

## Methoden

Analytisierte P-Dünger und Datenherkunft: Für die LCAs wurden die Umweltwirkungen der Herstellung von RPD aus Klärschlamm und Klärschlammaufbereitungsprodukten (u.a. Struvit, Aschen, aufgeschlossene Aschen) und traditionellen Düngern wie Kompost (davon eine Variante teileingehaust/emissionsarm), Holzasche, Fleischknochenmehl, Thomasphosphat und Biogasgülle aus Reststoffen mit denen von Rohphosphat und Triplesuperphosphat verglichen. Die Daten zu P-Konzentrationen oder Trockenmassegehalten in Substraten sowie zu benötigten Produktionsmitteln, d.h. Energie und chemischen Stoffen, stammen von Möller & Schultheiss (2014), Möller (2015), Remy & Jossa (2015), Ecoinvent (2014), Blonk Agri-footprint BV (2014).

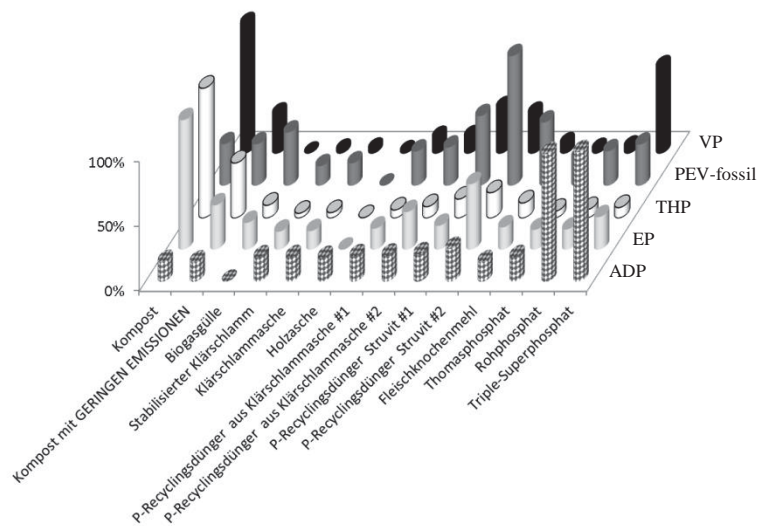
Verwendete Methodik und analysierte Umweltwirkungen sowie Systemgrenzen: Die Analyse der Datensammlungen/Inventaren für P-Dünger erfolgte mit der LCA-Software SimaPro (PRé Consultants, 2011) nach der Charakterisierungsmethode „CML“ (Guinée et al., 2002; mit dem aktuellen Stand der Charakterisierungsfaktoren). Die LCAs untersuchen fünf Indikatoren: den Verbrauch an Abiotischen Ressourcen (ADP; Sb-eq), Primärenergieverbrauch nicht erneuerbarer Energieträger (PEV-fossil; MJ), Treibhauspotenzial (THP, CO<sub>2</sub>-eq), Versauerungspotenzial (VP; SO<sub>2</sub>-eq) und Eutrophierungspotenzial (EP; PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-eq), jeweils je kg Phosphor.

Infrastrukturprozesse wie z.B. Gebäude wurden nicht bewertet. Die Sammlung der Rohstoffe wurde dann angerechnet, wenn sie gezielt für die Produktion/Aufbereitung des P-Düngemittels erfolgt und nicht wenn sie ohnehin erfolgen müsste (wie bspw. für den Abtransport von Siedlungsabfall). Ab der Weiterverarbeitung des Rohstoffs, z.B. Speisereste in einer Kompostierungs- oder einer Biogasanlage, wurden Umweltwirkungen aber auch allfällige Ko-Effekte wie z.B. die Biogas-Energieerzeugung – letzteres mittels Substitution des deutschen Strommixes und ohne Berücksichtigung der Abwärme – berechnet. Für die Bereitstellung aller Abfälle inkl. Klärschlamm und dessen Asche wurde wie auch in ähnlichen Studien die Annahme zugrunde gelegt, dass sie keine Umweltbelastung aufweisen, weil diese der Entsorgung des vorherigen Produkts, z.B. Lebensmittel für Speisereste, zugerechnet werden. Die Systemgrenze endet mit der Berücksichtigung des Energiebedarfs für die Ausbringung des (P-) Düngers. Weitere Emissionen mit und nach der Ausbringung, z.B. aus dem Boden, liegen aufgrund der schwierigen Vergleichbarkeit und hohen Abhängigkeit der vorhandenen Technik und eingesetzter Verfahren außerhalb der Systemgrenze. Die Ko-Effekte der Stickstoff- und der Kalidüngewirkung (organischer) P-Dünger wurden über eine Substitution mittels Kali-Mineraldünger bzw. Vinasse (für N und K<sub>2</sub>O) berücksichtigt, um deren Einsatz im Biolandbau zu simulieren. Das Humus-sequestrierungspotenzial je kg P wurde für organische Dünger spezifisch in Abhängigkeit von P und organischem Kohlenstoff (C<sub>org</sub>) berechnet und berücksichtigt eine potenzielle Anreicherung des Humusgehalts über 100 Jahre um maximal 10 % des Ausgangswertes. Die 10 % basieren auf einem Versuch von Kluge (2006) mit langjähriger Ausbringung von 5 t TM Kompost je ha und Jahr.

