

## Jahreszeitlicher Verlauf der Phosphor-Konzentration im Bodenwasser eines Grünlandbodens

Andreas Bohner<sup>1\*</sup> und Viktoria Rohrer<sup>1</sup>

### Zusammenfassung

Von einer ressourcenschonenden und umweltverträglichen Grünlandbewirtschaftung wird erwartet, dass die Düngung an den zeitlichen und mengenmäßigen Nährstoffbedarf der Vegetation angepasst ist. Um dieses Ziel zu erreichen, sind Kenntnisse über den jahreszeitlichen Verlauf der Phosphor-Konzentration im Bodenwasser des Hauptwurzelraumes notwendig. In der vorliegenden Studie wurde daher an einem repräsentativen Grünlandstandort mit einem ausgeglichenen Bodenwasserhaushalt die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser im Jahresverlauf untersucht. Zur Gewinnung von Bodenwasser wurden auf der Untersuchungsfläche zehn Saugkerzen in der Bodentiefe 10-15 cm installiert. Im Zeitraum 1.1.2007 bis 31.12.2010 konnte an 69 Terminen bei einer Saugspannung von 300 hPa eine ausreichende Menge an Bodenwasser für die chemische Analyse gesammelt werden. Die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser wies im Jahresverlauf starke zeitliche Schwankungen auf. Die Variabilität war auch zwischen den Jahren sehr groß. Hauptverantwortlich dafür dürften die Witterungsverhältnisse während des Jahres, die Witterungsunterschiede zwischen den Jahren und die saisonabhängige Phosphor-Aufnahme durch die Grünlandpflanzen sein. Die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser war während der Vegetationsperiode meist sehr niedrig. Sie nahm in den Herbstmonaten (Oktober bis Dezember) tendenziell zu. Während dieser Zeit wurde im Grünlandboden mehr Phosphor mobilisiert als von den Pflanzen aufgenommen werden konnte. Eine Phosphor-Düngung sollte daher im Frühling kurz vor Beginn der Vegetationsperiode und während der Hauptwachstumszeit der Grünlandvegetation erfolgen.

*Schlagwörter:* Saugkerzen, Phosphor-Fraktionen, Phosphor-Dynamik, Phosphor-Speicherkapazität, Düngeempfehlungen

### Summary

Fertilizer applications should be adapted to the temporal and quantitative nutritional requirement of the grassland vegetation. In order to reach this target, knowledge of the temporal variation of the phosphorus concentration in the soil solution of the main root zone is necessary. Thus, we investigated the phosphorus concentration in the soil solution throughout the year. The present study was made in a representative grassland ecosystem in Styria, Austria. The soil type was a freely drained, deep, carbonat-free Cambisol. The soil solution was sampled with ten suction cups using a tension of 300 hPa. The suction cups were installed at 10 to 15 cm soil depth. During the sampling period, which lasted from 1.1.2007 to 31.12.2010, an adequate amount of soil water for chemical analysis could be collected at 69 dates. The phosphorus concentration in the soil solution varied considerably in the course of the year. There was also a high degree of variability between the years. The different weather conditions within a year and between the years as well as the seasonal phosphorus uptake by plants may be primarily responsible for the temporal variation. The phosphorus concentration in the soil solution was very low during the vegetation period. There was a tendency to increased concentrations mainly in autumn (October to December). During this time, the released amount of phosphorus exceeded the requirement of the plants. Thus, phosphoric fertilizer should be applied to grassland soils in spring at the beginning of the vegetation period and during the main growing season of the grassland vegetation.

*Keywords:* suction cups, phosphorus fractions, phosphorus dynamic, phosphorus sorption capacity, fertilizer recommendations

<sup>1</sup> LFZ Raumberg-Gumpenstein, Abteilung Umweltökologie, Raumberg 38, A-8952 IRDNING

\* Dr. Andreas BOHNER, andreas.bohner@raumberg-gumpenstein.at



## Einleitung

Die Nährstoffverfügbarkeit im Boden hängt vom Intensitäts-, Kinetik-, Kapazitäts- und Quantitätsfaktor ab. Für die Pflanzenernährung ist die Nährstoffkonzentration in der Bodenlösung (Intensitätsfaktor) entscheidend, denn die Pflanzen nehmen die Nährstoffe direkt aus der Bodenlösung auf. Die Nährstoffkonzentration in der Bodenlösung ist daher ein direktes Maß für den Gehalt an pflanzenverfügbaren Nährstoffen im Boden.

Der Intensitätsfaktor ist auch für die Beurteilung des Nährstoff-Austragsrisikos von Grünlandflächen relevant, denn die im Bodenwasser gelösten Nährstoffe können direkt mit dem Sickerwasser im Boden verlagert und aus dem Boden ausgewaschen werden. Der Kinetikfaktor hat für die Nährstoffaufnahme der Pflanzen eine große Bedeutung. Man versteht darunter die Rate, mit der die Bodenlösung durch die Bodenfestphase mittels Mineralisations-, Desorptions- und Auflösungsprozessen wieder aufgefüllt wird. Der Kapazitätsfaktor hingegen ist ein Maß für die mobilisierbaren Nährstoffreserven im Boden und der Quantitätsfaktor repräsentiert den Gesamtelementgehalt eines Nährstoffs im Boden (Marschner, 1998; Scheffer und Schachtschabel, 2002).

