassermenge berechnet. Dieser Näherungswert für die jährliche Gesamtverdunstung variierte während der vierjährigen Untersuchungsperiode zwischen 596 und 845 mm; dies entspricht etwa 55 bis 70 % des Jahres-Niederschlags. Die jährliche Gesamtverdunstung war im ertragschwachen, niederschlagreichen Jahr 2005 am höchsten und im warmen Trockenjahr 2003 am niedrigsten. In warmen, niederschlagarmen Jahren ist die mangelnde Bodenfeuchte der begrenzende Faktor für die aktuelle Verdunstung. Der tägliche Wasserverbrauch durch Verdunstung lag in der Vegetationsperiode (April bis September) beim Dauergrünland zwischen 2,6 und 2,9 mm. Legt man für die Verdunstung von 1 Liter Wasser einen Energiebedarf von 2,454 MJ zugrunde, dann wurden in der Vegetationsperiode zwischen 39 und 44 % der am Standort gemessenen Globalstrahlung für die Verdunstung verbraucht. Der Quotient aus jährlicher Verdunstungsmenge und Jahres-Sickerwassermenge schwankte während der vierjährigen Untersuchungsperiode zwischen 1,2 und 2,4. Das warme Trockenjahr 2003 war durch eine relativ hohe Mengenrelation charakterisiert. Der Einfluss des Grünland-Ertrages und des Pflanzenbestandes auf die jährliche Sickerwassermenge war im Vergleich zum Klimaeinfluss gering; die Höhe der jährlichen Sickerwassermenge wurde in erster Linie von der Jahres-Niederschlagssumme bestimmt. Die Menge an Sickerwasser war im niederschlagreichen Jahr

Tabelle 8: Stoffausträge mit dem Sickerwasser (kg ha⁻¹) in den einzelnen Quartalen unter Dauergrünland in 150 cm Bodentiefe

Jahr	Quartal	mm SW	TC	TN	kg ha ⁻¹									
					N _{anorg}	N _{org}	P	S	K	Ca	Mg	Na	Cl	
2002	I	193			1,7		0,017			1,4	63,3	8,6	2,2	
	II	45			0,2		0,003			0,3	15,4	1,9	0,6	
	III	225			1,2		0,022			1,8	86,8	10,2	3,6	
	IV	150			0,4		0,014			0,9	51,4	10,4	2,4	
2003	I	41			0,2		0,003			0,2	14,7	2,3	0,5	
	II	36			0,2		0,001			0,1	13,9	1,9	0,4	
	III	37			0,6		0,005			0,1	7,9	1,6	0,5	
	IV	152			0,4		0,018			0,6	48,5	8,5	2,4	
2004	I	96			0,4		0,008	20,0	0,01	29,8	4,1	1,1	0,02	
	II	159			0,3		0,016	29,6	0,02	46,4	6,5	1,9	0,03	
	III	157			0,6		0,022	32,0	0,09	48,8	7,1	2,3	0,02	
	IV	80			0,4		0,010	16,0	0,05	26,6	3,3	1,0	0,05	
2005	I	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
	II	55	1,2	0,5	0,4	0,1	0,011	5,1	0,01	16,7	2,1	0,6	0,03	
	III	223	10,5	1,7	1,5	0,3	0,113	41,1	0,25	65,6	9,3	2,9	0,18	
	IV	76	2,2	0,6	0,4	0,2	0,008	17,4	0,07	24,2	3,4	1,1	0,04	

SW = Sickerwassermenge in mm; TC = gesamter Kohlenstoff; TN = gesamter gebundener Stickstoff; N_{anorg} = NH₄-N + NO₃-N + NO₂-N; N_{org} = TN - N_{anorg}