## Ergebnisse

Herkömmliche Dünger auf Basis von phosphathaltigem Gestein, d.h. Triplesuperphosphat und Rohphosphat zeigen generell ein sehr hohes ADP (Abb. 1), Triplesuperphosphat zudem ein relativ hohes VP. Daher ist die Rückführung von Nährstoffen aus dem Siedlungsbereich von hoher Bedeutung. Die Verwertung organischer Siedlungsabfälle stellt sich für verwertbares Material, z.B. Haushaltsabfälle, in der Biogasanlage als günstiger gegenüber üblicher Kompostie-

zung dar, weil bei letzterer deutlich höhere Anteile an C und N verloren gehen und sich damit ungünstige Ergebnisse beim VP, THP und EP ergeben. In der Biogasanlage kann dagegen ein Teil des C in Energie umgewandelt und dem Gärrest damit eine Gutschrift gegeben werden. Wird der Kompostierungsprozess allerdings teilweise eingehaust und unter speziellen Folien geführt, resultieren deutlich geringere Emissionen. Aus Sicht der LCAs sind die Ausbringung von stabilisiertem Klärschlamm und dessen Asche günstiger als der Einsatz von daraus aufbereiteten RPD. Die zwei RPD auf Basis von aufgeschlossener Klärschlammasche zeigen sich dabei günstiger als die zwei Struvite, die abhängig vom Gewinnungsverfahren teilweise sehr hohen PEV-fossil und auch relativ hohes VP zeigen. Fleischknochenmehl und Thomasphosphat weisen generell moderate bis günstige LCA-Ergebnisse auf. Die in Summe geringsten Umweltwirkungen resultieren bei Holzasche (siehe relative Vorteile in Abb. 1).



**Abbildung 1: Relative Ergebnisse für die LCA-Indikatoren Verbrauch an Abiotischen Ressourcen (ADP), Eutrophierungspotenzial (EP), Treibhauspotenzial (THP), Primärenergieverbrauch nicht erneuerbarer Energieträger (PEV-fossil) und Versauerungspotenzial (VP) für die Herstellung und Ausbringung alternativer P-Dünger zwischen dem jeweils besten Ergebnis (mit „0%“ = geringe Umweltwirkungen) und dem schlechtesten (mit „100%“ = hohe Umweltwirkungen).**

### Diskussion

Bei organischen Düngern können Ko-Effekte für viele Indikatoren Nachteile deutlich ausbessern und zum Teil weisen sie dann auch negative Umweltwirkungen auf (d.h. höhere Gutschriften als negative Wirkungen). Wird bei der Substitution für die N-Düngewirkung ein Mineraldünger statt der Vinasse (für N und K) neben mineralischem Kalidünger (falls zusätzlich oder ausschließlich K ersetzt werden kann) angesetzt,

wären Gutschriften allgemein höher und die Reihung der günstigsten P-Dünger geringfügig anders. Struvite können teilweise moderate Umweltwirkungen ähnlich den RPD aus Klärschlammasche aufweisen, und sind im Mittel über alle Indikatoren ähnlich den mineralischen Düngern. Alle aufbereiteten RPD schließen, abhängig vom Herstellungsverfahren, im Vergleich zu Klärschlamm oder dessen unbehandelter Asche einen großen Teil der Schadstoffe aus. Die Ergebnisse des LCAs sind anderen Aspekten wie z.B. der Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe gegenüberzustellen. Dabei zeigen sich teilweise sehr gegensätzliche Vorzüglichkeiten der Rohstoffe und Verfahren.

### Schlussfolgerungen

Organische Dünger inklusive emissionsarm produziertem Kompost sind aus der Perspektive der gegenständlichen Ökobilanz in vielen Umweltwirkungen mineralischen Düngern (Rohphosphat für Bio) vorzuziehen. Hinsichtlich des Risikos von Schadstoffanreicherungen, z.B. Schwermetalle oder Pathogene in Böden und Produkten, können Klärschlamm und dessen Asche Nachteile aufweisen, die jedoch mit aufbereiteten RPD stark reduziert werden. Mit dieser Aufbereitung gehen zwar auch Nachteile einher, allerdings wird damit eine mengenmäßig äußerst wichtige P-Quelle aus den Siedlungen für die Rückführung in die (Bio?-)Landwirtschaft verfügbar.

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der FiBL-Kollegin Mag.<sup>a</sup> Theresia Markut, bei den KollegInnen des FP7 ERA-Net CORE Organic II-Projektes „IMPROVE-P“ (Projekt Nr. 249667) und den nationalen Finanzierungsstellen. Für weitere Informationen: [www.coreorganic2.org](http://www.coreorganic2.org) bzw. die Projektwebsite <https://improve-p.uni-hohenheim.de/>

### Literatur

- Blonk Agri-footprint BV (2014) Agri-Footprint - Part 2. Description of data - Version 1.0. Gouda, Niederlande. Online verfügbar unter <http://www.agri-footprint.com/assets/Agri-footprint%202.0%20-%20Part%202%20Description%20of%20data.pdf> (08.08.2016).
- Ecoinvent Centre (2014) Ecoinvent data v 3.1. Dübendorf, Schweiz.
- Guinée JB, Gorrae M, Heijungs R, Huppes G, Kleijn R, de Koning A, van Oers L, Wegener Sleeswijk A, Suh S, Udo de Haes HA, de Bruijn H, van Duin R & Huijbregts MAJ (2002) Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Kluge R (2006) Key benefits of compost use for the soil-plant system. In: Ecologically Sound Use of Biowaste in the EU. Tagungsbeitrag. Brüssel, 31. Mai – 1. Juni 2006. Online verfügbar unter [http://kompost.de/uploads/media/key\\_benefits\\_of\\_compost\\_use.pdf](http://kompost.de/uploads/media/key_benefits_of_compost_use.pdf) (10.08.2016).
- Möller K (2015) Compost and Digestates from Urban Organic Wastes. Assessment of Alternative Phosphorus Fertilizers for Organic Farming. FiBL Fact Sheet. <https://shop.fibl.org/en/article/c/fertilization/p/1699-compost-and-digestates.html> (08.08.2016)
- Möller K & Schultheiss U (2013) Organische Handelsdüngemittel tierischer und pflanzlicher Herkunft für den ökologischen Landbau - Charakterisierung und Empfehlungen für die Praxis. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) e.V., Darmstadt.
- PRé Consultants (2011) SimaPro, Life Cycle Assessment software package. Version 7.3. Amersfoort, Niederlande.
- Remy C & Jossa P (2015) Life Cycle Assessment of selected processes for P recovery from sewage sludge, sludge liquor, or ash. Deliverable D 9.2 from P-REX project. Online verfügbar unter [http://p-rex.eu/uploads/media/P-REX\\_D9\\_2\\_Environmental\\_Impact\\_Assessment\\_LCA\\_Remy\\_2015.pdf](http://p-rex.eu/uploads/media/P-REX_D9_2_Environmental_Impact_Assessment_LCA_Remy_2015.pdf) (10.08.2016)