Die routinemäßige Bestimmung des Phosphor-Gehaltes in landwirtschaftlich genutzten Böden erfolgt in Österreich mit Hilfe der Calcium-Acetat-Lactat-Methode (CAL-Methode). Damit wird der CAL-lösliche Phosphor-Gehalt im Boden erfasst. Dieser entspricht annähernd dem Kapazitätsfaktor. Der CAL-lösliche Phosphor-Gehalt im Oberboden (0-10 cm Bodentiefe) dient in der Landwirtschaft sowohl als Grundlage für die Ermittlung des Phosphor-Düngebedarfs als auch zur Ableitung und Begründung einer Phosphor-Düngeempfehlung. Die mit der CAL-Extraktionsmethode gemessenen Phosphor-Gehalte liefern allerdings keine Informationen über den Intensitäts- und Kinetikfaktor. Sie können daher auch nicht als „pflanzenverfügbar“ bezeichnet werden (Knauer, 1968). Der CAL-lösliche Phosphor-Gehalt im Boden stellt eine „Momentaufnahme“ dar und gilt streng genommen nur für den Zeitpunkt der Probenahme. Standorte mit ähnlichen Kapazitätsfaktoren können allerdings verschiedene Kinetikfaktoren aufweisen (Flossmann und Richter, 1982). Unterschiedliche Pflanzenerträge auf Böden mit gleichen Gehalten an CAL-löslichem Phosphor können daher das Ergebnis verschiedener Freisetzungs- und Nachlieferungsgeschwindigkeiten der Bodenphosphate sein. Eine Beurteilung der Phosphor-Verfügbarkeit im Boden und die quantitative Ableitung der benötigten Phosphor-Düngermenge, um einen bestimmten Ertrag oder Phosphor-Gehalt in den Pflanzen zu erzielen, sind somit allein auf der Basis von CAL-löslichen Phosphor-Gehalten nicht möglich (Jungk, 1993). Auch die Phosphor-Nachlieferungsrate aus dem verfügbaren Vorrat sowie die Transportrate durch Massenfluss und Diffusion mit und in der Bo-

denlösung zur Pflanzenwurzel müssen berücksichtigt werden (Scheffer und Schachtschabel, 2002).

Die Düngung ist neben der Regulierung der Bodenwasserverhältnisse das wirksamste Mittel, um die Grünlanderträge zu erhöhen und die Futterqualität zu verbessern (Witter, 1966). Von einer ressourcenschonenden und umweltverträglichen Grünlandbewirtschaftung wird erwartet, dass die Düngung den Phosphor-Bedarf der Pflanzen deckt, gleichzeitig aber die Phosphor-Verluste durch Erosion, Abschwemmung und Auswaschung so gering wie möglich gehalten werden (Frossard *et al.*, 2004). Daher ist es notwendig, die Düngung an den zeitlichen und mengenmäßigen Nährstoffbedarf der Vegetation anzupassen (Werner *et al.*, 1991). Um dieses Ziel zu erreichen, muss einerseits der saisonabhängige Phosphor-Bedarf der Pflanzen bekannt sein und andererseits die Phosphor-Dynamik im Boden berücksichtigt werden. Die Phosphor-Dynamik im Boden ist von vielen Bodeneigenschaften abhängig. Entscheidend sind vor allem pH-Wert, Bodenwasserhaushalt (Redoxpotenzial), Bodentemperatur und mikrobielle Aktivität (Phosphataseaktivität) im Boden (Scheffer und Schachtschabel, 2002).

Im Grünland entfallen 80 bis 90% der gesamten Wurzelmasse auf die Tiefenstufe 0 bis 10 cm (Kmoč, 1952). Nach Klapp (1971) kommen im Grünland unterhalb von 30 bis 40 cm Bodentiefe nur mehr wenige Prozent der gesamten Wurzelmasse vor. Die Grünlandpflanzen nehmen deshalb ihre Nährstoffe überwiegend aus den obersten 30 cm des Bodens auf. Für die Optimierung von Phosphor-Düngemaßnahmen sind daher Kenntnisse über den jahreszeitlichen Verlauf der Phosphor-Konzentration im Bodenwasser des Hauptwurzelraumes notwendig. Davon hängt die Ausnutzbarkeit und Ertragswirksamkeit der Phosphor-Dünger und somit die bedarfsgerechte Menge und der optimale Zeitpunkt der Phosphor-Düngung ab. Über den jahreszeitlichen Verlauf der Phosphor-Konzentration im Bodenwasser des Hauptwurzelraumes von österreichischen Grünlandböden ist bisher noch wenig bekannt. Die Thematik ist allerdings von großer praktischer Relevanz, denn Phosphor ist nicht nur ein lebensnotwendiges Nährelement für alle Lebewesen, sondern auch für die Eutrophierung der Gewässer hauptverantwortlich (Kummert und Stumm, 1989). Außerdem beeinflusst der Phosphor-Gehalt im Oberboden die Pflanzenartenvielfalt im Dauergrünland (Bohner, 2005). Phosphor gehört zu den knappen Rohstoffen (Finck, 1992). Die derzeit bekannten weltweiten Phosphor-Lagerstätten reichen bei pessimistischer Prognose für 30-40 Jahre und bei optimistischer Prognose für 60-90 Jahre (Leifert *et al.*, 2009). Die Preise für mineralische Phosphor-Dünger werden deshalb in Zukunft vermutlich steigen. Ein effizienter Einsatz mineralischer Phosphor-Dünger ist daher sowohl aus Gründen des Natur- und Umweltschutzes als auch aus Kostengründen notwendig.

Das primäre Ziel dieser Studie ist es daher, Grundlagen zu schaffen für eine bedarfsgerechte und umweltverträgliche Phosphor-Düngung. Einige Untersuchungsergebnisse wurden bereits publiziert (Bohner, 2008).

## 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 m<sup>2</sup> (15 m x 8 m) auf. Das Untersuchungsgebiet gehört geologisch zur Grauwackenzone. 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 somit ein winterkaltes, sommerkühles, relativ niederschlag- und schneereiches, kontinental beeinflusstes Talbeckenklima auf (Pilger, 2005). Die relativ niedrige Lufttemperatur und die kurze Vegetationsperiode sind die begrenzenden klimatischen Faktoren.

