

Phosphor-Pools und Phosphor-Verfügbarkeit im Grünlandboden als Basis für Phosphor-Düngeempfehlungen

A. BOHNER

Abstract

This study was made in a representative grassland ecosystem with a balanced soil water regime. The phosphorus content in the harvestable above-ground plant biomass, the phosphorus content in the below-ground phytomass, the phosphorus uptake by the grassland vegetation during the vegetation period, the water-soluble phosphorus content in the grassland soil and the phosphorus concentration in the soil solution for a period of two years, as well as the relationship between phosphorus concentration in the soil solution and soil properties were investigated.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurden an einem ausgewählten Grünlandstandort mit einem ausgeglichenen Bodenwasserhaushalt der Phosphor-Gehalt in der landwirtschaftlich nutzbaren oberirdischen Phytomasse, der Phosphor-Gehalt in der unterirdischen Phytomasse, der jahreszeitliche Verlauf der Phosphor-Aufnahme durch die Grünlandvegetation, der wasserlösliche Phosphor-Gehalt im Grünlandboden und die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser im Jahresverlauf sowie die Beziehung zwischen der Phosphor-Konzentration im Bodenwasser einerseits und dessen Bodeneigenschaften andererseits untersucht und diskutiert.

Einleitung

Für die Eutrophierung der Gewässer ist in erster Linie der Phosphor verantwortlich (KUMMERT & STUMM, 1989). Vom Phosphor geht daher ein besonderes Gefahrenpotential für Oberflächengewässer aus.

Der Phosphor ist für alle Lebewesen essentiell, er zählt in der Pflanzenernährung zu den lebensnotwendigen

Makronährelementen (MARSCHNER, 1998) und er hat eine große Bedeutung für die Pflanzenartenvielfalt im Grünland (BOHNER, 2005).

Phosphor wird gedüngt, um die Erträge zu steigern, den Phosphor-Gehalt in den Pflanzen zu erhöhen, und um die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten oder zu verbessern. Von einer nachhaltigen, umweltverträglichen Grünlandbewirtschaftung wird erwartet, dass die Düngung den Phosphor-Bedarf der Grünlandpflanzen deckt, gleichzeitig aber die Phosphor-Verluste durch Erosion, Abschwemmung und Auswaschung so gering wie möglich gehalten werden. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen unter anderem der Phosphor-Bedarf der Grünlandpflanzen bekannt sein und die verfügbaren Phosphor-Vorräte im Boden berücksichtigt werden (FROSSARD et al., 2004).

Für die bessere Ausnutzung der im Boden vorhandenen Phosphor-Vorräte, für die Steigerung der Effektivität der Phosphor-Düngung, für die Beurteilung des Phosphor-Austragsrisikos von Grünlandflächen und für die Ausarbeitung von Gewässerschutzmaßnahmen sind Kenntnisse über die Phosphor-Dynamik in Grünlandböden notwendig. Die Thematik ist von großer praktischer Relevanz, denn sowohl im Einzugsgebiet des Mondsees und Irrsees (BOHNER & SCHINK, 2007) als auch in anderen österreichischen Landschaftsräumen (HEINZLMAIER et al., 2005; BOHNER & EDER, 2006) ist der Großteil der untersuchten Grünlandböden – beurteilt nach den RICHTLINIEN FÜR DIE SACHGERECHTE DÜNGUNG (2006) – mit Phosphor unterversorgt.

Die Abschätzung des Phosphor-Düngebedarfs und die Ableitung von Phosphor-Düngungsempfehlungen werden im Grünland vorrangig an Hand von Bodenuntersuchungsergebnissen vor-

genommen. Die landwirtschaftliche Referenzmethode in Österreich für die Bestimmung des „pflanzenverfügbaren“ Phosphor-Gehaltes im Boden ist die Calcium-Acetat-Lactat (CAL)-Methode. Der CAL-lösliche Phosphor-Gehalt im Oberboden ist auch ein gutes Indikatorelement für die Nutzungsintensität und Bodenfruchtbarkeit sowie Maßzahl für eine ökologisch nachhaltige Grünlandbewirtschaftung (BOHNER, 2005). Der mit dem CAL-Extrakt ermittelte Phosphor-Gehalt des Grünlandbodens hat somit eine große praktische Bedeutung für die Grünlandbewirtschaftung und den Naturschutz. Für den Gewässerschutz hingegen sind vor allem die Höhe und der jahreszeitliche Verlauf des wasserlöslichen, leicht auswaschbaren Phosphors im Grünlandboden relevant.

In der vorliegenden Studie werden an einem ausgewählten Grünlandstandort mit einem ausgeglichenen Bodenwasserhaushalt der Phosphor-Gehalt in der landwirtschaftlich nutzbaren oberirdischen Phytomasse, der Phosphor-Gehalt in der unterirdischen Phytomasse, der jahreszeitliche Verlauf der Phosphor-Aufnahme durch die Grünlandvegetation, der wasserlösliche Phosphor-Gehalt im Grünlandboden und die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser im Jahresverlauf sowie die Beziehung zwischen der Phosphor-Konzentration im Bodenwasser einerseits und dessen Bodeneigenschaften andererseits vorgestellt und diskutiert.

Dieser Bericht soll Grundlagen schaffen

- für die Ausarbeitung von gewässerschonenden Phosphor-Düngungsempfehlungen und
- für die Entwicklung von Maßnahmen zur Verminderung der landwirtschaftlich bedingten Phosphor-Belastung der Gewässer.

Autor: Dr. Andreas BOHNER, LFZ Raumberg-Gumpenstein, Abteilung für Umweltökologie, Raumberg 38, A-8952 IRDNING, andreas.bohner@raumberg-gumpenstein.at

Material und Methoden

Untersuchungsgebiet und Untersuchungsfläche

Die Untersuchungen wurden am Versuchsgelände des LFZ Raumberg-Gumpenstein (Irdning, Mittleres Steirisches Ennstal, Österreich) durchgeführt. Die Untersuchungsfläche befindet sich auf einer Terrassenverebnung einer Eisrandterrasse in 718 m Seehöhe. Sie weist eine Parzellengröße von 120 m² (15 m x 8 m) auf. 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-Niederschlags. 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.