## Phosphordüngewirkung von Recyclingdüngemitteln

Möller K<sup>1</sup>

*Keywords: phosphorus, recycling, relative P fertilizer efficiency.*

### Abstract

*Phosphorus (P) is an essential element for all living organisms, and at the current rate of extraction, global reserves will be exhausted in the next few centuries. Often, P balances calculated for organically managed arable systems indicate that more P is removed with the products than applied as fertilizer. Within the IMPROVE-P consortium, the relative P fertilizer effectiveness of most recycling P fertilizers was assessed. Most organic P fertilizers with exception of meat and bone meal have a relatively high relative P effectiveness. Struvite obtained from chemical approaches for P recycling also showed high P effectiveness, while incineration and most other thermal approaches downgraded the final fertilizer value by the loss of organic matter, nitrogen and sulfur, and by reducing the P fertilizer efficiency. The suitability of recycling P fertilizers as P source is largely dependent on the soil reaction.*

### Einleitung und Zielsetzung

Ein Grundprinzip des ökologischen Landbaus sind geschlossene Stoffkreisläufe. Mit den verkauften Ernteprodukten werden jedoch Nährstoffe abgeführt, die derzeit häufig nicht in angemessenem Umfang ersetzt werden. Die wichtigste potenzielle P-Recyclingquelle in Mitteleuropa stellen Klärschlämme dar, relevante Quellen sind auch Knochen- und Fleischknochenmehle sowie organische Siedlungsabfälle aus der getrennten Hausmüllsammlung. Klärschlämme können entweder nach Hygienisierung und Stabilisierung direkt landwirtschaftlich verwertet werden, was v.a. in deutschsprachigen Ländern stark in der Diskussion steht und im ökologischen Landbau seit den 70er Jahren aufgrund der Belastung mit Schadstoffen (potenziell toxischen Elementen, organischen Schadstoffen, etc.) nicht erlaubt ist. Aus diesem Grunde wurden in den vergangenen Jahren zahlreiche Ansätze zur Weiterverarbeitung von Klärschlämmen entwickelt, um ein effizientes P-Recycling bei reduzierten Schadstofffrachten zu ermöglichen. Diese beruhen entweder auf chemische Ansätze zur P-Fällung, oder auf thermische Prozesse verbunden mit einer Verbrennung getrockneter Klärschlämme. Je nach Prozessdesign wird eine Vielzahl verschiedener Recycling-P-Düngemittel (RPD) mit sehr unterschiedlichen chemischen Eigenschaften erzeugt. Neben Fragen der Gefahr der Schadstoffanreicherung bei langfristiger Anwendung von RPDs (siehe Friedel et al., in diesem Band) und der Umweltverträglichkeit der verschiedenen P-Recyclingansätzen (siehe Hörtenhuber et al., in diesem Band) ist deren P-Düngewirkung unter verschiedenen Bodenbedingungen ein sehr wichtiges Merkmal zu deren Bewertung. Daher wurden im Rahmen des EU-Projektes „IMPROVE-P“ nicht nur eigene Versuche zur P-Düngewirkung von RPDs durchgeführt, sondern zugleich auch der derzeitige Kenntnisstand zusammengetragen und ausgewertet.

---

<sup>1</sup> Institut für Kulturpflanzenwissenschaften, Fachgebiet Düngung und Bodenstoffhaushalt, Universität Hohenheim, Fruwirthstr. 20, 70593 Stuttgart, E-Mail: kurt.moeller@alumni.tum.de

## Material und Methoden

Es wurden veröffentlichte und teils noch unveröffentlichte Daten zur P-Düngewirkung von Recyclingdüngemitteln zusammengetragen, die sowohl aus dem IMPROVE-P-Konsortium stammen, als auch von anderen Projekten zum P-Recycling. Dabei wurden RPDs berücksichtigt, die aus Klärschlämmen, aus Fleischknochenmehl, aus organischen Siedlungsresten aus der getrennten Hausmüllsammmlung oder Biomasseaschen als Substrat stammen. Als Kontrollvarianten wurden Daten zu Rohphosphat und Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft zusammengetragen. Es wurden ausschließlich Ergebnisse aus Pflanzenversuchen (sowohl Freiland als auch Gefäßversuche) einbezogen, bei denen eine unbehandelte Kontrolle vorlag, und die Kontrolle mit wasserlöslichen P-Düngemitteln einen signifikanten Effekt auf die P-Aufnahme aufwies. Die relative P-Düngeeffizienz (rPE) wurde auf Grundlage nachfolgender Gleichung berechnet:

$$rPE (\%) = 100 * (P\text{-Gehalt RPD} - P\text{-Gehalt 0}) / (P\text{-Gehalt WIP} - P\text{-Gehalt 0}) \quad [1]$$

für: P-Gehalt RPD = Sprossmasse-P-Entzug der RPD behandelten Variante; P-Gehalt 0 = Sprossmasse-P-Entzug der unbehandelten Kontrolle; P-Gehalt WIP = Sprossmasse-P-Entzug der mit einem wasserlöslichen P-Mineraldünger behandelten Kontrolle (z.B. Triplesuperphosphat).

