

Phosphorbilanzen und Phosphorvorräte im Dauergrünland - Eine Untersuchung im Steirischen Ennstal und Steirischen Salzkammergut

Christine Weissensteiner^{1*}, Jürgen Kurt Friedel² und Andreas Bohner³

Zusammenfassung

Um die Phosphorsituation im österreichischen Dauergrünland einschätzen zu können, wurden an repräsentativen Standorten Pflanzenanalysen durchgeführt und Bodenproben hinsichtlich einzelner P-Fractionen untersucht. Darüber hinaus wurden P-Hoftorbilanzen berechnet bzw. ausgewertet. Im Oberboden (0 bis 10 cm) lagen überwiegend hohe P-Gesamtgehalte vor. Die Nährstoffbilanzierungen ergaben meist ausgeglichene bis überschüssige P-Salden. Eine erhebliche P-Abreicherung der Böden ist in Dauergrünlandgebieten bei gegebener Praxis daher nicht zu erwarten. Im Widerspruch dazu fanden sich im überwiegenden Anteil der untersuchten Böden geringe P_{CAL} -Gehalte. Außerdem wies vor allem der 1. Pflanzenaufwuchs niedrige P-Gehalte auf. In den untersuchten Grünlandböden lag somit vorrangig ein Mobilisierungs- und weniger ein Mengenproblem vor. Da P in den untersuchten Böden vor allem organisch gebunden ist, könnte eine rege Mikroorganismenaktivität eine Schlüsselfunktion für die P-Mobilisierung einnehmen. Über verschiedene Maßnahmen wie z.B. die Düngung sind somit mikrobielle Prozesse anzuregen. Um die P-Versorgung in „Low Input“ Betrieben sicherzustellen, ist darüber hinaus eine P-Zufuhr vorzugsweise über die Rückführung organischer Abfälle (z.B. „Biotonnen-Kompost“) vorzunehmen.

Schlagwörter: P-Fractionen, Gesamtphosphor, CAL-löslicher Phosphor, Nährstoffbilanz

Summary

In order to assess the phosphorus status in Austrian permanent grassland, soil and plant analyses were performed at representative sites. Also, nutrient budgets were calculated. In the topsoil (0 - 10 cm), total P content usually was high. The nutrient budgets were balanced or of surplus. Thus, in areas where permanent grassland is dominating, no considerable decrease in soil phosphorus content is to be expected. Nevertheless, in the studied soils the CAL-extractable P content was mostly low. In addition, the plants, especially the first growth, had low P contents. Therefore, in grassland soils the main problem seems to be mobilization rather than quantity. Since in the studied soils P is mainly organically bounded, a high activity of microorganisms could be a key factor for P-mobilization. Through various measures, such as fertilization, microbial processes should be stimulated. Moreover, to ensure the long-term P supply in low input farms, external P should be applied, preferably as recycled organic waste (e.g. "biowaste compost").

Keywords: P fractions, total phosphorus, CAL-extractable phosphorus, nutrient budget;

Einleitung

Phosphor (P) stellt für den menschlichen, tierischen und pflanzlichen Organismus ein lebensnotwendiges Makroelement dar (MARSCHNER 1995, MAATHUIS 2009). Daher sollte für die Pflanze (als erstes Glied in dieser Kette) im Boden eine ausreichende P-Menge in verfügbarer Form vorliegen. P weist allerdings auch ein erhebliches Eutrophierungspotential in aquatischen Ökosystemen auf (BRADY und WEIL 2002). Im Grünland wird P durch Abschwemmung, Auswaschung und vereinzelt durch Erosion aus dem Boden ausgetragen (PRASUHN und BRAUN 1994, FROSSARD et al. 2004).

Im Zuge der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung wird eine bedarfsgerechte P-Versorgung durch den Einsatz von Düngemitteln sichergestellt. Im österreichischen Dauergrünland

kommt es vor allem zum Einsatz von Wirtschaftsdüngern (Mist, Gülle, Jauche, Kompost). P wird aber auch in mineralischer Form aus globalen Rohstofflagern zugeführt (PÖTSCH 2000). Die aktuell bekannten, bedeutsamen P-Lagerstätten werden voraussichtlich in wenigen Jahrzehnten erschöpft sein, weshalb mineralischer P vermutlich bald eine limitierte Ressource darstellt (STEEN 1998, NESET und CORDELL 2012). Die vollständige Nutzung menschlicher Abfälle und Fäkalien und somit die Schließung des P-Kreislaufes ist derzeit aus ökologischen sowie ökonomischen Gründen nicht realisierbar (BUND 2005), könnte bzw. muss in Zukunft aber an Bedeutung gewinnen (SMIT et al. 2009, GRONEGGER 2011, PETZET und CORNEL 2013).

Darüber hinaus berichten verschiedene Autoren in landwirtschaftlichen Praxiszeitschriften (BUCHGRABER

¹ Weißenbach 87, A-8932 Weißenbach/Enns

² Universität für Bodenkultur, Institut für Ökologischen Landbau, A-1180 Wien

³ HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Abteilung Umweltökologie, A-8952 Irnding

* Ansprechpartner: Christine Weissensteiner, MSc, christine-weissensteiner@gmx.at



2007, GALLER 2007), aber auch in der wissenschaftlichen Literatur (HEINZLMAIER et al. 2008, PÖTSCH et al. 2013), über einen akuten P-Mangel in österreichischen Grünlandböden. Deren Angaben stützen sich vor allem auf die sehr geringen Bodengehalte an Calcium-Acetat-Lactat-löslichen P (P_{CAL}), aber auch auf niedrige P-Gehalte in den Pflanzenaufwüchsen. Der P_{CAL} -Gehalt wird in Österreich als Referenzwert für die Düngeempfehlung herangezogen und in den aktuellen „Richtlinien für die sachgerechte Düngung“ (BMLFUW 2006) als „pflanzenverfügbare“ P-Fraktion bezeichnet.