Der Boden auf der Untersuchungsfläche ist eine tiefgründige, carbonatfreie Braunerde aus fluvioglazialen Sedimenten. Die Humusform ist Mull und die Bodenart ist lehmiger Sand. Der locker gelagerte und stark durchwurzelte Oberboden weist eine krümelige Struktur auf. Makromorphologisch ist keine Bodenverdichtung erkennbar. Redoxmerkmale wie Roströhren, Rostflecken oder Nassbleichung fehlen. Der Wasserhaushalt ist frisch (ausgeglichen). In den *Tabellen 1 bis 4* sind ökologisch relevante bodenchemische Kennwerte des untersuchten Grünlandbodens angeführt. Der Oberboden (0-10 cm Bodentiefe) befindet sich gerade noch im Silikat-Pufferbereich. Der Humusgehalt ist - verglichen mit anderen Grünlandböden in der Region - nicht sehr hoch. Der Oberboden weist eine niedrige elektrische Leitfähigkeit und ein enges C:N-Verhältnis auf. Der Gehalt an CAL-löslichem Phosphor und Kalium ist - beurteilt nach den Richtlinien für die sachgerechte Düngung (BMLFUW, 2006) - niedrig; der Grünlandboden muss jeweils der Gehaltsstufe B zugeordnet werden. Der Oberboden weist einen relativ hohen Gehalt an wasserlöslichem Phosphor und eine geringe effektive Kationenaustauschkapazität auf. Die Basensättigung ist mit 93% ziemlich hoch; die Calcium-Sättigung beträgt 75%. Der Gesamtgehalt an Phosphor ist mit 1652 mg pro kg Feinboden sehr hoch.

Der Anteil des organisch gebundenen Phosphors am Phosphor-Gesamtgehalt beträgt 63%. Der organisch gebundene Phosphor ist somit im Oberboden der größte Phosphor-Pool. Auch der Gehalt an oxalatextrahierbarem Phosphor ist sehr hoch. Der oxalatlösliche Phosphor entspricht der Menge des hauptsächlich an pedogene Aluminium-, Eisen- und Mangan-Oxide adsorbierten Phosphates (Leinweber *et al.*, 1997).

Der Anteil des CAL-löslichen und wasserlöslichen Phosphor-Gehaltes 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 Verhältnisse C<sub>org</sub>:P<sub>t</sub> und C<sub>org</sub>:P<sub>o</sub> sind im Oberboden mit 18:1 und 29:1 extrem eng. Auch das N<sub>t</sub>:P<sub>t</sub>-Verhältnis ist sehr niedrig. Der untersuchte Grünlandboden weist in den obersten 10 cm eine große Phosphor-Speicherkapazität auf. Ursache hierfür sind vor allem die hohen Gehalte an oxalatextrahierbarem Eisen und Aluminium. Der Phosphor-Sättigungsgrad ist - bedingt durch den hohen Gehalt an oxalatextrahierbarem Phosphor - mit 28% relativ hoch.

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

CaCl <sub>2</sub>	μS cm <sup>-1</sup>	%		mg kg <sup>-1</sup>		H <sub>2</sub> O-P	
pH	eL	Humus	N <sub>t</sub>	C <sub>org</sub> :N <sub>t</sub>	CAL-P	CAL-K	
5,1	60	5,6	0,3	10,0	40	66	11

eL = elektrische Leitfähigkeit; N<sub>t</sub> = Gesamtgehalt an Stickstoff  
 C<sub>org</sub> = Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff  
 CAL-P und CAL-K = CAL-löslicher Phosphor- und Kalium-Gehalt  
 H<sub>2</sub>O-P = wasserlöslicher Phosphor-Gehalt

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

		cmol kg <sup>-1</sup>					%		%		T
Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	KAK <sub>eff</sub>	BS	S	Z	
5,7	1,1	0,2	0,1	0,2	0,0	0,3	7,6	93,4	50	44	6

KA<sub>eff</sub> = effektive Kationenaustauschkapazität (BaCl<sub>2</sub>-Extrakt)  
 BS = Basensättigung, S = Sand, Z = Schluff, T = Ton

Tabelle 3: Allgemeine Bodenkennwerte und ausgewählte Phosphor-Fraktionen (0-10 cm Bodentiefe)

mg kg <sup>-1</sup>									
Al <sub>ox</sub>	Fe <sub>ox</sub>	Mn <sub>ox</sub>	P <sub>ox</sub>	P <sub>t</sub>	P <sub>i</sub>	P <sub>o</sub>	C <sub>org</sub> :P <sub>t</sub>	C <sub>org</sub> :P <sub>o</sub>	N <sub>t</sub> :P <sub>t</sub>
2841	6755	666	1016	1652	610	1042	18	29	2

Al<sub>ox</sub>, Fe<sub>ox</sub>, Mn<sub>ox</sub>, P<sub>ox</sub> = oxalatextrahierbares Aluminium, Eisen, Mangan, Phosphor  
 P<sub>t</sub> = Gesamtelementgehalt an Phosphor  
 P<sub>i</sub> = Gesamtgehalt an anorganischem Phosphor  
 P<sub>o</sub> = Gesamtgehalt an organischem Phosphor

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

P <sub>o</sub>	P <sub>ox</sub>	in % von P <sub>t</sub>		mmol kg <sup>-1</sup>	%
		CAL-P	H <sub>2</sub> O-P	PSC	DPS
63	62	2,4	0,7	119	28

Der Pflanzenbestand muss der Frauenmantel-Glatthaferwiese (*Alchemilla monticola*-*Arrhenatheretum elatioris*) zugeordnet werden. Überdüngungs- und Übernutzungszeiger fehlen oder kommen nur vereinzelt vor. Das Gräser-Kräuter-Leguminosenverhältnis beträgt im Durchschnitt 42% Gräser, 38% Kräuter und 20% Leguminosen. Die Düngungs- und Nutzungsgeschichte des Pflanzenbestandes ist nicht bekannt. Eine düngerbedingte Phosphor-Anreicherung im Oberboden ist auf Grund des hohen Phosphor-Gesamtgehaltes und der engen C:P- und N:P-Verhältnisse anzunehmen. Die Dauermähwiese wurde im Untersuchungszeitraum 2007 bis 2010 viermal pro Jahr gemäht. Der Jahresertrag betrug durchschnittlich 81 dt Trockenmasse pro Hektar; dies entspricht dem allgemeinen Ertragsniveau im Untersuchungsgebiet. Gedüngt wurde jährlich im Herbst mit Stallmistkompost. Die Düngungstermine waren 5.11.2007, 15.10.2008, 22.10.2009 und 14.10.2010. Die jährliche ausgebrachte Düngermenge entsprach der zulässigen Höchstmenge für Wirtschaftsdünger (170 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr) gemäß EU-Nitratrichtlinie. Die Phosphorzufuhr mit dem Stallmistkompost variierte von Jahr zu Jahr und betrug im Durchschnitt 64 kg Phosphor pro Hektar und Jahr.