2002 am höchsten und im warmen Trockenjahr 2003 am niedrigsten. Die jährliche Grundwasserneubildungsrate variierte während der vier ausgewerteten Untersuchungsjahre zwischen 266 und 613 mm. Der Anteil der Sickerwassermenge am Jahres-Niederschlag schwankte zwischen 30 und 45 %. Beim Silomais wurde im warmen Trockenjahr 2003 ein Sickerwasser-Anteil von 47 % bei Düngung mit Rindergülle und von 55 % bei Düngung mit Stallmistkompost festgestellt (BOHNER et al., 2005). Das Dauergrünland weist mit seiner dichten Grasnarbe und ganzjährigen Vegetationsbedeckung offensichtlich einen hohen Wasserverbrauch durch Transpiration auf. Das Dauergrünland hat daher für die jährliche Grundwasserneubildung quantitativ eine geringere Bedeutung als beispielsweise Ackerland (vgl. WESSOLEK et al., 1985). Die Sickerwassermenge und somit die Grundwasserneubildungsrate zeigten im Untersuchungszeitraum 2002 bis 2005 keinen ausgeprägten jahreszeitlichen Verlauf (Tabelle 8). Generell fällt kein Sickerwasser bei langer sommerlicher Trockenperiode oder gefrorenem Boden an. Größere Sickerwassermengen treten im Untersuchungsgebiet bevorzugt im Spätwinter und Frühling während der Schneeschmelze sowie im Herbst nach Starkregenereignissen oder nach einer längeren Regenperiode auf. Während der vierjährigen Untersuchungsperiode waren vor allem

im dritten Quartal meist höhere Sickerwassermengen und somit größere vertikale Stoffausträge aus dem durchwurzelten Bodenraum zu beobachten. Das dritte Quartal kann im Untersuchungsgebiet am ehesten als auswaschungsgefährdete Zeitperiode bezeichnet werden. Nachdem insbesondere im dritten Quartal mit höheren Sickerwassermengen und somit auch größeren Stoffausträgen zu rechnen ist, dürfte eine Düngung im Herbst, zumindest auf stark durchlässigen, flachgründigen Böden aus der Sicht des Grundwasserschutzes ungünstiger als eine Frühjahrsdüngung sein.

Die pro Jahr mit dem Sickerwasser ausgetragenen Stoffmengen werden in erster Linie von der Höhe der jährlichen Sickerwassermenge und vom jährlichen Stoffentzug durch die Grünlandvegetation sowie von der selektiven Stoffspeicher- und -nachlieferungskapazität des Grünlandbodens bestimmt. Ein Vergleich der Stoffausträge des niederschlagsreichen Jahres 2002 mit jenen des niederschlagsarmen Jahres 2003 lässt erkennen, dass eine größere jährliche Sickerwassermenge infolge höherer Jahres-Niederschläge auch zu größeren Jahres-Frachten führt (Tabelle 6). In kühlen und niederschlagsreichen Jahren ist daher im allgemeinen mit einer höheren Stoffauswaschung aus Grünlandböden als in warmen und niederschlagsarmen Jahren zu rechnen. Mit dem Sickerwasser wurde während der vierjährigen Un-

tersuchungsperiode unter den Kationen am stärksten Calcium ausgewaschen (Tabelle 6). Hohe Auswaschungsverluste an Calcium führen allmählich zu einer Versauerung des Grünlandbodens. Für den vergleichsweise hohen jährlichen Calcium-Austrag (85 bis 217 kg Calcium pro Hektar) sind der relativ große BaCl₂-austauschbare Calcium-Vorrat im Grünlandboden (Tabelle 2), die relativ geringe Calcium-Aufnahme durch die Grünlandvegetation (Tabelle 4) und vor allem die ständige Calcium-Aktivierung im Grünlandboden durch Säurepufferreaktionen hauptverantwortlich. Natrium wird von den Grünlandpflanzen bei der Ionenaufnahme stark diskriminiert (Tabelle 4) und als einwertiges Kation mit relativ großem effektiven Ionenradius im Grünlandboden nur sehr schlecht adsorbiert und deshalb bevorzugt mit dem Sickerwasser ausgetragen. Die Jahresfracht betrug während der vierjährigen Untersuchungsperiode 4 bis 9 kg Natrium pro Hektar. Die sehr niedrigen jährlichen Kalium- und Stickstoff-Austräge mit dem Sickerwasser resultieren primär aus der hohen pflanzlichen Aufnahme und Speicherung in der Grünlandvegetation (Tabelle 4). Die äußerst geringe jährliche Kalium-Auswaschung (0,2 bis 4,4 kg Kalium pro Hektar) trotz mineralischer Kalium-Düngung hängt sehr wesentlich mit dem niedrigen CAL-löslichen Kalium-Gehalt des Grünlandbodens (Tabelle 1) und mit der ständig ne-