Ausgehend von dem Spannungsfeld eines essentiellen Bedarfs an P für alle Lebewesen, der Eutrophierung (P) aquatischer Ökosysteme, zu Ende gehender globaler mineralischer P-Vorräte und der Diskussion über eine mangelhafte P-Versorgung in österreichischen Grünlandböden, wird im nachfolgenden Beitrag der Versuch unternommen, Antwort auf folgende Fragen zu geben: Welche Größenordnung nehmen die Nährstoffsalden von (Dauer-)Grünlandbetrieben ein? Findet langfristig eine An- oder Abreicherung von P in Böden des Dauergrünlandes statt? Was sind die entscheidenden Einflussfaktoren (Bewirtschaftungsweise, Zukauf von Betriebsmitteln, Milch- / Mutterkuhhaltung)? Wie groß sind die Gesamtvorräte an P in repräsentativen Böden des österreichischen Dauergrünlandes? In welcher Größenordnung liegt der P_{CAL} -Gehalt vor, und welchen Anteil nimmt dieser am Gesamtvorrat ein? Kann von der P_{CAL} -Fraktion auf den P-Gehalt im Pflanzenaufwuchs geschlossen werden? Welche P-Fraktion (organisch oder anorganisch) nimmt den vorherrschenden Anteil am Gesamtposphorvorrat ein?

Material und Methoden

Untersuchungsgebiet: Die Boden- und Pflanzenproben wurden im Steirischen Ennstal und Steirischen Salzkammergut entnommen. Daher wurden die exemplarischen Bilanzen auf diese Gebiete angepasst. Diese Regionen sind repräsentativ für das österreichische Grünland im Berggebiet. Sie werden geologisch den Nördlichen Kalkalpen und der Grauwackenzone zugeordnet (SCHUSTER et al. 2013). Die Probestellen befanden sich auf einer Seehöhe von 600 bis 1180 m. An den regionalen Wetterstationen reichte der Jahresniederschlag im langjährigen Mittel (1971-2000) von 970 bis 1530 mm und die Jahresmitteltemperatur von 5,9 bis 7,3 °C (ZAMG 2002). Es wurden alle im Untersuchungsgebiet bedeutenden Bewirtschaftungsformen und Nutzungsintensitäten erfasst. Die untersuchten Böden waren diverse Rendzinen, Braunerden, Kalkbraunlehme, Auböden, Gleye und carbonathaltige Niedermoore. Die Bodenreaktion reichte von stark sauer bis schwach alkalisch und der organische Kohlenstoffgehalt von 0,6 - 52,8 % (WEISSENSTEINER 2014).

Phosphorbilanz: Die Nährstoffbilanz stellt die in einem Zeitraum (Jahr) auf eine Bezugsebene (Betrieb, Fläche) zu- und abgeführten Nährstoffmengen gegenüber. Für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit und um Verluste zu verhindern, sind ausgeglichene Salden ($\text{kg P ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) anzustreben (BAUMGÄRTEL et al. 2007; KOLBE und KÖHLER 2008). Mit der Hoftorbilanz kann eine Aussage über die gesamtbetriebliche Situation der Nährstoffflüsse und deren Effizienz getroffen werden. Sie kann unterstützend für die Düngeplanung eingesetzt werden (FREYER und PERICIN

1993). Zur Abbildung der innerbetrieblichen Nährstoffverteilung sind Schlagbilanzen einzusetzen (BAUMGÄRTEL et al. 2007).

Um die P-Situation in der landwirtschaftlichen Praxis beurteilen zu können, wurden Hoftorbilanzen von 16 biologisch und 6 konventionell wirtschaftenden Grünlandbetrieben (GIGLER 2001, JANDL 2013) zusammengefasst und interpretiert. Die betrachteten Betriebe befanden sich im Bezirk Liezen, und somit im Untersuchungsgebiet, sowie in anderen typischen Grünlandgebieten Österreichs (OÖ, Salzburg). Um darüber hinaus die Größenordnung der P-Salden in einem umfangreichen Leistungsbereich sowie Veränderungen in der Bewirtschaftungspraxis (z.B. Verzicht auf Kraftfutter) abschätzen zu können, wurden exemplarische Hoftorbilanzen berechnet. Als Eingangsfaktoren wurden alle Zukäufe an Kraft- und Mineralfuttermittel, Vieh und Einstreu sowie als Ausgangsfaktoren allfällige Verkäufe an tierischen Erzeugnissen herangezogen. Zusätzlich berücksichtigt wurden die Gesteinsverwitterung, atmosphärische Einträge und Verluste durch Erosion, Auswaschung und Abschwemmung. Als Datengrundlage dienten Durchschnittswerte aus dem Standarddeckungsbeitrag und Tabellenwerken sowie Informationen von Experten. Um eine möglichst große Bandbreite abzudecken, wurden konventionelle und biologische Mutter- und Milchkuhbetriebe (4000 - 10000 L a^{-1}), Besatzdichten von 0,5 bis 2 GVE ha^{-1} sowie drei Intensitäten des Betriebsmitteleinsatzes hinsichtlich der Faktoren Kraft-, Mineralfutter und Stroh betrachtet. Der Saldo ($\text{kg P ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) bezieht sich auf eine Milch- bzw. Mutterkuheinheit. Die Interpretation der P-Salden erfolgte nach FREYER und PERICIN (1996) (Tabelle 1).

Tabelle 1: Einstufung der Phosphorsalden nach FREYER und PERICIN (1996)

Einstufung	Saldo $\text{kg P ha}^{-1} \text{a}^{-1}$
stark defizitär	unter -13
schwach defizitär	-13 bis -4,5
ausgeglichen	+ / -4,5
schwach überschüssig	+4,5 bis +13
stark überschüssig	über +13

Boden- und Pflanzenanalysen: Untersuchung 1: Die Bodenproben ($n = 176$) wurden in der Vegetationsperiode in Form einer flächenrepräsentativen Mischprobe aus der Tiefenstufe 0 - 10 cm entnommen. Die für die Düngeempfehlung in Österreich übliche Routinemethode, die Calcium - Acetat - Lactat - Methode (CAL), wurde nach ÖNORM L 1087 ermittelt. Mittels Mikrowellenaufschluss und Zugabe von Königswasser wurde der Gesamtelementgehalt an Phosphor (P_t) bestimmt. Zur Ermittlung des anorganischen Phosphorgehalts (P_i) wurde eine Extraktion mit 0,1 M H_2SO_4 durchgeführt. Durch Subtraktion von $P_t - P_i$ erhält man den organischen Phosphorgehalt (P_o).