Der Boden auf der Untersuchungsfläche ist eine tiefgründige, carbonatfreie Braunerde aus fluvioglazialen Sedimenten mit der Humusform Mull, der Bodenart lehmiger Sand und einer locker gelagerten, krümeligen Struktur im Oberboden. Makromorphologisch ist keine Oberbodenverdichtung erkennbar. Redoxmerkmale wie Roströhren, Rostflecken oder Nassbleichung fehlen. Der Wasserhaushalt ist frisch (ausgeglichen). Die Untersuchungsfläche ist aus feldbodenkundlicher Sicht beurteilt homogen. Eine hohe räumliche Variabilität der Bodenkennwerte aufgrund einer Heterogenität des Bodens kann somit ausgeschlossen werden. Der Pflanzenbestand muss der Frauenmantel-Glatthaferwiese (*Alchemilla monticola*-*Arrhenatheretum elatioris*) zugeordnet werden. Überdüngungs- und Übernutzungszeiger fehlen oder kommen nur vereinzelt vor. Magerkeitszeiger wie *Anthoxanthum odoratum* und

Leontodon hispidus erreichen hingegen einen relativ hohen Deckungsgrad. Das Gräser-Kräuter-Leguminosenverhältnis beträgt im Durchschnitt 42 % Gräser, 38 % Kräuter und 20 % Leguminosen. Die Dauerwiese wird seit 2002 viermal pro Jahr gemäht. Gedüngt wird jährlich im Herbst mit Stallmistkompost (1,6 GVE pro Hektar). Nach dem ersten und zweiten Schnitt erfolgt seit 2002 eine mineralische Ergänzungsdüngung mit Nitramoncal in der Höhe von jeweils 25 kg Stickstoff pro Hektar.

Die Untersuchungsfläche repräsentiert in klimatischer, pedologischer und vegetationskundlicher Hinsicht einen charakteristischen österreichischen Grünlandstandort.

Methoden

Die Bodenproben zur Charakterisierung des Nährstoffzustandes der Untersuchungsfläche wurden aus der Tiefenstufe 0-10 cm in Form einer repräsentativen Mischprobe gezogen. Die Bodenproben wurden luftgetrocknet, homogenisiert und bei 2 mm Maschenweite gesiebt. Die Analysemethoden richten sich nach der jeweiligen ÖNORM. Aufgrund der speziellen Problemstellung (Gewässer-Eutrophierung) wurden die Bodenanalysen auf den Phosphor fokussiert. Die unterschiedlich verfügbaren Phosphor-Anteile im Boden wurden mit vier verschiedenen Phosphor-Bestimmungsmethoden charakterisiert. Die in Österreich übliche Routineuntersuchungsmethode für Phosphor ist die Calcium-Acetat-Lactat-Methode (CAL-Methode). Mit der CAL-Extraktionsmethode wird der CAL-lösliche Phosphor-Pool im Boden erfasst. Damit kann der „Kapazitätsfaktor“ annähernd ermittelt werden. Mit der Messung des Phosphor-Gehaltes im Wasserextrakt wird der „Intensitätsfaktor“ festgestellt. Die Extraktion mit Wasser liefert Informationen über die Menge an wasserlöslichem und damit leicht mobilisierbarem Phosphor im Boden. Die Quantität des hauptsächlich an pedogene Aluminium-, Eisen- und Mangan-Oxide adsorbierten Phosphates wurde durch die Bestimmung des oxalatlöslichen Phosphors ermittelt (PIHL & WERNER, 1993; LEINWEBER et al., 1997). Der Gesamtelementgehalt an Phosphor repräsentiert den „Quantitätsfaktor“. Zur Abschätzung der Phosphor-Speicher-

kapazität des Grünlandbodens und zur Beurteilung der potentiellen Gefahr von Phosphor-Verlusten durch Auswaschung wurden die Phosphor-Speicherkapazität (PSC) und der Phosphor-Sättigungsgrad (DPS) folgendermaßen berechnet (ECKHARDT & LEINWEBER, 1997):

$$PSC \text{ (in mmol kg}^{-1}\text{)} = 0.5 \times (Al_{ox} + Fe_{ox} + Mn_{ox})$$

$$DPS \text{ (in \%)} = 100 \times P_{ox} / PSC$$

Oxalatrextrahierbares Aluminium, Eisen und Mangan sowie oxalatlöslicher Phosphor wurden nach SCHWERTMANN (1964) analysiert. Die Gesamtelementgehalte an Aluminium, Eisen, Mangan und Phosphor wurden nach Mikrowellen-aufschluss mit Königswasser bestimmt. Der Gesamtgehalt an anorganischem Phosphor wurde nach Extraktion mit 0.1 M H₂SO₄ ermittelt. Der Gesamtgehalt an organischem Phosphor wurde als Differenz aus Phosphor-Gesamtgehalt und Gesamtgehalt an anorganischem Phosphor errechnet.

Um einen Überblick über die zeitliche Variabilität des wasserlöslichen und somit auswaschbaren Phosphors zu erhalten, wurden im Jahr 2006 auf der Untersuchungsfläche in wöchentlichen Abständen Bodenproben (Mischproben) aus der Tiefenstufe 0-10 cm entnommen, luftgetrocknet, homogenisiert, bei 2 mm Maschenweite gesiebt und auf wasserlöslichen Phosphor (ÖNORM L 1092) analysiert.

Die Nährstoffkonzentration in der Bodenlösung ist für die Pflanzenernährung entscheidend, denn die Pflanzen nehmen die Nährstoffe direkt aus der Bodenlösung auf. Die Phosphor-Konzentration in der Bodenlösung ist daher ein direktes Maß für den Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphor im Boden. Im Herbst 2006 wurden zur Gewinnung von Bodenwasser 10 Saugkerzen aus Siliziumcarbid der Firma UMS GmbH, Modell SIC 20-30, auf der Untersuchungsfläche in der Bodentiefe 10-15 cm installiert. Mit Hilfe der Saugkerzen wird bei einer Saugspannung von 300 hPa kontinuierlich Bodenwasser abgesaugt. Im Zeitraum 11.10.2006 bis 18.12.2007 konnte an zwanzig Terminen in jeweils 10facher Wiederholung eine ausreichende Menge an Bodenwasser für die Analyse gesammelt werden. Somit stehen bisher für jeden Untersuchungsparameter zwanzig

Analysewerte (jeweils arithmetischer Mittelwert aus zehn Einzelmesswerten) für die statistische Auswertung zur Verfügung. Die Wasserproben werden nicht tiefgefroren, sondern sofort analysiert. Die Bestimmung der Stoffkonzentration im Bodenwasser erfolgt mit der Ionenchromatographie und mit dem Photometer. Analysiert werden die Makronährstoffe Stickstoff (Ammonium, Nitrat, Nitrit), Phosphor, Schwefel, Kalium, Calcium und Magnesium, das Mikronährelement Chlorid sowie das „nützliche“ Element Natrium. Ferner werden auch der gesamte Kohlenstoff (organisch und anorganisch gebundener Kohlenstoff sowie elementarer Kohlenstoff), der gelöste organische Kohlenstoff (DOC) und der gesamte gebundene Stickstoff im Bodenwasser mittels MULTI N/C 2000 bestimmt. Der gelöste organische Stickstoff wird berechnet aus der Differenz von gesamtem gebundenen Stickstoff und gelöstem anorganischen Stickstoff (Summe aus $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$).