Die Untersuchungsfläche repräsentiert in klimatischer, pedologischer und vegetationskundlicher Hinsicht einen charakteristischen österreichischen Grünlandstandort. Die Untersuchungsergebnisse können daher auf zahlreiche andere typische Grünlandgebiete in Österreich übertragen werden.

### Methoden

Im Herbst 2006 wurden zur Gewinnung von Bodenwasser zehn Saugkerzen aus Siliziumcarbid der Firma UMS GmbH, Modell SIC 20-30, auf der Untersuchungsfläche in der Bodentiefe 10-15 cm installiert. Diese Untersuchungstiefe wurde gewählt, um den jahreszeitlichen Verlauf der Phosphor-Konzentration im Hauptwurzelraum zu erfassen. Mit Hilfe der Saugkerzen wurde bei einer Saugspannung von 300

hPa schwach gebundenes Porenwasser abgesaugt. Die Wasserproben wurden nicht tiefgefroren, sondern sofort analysiert. Die Bestimmung der Phosphor-

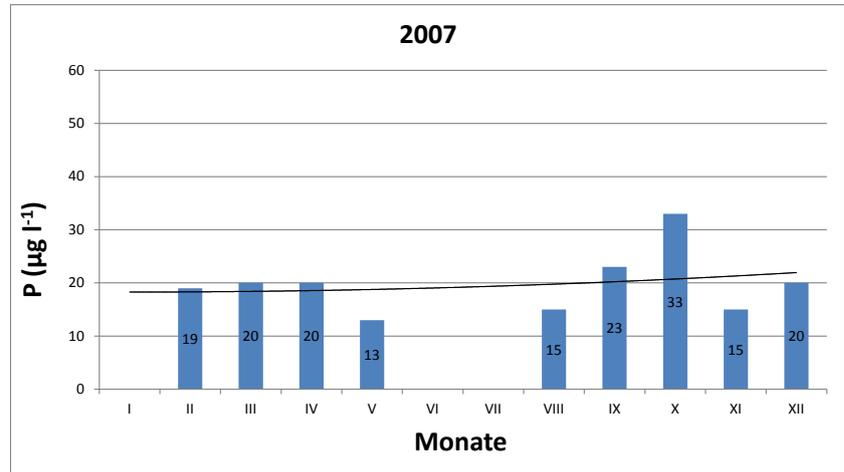


Abbildung 1: Phosphor-Konzentration im Bodenwasser (10-15 cm Bodentiefe) im Jahresverlauf (Zeitraum: 1.1.2007-31.12.2007)

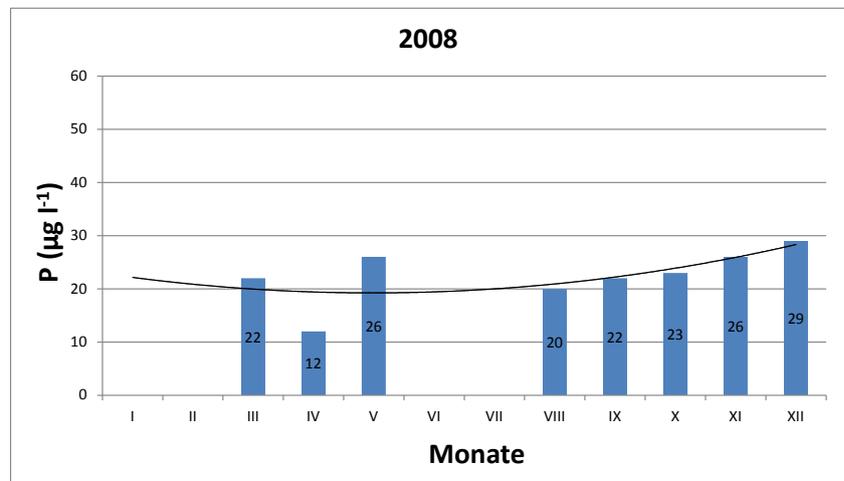


Abbildung 2: Phosphor-Konzentration im Bodenwasser (10-15 cm Bodentiefe) im Jahresverlauf (Zeitraum: 1.1.2008-31.12.2008)

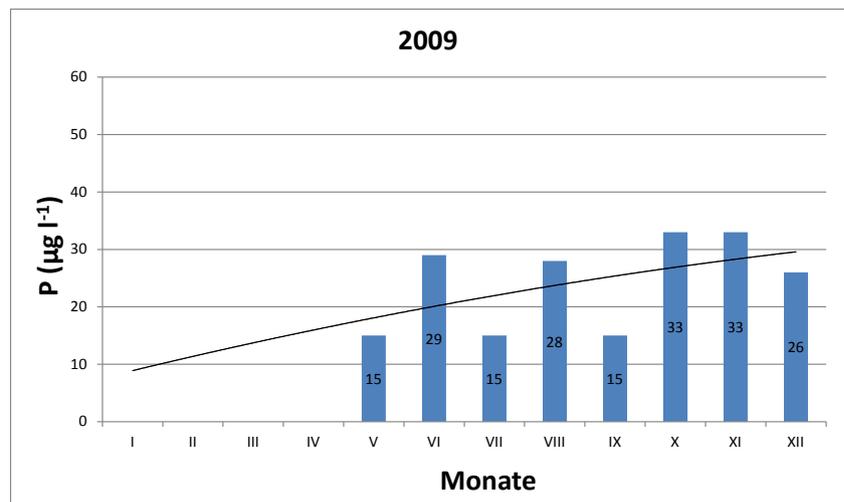


Abbildung 3: Phosphor-Konzentration im Bodenwasser (10-15 cm Bodentiefe) im Jahresverlauf (Zeitraum: 1.1.2009-31.12.2009)