Untersuchung 2: Zur Feststellung des P-Gehaltes in der oberirdischen pflanzlichen Biomasse ($n = 188$) sowie des landwirtschaftlich nutzbaren Ertrags wurden jeweils 5 m^2 geerntet. Die Mahd erfolgte zum ortsüblichen Nutzungstermin. Der P-Gehalt wurde mittels Salpetersäure-Perchlorsäureaufschluss und ICP-Messung bestimmt (ALVA 1983). Die Auswertung der statistischen Kennzahlen -arithmetischer Mittelwert, Median, Maximum, Minimum

und Variabilitätskoeffizient - wurde mit dem Programm IBM SPSS Statistics 21 vorgenommen. Im Weiteren kamen folgende Analysen zum Einsatz: Korrelationen (Spearman), Mittelwertvergleich (Kruskal-Wallis).

Ergebnisse und Diskussion

In Abbildung 1 findet sich eine Zusammenfassung der P-Salden biologischer und konventioneller Milch- und Mutterkuhbetriebe (Grünlandbetriebe). Im Bezirk Liezen (GIGLER 2001) wies sowohl etwa die Hälfte der untersuchten biologischen als auch konventionellen Betriebe negative P-Salden auf, die allerdings nur bis $-1,1 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (biologisch) bzw. bis $-0,3 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (konventionell) reichten. Die Salden der Betriebe mit positiven Bilanzen reichten bis $+1,3 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (biologisch) bzw. $+5,1 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (konventionell). In den konventionellen Betrieben ($\bar{\varnothing} 1,8 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) wurden somit im Mittel vergleichsweise höhere P-Salden als in den biologischen Betrieben ($\bar{\varnothing} -0,2 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) festgestellt. JANDL (2013), die biologische Betriebe in Oberösterreich und Salzburg untersuchte, stellte nur in einem Betrieb einen negativen Saldo ($-1 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) fest. Mit einem Maximum von $8 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und einem Mittelwert von $1,8 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ wiesen die Betriebe von JANDL (2013) somit eine ähnliche Nährstoffeffizienz wie die konventionellen Betriebe von GIGLER (2001) auf. Die wesentlichen Inputfaktoren (P) in den Praxisbetrieben waren Kraftfutter- sowie Mineralfuttermittel und Stroh.

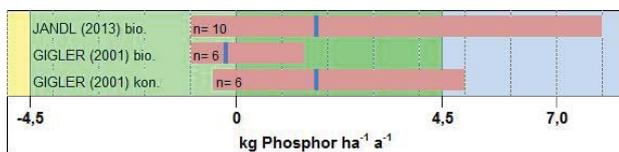


Abbildung 1: Bandbreite und Mittelwerte der Hoftorsalden biologischer und konventioneller Grünlandbetriebe (Praxisbetriebe)

n= Anzahl der Betriebe, bio= biologisch, kon= konventionell

Einige Betriebe verwendeten außerdem mineralische Düngemittel (z.B. Hyperphosphat). Vereinzelt wurden in den von JANDL (2013) untersuchten Betrieben beträchtliche Mengen an (schwach phosphorhaltigem) Gesteinsmehl zugekauft. Dieses leistete einen nicht zu vernachlässigbaren

Beitrag zum P-Input. Insgesamt reichten die Salden der Praxisbetriebe, interpretiert nach FREYER und PERICIN (1996), von ausgeglichen bis schwach überschüssig.

Anhand von Modellrechnungen (Hoftorbilanzierung) wurden diverse Szenarien zur P-Situation betrachtet. Allen gemeinsam war (im Unterschied zu den Praxisbetrieben) der Verzicht auf phosphorhaltige mineralische Zukaufdünger. Ebenso wurde angenommen, dass die Betriebe weder Grundfutter noch Wirtschaftsdünger zu- oder verkaufen, womit ein möglichst geschlossener Düngerkreislauf abgebildet werden sollte. Folgende Schlüsse wurden daraus abgeleitet (Abbildung 2):

- Mutterkuhbetriebe stellen eine extensive Betriebsform dar. Dies spiegelt sich auch in den Betriebsmitteleingängen und -ausgängen und somit geringen Mengen an P-Input als auch P-Output wider. Die P-Salden konnten selbst bei gänzlichem Verzicht auf Kraftfutter, Stroh und Mineralfutter, interpretiert nach FREYER und PERICIN (1996), als ausgeglichen bezeichnet werden und reichten in ihrer gesamten Bandbreite (Besatzdichte bis 1 GVE ha^{-1}) von $-1,5$ bis $+1,0 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

- Bei praxisüblichen Annahmen hinsichtlich des Einsatzes von Kraftfutter, Stroh und Mineralstoffen wiesen biologische Milchviehbetriebe (je nach P-Gehalt der Betriebsmittel und Besatzdichte: 1 bis $1,5 \text{ GVE ha}^{-1}$, sowie Milchleistung: 4000 bis 8000 L a^{-1}) ausgeglichene bis schwach überschüssige Phosphorsalden auf ($-2,5$ bis $+7 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Bei konventionellen Milchviehbetrieben (Besatzdichte: 1 bis 2 GVE ha^{-1} , 4000 bis 10000 L a^{-1}) reichten diese von ausgeglichen bis stark überschüssig ($-3,5$ bis $+20,5 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Abgesehen von den unterschiedlichen Besatzdichten und Milchleistungen ergibt sich der Unterschied zwischen den beiden Bewirtschaftungsweisen aufgrund der meist höheren Kraftfuttermengen bei konventioneller Bewirtschaftung (BMLFUW 2008, KRIECHBAUM 2013). Außerdem zeigt die Auswertung von WEISSENSTEINER (2014), dass in konventionellen Handelsfuttermitteln im Mittel höhere P-Gehalte (Zusatz von Mineralstoffen) vorliegen. Dies gilt es in der Futtermittellieferung und in weiterer Folge in der Hoftorbilanz zu beachten.