Der Trockenmasse-Ertrag und die Mineralstoffgehalte in der landwirtschaftlich nutzbaren oberirdischen pflanzlichen Biomasse wurden mit den üblichen Methoden bestimmt. Die Bodenproben für die unterirdische Phytomassebestimmung wurden mit einem Probenbohrer ($\text{Ø} 7,5 \text{ cm}$) entnommen. Die Probenahme erfolgte an sieben Terminen in 6facher Wiederholung. Die Untersuchungstiefe betrug 30 cm. Die unterirdische Phytomasse wurde mit Hilfe einer Wurzelwaschmaschine (SMUCKER et al., 1982) vom Boden getrennt, danach 12 Stunden bei 70 °C im Trockenschrank getrocknet und anschließend gewogen. Die Mineralstoffgehalte in der unterirdischen Phytomasse wurden mit den üblichen Methoden bestimmt.

Die statistische Auswertung der Analysedaten erfolgte mittels SPSS 14.0. Es wurden multiple Regressionsanalysen durchgeführt.

Ergebnisse

Bodenkennwerte

In den Tabellen 1 bis 4 sind ökologisch relevante bodenchemische Kennwerte des untersuchten Grünlandbodens angeführt. Der Oberboden (0-10 cm Bodentiefe) befindet sich im ökologisch

Tabelle 1: Allgemeine Bodenkenwerte (0-10 cm Bodentiefe)

CaCl ₂ pH	µS cm ⁻¹ eL	Humus %	N _t %	C _t :N _t	mg kg ⁻¹ 7d ⁻¹ nachl. N	S	CAL-P mg kg ⁻¹	CAL-K mg kg ⁻¹	H ₂ O-P
5,1	60	5,6	0,3	10,0	175	314	40	66	11

Tabelle 2: Allgemeine Bodenkenwerte (0-10 cm Bodentiefe)

Ca	Mg	K	cmol kg ⁻¹		Fe	Mn	KAK _{eff}	% BS	S	% Z	T
			Na	Al							
5,7	1,1	0,2	0,1	0,2	0,0	0,3	7,6	93,4	50	44	6

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

Tabelle 3: Allgemeine Bodenkenwerte und ausgewählte Phosphor-Fractionen (0-10 cm Bodentiefe)

			mg kg ⁻¹				g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹			
Al _{ox}	Fe _{ox}	Mn _{ox}	P _{ox}	P _t	P _i	P _o	Al _t	Fe _t	Mn _t	C _t :P _t	C _t :P _o	N _t :P _t
2841	6755	666	1016	1652	610	1042	30	42	666	18	29	2

Al_{ox}, Fe_{ox}, Mn_{ox}, P_{ox} = oxalatrextrahierbares Aluminium, Eisen, Mangan, Phosphor; P_t, Al_t, Fe_t, Mn_t = Gesamtelementgehalte an Phosphor, Aluminium, Eisen, Mangan; P_i = Gesamtgehalt an anorganischem Phosphor; P_o = Gesamtgehalt an organischem Phosphor

Tabelle 4: Phosphor-Fractionen, Phosphor-Speicherkapazität und Phosphor-Sättigungsgrad

P _o	in % von P _t		H ₂ O-P	mmol kg ⁻¹ PSC	% DPS
	P _{ox}	CAL-P			
63	62	2,4	0,7	119	28

PSC = Phosphor-Bindungskapazität; DPS = Phosphor-Sättigungsgrad

günstigen Silikat-Pufferbereich. Der Humusgehalt ist – verglichen mit anderen Grünlandböden in der Region – nicht sehr hoch. Der Oberboden weist eine niedrige elektrische Leitfähigkeit, ein enges C:N-Verhältnis und ein höheres Stickstoff-Mineralisierungspotential (potentielles Stickstoff-Nachlieferungsvermögen) auf. Der Gehalt an CAL-löslichem Phosphor und Kalium ist – beurteilt nach den RICHTLINIEN FÜR DIE SACHGE-RECHTE DÜNGUNG (2006) – niedrig; der untersuchte Grünlandboden muss jeweils der Gehaltsstufe B zugeordnet werden. Eine Kalium-Fixierung wurde nicht festgestellt. Der saure, leicht-texturierte Oberboden ist durch eine gute Wasserlöslichkeit der Phosphate charakterisiert. Er weist aufgrund des relativ niedrigen Humusgehaltes eine geringe effektive Kationenaustauschkapazität auf. Die Basensättigung ist hoch; die Calcium-Sättigung beträgt 75 %. Die Verhältnisse C_t:P_t und C_t:P_o sind im Oberboden mit 18:1 bzw. 29:1 extrem eng; das Verhältnis C_t:N_t:P_t beträgt nur 18:2:1. Diese Relationen sind deutlich niedriger als jene in der landwirtschaftlich nutzbaren oberirdischen Phytomas-

se; hier beträgt der Quotient C_t:P_t je nach Erntezeitpunkt 74 (letzter Aufwuchs) bis 122:1 (erster Aufwuchs) und das Verhältnis C_t:N_t:P_t schwankt zwischen 74:5:1 (letzter Aufwuchs) und 122:5:1 (erster Aufwuchs). Der vorhandene Phosphor-Vorrat liegt im Oberboden in unterschiedlicher Bindungsform vor. Der Gesamtgehalt an Phosphor beträgt in der Bodenschicht 0-10 cm 2072 kg Phosphor pro Hektar. Dieser errechnete hohe Phosphor-Vorrat reicht für ungefähr 61 Jahres-Ernten. Der Gesamtgehalt an organischem Phosphor macht 1308 kg Phosphor pro Hektar aus und jener an oxalatlöslichem Phosphor beträgt 1275 kg Phosphor pro Hektar. Die Menge an CAL-löslichem Phosphor macht in den obersten 10 cm im Vergleich dazu lediglich 50 kg Phosphor pro Hektar aus und der wasserlösliche Phosphor-Gehalt beträgt nur rund 13,5 kg Phosphor pro Hektar. Die im Oberboden vorhandene CAL-extrahierbare Phosphor-Menge ist allerdings deutlich höher als der jährliche Phosphor-Entzug mit der Ernte, welcher im Durchschnitt 34 kg Phosphor pro Hektar ausmacht. Der Anteil des organisch gebundenen Phosphors