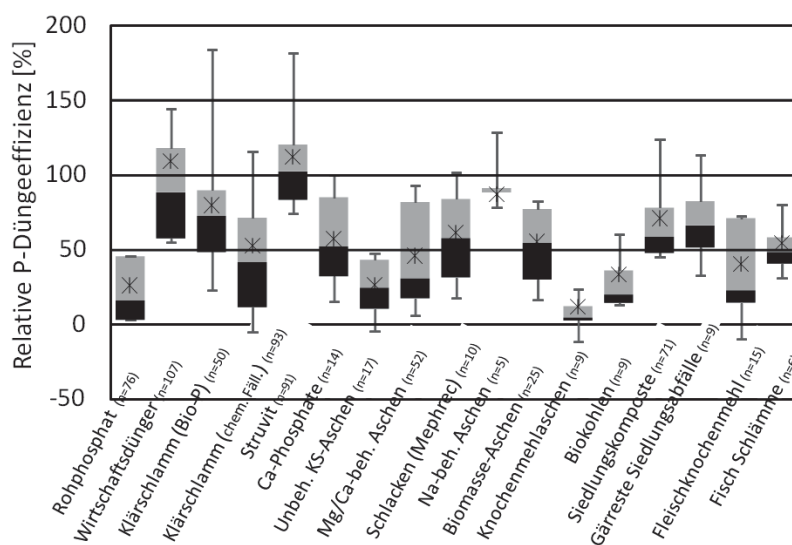
Ergänzend wurden die Daten zum pH-Wert des Testbodens, zur Versuchsmethode (Feld- vs. Gefäßversuch) sowie zur Testpflanze dokumentiert. Die Literaturangaben zur Erstellung der Zusammenstellung sind in Möller et al. (2017) zusammengetragen.

## Ergebnisse

Die P-Wasserlöslichkeit nahezu aller derzeitigen RPD ist gering (z.B. Kompost, Klärschlamm, Gärreste) bis sehr gering (Struvite, Aschen, etc.) (nicht dargestellt). Die Auswertungen der relativen P-Düngeeffizienz von RPDs zeigen große Unterschiede (Abb. 1). Organische Düngemitteln weisen mit Ausnahme von Fleischknochenmehl eine vergleichsweise hohe relative P-Düngeeffizienz auf (z.B. Wirtschaftsdünger, Klärschlämme, Siedlungskomposte und -gärreste), allerdings ist die direkte P-Düngewirkung von Klärschlämmen stark abhängig vom Fällungsverfahren in der Kläranlage (biologisch vs. chemisch mit Aluminium und/oder Eisen). Zudem ist die relative P-Düngeeffizienz bei diesen organischen RPD weitgehend unabhängig vom pH-Wert des Bodens (nicht dargestellt). Die relative P-Düngeeffizienz von Fleischknochenmehl unterscheidet sich dagegen nicht wesentlich der von Rohphosphaten, bei diesen beiden Düngemitteln ist sie zudem sehr abhängig vom pH-Wert des Bodens (nicht dargestellt). Dies bedeutet, dass bei neutralen Boden-pH-Wert und höher nahezu keine P-Düngewirkung feststellbar ist, und mit sinkendem pH-Wert ansteigt. Allerdings zeigen die Auswertungen auch, dass mit sinkendem pH-Wert die Herkunft und damit die chemischen Eigenschaften der Rohphosphate eine immer stärkere Bedeutung für deren P-Düngewirkung einnimmt.

Unter den chemischen Fällungsansätzen zum P-Recycling aus Klärschlämmen weisen Struvite ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6 H_2O$ ) trotz sehr niedriger Wasserlöslichkeit im Durchschnitt eine im Vergleich zu wasserlöslichen P-Mineraldüngemittel sehr hohe relative P-Düngeeffizienz auf (Abb. 1), die zudem unabhängig vom pH-Wert der Bodenlösung ist. Die P-Düngewirkung von zahlreichen nicht apatitischen Ca-Phosphaten ist dagegen eher gering (Abb. 1) und stark abhängig vom pH-Wert des Bodens (nicht dargestellt).

Eine einfache Veraschung von organischen Reststoffen führt nicht nur zu Verlusten an anderen Nährstoffen wie Stickstoff und Schwefel, sondern zugleich auch zu einer deutlichen Reduzierung der relativen P-Düngewirkung (Abb. 1). Nur durch aufwändige Verfahren wie die direkte Behandlung in einem Hochofen ähnlich der Herstellung von Thomasphosphat oder eine aufwändige Nachbehandlung der Asche entweder mit Schwefelsäure mit dem Ziel eines chemischen Aufschlusses (nicht dargestellt) oder mit geeigneten Zusatzstoffen (z.B.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) führt zu Düngemitteln mit einer hohen relativen P-Dünger-effizienz (Abb. 1).



**Abbildung 1: Boxplot der relativen P-Dünger-effizienz von Recycling-Phosphor-Düngemitteln (Box: 50 % der Werte; Antennen: 95 % der Werte; Mittelwerte durch Kreuz gekennzeichnet).**

Aufbereitungsprodukte aus der Verwertung von organischen Siedlungsabfällen aus der getrennten Hausmüllsammmlung weisen eine relativ hohe relative P-Dünger-effizienz auf, sie ist auch weitgehend unabhängig vom pH-Wert des Testbodens. Allerdings ist der Datensatz für Gärreste noch relativ schwach.

### Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass auf sauren Standorten mit einem  $\text{pH} < 5,5 - 6,0$  mit nahezu allen RPDs eine befriedigende bis sehr gute P-Dünger-wirkung erzielt wird. Deutlich höhere Ansprüche an die Eigenschaften der RPD stellen schwach saure und neutrale Böden, denn auf solchen Standorten sind weder herkömmliche P-Dünger-mittel wie Rohphosphate noch zahlreiche RPDs (z.B. Aschen, Knochenmehl, etc.) effektiv. Die hohe relative P-Effizienz von den meisten organischen Recycling-P-Dünger-mitteln ist eine Folge von direkten und indirekten Wirkungen. Ein hoher Anteil der P-Verbindungen in organischen RPD liegen in mineralischer Form vor, entweder in Form von gelösten P-Salzen, gefällten P-Verbindungen (z.B. Struvit) oder adsor-

biert an der Oberfläche der organischen Masse (Annaheim et al. 2015). Diese tragen zur direkten P-Düngewirkung von organischen P-Düngemitteln bei. Die indirekten Wirkungen auf die P-Verfügbarkeit kommen durch Veränderungen der P-Sorptionseigenschaften an Bodenkolloiden zustande, zahlreiche Elemente und Verbindungen können adsorbierte P-Verbindungen in die Bodenlösung überführen (u.a. vanden Nest et al., 2016). Ein bedeutender Vorteil von den hier diskutierten organischen RPDs ist auch deren P-Düngewirkung unter einer leicht sauren bis neutralen Bodenreaktion. Fleischknochenmehle und Knochenmehle eignen sich dagegen kaum als P-Düngemittel, da ihre apatitischen P-Verbindungen nur unter sauren Bedingungen in pflanzenverfügbare Formen überführt werden können. Die smarteste Verwertung von Fleischknochenmehlen ist ihre Verwertung über den Tiermagen, der sehr niedrige pH-Wert während der Magenpassage überführt einen Großteil des apatitischen P in tier- und pflanzenverfügbare P-Verbindungen.