gativen Kalium-Bilanz (23 bis 57 kg Kalium pro Jahr) zusammen. Ein geringer CAL-löslicher Kalium-Vorrat im Oberboden (Gehaltsstufe A; sehr niedrig) und eine langfristig negative Kalium-Bilanz führen offensichtlich zu niedrigen Auswaschungsverlusten an Kalium. Der jährliche anorganische Stickstoff-Austrag mit dem Sickerwasser variierte während der vierjährigen Untersuchungsperiode zwischen 1,4 und 3,5 kg pro Hektar; dies entspricht 0,02 bis 0,05 % des totalen Stickstoff-Vorrates im Oberboden (0-25 cm Bodentiefe) oder 0,7 bis 1,8 % des Stickstoff-Gehaltes in der landwirtschaftlich nutzbaren oberirdischen Phytomasse. Der anorganische Stickstoff wurde im Grünlandboden zum Großteil in Form von Nitrat-Stickstoff ausgetragen, weil die Bedingungen für die Nitrifikation günstig waren und Ammonium-Stickstoff im Vergleich zu Nitrat-Stickstoff im Grünlandboden viel stärker inaktiviert wird. Die Fracht an organischem Stickstoff betrug im Untersuchungsjahr 2005 0,6 kg pro Hektar; dies entspricht 0,009 % des totalen Stickstoff-Vorrates im Oberboden (0-25 cm Bodentiefe) oder 0,4 % des Stickstoff-Gehaltes in der landwirtschaftlich nutzbaren oberirdischen Phytomasse. Der Stickstoff-Export vom Grünlandboden erfolgte im Untersuchungsjahr 2005 zu 77 % in Form von Nitrat-Stickstoff (Tabelle 7). Der Anteil des organischen Stickstoffs an der Gesamt-Stickstoff-Auswaschung betrug 21 %. Der organische Stickstoff trägt somit wesentlich zum Stickstoff-Austrag in Grünlandböden bei. Beim jährlichen Stickstoff-Austrag (weniger als 5 kg pro Hektar) handelt es sich infolge fehlender Stickstoff-Düngung um die natürliche bodenbürtige Stickstoff-Basisfracht; sie repräsentiert die unvermeidbare natürliche Stickstoff-Auswaschung unter einer nicht mit Stickstoff gedüngten dreischnittigen Mähwiese. Das Verhältnis von totalem Kohlenstoff zu totalem Stickstoff betrug im Untersuchungsjahr 2005 im Sickerwasser in 1,5 m Bodentiefe 5:1 (Tabelle 7). Es war damit deutlich enger als das $C_{org}:N_{tot}$ -Verhältnis im Oberboden (0-25 cm Bodentiefe) mit 9,5:1 (Tabelle 1). Das viel engere TC:TN-Verhältnis im Sickerwasser in 1,5 m Bodentiefe ist ein Hinweis für eine relative Stickstoff-Anreicherung des Sickerwassers insbesondere mit Nitrat-

Tabelle 9: Verhältnis Stoffeinträge mit den Niederschlägen (kg ha⁻¹) zu Stoffausträgen mit dem Sickerwasser (kg ha⁻¹) unter Dauergrünland

Jahr	TC	TN	N _{anorg}	N _{org}	P	S	K	Ca	Mg	Na	Cl
2002			3,0		6,7		0,6	0,2	0,18	0,2	
2003			5,3		7,2		1,4	0,3	0,24	0,4	
2004			10,5		6,1	0,04	6,4	0,3	0,03	0,2	17,5
2005	2,3	4,1	4,6	2,3	2,5	0,05	9,2	0,4	0,04	0,4	9,4

TC = gesamter Kohlenstoff; TN = gesamter gebundener Stickstoff; N_{anorg} = NH₄-N + NO₃-N + NO₂-N; N_{org} = TN - N_{anorg}