am Phosphor-Gesamtgehalt ist mit 63 % relativ hoch. Erst durch mikrobiellen Abbau der organischen Substanz bzw. durch enzymatische Spaltung wird dieser Phosphor pflanzenverfügbar. Diese Prozesse sind primär vom Wärme- und Wasserhaushalt des Standortes und folglich auch von der Witterung abhängig. Der organisch gebundene Phosphor ist die dominierende Phosphor-Fraktion und somit der größte Phosphor-Pool im untersuchten Grünlandboden. Der organische Phosphor-Pool ist folglich eine wesentliche potentielle Phosphor-Quelle für die Grünlandvegetation und kann durch eine intensive Mikroorganismenaktivität mobilisiert werden. Der CAL-lösliche und wasserlösliche Phosphor-Gehalt sind Phosphor-Fraktionen aus der Düngerberatung; auf deren Basis werden Phosphor-Düngeempfehlungen abgegeben. Ihr Anteil am Phosphor-Gesamtgehalt beträgt lediglich 2.4 % und 0.7 %. Nur ein sehr kleiner Teil des gesamten Phosphor-Vorrates im Oberboden ist somit wasserlöslich oder mit der CAL-Methode extrahierbar. Die Gehalte an amorphen Aluminium-, Eisen- und Manganoxiden bzw. -hydroxiden beeinflussen die Phosphor-Sorptionskapazität des Bodens. Im untersuchten Grünlandboden haben vor allem die oxalatextrahierbaren Eisenoxide und -hydroxide eine große Bedeutung für die Adsorption und Festlegung von Phosphat. Die Phosphor-Speicherkapazität ist – bedingt durch die relativ hohen Gehalte an oxalatextrahierbarem Eisen, Aluminium und Mangan – in den obersten 10 cm mit 119 mmol pro kg Feinboden hoch. Die große Phosphor-Speicherkapazität und der hohe Gehalt an oxalatextrahierbarem Phosphor bewirken einen mäßigen Phosphor-Sättigungsgrad von 28 %. Ein Phosphor-Sättigungsgrad über 30 % wird in der internationalen Literatur als kritischer Wert für einen erhöhten Phosphor-Austrag in Gewässer angeführt (SCHOETERS et al., 1995; DE SMET et al., 1996; LOOKMAN et al., 1996; LEINWEBER et al., 1997). Dieser Grenzwert wird im untersuchten Grünlandboden zumindest in den obersten 10 cm nicht überschritten. Aufgrund der hohen Phosphor-Speicherkapazität und wegen des mäßigen Phosphor-Sättigungsgrades dürfte die Gefahr einer erhöhten Phosphor-Auswaschung mit

dem Sickerwasser bei dem untersuchten Grünlandboden gering sein.

Phosphor-Festlegung in der Phytomasse und Phosphor-Bilanz

Die untersuchte Dauerwiese mit vier Schnitten pro Jahr weist einen Jahresertrag von durchschnittlich 81 dt TM ha⁻¹ auf; dies entspricht dem allgemeinen Ertragsniveau im Untersuchungsgebiet. Der durchschnittliche Phosphor-Gehalt in der landwirtschaftlich nutzbaren oberirdischen Phytomasse variiert je nach Erntezeitpunkt zwischen 3.5 (erster Aufwuchs) und 4.9 g (letzter Aufwuchs) Phosphor pro kg Trockenmasse. Die über die gesamte Vegetationsperiode von den Grünlandpflanzen insgesamt aufgenommene Phosphor-Menge (Gesamtentzug durch die landwirtschaftlich nutzbare oberirdische Phytomasse) beträgt im Durchschnitt 34 kg Phosphor pro Hektar und Jahr. Die relativ hohen Phosphor-Gehalte und Phosphor-Entzüge weisen darauf hin, dass die Grünlandpflanzen auf der Untersuchungsfläche nicht an Phosphor-Mangel leiden und dass der Grünlandboden ausreichend mit pflanzenverfügbarem Phosphor versorgt ist. Daher beträgt der Leguminosenanteil an der floristischen Zusammensetzung des Wiesenbestandes immerhin 20 % und der Rotklee (*Trifolium pratense* ssp. *pratense*) verzeichnet einen relativ hohen Deckungsgrad. Diese Befunde stimmen auch mit dem Resultat der Bodenuntersuchung gut überein, wonach die CAL-

lösliche Phosphor-Menge im Oberboden mit 50 kg Phosphor pro Hektar die jährliche Phosphor-Aufnahme durch die Grünlandvegetation mit durchschnittlich 34 kg Phosphor pro Hektar deutlich übersteigt. Die CAL-lösliche Phosphor-Menge im durchwurzelten Unterboden ist dabei als Phosphor-Quelle für die Grünlandpflanzen noch gar nicht berücksichtigt. Es besteht allerdings eine Diskrepanz mit der Gehaltsklassen-Einstufung für den CAL-löslichen Phosphor-Gehalt gemäß den RICHTLINIEN FÜR DIE SACHGERECHTE DÜNGUNG, 2006; damit wird der Phosphor-Versorgungszustand des Grünlandbodens eindeutig unterbewertet.

Phosphor wird auch in der Wurzelmasse gespeichert. Die Wurzeln haben allerdings einen niedrigeren Phosphor-Gehalt als der Spross und das Wurzelwachstum zeigt einen anderen Jahresverlauf als das Sprosswachstum (Abbildung 1,2). Das Wurzelwachstum ist in den Sommermonaten am stärksten; dies könnte eine Anpassung der Grünlandpflanzen an die sommerliche Trockenheit sein. Die unterirdische Phytomasse war auf dem untersuchten Grünlandstandort mit Werten von 3 bis 8 dt TM pro Hektar extrem niedrig. Der durchschnittliche Phosphor-Gehalt in der unterirdischen Phytomasse beträgt 2.4 g Phosphor pro kg Trockenmasse und die Phosphor-Festlegung in der Wurzelmasse schwankt je nach Jahreszeit zwischen 0.8 und 1.9 kg Phosphor pro Hektar und Jahr (Abbildung 1).

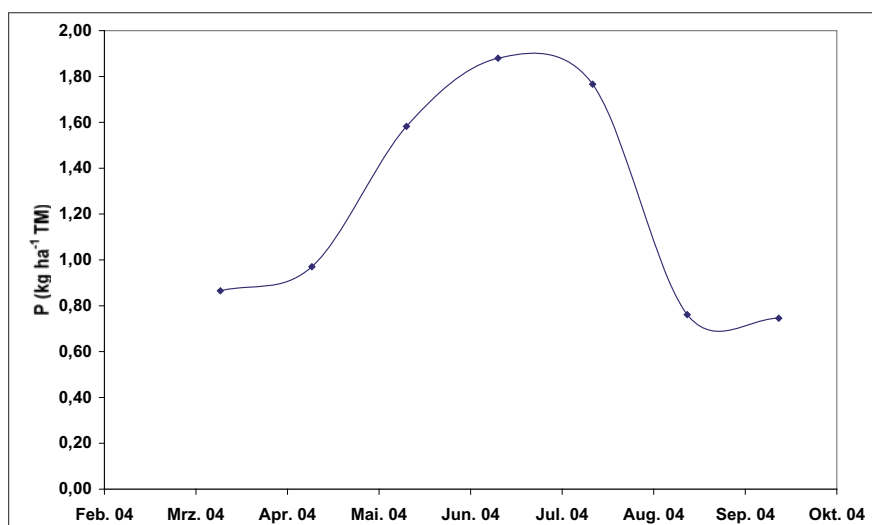


Abbildung 1: Phosphor-Festlegung (kg ha⁻¹) in der unterirdischen Phytomasse im Jahresverlauf