- Bei geringen Einsatzmengen an Kraftfutter, niedrigen P-Gehalten sowie ohne zusätzliche Mineralstoffergänzung traten bei biologischer Bewirtschaftung im gesamten

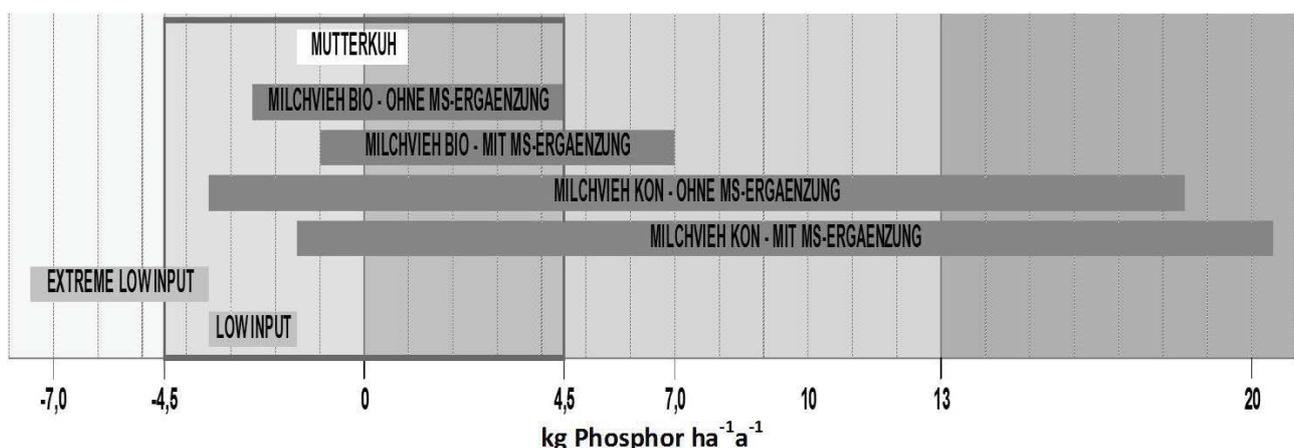


Abbildung 2: Bandbreite der exemplarischen Phosphorbilanzierung biologischer und konventioneller Milch- und Mutterkuhbetriebe

MS= Mineralstoffergänzung, bio= biologisch, kon= konventionell

Leistungsbereich (4000 bis 8000 L a⁻¹) schwach negative P-Salden (bis etwa -2,5 kg P ha⁻¹ a⁻¹) auf. Bei konventioneller Bewirtschaftung wurden unter den gegebenen Annahmen nur im unteren Leistungsbereich (4000 bis 6000 L a⁻¹) schwach negative P-Salden (bis etwa -3,5 kg P ha⁻¹ a⁻¹) festgestellt.

- Bei völligem Verzicht bzw. der Substitution von Kraftfutter, Stroh sowie Mineralstoffen („Low-Input“ Betriebe) traten bei Milchleistungen von 4000 bis 6000 L a⁻¹ und einer Besatzdichte bis 1,5 GVE ha⁻¹ ausgeglichene bis schwach defizitäre Salden auf (-7,3 bis -3,4 kg P ha⁻¹ a⁻¹). Der alleinige Verzicht von Kraftfutter bei gleichzeitigem Einsatz von Stroh und Mineralstoffen bedingte Salden von etwa -3,6 bis -1,4 kg P ha⁻¹ a⁻¹. Aktuell findet man in der Praxis allerdings kaum Betriebe, die unter diesen Voraussetzungen arbeiten (ZOLLITSCH 2013). Ein verbessertes Schulungsangebot sowie eine zunehmende Professionalisierung in der Bereitstellung bzw. Gewinnung von Grundfutter (Weidemanagement, Futtergewinnung) sowie höhere Kraftfutterpreise könnten diese Szenarien zunehmend auch in der Praxis realistisch machen (STEINWIDDER 2013).

- Demgegenüber können vor allem in intensiven Milchviehbetrieben (Leistungen \geq 6000 L a⁻¹) (stark) überschüssige P-Bilanzen (bis etwa +7 kg P ha⁻¹ a⁻¹ bei biologischer bzw. bis etwa +20,5 kg P ha⁻¹ a⁻¹ bei konventioneller Bewirtschaftung) auftreten, womit durchaus erhebliche Mengen an P im Boden angereichert werden. Diese Überschüsse ergeben sich, da mit zunehmendem Leistungsniveau neben einer steigenden Kraftfuttermenge vor allem auch eine höhere Konzentration an Energie, Eiweiß aber auch P empfohlen wird (LFL 2012). Bei geringen Leistungen ist eine bedarfsgerechte Versorgung (Energie, Eiweiß und P) meist auch mit dem betriebseigenen Grundfutter möglich, womit vor allem bei einem optimierten Fütterungsmanagement nur sehr geringe Mengen an Kraftfutter und Mineralstoffe in den Betriebskreislauf eingebracht werden müssen. Somit beeinflusst vor allem der effiziente Einsatz betriebseigener sowie -fremder Ressourcen und daher der Bedarf an Zukauffuttermitteln die P-Nährstoffsalden. Auch GRUBER und STEINWIDDER (1996) stellten in diesen Zusammenhang fest, dass Hochleistungstiere angesichts der hohen Mengen an zugekauften Kraftfuttermitteln hohe P-Ausscheidungen pro Grünlandfläche erzeugen und somit bezogen auf diese ineffizienter sind als Tiere mit geringeren Leistungen.

- Auch die betriebsspezifische Grundfütterration (Heu, Silage, Grünfutter oder Silomais) und der damit einhergehende Bedarf einer Energie- oder Eiweißkraftfutterergänzung beeinflusst die P-Salden. So zeigt die Auswertung einer umfangreichen Tabelle von praxisüblichen Mischfuttermitteln aus dem Handel, dass eiweißreiche Kraftfuttermittel höhere P-Gehalte als energiereiche aufweisen (WEISSENSTEINER 2014).

- Grundsätzlich steht somit bei gegebener Praxis sowohl in konventionellen aber auch biologischen Grünlandbetrieben (wie die Modellrechnung aber auch die Praxisbetriebe zeigten) meist ausreichend P über die Rückführung des Wirtschaftdüngers zur Verfügung. Im Widerspruch zu den vorwiegend niedrigen P_{CAL}-Gehalten in den österreichischen Grünlandböden sowie geringen P-Gehalten im Pflanzenaufwuchs (BUCHGRABER 2007, GALLER 2007) scheint eine großflächige P- Abreicherung im österreichischen

Dauergrünland daher nicht gegeben zu sein. Die Herausforderung liegt deshalb vor allem darin, den vorliegenden Dünger möglichst ohne Verluste auszubringen sowie den darin enthaltenen P im Boden mobil zu halten. Bei Betrieben mit ausgeglichenen bzw. schwach negativen Salden (z.B. bei den Praxisbetrieben bis -1,1 kg P ha⁻¹) sind für eine nachhaltige P-Versorgung die Höhe des Bodenvorrats sowie die Dauer des Entzugs entscheidend. Im Zusammenhang mit schwindenden globalen mineralischen P-Ressourcen und lückenhaften anthropogenen Nährstoffkreisläufen stellt eine geringfügige Zehrung (Mobilsierung) hoher Bodenvorräte auch eine Alternative dar. „Low Input“ Betriebe führen hingegen langfristig erhebliche Mengen an P aus dem Boden ab. Dies stellt einen Verlust dar, den es auszugleichen gilt. Für eine zukunftsfähige Düngestrategie des Dauergrünlandes, vor allem aber auch für „Low Input“ Betriebe, sind daher System zu schaffen, die es ermöglichen, organische Abfälle (z.B. „Biotonnen-Kompost“) aus möglichst kleinräumigen Nährstoffkreisläufen auf den Grünlandflächen einzusetzen. Nicht nachhaltig ist es hingegen, mineralische Dünger im Einbahnsystem aus globalen Rohstofflagern oder über Importe aus den Ackerböden (Kraftfutter, Stroh) in die Grünlandböden einzubringen.