Unter den P-Düngemitteln, die durch chemische Fällungsreaktionen gewonnen werden, weist Struvit eine sehr hohe P-Verfügbarkeit auf. Da die Elemente in den Struvitkristallen im dynamischen Lösungsgleichgewicht mit der Bodenlösung stehen, wird der Abbau des Struvits im Boden vermutlich maßgeblich durch die Nährstoffaufnahme durch die Pflanzen gesteuert. Die Eignung von Aschen als P-Düngemittel ist am ehesten mit der von Rohphosphaten oder Knochenmehlen zu vergleichen, zur Erzielung befriedigender Ergebnisse sind aufwändige Aufbereitungsschritte notwendig.

### Schlussfolgerungen

Die Eignung von Recycling-P-Düngemitteln wird maßgeblich durch den Boden-pH-Wert bestimmt. Neutrale bis alkalische Böden stellen die höchsten Ansprüche an die Eigenschaften der applizierten RPDs. Die heute bevorzugte Verbrennung von Klärschlämmen führt nicht nur zu einem Verlust an organischer Masse, Stickstoff und Schwefel, zugleich werden P-Verbindungen mit mittlerer bis hoher Pflanzenverfügbarkeit in solche ohne P-Düngewirkung überführt, die vor einer Ausbringung eigentlich chemisch wieder aufgeschlossen werden sollten.

### Danksagung

Diese Arbeiten sind im Rahmen des EU-Projektes IMPROVE-P durchgeführt worden. Wir danken für die finanzielle Unterstützung durch die an CORE Organic II ([www.coreorganic2.org](http://www.coreorganic2.org)) beteiligten nationalen Finanzierungsinstitutionen aus Dänemark, Deutschland, Groß-Britannien, Norwegen, Österreich und Schweiz.

### Literatur

- Annaheim KE, Doolette AL, Smernik RJ, Mayer J, Oberson A, Frossard E & Bünemann EK (2015) Long-term addition of organic fertilizers has little effect on soil organic phosphorus as characterized by <sup>31</sup>P NMR spectroscopy and enzyme additions. *Geoderma* 257-258(1): 67-77.
- Möller K, Oberson A, Bünemann E, Cooper J & Friedel J, et al. (2017) Improved phosphorus recycling in organic farming: navigating between constraints. *Advances in Agronomy* (eingeladen und eingereicht).
- Nest TV, Ruyschaert G, Vandecasteele B, Houot S, Baken S, Smolders E, [...] & Merckx R (2016) The long term use of farmyard manure and compost: effects on P availability, orthophosphate sorption strength and P leaching. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 216(1): 23-33.

## Phosphordüngewirkung karbonisierter Biogasgärreste

Leong KI<sup>1</sup>, Lohr D<sup>2</sup>, von Tucher S<sup>1</sup> & Meinken E<sup>2</sup>

*Keywords: pyrolysis, TCR, hydrothermal carbonization, HTC, P-recycling.*

### Abstract

*P-recycling from biogas residue may play a future key role for sustainable P supply in organic farming. However, in particular transportation costs of residue need to be reduced e.g. by pretreatment. One approach is carbonization by pyrolysis or hydrothermal carbonization (HTC). In a pot trial with maize on a P-deficient, acidic sandy loam P uptake after application of two chars from pyrolysis (400 and 700 °C) and HTC (6 and 8 h dwell time) all made of the same residue was compared to P uptake after application of the raw residue and water soluble KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> respectively. P uptake was the same for KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, raw residue and both HTC treatments, but was significant lower in treatments with pyrolytic chars. Neither dwell time nor temperature had an effect. However, whereas pyrolysis raised P concentration, in HTC chars it was the same as in the raw residue. Also P was extracted from soil of pots without plants at beginning, half and end of the trial using H<sub>2</sub>O, CAT, CAL and Na-formate respectively. For CAT, CAL and Na-formate significant correlations between P uptake by maize and extractable P at all dates exist, whereas for H<sub>2</sub>O this was only true for extractable P at the end of the trial.*

### Einleitung und Zielsetzung

Die weltweiten Reserven an Rohphosphaten – insbesondere an solchen mit hohen P-Gehalten und einer nur geringen Schwermetallbelastung – werden in absehbarer Zeit zu Neige gehen. Gleichzeitig gibt es in Regionen mit einer hohen Dichte an Biogasanlagen auf Grund der geringen Transportwürdigkeit der anfallenden P-reichen Gärreste erhebliche P-Bilanzüberschüsse. Eine Möglichkeit die Transportwürdigkeit zu erhöhen, ist die Karbonisierung. Hierbei wird zwischen der Verschwelung unter Luftabschluss (Pyrolyse) und der Konvertierung unter hohem Druck und hoher Temperatur im wässrigen Milieu – der Hydrothermalen Karbonisierung (HTC) – unterschieden (Libra et al., 2011). In einem Gefäßversuch mit Mais wurde untersucht, wie das Karbonisierungsverfahren und die Prozessparameter die P-Verfügbarkeit beeinflussen.