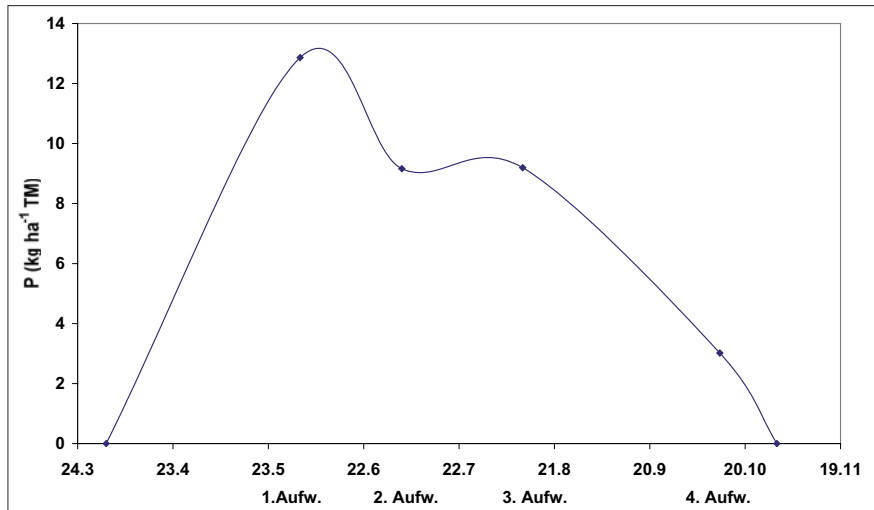


Abbildung 2: Phosphor-Mengen (kg ha⁻¹) in der landwirtschaftlich nutzbaren oberirdischen Phytomasse während der Vegetationsperiode

Tabelle 5: Phosphor-Bilanz der untersuchten Dauerwiese mit vier Schnitten pro Jahr

	kg ha ⁻¹ a ⁻¹
Düngung (Stallmistkompost)	+ 41,4
Nasse Deposition	+ 0,3
Entzug mit der Ernte	- 34,2
Austrag mit dem Sickerwasser	- 0,1
Bilanzsaldo	+ 7,4

Nasse Deposition = jährlicher Phosphor-Eintrag mit den Niederschlägen (arithmetischer Mittelwert aus 5 Jahren); Entzug mit der Ernte (arithmetischer Mittelwert aus 3 Jahren); Austrag mit dem Sickerwasser = Literaturwert (OTTO, 1980)

Die Menge an Phosphor, die in der Grünlandvegetation gespeichert und somit vor Auswaschung geschützt wird, variiert hauptsächlich mit der oberirdischen Phytomasseproduktion. Die Phosphor-Aufnahme und -Speicherung durch die Grünlandvegetation zeigen während der Vegetationszeit einen charakteristischen Jahresverlauf (Abbildung 2); einem Frühjahrsmaximum folgen die „Sommerdepression“ und ein sekundäres Herbstmaximum. Die Grünlandvegetation weist somit eine intensive Phosphor-Aufnahme zur Zeit des stärksten Pflanzenwachstums im Frühjahr auf. In dieser Jahreszeit haben die Grünlandpflanzen ihren höchsten Phosphor-Bedarf; später kann das Phosphor-Angebot aus Boden und Dünger niedriger sein. Die Tagesaufnahme rate beträgt in der Hauptwachstumszeit etwa 0.18 kg Phosphor pro Hektar. Die tägliche Phosphor-Aufnahme sinkt bis zum letzten Aufwuchs auf etwa 0.05 kg Phosphor pro Hektar ab. Die relativ hohe Rate der Phosphor-Aufnahme während

der intensiven Wachstumsphase der Grünlandpflanzen ist kein Luxuskonsum, sondern das Ergebnis eines hohen pflanzlichen Phosphor-Bedarfs.

In der Tabelle 5 ist die Phosphor-Bilanz (Gegenüberstellung von Phosphor-Zufuhr durch Düngung und nasse Deposition einerseits und Phosphor-Abfuhr mit der Ernte sowie mit dem Sickerwasser andererseits) des Feldversuches angeführt. Die jährlichen Phosphor-Einträge über die Atmosphäre durch nasse Deposition sind mit 0,3 kg Phosphor pro Hektar ziemlich niedrig im Vergleich zur Phosphor-Zufuhr mit Wirtschaftsdünger (Stallmistkompost) in der Höhe von rund 41 kg Phosphor pro Hektar. Der Phosphor-Gehalt im Grünlandboden hängt daher maßgeblich von der Menge und Art der Düngung in der Gegenwart und Vergangenheit ab (BOHNER, 2005). Die etwa 41 kg Phosphor, die pro Hektar und Jahr gedüngt werden, machen allerdings nur rund 2 % vom gesamten Phosphor-Vorrat im Oberboden (0-10 cm Bodentiefe) aus. In Grünland-Ökosystemen werden wegen der ganzjährig geschlossenen, dichten Vegetation beträchtliche Phosphor-Mengen in der ober- und unterirdischen Phytomasse gespeichert und somit vor Auswaschungsverlusten geschützt. Daher ist bei einer ökologisch nachhaltigen Grünlandbewirtschaftung das Phosphor-Eintragspotential in das Grundwasser im Vergleich zu vielen anderen Kulturarten deutlich niedriger (SCHEFFER, 1977; OTTO, 1980; SCHACHTSCHABEL et al., 1998, BOHNER et al., 2007). Mit