Zur Abschätzung des P-Bodenvorrates sowie zur Ermittlung der vorherrschenden P-Fraktion wurden der Gesamt-, organische, anorganische und CAL-lösliche P-Gehalt in einem typischen österreichischen Grünlandgebiet erhoben. In Tabelle 2 sind diese für terrestrische und hydromorphe Böden für die Tiefenstufe 0 bis 10 cm angeführt. Die terrestrischen Böden wiesen signifikant höhere Gesamtphosphorgehalte (P_t)⁴ sowie P_{CAL}-Gehalte⁵ als die hydromorphen Böden auf. Dies deutet auf eine P-Anreicherung hin, die auf höhere Düngergaben in den meist intensiver genutzten terrestrischen Talböden zurückzuführen sein könnte. Der Vergleich mit anderen Untersuchungen zeigt, dass die P_t-Gehalte im Untersuchungsgebiet (Median, terrestrische Böden: 1148 mg kg⁻¹, hydromorphe Böden: 990 mg kg⁻¹) generell sehr hoch waren. So ermittelte LINDENTHAL (2000) in Salzburg im extensiven Grünland P_t-Gehalte von 649 mg kg⁻¹⁶, im intensiven Grünland 840 mg kg⁻¹⁷ sowie in Tiroler Grünlandböden 855 mg kg⁻¹⁸. In NÖ und im Burgenland stellte er in den untersuchten Ackerböden Gesamtgehalte von 869 mg kg⁻¹⁹ sowie in den Grünlandböden 777 mg kg⁻¹¹⁰ fest. HUEMER (2013) fand in oberösterreichischen Grünlandböden (Dauer- und Wechselgrünland) vergleichsweise niedrige Gesamtgehalte (689 mg kg⁻¹¹¹), die sich auch nicht wesentlich von angrenzenden Ackerböden (708 mg kg⁻¹¹²) sowie deutschen Ackerböden (680 mg kg⁻¹) (WERNER et al. 1991) unterschieden. Eine Erklärung für die hohen Gesamtgehalte im vorliegenden Untersuchungsgebiet könnte die Agrarstruktur und das damit einhergehende Zukaufverhalten liefern. So wurde, klimatisch bedingt, in den letzten Jahrzehnten nur in einem geringen Ausmaß Ackerbau betrieben, womit über den Zukauf von Stroh und Kraftfuttermitteln möglicherweise eine erhebliche Menge an P in die Nährstoffkreisläufe der Betriebe eingebracht wurde. Über die Ausbringung der Wirtschaftsdünger könnte schließlich eine P-Anreicherung in den Böden stattgefunden haben. Diese Annahme wird durch die signifikant höheren P_t-Gehalte in gedüngten im Vergleich zu ungedüngten Böden bekräftigt (Tabelle 3). Allerdings wiesen im Untersuchungsgebiet auch ungedüngte Böden vergleichsweise hohe P_t-Gehalte

Tabelle 2: Ausgewählte Phosphorfraktionen in terrestrischen und hydromorphen Talböden in der Tiefenstufe 0 bis 10 cm

	terrestrische Grünlandböden (n= 106)				hydromorphe Grünlandböden (n= 70)			
	P _t mg kg ⁻¹	P _{CAL}	P _o %	P _{CAL} %	P _t mg kg ⁻¹	P _{CAL}	P _o %	P _{CAL} %
Median	1148	21	73,3	2,0	990	15	60,4	1,5
MW	1198	27	70,8	2,3	1066	22	62,0	2,2
V (%)	38	90	19,3	63,8	31	93	42,5	104,7
MIN	197	1	37,6	0,1	534	1	0,2	0,1
MAX	2600	204	95,5	9,1	2071	93	98,8	9,6

n= Anzahl der Bodenanalysen, MW= arithmetischer Mittelwert, V (%)= Variabilitätskoeffizient, Min= Minimum, Max= Maximum, P_t= Gesamtphosphor, P_{CAL}= CAL-löslicher Phosphor, P_o= organischer Phosphor, P_i= anorganischer Phosphor

Tabelle 3: Gesamtphosphorgehalt und CAL-löslicher Phosphorgehalt in Abhängigkeit von der Düngung

	P _t mg kg ⁻¹	P _{CAL}
ungedüngt (n = 66)	899	13
gedüngt (n = 110)	1224	22
Signifikanz	p < 0,001	p < 0,001

n= Anzahl der Bodenanalysen

Tabelle 4: Korrelationskoeffizienten (Spearman) zwischen dem P_{CAL} - Gehalt im Boden und dem P-Gehalt im Pflanzenaufwuchs in Abhängigkeit des Bodenwasserregimes.

P _{CAL} (Spearman)	terrestrische Böden (n= 136)		hydromorphe Böden (n= 52)	
	P-Gehalt 1. Aufwuchs	P-Gehalt Gesamtaufwuchs	P-Gehalt 1. Aufwuchs	P-Gehalt Gesamtaufwuchs
Korrelationskoeffizient	0,614	0,717	-0,240	-0,192
Signifikanz	<0,001	<0,001	0,086	0,172
Einstufung	mittel	stark	n.s	n.s

n= Anzahl der Bodenanalysen, n.s= nicht signifikant

auf, womit wahrscheinlich auch das Ausgangsgestein die Gehalte positiv beeinflusst hat.