### Material und Methoden

Das Ausgangsmaterial war ein getrockneter und pelletierter Gärrest (BGR), der einmal in einem zweistufigen Verfahren pyrolysiert (TCR®; 1 Stufe: 400 °C; 2 Stufe: 400 °C (Pyr 400) bzw. 700 °C (Pyr 700)) sowie in einem Batchreaktor für 6 (HTC 6) bzw. 8 Stunden (HTC 8) hydrothermal karbonisiert wurde. Der BGR und die Kohlen wurden auf Basis von 100 mg Gesamt-P/kg in einen P-armen (CAL-P 15 mg/kg), sauren (pH 4,9) sandigen Lehm (mit ackerbaulicher Vornutzung) eingemischt. Um bei den übrigen

---

<sup>1</sup> TU München, Lehrstuhl für Pflanzenernährung, Emil-Ramann-Straße 2, 85354 Freising, Deutschland, tucher@wzw.tum.de, <http://www.pe.wzw.tum.de>

<sup>2</sup> Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Institut für Gartenbau, Am Staudengarten 14, 85354 Freising, Deutschland, elke.meinken@hswt.de, <http://www.hswt.de>



Nährstoffen eine identische Versorgung sicherzustellen, wurden die jeweils eingetragenen Nährstoffe mit Einzelsalzen ergänzt. Als Kontrollen dienten zum einen der Boden ohne P-Düngung (Kon 0) sowie mit 100 mg P/kg als  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (Kon P).

Der Versuch wurde in 2,5 l-Containern (Inhalt: 3 kg Boden) in einer Vegetationshalle von KW 33 bis 40/2015 in vierfacher Wiederholung durchgeführt. Je Gefäß wurden acht Körner ausgesät. Nach dem Auflaufen (BBCH 9-10) wurde auf vier Pflanzen je Gefäß vereinzelt. Zusätzlich zu den bepflanzt Gefäßen wurden je Variante vier weitere Gefäße ohne Pflanzen in gleicher Weise (Bewässerung, N-Kopfdüngung nach drei Wochen) behandelt. Zu Versuchsbeginn, drei Wochen nach Aussaat und zu Versuchsende wurden die Gehalte an  $\text{H}_2\text{O}$ -, CAT-, CAL- und Na-Formiat-löslichem P sowie die  $N_{\text{min}}$ -Gehalte und pH-Werte in den Böden bestimmt. Für die Analyse nach drei Wochen wurden zwei der unbepflanzten Gefäße entnommen. Zu Versuchsende erfolgten die Analysen sowohl bei den beiden verbliebenen unbepflanzten Gefäßen als auch bei den vier bepflanzt. Zudem wurden die Frisch- und Trockenmasse sowie der Gesamt-P-Gehalt der Pflanzen bestimmt und deren P-Aufnahme errechnet.

### Ergebnisse und Diskussion

Während in den Varianten mit BGR, HTC 6 und HTC 8 die P-Aufnahme vergleichbar war wie in der Kontrolle mit P, war sie bei den beiden Varianten mit Pyrolysekohle signifikant geringer, allerdings deutlich höher wie in der 0-Kontrolle. Des Weiteren wiesen die Pflanzen bei Verwendung von Pyrolysekohle Anthocyanverfärbungen in den Blattadern auf, die aber schwächer ausgeprägt waren wie in der 0-Kontrolle. Unterschiede zwischen dem unbehandelten Gärrest, den Pyrolyse- und den HTC-Kohlen zeigten sich auch bei den extrahierbaren P-Gehalten. Sowohl beim CAT-, CAL- und Na-Formiat-löslichen P bestanden hochsignifikante Korrelationen zwischen den extrahierbaren P-Gehalten zu Versuchsbeginn bzw. zu den weiteren Analyseterminen (unbepflanzte Gefäße) und der P-Aufnahme ( $r \geq 0,88$ ). Beim  $\text{H}_2\text{O}$ -löslichen P war nur bei der Analyse zu Versuchsende eine lineare Korrelation ( $r = 0,92$ ) zu beobachten. Im Gegensatz zu anderen Versuchen (Atkinson et al., 2010) wurde in diesem Versuch kein Kalkungseffekt durch die Pyrolysekohle beobachtet. Auch bei keiner der übrigen Varianten waren pH-Wert-Veränderungen erkennbar, die Unterschiede in der P-Verfügbarkeit hätten verursachen können. Bei keinem der beiden Karbonisierungsverfahren beeinflussten die Prozessparameter (Temperatur bzw. Verweildauer) die P-Aufnahme oder die extrahierbaren P-Gehalte.

Der Versuch zeigt, dass der HTC-Prozess die P-Verfügbarkeit – zumindest auf einem sauren Boden – nicht negativ beeinflusst. Allerdings wurde auch keine P-Anreicherung im Vergleich zum BGR erzielt ( $\leq 0,1$  % P). Umgekehrt kommt es durch die Pyrolyse zwar zu einer starken P Anreicherung (Pyr 400: Faktor 2,2; Pyr 700: Faktor 3,0), gleichzeitig wird aber die P-Verfügbarkeit reduziert. Damit lässt sich die Frage, ob die Karbonisierung – pyrolytisch oder hydrothermal – geeignet ist die Transportwürdigkeit von BGR zu erhöhen, nicht eindeutig beantworten.

### Literatur

- Atkinson C.J, Jean D.F & Neil A Hipps (2010) Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant Soil* 337(1-2): 1-18.
- Libra J.A, Kyoung R.S, Kammann C, Funke A, Berge N.D, Neubauer Y, Titrici M-M, Fühner C, Bens O, Kern J & Emmerich K-H (2011): Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*, 2(1): 89-124.