dem Erntegut werden dem untersuchten Grünlandboden jährlich im Durchschnitt 34 kg Phosphor pro Hektar entzogen; dies entspricht etwa 1.7 % vom gesamten Phosphor-Vorrat im Oberboden (0-10 cm Bodentiefe). Daraus kann eine jährliche Phosphor-Nachlieferungsrate von ungefähr 1.7 % abgeleitet werden. Eine Literaturübersicht lässt erkennen, dass aus intensiv landwirtschaftlich genutzten Flächen nicht mehr als 1 kg Phosphor pro Hektar und Jahr mit dem Sickerwasser ausgetragen werden (SCHEFFER, 1977; SCHACHTSCHABEL et al., 1998; BOHNER et al., 2007), wobei für Dauergrünland ein jährlicher Durchschnittswert von 0.1 kg Phosphor je Hektar angegeben wird (OTTO, 1980). Ein jährlicher Phosphor-Austrag mit dem Sickerwasser von 0.1 kg Phosphor pro Hektar entspricht auf der Untersuchungsfläche 0.2 % der Phosphor-Zufuhr mit dem Wirtschaftsdünger. Die Phosphor-Austräge durch Entzug mit der Ernte sind demnach bei standortgemäßer Grünlandbewirtschaftung um ein Vielfaches größer als die jährlichen Auswaschungsverluste mit dem Sickerwasser. Der Phosphor-Entzug mit der Ernte ist somit die Hauptquelle für Phosphor-Austräge aus Grünland-Ökosystemen. Die Entzugshöhe richtet sich primär nach dem Ertragsniveau. Jährliche Phosphor-Auswaschungsverluste von bis zu 0,1 kg Phosphor pro Hektar sind aus landwirtschaftlicher Sicht betrachtet gering. Sie können allerdings für aquatische Ökosysteme bereits kritisch sein. Für den Mondsee und Irrsee beispielsweise wurde aus dem Einzugsgebiet eine tolerierbare Phosphor-Fracht von 0,5 kg Phosphor pro Hektar und Jahr ermittelt (STRAUSS & STAUDINGER, 2007).

Insgesamt war die Phosphor-Bilanz auf der Untersuchungsfläche positiv (Tabelle 5). Bei einer mehrjährigen stark positiven Phosphor-Bilanz, wie beispielsweise in intensiv geführten Betrieben mit hoher Kraftfutterzufuhr für die Hochleistungstiere, reichert sich der Oberboden allmählich mit Phosphor an und es erhöht sich dadurch das Phosphor-Eintragspotential in die Gewässer über mehrere Jahre. Das Ziel einer nachhaltigen, umweltverträglichen Grünlandbewirtschaftung ist daher eine langfristig ausgeglichene Phosphor-Bilanz auf der Grünlandfläche.

Wasserlöslicher Phosphor-Gehalt im Jahresverlauf

Die *Abbildung 3* zeigt den wasserlöslichen Phosphor-Gehalt im Jahresverlauf. Während der Untersuchungsperiode (14.4.2006 bis 18.12.2006) wurden insgesamt 38 Bodenproben aus der Tiefenstufe 0-10 cm analysiert. Im Untersuchungszeitraum April bis Dezember waren sehr hohe Schwankungen der wasserlöslichen Phosphor-Gehalte im Oberboden zu verzeichnen. Die Variationsbreite reichte von 4 bis 15 mg Phosphor pro kg Feinboden. Der höchste wasserlösliche Phosphor-Gehalt wurde am 30. Oktober gemessen. Hauptgrund für diese Konzentrationsspitze (H_2O -P: 15 mg kg^{-1}) dürfte die Düngung mit Stallmistkompost am 18. Oktober gewesen sein. Der mit der organischen Düngung zugeführte Phosphor tritt somit bei der wasserlöslichen Phosphor-Fraktion mit einer zeitlichen Verzögerung deutlich in Erscheinung. Diese düngungsbedingte Konzentrationsspitze war allerdings nur von kurzer zeitlicher Dauer. Der wasserlösliche Phosphor-Gehalt nahm im Oberboden in den Herbstmonaten infolge abnehmender Phosphor-Aufnahme durch die Grünlandvegetation tendenziell zu. Während dieser Zeit wurde im Grünlandboden offensichtlich durch Mineralisations-, Desorptions- und Auflösungsprozesse mehr Phosphor mobilisiert als von den Grünlandpflanzen aufgenommen werden kann.

Phosphor-Konzentration im Bodenwasser im Jahresverlauf

Die *Abbildung 4* zeigt die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser in 10-15 cm Bodentiefe im Zeitraum 11.10.2006 bis 18.12.2007. Im Juni und Juli 2007 konnten wegen Umbauarbeiten im Labor keine Analysen durchgeführt werden. Während der Untersuchungsperiode gab es einen ausgeprägten saisonalen Phosphor-Konzentrationsverlauf. Die höchste Phosphor-Konzentration wurde Mitte Oktober 2006 mit durchschnittlich $64 \mu\text{g Phosphor pro Liter Bodenwasser}$ gemessen. Diese Konzentrationsspitze wurde noch vor der Düngung mit Stallmistkompost erzielt. Bis Mitte November 2006 war die durchschnittliche Phosphor-Konzentration mit über $50 \mu\text{g Phosphor pro Liter Bodenwasser}$ noch relativ hoch; danach sank sie bis Mitte

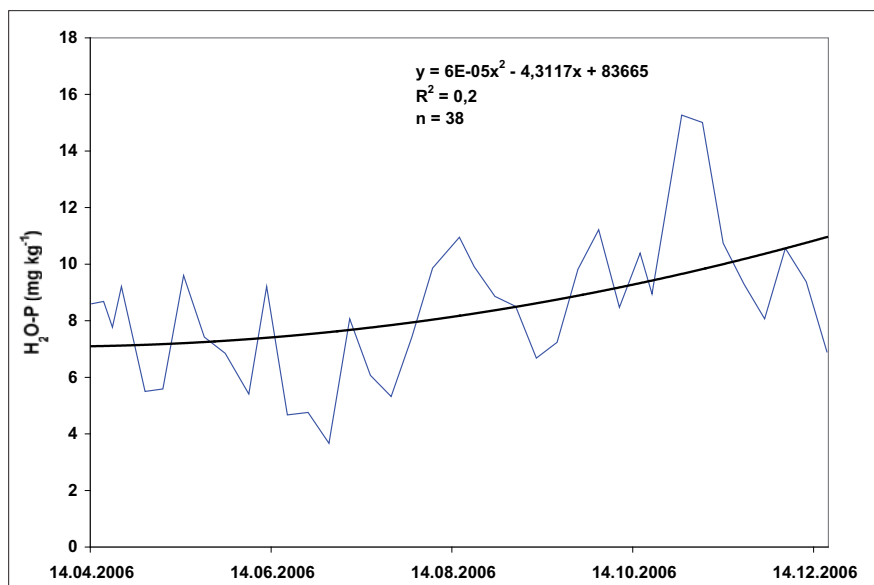


Abbildung 3: Wasserlöslicher Phosphor-Gehalt (0-10 cm Bodentiefe) im Jahresverlauf