Stickstoff. Die jährlichen Phosphor-Austräge mit dem Sickerwasser waren trotz mineralischer Phosphor-Düngung und geringfügig positiver Phosphor-Bilanz (4 bis 8 kg Phosphor pro Jahr) wegen der beträchtlichen Phosphor-Inaktivierungskapazität des Grünlandbodens mit 0,03 bis 0,13 kg Phosphor pro Hektar sehr niedrig. Sogar ausreichend mit Phosphor versorgte Grünlandböden (Gehaltsstufe C im Oberboden) weisen offensichtlich eine geringe jährliche Phosphor-Auswaschung auf, wenn der Pflanzenbestand regelmäßig gemäht und das Mähgut von der Fläche abgeführt wird. Auch eine dichte, geschlossene Grasnarbe minimiert die Auswaschungsverluste (DIEPOLDER et al., 2006). Allerdings kann nach Starkregenereignissen die Phosphor-Konzentration im Sickerwasser in 1,5 m Bodentiefe kurzzeitig stark ansteigen und der verstärkte Sickerwasserabfluss kann zu einem erhöhten Phosphor-Austrag führen. Vom im Grünlandboden angereicherten Phosphor geht somit durchaus ein latentes Risiko für eine temporär verstärkte Stoffverlagerung in Richtung Grundwasser aus. Die jährlichen Schwefel-Austräge mit dem Sickerwasser waren immer sehr hoch; die jährlichen Auswaschungsverluste betragen 64 bis 98 kg Schwefel pro Hektar. Die jährlichen Chlorid-Austräge mit dem Sickerwasser waren mit 0,1 bis 0,2 kg Chlorid pro Hektar extrem niedrig. Insgesamt betrachtet, waren im Grünlandboden während der vierjährigen Untersuchungsperiode die Nährstoffverluste durch Austrag mit dem Sickerwasser trotz geringer effektiver Kationenaustauschkapazität im Oberboden (Tabelle 2) sehr niedrig. Im Grünlandboden nahmen die jährlichen Auswaschungsverluste in der Reihenfolge Ca > S > Mg > Na > N > K > Cl > P ab. Eine Verschiebung dieser Rangfolge von Jahr zu Jahr war mit einer Ausnahme nicht zu beobachten. Calcium war somit während der ge-

samten Untersuchungsperiode das wichtigste begleitende Kation beim Anionen-Austrag (insbesondere Sulfat-Austrag) mit dem Sickerwasser.

Die durchschnittliche jährliche Konzentration an totalem gelöstem Kohlenstoff betrug 2,6 bis 3,8 mg Kohlenstoff pro Liter Sickerwasser in 1,5 m Bodentiefe (Tabelle 5). Vor allem im dritten Quartal 2005 wurden zeitweise nach Starkregenereignissen hohe Konzentrationen (bis zu 19 mg pro Liter) gemessen und somit eine beträchtliche Quartals-Fracht festgestellt (Tabelle 8). Für das Jahr 2005 wurde eine Jahres-Fracht von 14 kg gelöstem totalen Kohlenstoff pro Hektar berechnet (Tabelle 6); dies entspricht 0,02 % des totalen Kohlenstoff-Vorrates im Oberboden (0-25 cm Bodentiefe) oder 0,4 % des Kohlenstoff-Gehaltes in der landwirtschaftlich nutzbaren oberirdischen Phytomasse. Unter Silomais wurde am gleichen Standort eine Jahres-Fracht von 15 kg gelöstem totalen Kohlenstoff pro Hektar festgestellt. Die dreischnittige Mähwiese dürfte somit eine ähnlich niedrige Denitrifikationskapazität in der ungesättigten Bodenzone unterhalb des Wurzelraumes aufweisen als der Silomais.

Vergleicht man die Stoffeinträge aus der Atmosphäre durch nasse Deposition mit den Stoffausträgen durch Sickerwasser, dann war während der vierjährigen Untersuchungsperiode der Grünlandboden eine Senke für Kohlenstoff, anorganischen und organischen Stickstoff, Phosphor, Chlorid und Kalium sowie eine Quelle für Schwefel, Calcium, Magnesium und Natrium (Tabelle 9).

Literatur

- AMBERGER, A., 1983: Stickstoffaustrag in Abhängigkeit von Kulturart und Nutzungsintensität im Ackerbau und Grünland. Arbeiten der DLG 177, 83-94.
- BOHNER, A., 2001: N-Akkumulationen in frischen Gebirgsböden ausgelöst durch Nutzungsaufga-