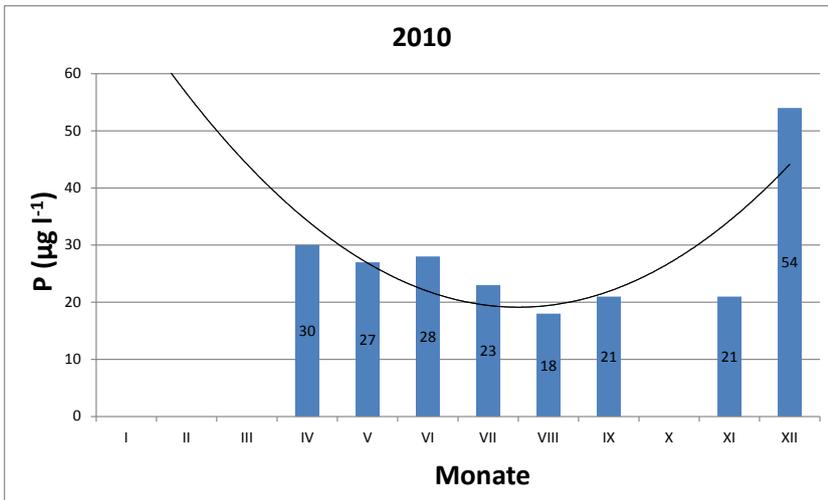


Abbildung 4: Phosphor-Konzentration im Bodenwasser (10-15 cm Bodentiefe) im Jahresverlauf (Zeitraum: 1.1.2010-31.12.2010)

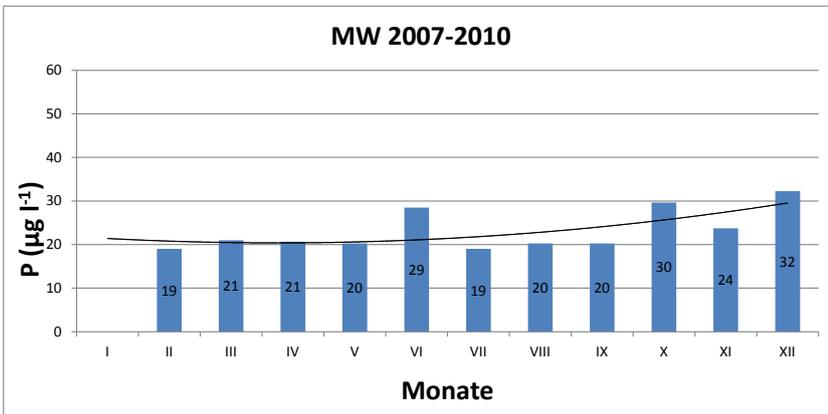


Abbildung 5: Phosphor-Konzentration im Bodenwasser (10-15 cm Bodentiefe) im Jahresverlauf (Zeitraum: 1.1.-31.12.; arithmetischer Mittelwert aus den Jahren 2007-2010)

Konzentration (Ortho-Phosphat) im Bodenwasser erfolgte photometrisch nach ÖNORM EN ISO 6878 (2004). Im Zeitraum 1.1.2007 bis 31.12.2010 konnte an 69 Terminen eine ausreichende Menge an Bodenwasser für die chemische Analyse gesammelt werden. Allerdings variierte die von den einzelnen Saugkerzen abgesaugte Menge an Bodenwasser sehr stark. Deshalb konnte der Gehalt an gelöstem Phosphor häufig nicht in den zehn Einzelproben separat sondern nur in Mischproben gemessen werden. Somit stehen 69 Analysewerte (jeweils arithmetischer Mittelwert aus zehn Einzelproben- oder Mischprobenmesswerten) für die Ermittlung des jahreszeitlichen Verlaufes der Phosphor-Konzentration im Bodenwasser zur Verfügung.

### Ergebnisse und Diskussion

In den Abbildungen 1-5 ist die Phosphor-Konzentration (Ortho-Phosphat) im Bodenwasser in 10-15 cm Bodentiefe im Jahresverlauf für den Zeitraum 1.1.2007 bis 31.12.2010 dargestellt. Während längerer Trockenperioden vor allem in den Sommermonaten oder bei langanhaltendem Bodenfrost im Winter konnte keine ausreichende Menge an Bodenwasser gesammelt wer-

den. In dieser Zeit erfolgt auch kein Phosphor-Austrag mit dem Sickerwasser. Die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser wies im Jahresverlauf starke zeitliche Schwankungen im Oberboden auf. Die Variabilität war auch zwischen den Jahren sehr groß. Hauptverantwortlich dafür dürften die Witterungsverhältnisse während des Jahres und die Witterungsunterschiede zwischen den Jahren sein. Die Witterung beeinflusst die Bodentemperatur und den Bodenwassergehalt, somit auch die Aktivität der Bodenmikroorganismen und die Mineralisation von organisch gebundenem Phosphor im Boden (Dalal, 1977). Da der organisch gebundene Phosphor im Oberboden den größten Phosphor-Pool darstellt, dürfte er bei den Phosphor-Freisetzungsprozessen eine entscheidende Rolle spielen.