## Phosphor im Grünland – Antrieb der Leguminosen, aber Bremse der Phytodiversität?

Mahnke B<sup>1</sup>, Wrage-Mönnig N<sup>1</sup>, Leinweber P<sup>2</sup> & Müller J<sup>1</sup>

*Keywords: grassland, phosphorus, legumes, phytodiversity.*

### Abstract

*In our study we investigated the effect of soil phosphorus (P) status on legume occurrence and on phytodiversity of organically managed permanent grassland sites. Therefore, we realized screenings on 2 m x 2 m plots with a clear spatial differentiation between the functional groups 'legumes' and 'non-legumes' on five mown pasture sites under organic management in north-eastern Germany. We found no significant difference between the phosphorus content of aboveground biomass of legumes and the associated non-legume group. However, we detected a significant difference between the soil P<sub>DL</sub> contents of these two groups with lower contents in soils of the legume patches whereas the different P fractions and thus different P availability on the mineral site could not explain the occurrence of legumes. Contrary to reports by many ecologists, we could not confirm a clear relationship between soil phosphorus and species number.*

### Einleitung und Zielsetzung

Neben der Bereitstellung von Grundfutter dient Grünland auch dem Erhalt der Biodiversität. Grünlandleguminosen sind dabei maßgeblich an der Erzielung einer hohen Grundfutterleistung und -qualität beteiligt und spielen besonders auf ökologisch bewirtschafteten Standorten als Stickstofflieferanten eine bedeutende Rolle. Sie haben einen hohen Phosphor(P)bedarf, so dass mit einer gezielten P-Düngung ihre Vitalität und N-Fixierungskapazität verbessert sowie ihr Anteil an der Narbe und deren Ertrag gesteigert werden können (Høgh-Jensen et al. 2002). Erhöhte Boden-P-Gehalte können sich allerdings negativ auf die Phytodiversität und Artenzusammensetzung im Grünland auswirken (Ceulemans et al. 2014). Vor diesem Hintergrund wurde der Einfluss der Phosphorversorgung auf die Artenvielfalt und die Präsenz von Leguminosen im Dauergrünland untersucht.

### Methoden

Im Sommer 2014 und 2015 wurden auf insgesamt fünf ökologisch bewirtschafteten Mähweiden in Nordostdeutschland Praxiserhebungen durchgeführt. Alle fünf Standorte sind repräsentativ für diese Region sowie für die Art der Nutzung. Sie können der Klasse der *Molinio-Arrhenatheretea* zugeordnet werden, wobei keine zusätzliche N-Düngung erfolgte. Sie wurden dreimal jährlich genutzt. Einer der Standorte befand sich auf einem diluvialen Sand, ein weiterer Standort umfasste einen sandig-mineralischen Bereich, einen Niedermoorbereich und einen Übergangsbereich. Die anderen drei Standorte befanden sich auf Niedermoorböden, von denen

---

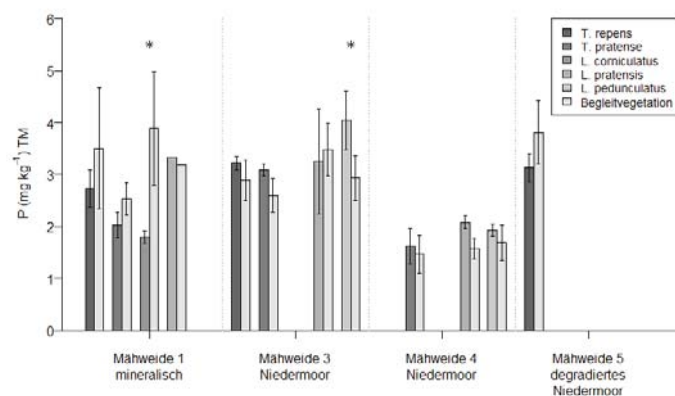
<sup>1</sup> Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Grünland und Futterbauwissenschaften, <sup>2</sup> Bodenkunde, Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059, Rostock, Deutschland, barbara.mahnke@uni-rostock.de, <http://www.auf-gf.uni-rostock.de/>

einer stärker degradiert ist. Auf letzterem erfolgte 2013 eine Nachsaat mit *Lolium perenne*, alle anderen Flächen stellten natürliches Grünland dar. Insgesamt wurden 48 Plots mit einer Größe von 2 x 2 m untersucht, welche auf den Flächen zufällig, aber repräsentativ ausgewählt wurden und dabei jeweils eine deutliche kleinräumige Trennung von Leguminosen und Nicht-Leguminosen aufwiesen. Die Anzahl der Plots je Standort wurden in Abhängigkeit der Wirtschaftseinheit gewählt. Die Pflanzen- und Bodenbeprobungen erfolgten getrennt nach den funktionellen Gruppen (Leguminosen/nicht-legume Begleitvegetation) innerhalb eines jeden Plots. Bei den Leguminosen handelte es sich um verschiedene, jeweils standorttypische Arten. Bei der nicht-legumen Begleitvegetation wurden nur die Begleitgräser, nicht aber die Kräuter beprobt. Auf allen Standorten waren die Leguminosen in Patches verteilt und erreichten maximale Narbenanteile von 15%. Die Pflanzenproben wurden getrocknet und anschließend mit Hilfe von OES-ICP nach vorheriger Reaktion mit  $\text{HNO}_3$  und  $\text{H}_2\text{O}_2$  sowie Mikrowellenaufschluss analysiert. Die P-Gehalte der Bodenproben wurden mittels Doppellactat-Verfahren quantifiziert. Exemplarisch wurde an den Bodenproben des mineralischen Standortes eine modifizierte Phosphorfractionierung nach Hedley et al. (1982) vorgenommen.