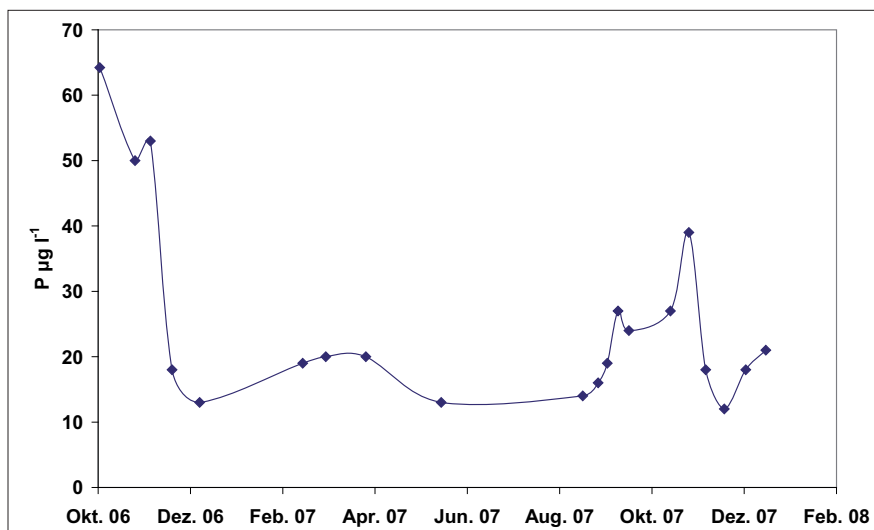


Abbildung 4: Phosphor-Konzentration im Bodenwasser (10-15 cm Bodentiefe) im Jahresverlauf

Dezember 2006 stark ab. Die relativ hohen Phosphor-Konzentrationen von Mitte Oktober bis Mitte November 2006 dürften mit der außergewöhnlich warmen und niederschlagsreichen Witterung und der daraus resultierenden hohen mikrobiellen Aktivität im Grünlandboden zu erklären sein. Von Mitte Dezember 2006 bis Mitte Februar 2007 konnte wegen des gefrorenen Bodens keine ausreichende Menge an Bodenwasser gesammelt werden. In dieser Zeit erfolgt auch kein Phosphor-Austrag mit dem Sickerwasser. Sowohl im Februar und März 2007 als auch während der Hauptwachstumsperiode war die durchschnittliche Phosphor-Konzentration

mit Werten unter $21 \mu\text{g Phosphor pro Liter Bodenwasser}$ sehr niedrig. Die geringste Phosphor-Konzentration in diesem Zeitraum mit durchschnittlich $13 \mu\text{g Phosphor pro Liter Bodenwasser}$ wurde im Mai 2007 zur Zeit des stärksten Pflanzenwachstums und der größten Phosphor-Aufnahme durch die Grünlandvegetation gemessen. Im September 2007 begann die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser infolge abnehmender pflanzlicher Phosphor-Aufnahme wieder anzusteigen. Ende Oktober wurde für das Jahr 2007 die höchste durchschnittliche Phosphor-Konzentration mit $39 \mu\text{g Phosphor pro Liter Bodenwasser}$ gemessen; danach war eine deutliche Abnahme zu

beobachten. Diese Konzentrationsspitze Ende Oktober 2007 wurde vor der Düngung mit Stallmistkompost erzielt. Somit erweist sich im bisherigen Messzeitraum der Oktober als jener Monat mit der höchsten Phosphor-Konzentration im Bodenwasser in 10-15 cm Bodentiefe.

Generell war die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser während des gesamten Messzeitraumes mit Werten von 12 bis 64 µg Phosphor pro Liter Bodenwasser sehr niedrig. Hauptverantwortlich dafür dürften die hohe Phosphor-Speicherkapazität und der mäßige Phosphor-Sättigungsgrad des untersuchten Grünlandbodens sein. Auch die Grünlandvegetation beeinflusst aufgrund ihrer Phosphor-Aufnahme während der Vegetationszeit die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser sehr wesentlich. Während der Vegetationsperiode, die im Wirtschaftsgrünland vergleichsweise lange dauert (je nach Jahreswitterung von Anfang April bis Mitte Oktober); nehmen die Grünlandpflanzen relativ viel Phosphor aus der Bodenlösung auf und vermindern dadurch die auswaschungsgefährdete Phosphor-Menge im Boden. In dieser Zeit ist die Gefahr einer erhöhten Phosphor-Auswaschung mit dem Sickerwasser gering. In den Herbstmonaten allerdings wird im Grünlandboden durch Mineralisations-, Desorptions- und Auflösungsprozesse mehr Phosphor mobilisiert als von den Grünlandpflanzen aufgenommen werden kann. Deshalb besteht in dieser Jahreszeit vor allem in Gebieten mit hohen Herbstniederschlägen insbesondere bei warmer Witterung die Gefahr einer umweltrelevanten Phosphor-Auswaschung mit dem Sickerwasser. Aufgrund des Überangebotes an Phosphor im Bodenwasser sollte aus wasserwirtschaftlicher Sicht betrachtet keine stärkere Düngung ab Mitte Oktober erfolgen. Günstiger wäre die Ausbringung geringer Mengen Phosphor-haltiger Dünger im Frühjahr kurz vor Beginn der Vegetationsperiode und während der Hauptwachstumszeit.

Eine multiple Regressionsanalyse ergab, dass während der Untersuchungszeit die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser am ehesten vom pH-Wert und von der Calcium-Konzentration bestimmt wird. In das Regressionsmodell wurden mit Ausnahme der Kieselsäure alle im Bodenwasser gelösten Stoffe und

Stoffgruppen aufgenommen, die nach derzeitigem Wissensstand die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser wesentlich beeinflussen. Allerdings müssen für eine wissenschaftlich zuverlässige und abgesicherte Aussage deutlich mehr Analysedaten als bisher für die multiple Regressionsanalyse zur Verfügung stehen. Daher werden die Untersuchungen fortgesetzt.

Schlussfolgerungen

Aus diesen Untersuchungsergebnissen können folgende praxisrelevante Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Mit der Gehaltsklasseneinteilung für den CAL-löslichen Phosphor-Gehalt gemäß den RICHTLINIEN FÜR DIE SACHGERECHTE DÜNGUNG (2006) wird der Phosphor-Versorgungszustand des Grünlandbodens eindeutig unterbewertet. Daher wäre eine Überprüfung der derzeitigen Gehaltsklasseneinstufung aus ökologischen und ökonomischen Gründen sinnvoll.
- Der wasserlösliche Phosphor-Gehalt weist sehr hohe zeitliche Schwankungen im Oberboden auf. Hauptgründe hierfür sind die Witterung, der Entzug durch die Grünlandpflanzen und die Düngung.
- Der wasserlösliche Phosphor-Gehalt nimmt im Oberboden in den Herbstmonaten infolge abnehmender Phosphor-Aufnahme durch die Grünlandvegetation tendenziell zu. Während dieser Zeit wird im Grünlandboden durch Mineralisations-, Desorptions- und Auflösungsprozesse mehr Phosphor mobilisiert als von den Grünlandpflanzen aufgenommen werden kann.
- Eine hohe Phosphor-Speicherkapazität und ein mäßiger Phosphor-Sättigungsgrad bewirken im Grünlandboden eine geringe Phosphor-Konzentration im Bodenwasser. Auch die Grünlandvegetation beeinflusst aufgrund ihrer Phosphor-Aufnahme während der Vegetationszeit die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser sehr wesentlich. Während der Vegetationsperiode, die im Wirtschaftsgrünland vergleichsweise lange dauert, nehmen die Grünlandpflanzen relativ viel Phosphor aus der Bodenlösung auf und vermindern dadurch die auswa-