Die witterungsabhängige Mineralisation von organisch gebundenem Phosphor im Boden dürfte daher für die starken zeitlichen Schwankungen der Phosphor-Konzentration im Bodenwasser sowohl innerhalb eines Jahres als auch zwischen den einzelnen Untersuchungsjahren hauptverantwortlich sein. Die Witterung beeinflusst aber nicht nur alle biologischen Prozesse im Boden,

sondern auch die chemischen. Für die Adsorption und Festlegung von Phosphat haben vor allem die amorphen Aluminium-, Eisen- und Mangan-Oxide (inklusive Hydroxide und Oxihydroxide) eine große Bedeutung (Keller und Van der Zee, 2004). Im untersuchten Grünlandboden ist der Gehalt an oxalateextrahierbarem Phosphor sehr hoch. Ein großer Anteil des im Oberboden gespeicherten Phosphors liegt somit in adsorbierter Form vor. Unter reduzierenden Bedingungen treten infolge reduktiver Auflösung Phosphorhaltiger Mangan (III, IV)- und Eisen (III)-Oxide erhöhte Phosphor-Gehalte in der Bodenlösung auf. Eine starke Phosphor-Freisetzung aus Eisen (III)-Oxiden beginnt bei pH 5 unterhalb von +300 mV (Welp *et al.*, 1983).

Der volumetrische Bodenwassergehalt in der Bodentiefe 10 cm variierte im Untersuchungszeitraum von 7 bis 36 Vol.-%, das Redoxpotenzial schwankte zwischen +300 und +580 mV. Eine kurzfristige Zunahme der Phosphor-Konzentration im Bodenwasser nach Starkregen, bei Dauerregen oder während intensiver Schneeschmelze durch reduktive Auflösung amorpher Mangan- und Eisen-Oxide ist daher wahrscheinlich. Die höchste Phosphor-Konzentration wurde am

13.12.2010 mit 54 µg Phosphor pro Liter Bodenwasser gemessen. Die niedrigste Phosphor-Konzentration wurde am 2.4.2008 mit 7 µg Phosphor pro Liter Bodenwasser ermittelt. Höhere Phosphor-Konzentrationen wurden vor allem in den Monaten Oktober, November und Dezember beobachtet. In den Monaten April und Mai hingegen wurden sehr häufig niedrige Werte gemessen. Dies sind Hinweise dafür, dass die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser nicht nur von der Freisetzung von organisch und adsorptiv gebundenem Phosphor sondern auch sehr wesentlich von der Vegetation beeinflusst wird. Die Phosphor-Aufnahme durch die Grünlandvegetation ist im Frühling zur Zeit des stärksten Pflanzenwachstums am größten (Bohner, 2008). In dieser Jahreszeit haben die Grünlandpflanzen ihren höchsten Phosphor-Bedarf. Auf der Untersuchungsfläche nahmen die Grünlandpflanzen in der Hauptwachstumszeit etwa 0,18 kg Phosphor pro Hektar täglich auf. Die Tagesaufnahmerate verminderte sich bis zum letzten Aufwuchs auf rund 0,05 kg Phosphor pro Hektar (Bohner, 2008). Somit kann aus Sicht der Pflanzenernährung die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser in den Herbstmonaten durchaus niedriger als im Frühling sein. Die Phosphor-Düngung sollte diesem jahreszeitlich differenzierten Phosphor-Bedarf der Grünlandpflanzen angepasst werden. Während der Vegetationsperiode, die im Wirtschaftsgrünland vergleichsweise lange dauert (je nach Standort und Jahreswitterung von Anfang April bis Mitte Oktober), nehmen die Grünlandpflanzen ständig Phosphor aus der Bodenlösung auf. Die Phosphor-Nachlieferung aus der festen Bodenphase in die Bodenlösung erfolgt in der Regel langsamer als die Phosphor-Aufnahme durch die Pflanzen. Deshalb war die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser während der Vegetationsperiode meist sehr niedrig. In dieser Zeit ist die Gefahr einer erhöhten Phosphor-Auswaschung mit dem Sickerwasser gering. Allerdings können Starkregenereignisse kurzzeitig den Phosphor-Austrag erhöhen (Bohner *et al.*, 2007).

In den Herbstmonaten Oktober bis Dezember hingegen wird im Grünlandboden durch Mineralisations-, Desorptions- und Auflösungsprozesse mehr Phosphor mobilisiert als von den Grünlandpflanzen aufgenommen werden kann. Vor allem eine warme und niederschlagsreiche Witterung in dieser Jahreszeit und die daraus resultierende relativ hohe mikrobielle Aktivität im Grünlandboden bewirkt eine ständige Phosphor-Freisetzung aus dem organisch gebundenen Phosphor-Vorrat. Deshalb steigt die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser in den Herbstmonaten in der Regel an. Somit besteht in dieser Jahreszeit vor allem in Gebieten mit hohen Herbstniederschlägen insbesondere bei warmer Witterung die Gefahr einer umweltrelevanten Phosphor-Auswaschung mit dem Sickerwasser. Fiedler *et al.* (1985) beispielsweise konnten feststellen, dass der größte Teil der jährlichen Phosphor-Fracht in den Oberflächengewässern aus einem bewaldeten Ein-

zugsgebiet auf die Wintermonate entfällt. In Gebieten mit überwiegend landwirtschaftlich genutzten Flächen sind hingegen auch Starkregenereignisse im Sommer und die Schneeschmelze im Frühling für die Phosphor-Fracht in Oberflächengewässern relevant (Strauss und Staudinger, 2007). Auf Grund des Überangebotes an Phosphor im Bodenwasser in den Herbstmonaten sollte keine stärkere Düngung ab Oktober erfolgen. Günstiger wäre die Ausbringung geringer Mengen Phosphor-haltiger Dünger im Frühling kurz vor Beginn der Vegetationsperiode und während der Hauptwachstumszeit der Grünlandvegetation.