Der Vergleich zwischen den Grünland- und Ackerböden (aus der Literatur) zeigt außerdem, dass sich diese nicht grundsätzlich bezüglich ihrer P_t-Gehalte unterscheiden¹³. Gleichzeitig stellten diverse Autoren fest, dass in Grünlandböden meistens niedrigere P_{CAL}-Gehalte als in Ackerböden vorlagen (LINDENTHAL 2000, HEINZLMAIER et al. 2008, HUEMER 2013). Auch im Untersuchungsgebiet waren die P_{CAL}-Gehalte, abgesehen von einigen Ausnahmen (Maximum 204 mg kg⁻¹), trotz hoher P_t-Gehalte sowohl in den hydromorphen als auch in den terrestrischen Böden niedrig (Tabelle 2). Gedüngte Böden wiesen vergleichsweise höhere P_{CAL}-Gehalte als ungedüngte Böden auf, bewertet nach den „Richtlinien für die sachgerechte Düngung“ (BMLFUW 2006) lagen jedoch selbst in gedüngten Böden im Median sehr niedrige P_{CAL}-Gehalte vor (Tabelle 3). Nach dieser

⁴ p= 0,013

⁵ p= 0,006

⁶ Median, n= 131, (0 - 10 cm)

⁷ Median, n= 128, (0 - 10 cm)

⁸ Median, n= 138, (0 - 10 cm)

⁹ Median, n= 1295, (0 - 20 cm)

¹⁰ Median, n= 303, (0 - 20 cm)

¹¹ Median, n= 45, (0 - 15 cm)

¹² Median, n= 48, (0 - 15 cm)

¹³ Aufgrund der unterschiedlichen Probenahmetiefe sind Acker- und Grünlandböden nicht streng vergleichbar.

¹⁴ Empfehlungen: leistungsabhängige P-Gehalte (LFL 2000): 20 kg d⁻¹ = 3,3 g kg⁻¹ TM; 30 kg d⁻¹ = 3,6 g kg⁻¹ TM;

Richtlinie galten sogar etwa 87 % (Ergebnisse nicht dargestellt) der untersuchten Böden als nicht ausreichend mit P versorgt (Gehaltsklasse A oder B). Der Anteil des CAL-löslichen P am Gesamtvorrat betrug nur rund 2 % (terrestrische Böden) bzw. 1,5 % (hydromorphe Böden) (Tabelle 2). In den Grünlandböden liegt somit vermutlich ein Mobilisierung- und weniger ein Mengenproblem vor. Der organische P nahm meist den größten Anteil (etwa 73 % in terrestrischen bzw. 60 % in hydromorphen Böden) am P_t ein (Tabelle 2). Eine Ausnahme stellte die Bodengruppe der Auböden und Augleye dar,

in denen aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften (meist junge Böden) häufig der anorganische P (Median: 54 %) dominierte (Ergebnisse nicht dargestellt). In Untersuchungen zur P-Mobilisierung ist somit im Besonderen auch die organische Fraktion als Quelle für die Grünlandvegetation zu berücksichtigen. Eine aktive Mikroorganismen-tätigkeit könnte für die P-Mobilisierung eine Schlüsselfunktion einnehmen (GERRETSEN 1948, OBERSON et al. 1993,

SCHELLER 1993, RICHARDSON et al. 2009, SPOHN und KUZJAKOV 2013). Über verschiedene Maßnahmen, wie z.B. die Düngung, sind deshalb vor allem mikrobielle Prozesse anzuregen.

Entscheidend für die Praxis ist schließlich der im Futteraufwuchs vorliegende P-Gehalt. So ist das Grundfutter für die Wiederkäuerfütterung und somit für den Grünlandbetrieb der wichtigste Bestandteil in der Gesamtration (STEINWIDDER 2000). Die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LFL 2000) empfiehlt in der Gesamtration für eine Milchleistung von 10 bzw. 40 kg d⁻¹ Gehalte von 2,6 bzw. 4,0 g P kg⁻¹ TM¹⁴. Im Untersuchungsgebiet wurden vor allem im 1. Aufwuchs relativ geringe P-Gehalte festgestellt (Median terrestrische Standorte: 2,9 bzw. hydromorphe Standorte: 2,3 g kg⁻¹ TM). Allerdings lagen besonders im 1. Aufwuchs sehr hohe Trockenmasseaufwüchse vor, womit wahrscheinlich ein Verdünnungseffekt einherging.

Im 5. Aufwuchs von terrestrischen Böden lagen hingegen Gehalte von 4,2 g kg⁻¹ TM (Median) vor. Da der 1. Aufwuchs einen erheblichen Anteil am Gesamtaufwuchs einnahm, waren auch die Gehalte im Gesamtaufwuchs mit 3,2 (terrestrisch) bzw. 2,7 g kg⁻¹ TM (hydromorph) relativ niedrig. Dies stimmt mit den gleichzeitig niedrigen P_{CAL}-Bodengehalten gut überein. In den terrestrischen Böden lag zwischen dem P_{CAL}-Gehalt im Oberboden und dem P-Gehalt im 1. bzw. Gesamtaufwuchs ein signifikant positiver Zusammenhang vor. Aus den Korrelationskoeffizienten (mittel bis stark) (Tabelle 4) lässt sich folgern, dass auch noch weitere Faktoren für den P-Gehalt in den Pflanzen entscheidend sind bzw. dass aufgrund eines niedrigen P_{CAL}-Gehalts nicht mit Sicherheit auf einen geringen P-Gehalt im Pflanzenaufwuchs geschlossen werden kann. So zeigt DACCORD et al. (2001), dass bei Gräsern der P-Gehalt mit zunehmenden Alter stark absinken