schungsgefährdete Phosphor-Menge im Boden. In dieser Zeit ist die Gefahr einer erhöhten Phosphor-Auswaschung mit dem Sickerwasser gering. In den Herbstmonaten allerdings steigt die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser infolge abnehmender pflanzlicher Phosphor-Aufnahme deutlich an. Aufgrund des Überangebotes an Phosphor im Bodenwasser besteht in dieser Jahreszeit insbesondere in Gebieten mit hohen Herbstniederschlägen vor allem bei warmer Witterung die Gefahr einer umweltrelevanten Phosphor-Auswaschung mit dem Sickerwasser. Folglich sollte aus wasserwirtschaftlicher Sicht betrachtet zumindest auf besonders durchlässigen, flachgründigen Böden und/oder in Gebieten mit hohen Herbstniederschlägen keine stärkere Düngung ab Mitte Oktober erfolgen. Günstiger wäre die Ausbringung geringer Mengen Phosphor-haltiger Dünger im Frühjahr kurz vor Beginn der Vegetationsperiode und während der Hauptwachstumszeit.

- In Grünland-Ökosystemen werden wegen der ganzjährig geschlossenen dichten Vegetation beträchtliche Phosphor-Mengen in der ober- und unterirdischen Phytomasse gespeichert und somit vor Auswaschungsverlusten geschützt. Die Phosphor-Aufnahme ist zur Zeit des stärksten Pflanzenwachstums im Frühjahr am höchsten. In dieser Jahreszeit haben die Grünlandpflanzen ihren größten Phosphor-Bedarf; später könnte das Phosphor-Angebot aus Boden und Dünger niedriger sein. Die Phosphor-Düngung sollte diesem Wachstumsrhythmus angepasst werden.
- Die Phosphor-Austräge durch Entzug mit der Ernte sind bei standortangepasster Grünlandbewirtschaftung um ein Vielfaches größer als die jährlichen Auswaschungsverluste mit dem Sickerwasser. Der Phosphor-Entzug mit der Ernte ist somit die Hauptquelle für Phosphor-Austräge aus Grünland-Ökosystemen. Die Entzugshöhe richtet sich primär nach dem Ertragsniveau.

Literatur

- BOHNER, A., 2005: Soil chemical properties as indicators of plant species richness in grassland communities. *Grassland Science in Europe*, Vol. 10, 48-51.

- BOHNER, A. und G. EDER, 2006: Boden- und Grundwasserschutz im Wirtschaftsgrünland. Seminar Umweltprogramme für die Landwirtschaft, Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 53-64.
- BOHNER, A., G. EDER und M. SCHINK, 2007: Nährstoffkreislauf und Stoffflüsse in einem Grünland-Ökosystem. 12. Gumpensteiner Lysimetertagung, Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 91-99.
- BOHNER, A. und M. SCHINK, 2007: Ergebnisse der Bodenuntersuchungen im Einzugsgebiet des Mondsees und Irrsees mit besonderer Berücksichtigung des Phosphors. Schriftenreihe BAW, Band 26, 34-50.
- ECKHARDT, K.-U. und P. LEINWEBER, 1997: P-Fractionen zur Vorhersage von P-Austrägen aus landwirtschaftlich genutzten Böden. Mitt. der Deutschen Bodenkundl. Ges. 85, II, 871-874.
- HEINZLMEIER, F., M.H. GERZABEK, M. TULIPAN und A. BAUMGARTEN, 2005: Pflanzennährstoffe in Österreichs Böden: Räumliche und zeitliche Variationen sowie Wechselwirkungen mit Bodeneigenschaften. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 17, 96-97.
- KUMMERT, R. und W. STUMM, 1989: Gewässer als Ökosysteme. Grundlagen des Gewässerschutzes, Teubner Verlag, 331 S.
- LEINWEBER, P., F. LÜNSMANN und K.U. ECKHARDT, 1997: Phosphorus sorption capacities and saturation of soils in two regions with different livestock densities in northwest Germany. Soil Use and Management 13, 82-89.
- LOOKMAN, R., K. JANSEN, R. MERCKX and K. VLASSAK, 1996: Relationship between soil properties and phosphate saturation parameters. A transect study in northern Belgium. Geoderma 69, 265-274.
- MARSCHNER, H., 1998: Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. 889 p.
- OTTO, A., 1980: Gewässerbelastung durch Land- und Forstwirtschaft. Wasser und Boden 1/1980, 26-30.
- PIHL, U. und W. WERNER, 1993: Zur Interpretation von Quantitäts-/Intensitäts-Quotienten als Kriterien vertikaler Phosphatverlagerung in Böden. VDLUFA Kongressband 1993, 37, 99-102.
- 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.
- RICHTLINIEN FÜR DIE SACHGERECHTE DÜNGUNG, 2006: Anleitung zur Interpretation von Bodenuntersuchungsergebnissen in der Landwirtschaft. 6. Aufl., Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 80 S.
- SCHACHTSCHABEL, P., H.-P. BLUME, G. BRÜMMER, K.H. HARTGE und U. SCHWERTMANN, 1998: Lehrbuch der Bodenkunde, 14. Auflage, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 494 S.
- SCHOETERS, L., R. LOOKMAN, R. MERCKX and K. VLASSAK, 1995: Inventorisation and evaluation of phosphate saturation in Northern Belgium. Proceedings of the International Workshop, Phosphorus Loss to Water from Agriculture, Wexford, 79-80.
- SCHWERTMANN, U., 1964: Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. Z. f. Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde 105, 194-202.
- SMUCKER, A.J.M., S.L. Mc BURNEY and A.K. SRIVASTANA, 1982: Quantitative separation of roots from compacted soil profiles by the Hydropneumatik Elutriation System. Agronomy Journal, 500-503.
- STRAUSS, P. und B. STAUDINGER, 2007: Berechnung der Phosphor- und Schwebstofffrachten zweier Hauptzubringer (Zellerache, Fuschlerache) des Mondsees. Schriftenreihe BAW, Band 26, 18-33.



gefördert von der Europäischen Union mit Mitteln aus dem Europäischen Fonds im Rahmen der Gemeinschaftsinitiative INTERREG IIIA