Die Düngung mit Stallmistkompost im Herbst führte nicht unmittelbar zu einem Phosphor-Konzentrationsanstieg im Bodenwasser. Damit wird das Untersuchungsergebnis von Schlinkert (1992) bestätigt, wonach eine Stallmistdüngung keine erkennbare Wirkung auf die Phosphor-Gehalte in der Bodenlösung zeigt. Auch ein Einfluss der Mahd auf die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser konnte nicht festgestellt werden. Die Ursachen für die zeitweise höheren Phosphor-Konzentrationen im Juni sind noch nicht geklärt. Sie könnten möglicherweise mit einer starken Bodenaustrocknung und nachfolgenden Wiederbefeuchtung des Grünlandbodens zusammenhängen (Magid und Nielsen, 1992).

Nicht nur die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser ist ein zeitlich sehr variabler Parameter. Auch der wasserlösliche und CAL-lösliche Phosphor-Gehalt (Bohner, 2008) sowie der DL-lösliche Phosphor-Gehalt (Knauer, 1968, 1973; Leinweber *et al.* 1993) ändern sich im Hauptwurzelraum während der Vegetationsperiode mehr oder weniger stark. Eine hohe zeitliche Variabilität ist typisch für viele biologische und chemische Eigenschaften des Bodens (Troelstra *et al.*, 1990). Deshalb sollten die Bodenproben für die chemische Analyse immer zur gleichen Jahreszeit, vor allem aber bei annähernd vergleichbaren Bodentemperaturen und Bodenwassergehalten entnommen werden. Der Probenahmezeitpunkt sollte daher in erster Linie von der Witterung abhängig gemacht werden. Darauf hat bereits Obenauf (1987) hingewiesen.

Generell war die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser während des gesamten Messzeitraumes mit Werten von 7 bis 54 µg Phosphor pro Liter Bodenwasser sehr niedrig. Hauptverantwortlich dafür dürften die hohe Phosphor-Speicherkapazität und der mäßige Phosphor-Sättigungsgrad im Oberboden sein. Der hohe Phosphor-Gesamtgehalt, der hohe Gehalt an oxalatlöslichem Phosphor und das sehr niedrige  $C_{org}:P_t$ -Verhältnis haben offensichtlich keinen großen Einfluss auf die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser. Nach Pihl und Werner (1993) erlaubt der oxalatlösliche Phosphor keine Abschätzung der Phosphor-Konzentration in der Bodenlösung. Grünlandböden mit hoher Phosphor-Speicherkapazität und geringem bis mäßigem Phosphor-Sättigungsgrad

tolerieren offensichtlich kurz- bis mittelfristig höhere Phosphor-Düngergaben, ohne dass es gleichzeitig zu einer starken Erhöhung der Phosphor-Konzentration im Bodenwasser kommt.

## Schlussfolgerungen

Aus diesen Untersuchungsergebnissen können folgende praxisrelevante Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Für die Phosphor-Speicherkapazität im Grünlandboden ist der Gehalt an amorphen Eisen-Oxiden hauptverantwortlich (Bohner *et al.*, 2013). Eine hohe Phosphor-Speicherkapazität und ein geringer bis mäßiger Phosphor-Sättigungsgrad bewirken eine niedrige Phosphor-Konzentration im Bodenwasser. Grünlandböden mit hoher Phosphor-Speicherkapazität und geringem Phosphor-Sättigungsgrad tolerieren kurz- bis mittelfristig höhere Phosphor-Düngergaben, ohne dass es gleichzeitig zu einer starken Erhöhung der Phosphor-Konzentration im Bodenwasser kommt.
- Die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser weist im Jahresverlauf starke zeitliche Schwankungen im Oberboden auf. Die Variabilität ist auch zwischen den Jahren sehr groß. Hauptverantwortlich dafür sind die Witterungsverhältnisse während des Jahres, die Witterungsunterschiede zwischen den Jahren und die saisonabhängige Phosphor-Aufnahme durch die Grünlandpflanzen.
- Die Phosphor-Konzentration im Bodenwasser nimmt im Oberboden in den Herbstmonaten (Oktober bis Dezember) 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.
- Zumindest auf sandigen, skelettreichen, flachgründigen Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität und/oder in Gebieten mit hohen Herbstniederschlägen sollte keine stärkere Düngung ab Oktober erfolgen. Günstiger wäre die Ausbringung geringer Mengen Phosphor-haltiger Dünger im Frühling kurz vor Beginn der Vegetationsperiode und während der Hauptwachstumszeit der Grünlandvegetation.
- Um die Gefahr einer Phosphor-Abschwemmung zu reduzieren, sollten Böden in steiler Hanglage insbesondere im Nahbereich von Oberflächengewässern nicht unmittelbar vor einem Dauer- oder Starkregen sowie kurz nach der Schneeschmelze gedüngt werden (Bohner *et al.*, 2013).
- In humusreichen Grünlandböden ist der organisch gebundene Phosphor eine wesentliche potenzielle Phosphor-Quelle für die Grünlandvegetation. Durch mikrobiellen Abbau der organischen Substanz bzw. durch enzymatische Reaktionen wird dieser Phosphor pflanzenverfügbar. Bei Phosphor-Düngeempfehlungen sollte daher neben dem CAL-löslichen Phosphor-Gehalt im Oberboden (Kapazitätsfaktor) zumindest auch der witterungsbedingte Wärme- und Wasserhaushalt des Standortes (Kinetikfaktor) berücksichtigt werden. Dieser beeinflusst sehr wesentlich die Phosphor-Dynamik im Grünlandboden; vor allem die Phosphor-mobilisierende Leistung der Bodenmikroorganismen ist davon abhängig.
- Auf Grund der starken zeitlichen Schwankungen des Phosphor-Gehaltes im Oberboden sollten die Bodenproben für die chemische Analyse immer zur gleichen Jahreszeit, vor allem aber bei annähernd vergleichbaren Bodentemperaturen und Bodenwassergehalten entnommen werden. Der Probenahmezeitpunkt sollte daher in erster Linie von der Witterung abhängig gemacht werden.