kann. Die geringen P-Gehalte könnten somit auch auf einen suboptimalen Erntezeitpunkt zurückzuführen sein. So lagen im Untersuchungsgebiet bei intensiver Nutzung trotz ebenso geringer P_{CAL} -Gehalte im Boden höhere P-Gehalte im Pflanzenaufwuchs als bei extensiver Nutzung vor (Ergebnisse nicht dargestellt), wodurch diese Annahme bekräftigt wird. Ein Vergleich zwischen den Gehaltsklassen (GK) nach den „Richtlinien für die sachgerechte Düngung“ (BMLFUW 2006) zeigte außerdem, dass in GK A signifikant geringere P-Gehalte in den Pflanzenaufwuchs als in GK C vorlagen, zwischen den GK B und C wurde hingegen kein signifikanter Unterschied festgestellt (Ergebnisse nicht dargestellt). Für GK B wird nach den genannten Richtlinien ebenso eine über den Entzug liegende Düngermenge empfohlen. Eine Anpassung der Gehaltsklassen bzw. der Düngermengenzuschläge ist deshalb anzudenken. In den hydromorphen Böden wurden keine signifikanten Zusammenhänge zwischen den untersuchten Variablen festgestellt. In hydromorphen Böden scheint der P_{CAL} -Gehalt somit keine Aussagekraft über den pflanzenverfügbaren P-Anteil zu haben. Bezüglich der bedarfsgerechten Versorgung der Tiere mit P gilt es außerdem zu bedenken, dass diese sehr stark vom Leistungsanspruch (z.B. Milchmenge) abhängig ist (siehe oben). Die geringen Gehalte im Grundfutter werden somit erst bei hohen Leistungen problematisch. Außerdem umfasst die Gesamtration in der Praxis neben dem Grundfutter meist zusätzliche Kraftfuttermittel und Mineralstoffe, die positiv zur P-Versorgung beitragen. STEINWIDDER (2000) stellte dazu in einer umfangreichen Untersuchung in österreichischen Milchviehbetrieben fest, dass die Tiere über die Gesamtration meist ausreichend bzw. sehr häufig sogar mit P überversorgt waren. Auch HÖRTENHUBER et al. (2013) sprechen sich dafür aus, dass trotz mäßiger P-Gehalte im Grundfutter die Versorgung über die Gesamtration meist mühelos sichergestellt werden kann. Im Einzelfall ist die Versorgung über die Rationsberechnung zu überprüfen. Achtsam müssen demnach „Low Input“ Betriebe sein, da diese den P-Bedarf der Tiere vorwiegend über das Grundfutter decken.

Abschließend gilt es festzuhalten, dass sich die P-Versorgung im Grünland in einem Spannungsfeld bewegt dessen Lösung umfassender Überlegungen bedarf. Somit ist es für eine sachgerechte Düngung nicht zielführend, allein aufgrund geringer P_{CAL} -Gehalte Düngermengen über dem eigentlichen Entzug zu empfehlen, vor allem wenn dadurch der Einsatz mineralischer Dünger aus globalen Rohstofflagern forciert wird. Abgesehen davon werden die Tiere (Milchvieh) bei gegebener Praxis über die Gesamtration meist ausreichend mit P versorgt. Vor allem aber zeigte sich, dass in den untersuchten Grünlandböden trotz meist geringer P_{CAL} -Gehalte im Boden bzw. P-Gehalte im ersten Pflanzenaufwuchs vorwiegend hohe P-Gesamtgehalte (Boden) sowie gesamtbetrieblich ausgeglichene P-Salden ermittelt wurden, und somit ein Mobilisierungs- und kein Mengenproblem vorlag. Zukünftige Forschungsarbeiten zur P-Versorgung im Grünland sollten sich somit vorrangig auf den effizienten Einsatz von P und dessen Mobilisierung (v.a. der organischen Fraktion) konzentrieren.

Literatur

ARBEITSGEMEINSCHAFT LANDWIRTSCHAFTLICHER VERSUCHSANSTALTEN (ALVA) (1983): Österreichisches Methoden-

buch für die Untersuchung von Futtermitteln, Futterzusatzstoffen und Schadstoffen. ALVA, Wien.

- BAUMGÄRTEL, G., BREITSCHUH, G., EBERTSEDER, T., ECKERT, H., GUTSER, R., HEGE, U., HEROLD, L., WIESLER, F. & ZORN, W. (2007): Standpunkt Nährstoffbilanzierung im landwirtschaftlichen Betrieb. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), Speyer. Online: <http://www.vdlufa.de/joomla/Dokumente/Standpunkte/10-Naehrstoffbilanzierung.pdf> (14.03.2013).
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL) (2012): Gruber-Tabelle zur Fütterung der Milchkühe, Zuchtrinder, Schafe, Ziegen. 35. Auflage, LfL, Freising.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (BMLFUW) (2006): Richtlinien für die sachgerechte Düngung. 6. Auflage, BMLFUW, Wien. Online: http://oebg.boku.ac.at/files/rl_sgd.pdf (05.11.2012).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (BMLFUW) (2008): Deckungsbeiträge und Daten für die Betriebsplanung 2008. 2. Auflage, BMLFUW, Wien.
- BRADY, N. C. & WEIL, R. R. (2002): The nature and properties of soils. 13. Auflage, Prentice Hall, New Jersey.
- BUCHGRABER, K. (2007): Phosphorversorgung beim Grünland. Der fortschrittliche Landwirt 5, 14–15.
- BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND (BUND) (2005): BUNDposition Klärschlamm. BUND, Köln. Online: http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/publikationen/sonstiges/20050600_sonstiges_klaerschlamm_position.pdf (30.06.2013).
- DACCARD, R., ARRIGO, Y., KESSLER, J., JEANGROS, B., SCEHOVIC, J., SCHUBIGER, F. & LEHMANN, J. (2001): Nährwert von Wiesenpflanzen: Gehalt an Ca, P, Mg und K. Agrarforschung 8 (7), 264–269.
- FREYER, B. & PERICIN, C. (1993): Methoden der Nährstoffbilanzierung und ihre Anwendung am Beispiel von drei Bio-Betrieben. Landwirtschaft Schweiz 6 (10), 611–614.
- FREYER, B. & PERICIN, C. (1996): Nährstoffhaushalt in biologisch bewirtschafteten Betrieben. Agrarforschung 3 (1), 29–32.
- FROSSARD, E., JULIEN, P., NEYROUD, J.-A. & SINAJ, S. (2004): Phosphor in Böden Standortbestimmung Schweiz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 368, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- GALLER, J. (2007): Phosphormangel beginnt im Boden: Zu wenig Phosphor? Bauernjournal 27, 4–5.
- GERRETSEN, F. C. (1948): The influence of microorganisms on the phosphate intake by the plant. Plant and Soil 1 (1), 51–81.
- GIGLER, G. (2001): Stickstoff-, Phosphor- und Kalium-Hofbilanzen von biologisch und konventionell wirtschaftenden Betrieben in den NUTS III Regionen Liezen und Weinviertel. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, Wien.
- GRONEGGER, I. (2011): Von der Düngung zum Phosphor-Recycling. Wasserwirtschaft Wassertechnik 5, 42–44.
- GRUBER, L. & STEINWIDDER, A. (1996): Einfluss der Fütterung auf die Stickstoff- und Phosphorausscheidung landwirtschaftlicher Nutztiere - Modellkalkulationen auf Basis einer Literaturübersicht. Die Bodenkultur 47 (4), 255–277.
- HEINZLMAIER, F., FREUDENSCHUB, A. & GERZABEK, M. H. (2008): Der Versorgungszustand österreichischer Böden mit Pflanzennährstoffen - Ergebnisse der österreichischen Bodenzustandsinventuren. Die Bodenkultur 59 (1-4), 45–55.
- HÖRTENHUBER, S., WEIBHAIDINGER, R., FRIEDEL, J. K., LINDENTHAL, T. & ZOLLITSCH, W. (2013): Phosphorversorgung und P-Kreisläufe auf österreichischen Bio-Grünlandbetrieben. In: LFZ Raumberg-Gumpenstein (Hrsg.), 18. Alpenländisches Expertenforum „Phosphor im Grünlandbetrieb - Bedeutung und aktuelle Problembe- reiche“. LFZ Raumberg-Gumpenstein, Irnding, 51–60.