- be. Bericht BAL Gumpenstein, 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, 24.-25.4.2001, 67-74.
- BOHNER, A., 2003: N-Akkumulationen in krumenwechselfeuchten Gebirgsböden ausgelöst durch Bewirtschaftungsaufgabe. Bericht BAL Gumpenstein, 10. Gumpensteiner Lysimetertagung, 29.-30.4.2003, 91-95.
- BOHNER, A., M. ADAM, A. BAUMGARTEN und G. EDER, 2005: Nährstoffkreislauf in einem Silomais-Ökosystem mit besonderer Berücksichtigung des Stickstoffs. Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 11. Gumpensteiner Lysimetertagung, 5.-6.4.2005, 99-107.
- BOHNER, A. und G. EDER, 2006: Boden- und Grundwasserschutz im Wirtschaftsgrünland. Seminar Umweltprogramme für die Landwirtschaft, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 53-64.
- CZERATZKI, W., 1972: Transport von Nährstoffen aus der mineralischen Düngung durch Bodenperkolat unter den Wurzelhorizont. Ber. Landw. 50, 465-476.
- CZERATZKI, W., 1973: Die Stickstoffauswaschung in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion. Landbauforschung Völkenrode, 23. Jahrgang, 1-18.
- DIEPOLDER, M., F. PERETZKI, L. HEIGL und B. JAKOB, 2006: Nitrat- und Phosphorbelastung des Sickerwassers bei Acker- und Grünlandnutzung. Schule und Beratung, Heft 4/06.
- EDER, G., 1985: Der Einfluss steigender Güllegaben auf den Boden, den Pflanzenertrag, die Futterqualität und das Sickerwasser. Veröffentlich. der BAL Gumpenstein, Heft 3, 1-19.
- EHLERS, W., 1997: Zum Transpirationskoeffizienten von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen. Pflanzenbauwissenschaften 1, 97-108.
- EL-DEMERDASH, M.E. und J.C.G. OTTOW, 1983: Einfluss einer hohen Nitratdüngung auf Kinetik und Gaszusammensetzung der Denitrifikation in unterschiedlichen Böden. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 146, 138-150.
- GRÜNER BERICHT, 2006: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Wien.
- JAGNOW, G. und H. SÖCHTIG, 1983: Nitrogen losses from the soil to the atmosphere and to groundwater - possible ways of limiting them - a survey. Plant. Res. Develop. 17, 68-78.
- JUNG, J., 1972: Faktoren der Stickstoffauswaschung aus dem Oberboden und Beziehungen zum Gewässerschutz. Landw. Forschung 25, 336-354.
- MEISSNER, R., D. KRAMER, H. TAEGER, J. SEEGER und P. SCHONERT, 1991: Lysimeterversuchsergebnisse über Möglichkeiten zur optimierten wasser- und landwirtschaftlichen Bewirtschaftung von Trinkwasserschutzgebieten. Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkd., Berlin 35, 6, 425-434.
- MEISSNER, R., H. RUPP und M. SCHUBERT, 2000: Novel lysimeter techniques - a basis for the improved investigation of water, gas, and solute transport in soils. J. Plant Nutr. Soil Sci. 163, 603-608.
- PERAKIS, S. and L. HEDIN, 2002: Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds. Nature Vol. 415, 416-419.
- PILGER, H., 2005: Meteorologische Charakteristika der Station Gumpenstein und ihre Einbindung in größere Räume. Seminar "50 Jahre meteorologische Beobachtungen in Gumpenstein 1955-2004", Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 11-16.
- SCHEFFER, B., W. WALTHER, R. KRETZSCHMAR, W.D. SCHMIDT und H. NEUHAUS, 1984: Zum Einfluss der Bodennutzung auf den Nitrataustrag. Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung 25, 227-235.
- SIEMENS, J. and M. KAUPENJOHANN, 2002: Contribution of dissolved organic nitrogen to N leaching from four German agricultural soils. J. Plant Nutr. Soil Sci. 165, 675-681.
- SPIESS, E. und W. STAUFFER, 2002: Einfluss unterschiedlicher Bodenbedeckung auf den Stickstoffaustrag aus Lysimetern. GSF-Bericht 05/02, 37-41.
- STREBEL, O. und M. RENGER, 1982: Stoffanlieferung an das Grundwasser bei Sandböden unter Acker, Grünland und Nadelwald. Veröffentlich. des Institutes für Stadtbauwesen, TU Braunschweig 34, 131-144.
- VETTER, H. und G. STEFFENS, 1981: Nährstoffverlagerung und Nährstoffeintrag in das oberflächennahe Grundwasser nach Gülledüngung. Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung 22, 159-172.
- WESSOLEK, G., M. RENGER, M. FACKLAN und O. STREBEL, 1985: Einfluss von Standortnutzungsänderungen auf die Grundwasserneubildung. Zeitschrift Deutsche Geologische Gesellschaft 136, 357-364.
- WOLFF, J., 2003: Grundwasserqualität-Kriterium für die Güte der Trinkwasserversorgung und des Zustandes von Ökosystemen. Zbl. Geol. Paläont. Teil I, 1-10.
- WOODMANSEE, R.G., 1978: Additions and losses of nitrogen in grassland ecosystems. Bio Science 28, 448-453.