## Literatur

- BMLFUW, 2006. Richtlinien für die sachgerechte Düngung. Hrsg.: Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz, 6. Auflage, Wien, 80 S.
- 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., Eder G., Schink, M., 2007: Nährstoffkreislauf und Stoffflüsse in einem Grünland-Ökosystem. 12. Gumpensteiner Lysimetertagung, 91-99.
- Bohner, A., 2008: Phosphor-Pools und Phosphor-Verfügbarkeit im Grünlandboden als Basis für Phosphor-Düngeempfehlungen. Umwelt-ökologisches Symposium „Sachgerechte Düngung im Blickfeld von Untersuchungsergebnissen“, LFZ Raumberg-Gumpenstein, 59-66.
- Bohner, A., Huemer, C., Schaumberger J., Liebhard, P., 2013: Phosphor in landwirtschaftlich genutzten Böden in einem Teileinzugsgebiet der Antiesen im oberösterreichischen Innviertel. In: Das INTERREG IV A-Projekt „Gewässer-Zukunft“ 2009-2013, 45-57.
- Dalal, R.C., 1977: Soil organic phosphorus. *Advances in Agronomy* 29, 83-117.
- Fiedler, H.J., Katschner W., Richter, B., 1985: Phosphor in bewaldeten Wassereinzugsgebieten. II. Quantitative Kennziffern. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* 34, 217-224.
- Finck, A., 1992: Dünger und Düngung. VCH Verlagsgesellschaft Weinheim, 488 S.
- Flossmann, R., Richter, D., 1982: Extraktionsmethode zur Charakterisierung der Kinetik der Freisetzung von P aus der festen Phase des Bodens in die Bodenlösung. *Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenk.* 26, 703-709.
- Frossard, E., Julien, P., Neyroud, J.-A., Sinaj, S., 2004: Phosphor in Böden, Düngern, Kulturen und Umwelt-Situation in der Schweiz. *Schriftenreihe Umwelt* Nr. 368, 172 S.
- Jungk, A., 1993: Die Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe im Boden: chemische und räumliche Aspekte. In: *Berichte über Landwirtschaft* 207, SH 5, 70-84.
- Keller, A., Van der Zee, S., 2004: Phosphorverfügbarkeit in intensiv genutzten Grünlandböden. *Agrarforschung* 11, 396-401.
- Klapp, E., 1971: *Wiesen und Weiden*. Parey Verlag, 620 S.
- Kmoch, H.G., 1952: Über den Umfang und einige Gesetzmäßigkeiten der Wurzelmassenbildung unter Grasnarben. *Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau* 95, 363-380.
- Knauer, N., 1968: Über die Abhängigkeit des lactatlöslichen Nährstoffgehaltes des Bodens von der Nährstoffanreicherung durch die Düngung. *Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau* 127, 89-102.
- Knauer, N., 1973: Bedeutung der Nährstoffdynamik im Boden für die Ermittlung des Nährstoffbedarfes von Grünland. *Die Phosphorsäure* 30, 27-43.

- Kummert, R., Stumm, W., 1989: Gewässer als Ökosysteme. Grundlagen des Gewässerschutzes, Teubner Verlag, 331 S.
- Leinweber, P., Lünsmann F., Eckhardt, K.U., 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.
- Leinweber, P., Geyer-Wedell, K., Jordan, E., 1993: Phosphorversorgung der Böden im agrarischen Intensivgebiet Süddoldenburg. ISPA, Vechtaer Druckerei und Verlag GmbH, Vechta, 68 S.
- Magid, J., Nielsen, N.E., 1992: Seasonal variation in organic and inorganic phosphorus fractions of temperate-climate sandy soils. *Plant and Soil* 144, 155-165.
- Marschner, H., 1998: Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, 889 p.
- Obenauf, S., 1987: Variabilität von Bodenfruchtbarkeitsziffern während der Vegetationszeit im Ap sandiger Ackerböden. *Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkd.* 31, 137-145.
- ÖNORM EN ISO 6878, 2004: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von Phosphor - Photometrisches Verfahren mittels Ammoniummolybdat. Austrian Standards Institute, Wien.
- Pihl, U., Werner, W., 1993: Zur Interpretation von Quantitäts-/Intensitäts-Quotienten als Kriterien vertikaler Phosphatverlagerung in Böden. *VDLUFA Kongressband* 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.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P., 2002: Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 593 S.
- Schlinkert, A., 1992: Jahreszeitliche Dynamik der Inhaltsstoffe von Bodenlösungen aus A-Horizonten unterschiedlicher Böden in Abhängigkeit von Bewirtschaftungsweise und Standorteigenschaften. *Bonner Bodenkundl. Abh.*, Band 7, 271 S.
- Strauss, P., Staudinger, B., 2007: Berechnung der Phosphor- und Schwebstofffrachten zweier Hauptzubringer (Zellerache, Fuschlerache) des Mondsees. In: *Ausgewählte Ergebnisse des INTERREG IIIA-Projektes „SeenLandWirtschaft“*, Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, Band 26, 18-33.
- Troelstra, S.R., Lotz, L.A.P., Wagenaar R., Sluimer, L., 1990: Temporal and spatial variability in soil nutrient status of a former beach plain. *Plant and Soil* 127, 1-12.
- Welp, G., Herms, U., Brümmer, G., 1983: Einfluss von Bodenreaktion, Redoxbedingungen und organischer Substanz auf die Phosphatgehalte der Bodenlösung. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 146, 38-52.
- Werner, W., Olf, H.-W., Auerswald, K., Isermann, K., 1991: Stickstoff- und Phosphoreintrag in Oberflächengewässer über „diffuse Quellen“. In: A. Hamm (ed.): *Studie über Wirkungen und Qualitätsziele von Nährstoffen in Fließgewässern*. Academia Verlag, Sankt Augustin, 665-799.
- Witter, B., 1966: Einfluss der laktatlöslichen Boden-Phosphorsäure auf Ertrag und P-Gehalt von Wiesenfutter. *Dtsch. Akad. Landw. - Wiss. Tag. Ber.* 1966, Nr. 85, 121-129.