- HUEMER, C. (2013): Einfluss der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung und des Reliefs auf den Nährstoffgehalt im Oberboden mit besonderer Berücksichtigung des Phosphors. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, Wien.
- JANDL, S. M. (2013): Nährstoffbilanzen von biologisch wirtschaftenden Milchviehbetrieben im Grünlandgebiet bei reduziertem Kraftfuttereinsatz. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, Wien.
- KOLBE, H. & KÖHLER, B. (2008): Formen der Nährstoffbilanzierung in Praxis und Beratung des Ökologischen Landbaus. Online: <http://orgprints.org/14925/> (13. 03. 2013).
- KRIECHBAUM, J. (2013): schriftliche Mitteilung (07.03.2013).
- LINDENTHAL, T. (2000): Phosphorvorräte in Böden, betriebliche Phosphorbilanzen, und Phosphorversorgung im Biologischen Landbau. Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien, Wien.
- MAATHUIS, F. J. (2009): Physiological functions of mineral macronutrients. *Current Opinion in Plant Biology* 12 (3), 250–258.
- MARSCHNER, H. (1995): *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2. Auflage, Academic Press, London.
- NESET, T.-S. S. & CORDELL, D. (2012): Global phosphorus scarcity: identifying synergies for a sustainable future. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 92 (1), 2–6.
- OBERSON, A., FARDEAU, J. C., BESSON, J. M. & STICHER, H. (1993): Soil phosphorus dynamics in cropping systems managed according to conventional and biological agricultural methods. *Biology and Fertility of Soils* 16, 111–117.
- PETZET, S. & CORNEL, P. (2013): Phosphorus Recovery from Wastewater. In: Hester, R.E. & Harrison, R.H. (eds.), *Issues in Environmental Science and Technology* 37. „Waste as a Resource“. Royal society of chemistry, Cambridge, 110–143.
- PÖTSCH, E. M. (2000): Auswirkungen der biologischen Wirtschaftsweise auf pflanzenbauliche Kennwerte im Dauergrünland. In: Österreichische Akademie der Wissenschaften, BAL Gumpenstein (Hrsg.), MAB-Forschungsbericht „Landschaft und Landwirtschaft im Wandel - Das Grünland im Berggebiet Österreichs“. BAL Gumpenstein, Irtdning, 175–180.
- PÖTSCH, E. M., RESCH, R. & BUCHGRABER, K. (2013): Auswirkung der Düngung auf P-Gehaltswerte im Boden und Futter sowie P-Bilanzen von Grünlandflächen. In: LFZ Raumberg-Gumpenstein (Hrsg.), 18. Alpenländisches Expertenforum „Phosphor im Grünlandbetrieb - Bedeutung und aktuelle Problembereiche“. LFZ Raumberg-Gumpenstein, Irtdning, 41–50.
- PRASUHN, V. & BRAUN, M. (1994): Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern. Schriftenreihe der FAC Liebenfeld 17, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrilkulturchemie und Umwelthygiene, Liebefeld-Bern.
- RICHARDSON, A. E., BAREA, J.-M., MCNEILL, A. M. & PRIGENT-COMBARET, C. (2009): Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil* 321 (1-2), 305–339. DOI: <http://link.springer.com/10.1007/s11104-009-9895-2> (28.11.2013).
- SCHELLER, E. (1993): Wissenschaftliche Grundlagen zum Verständnis der Düngungspraxis im ökologischen Landbau - aktive Nährstoffmobilisierung und ihre Rahmenbedingungen. Selbstverlag, Dipperz.
- SCHUSTER, R., DAURER, A., KRENMAYR, H. G., LINNER M., MANDL, G. W., PESTAL, G. & REITNER, J. M. (2013): *Rocky Austria. Geologie von Österreich - kurz und bunt*. Geologische Bundesanstalt, Wien.
- SMIT, A. L., BINDRABAN, P. S., SCHRÖDER, J., CONIJN, J. & VAN DER MEER, H. (2009): Phosphorus in agriculture: global resources, trends and developments. Report to the Steering Committee Technology Assessment of the Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality, Plant Research International, Wageningen.
- SPOHN, M. & KUZYAKOV, Y. (2013): Phosphorus mineralization can be driven by microbial need for carbon. *Soil Biology and Biochemistry* 61, 69–75. DOI: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071713000692> (05.12.2013).
- STEEN, I. (1998): Phosphorus availability in the 21st Century: Management of a non-renewable resource. *Phosphorus and Potassium* 217, 25–31.
- STEINWIDDER, A. (2000): Futter und Nährstoffaufnahme, Leistung und Nährstoffversorgung von Kühen auf Milchviehbetrieben. In: Österreichische Akademie der Wissenschaften, BAL Gumpenstein (Hrsg.), MAB-Forschungsbericht „Landschaft und Landwirtschaft im Wandel - Das Grünland im Berggebiet Österreichs“. BAL Gumpenstein, Irtdning, 167–174.
- STEINWIDDER, A. (2013): mündliche Mitteilung (10.04.2013).
- WEISSENSTEINER, C. (2014): Phosphorvorräte und Phosphorbilanzen im österreichischen Dauergrünland. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, Wien.
- WERNER, W., OLFS, H.-W., AUERSWALD, K. & ISERMANN, K. (1991): Stickstoff- und Phosphoreintrag in Oberflächengewässer über „diffuse Quellen“. In: Hamm, A. (Hrsg.), *Studie über Wirkungen und Qualitätsziele von Nährstoffen in Fließgewässern*. Academia Verlag, Sankt Augustin, 665–764.
- ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK (ZAMG) (2002): Klimadaten von Österreich 1971-2000. Online: http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm (03.04.2013).
- ZOLLITSCH, W. (2013): mündliche Mitteilung (23.04.2013).