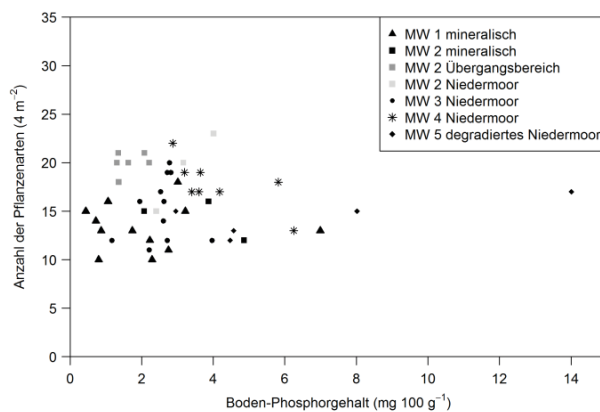
### Ergebnisse

In den 48 Plots konnten wir *Trifolium repens* (n=14), *Trifolium pratense* (n=12), *Lotus corniculatus* (n=4), *Lotus pedunculatus* (n=9) und *Lathyrus pratensis* (n=9) als dominierende Leguminosenarten in unsere Studie einbeziehen. Auf den Mähweiden konnte kein signifikanter Unterschied ( $p > 0.05$ ; t-Test) zwischen den P-Gehalten in der oberirdischen Biomasse der Leguminosen und der Begleitvegetation festgestellt werden. Mit im Mittel  $2,0 \pm 1,4 \text{ g P kg}^{-1}$  ( $\pm \text{SD}$ ) war der P-Gehalt der Leguminosen geringfügig niedriger als der der Begleitvegetation mit im Mittel  $2,2 \pm 1,6 \text{ g P kg}^{-1}$  ( $\pm \text{SD}$ ). Beim alleinigen Betrachten der organischen Standorte war ebenfalls kein signifikanter Unterschied festzustellen mit im Mittel  $1,9 \pm 1,5 \text{ g P kg}^{-1}$  ( $\pm \text{SD}$ ) in der Gruppe der Leguminosen und  $1,8 \pm 1,5 \text{ g P kg}^{-1}$  ( $\pm \text{SD}$ ) in der Gruppe der Begleitvegetation. Auf dem mineralischen Standort hingegen zeigte der Vergleich der beiden funktionellen Gruppen einen signifikanten Unterschied, was auf den signifikanten Unterschied zwischen den P-Gehalten der funktionellen Gruppen der *Lotus corniculatus*-Plots zurückzuführen war. Mit im Mittel  $2,3 \pm 0,6 \text{ g P kg}^{-1}$  ( $\pm \text{SD}$ ) war dort der P-Gehalt der Leguminosen niedriger als der der Begleitvegetation mit im Mittel  $3,4 \pm 1,0 \text{ g P kg}^{-1}$  ( $\pm \text{SD}$ ). Des Weiteren zeigten die Plots von *Lotus pedunculatus* auf der Mähweide 3 einen signifikanten Unterschied zwischen Leguminose und Begleitvegetation. Während auf dem mineralischen Standort und dem degradierten Niedermoorstandort *Trifolium repens* geringere P-Gehalte in der Biomasse zeigte, fielen diese auf den intakten Niedermoorstandorten geringfügig höher aus (Abb. 1). Hinsichtlich der Boden- $\text{P}_{\text{DL}}$ -Gehalte konnten wir unter Einbeziehung aller fünf Standorte einen signifikanten Unterschied zwischen der Leguminosengruppe und der Begleitvegetation nachweisen ( $p = 0,02$ ; t-Test). Die Leguminosen zeigten mit  $3,0 \pm 2,2 \text{ mg P/100 g}$  im Mittel einen geringeren Wert als die Begleitvegetation mit  $3,3 \pm 2,3 \text{ mg P/100 g}$ . Zwischen den einzelnen Boden-P-Fractionen auf dem mineralischen Standort konnten aber weder zwischen den funktionellen Gruppen noch zwischen den dort untersuchten Leguminosenarten signifikante Unterschiede oder Trends gefunden werden (Daten nicht gezeigt). Zwischen der Anzahl von Pflanzenarten (im Mittel  $15,9 \pm 3,4$ ) und den Boden- $\text{P}_{\text{DL}}$ -Gehalten konnten wir keinen signifikanten Zusammenhang ermitteln. Die intakten Niedermoorbereiche wiesen im Mittel höhere Artenzahlen auf als der mineralische Standort. Auf dem degradierten Nieder-

moorstandort wurden die höchsten Boden-P<sub>DL</sub>-Gehalte bei dennoch mittlerer Artenanzahl gemessen (Abb. 2).



**Abbildung 1: P-Gehalte ( $\text{g kg}^{-1}$ ) in der oberirdischen Biomasse der Leguminosenarten und ihrer assoziierten nicht-legumen Begleitvegetation ökologisch bewirtschafteter Mähweiden in Nordostdeutschland ( $n=48$ ). Die Ergebnisse sind präsentiert als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung. Die Ergebnisse der Mähweide 2 lagen zum Zeitpunkt der Auswertung noch nicht vor.**



**Abbildung 2: Anzahl der Pflanzenarten ( $4\text{m}^{-2}$ ) je Plot in Abhängigkeit vom Boden-P<sub>DL</sub>-Gehalt ( $\text{mg kg}^{-1}$ ). Der Boden-P<sub>DL</sub>-Gehalt ist als Mittelwert des Boden-P-Gehalts innerhalb des Leguminosenbereichs und des Boden-P-Gehalts des Bereichs der nicht-legumen Begleitvegetation angegeben. MW 1 bis 5: ökologisch bewirtschaftete Mähweiden in Nordostdeutschland (Sommer 2014 und 2015,  $n=48$ ).**

## Diskussion

Im Gegensatz zu Thomas & Bowman (1998), die deutlich niedrigere P-Gehalte im Aufwuchs von Klee-Bereichen im Vergleich zur Umgebung fanden, konnten wir diesbezüglich keinen deutlichen Unterschied feststellen. Die allerdings signifikanten Unterschiede zwischen den Boden-P-Gehalten entsprachen unseren Erwartungen, dass die Boden-P-Gehalte der Leguminosenbereiche aufgrund der hohen P-Bedürftigkeit der Leguminosen etwas niedriger seien als die der Begleitvegetation. Heuwinkel et al. (2004), die ihre Untersuchungen auf Ansaatklee gras auf fruchtbaren Ackerböden durchführten, erklärten die räumliche Variabilität von Leguminosenanteilen der Grasnarbe mit dem Stickstoffgehalt des Bodens statt mit P. Des Weiteren können auch pH-Wert und Konkurrenz eine große Rolle für das Vorkommen von Grünlandleguminosen spielen. Ceulemans et al. (2014) stellten einen deutlich negativen Zusammenhang zwischen Artenzahl und Boden-P-Gehalt bei einem hohen Probenumfang in Europa fest und fanden mit im Mittel 21,6 Arten 4 m<sup>-2</sup> mehr Arten als wir. So konnten auf unseren Standorten trotz der vorherrschenden Boden-gehaltsklassen A und B, also sehr niedrigen bis niedrigen P-Gehalten, nur mittlere Artenzahlen erreicht werden.

## Schlussfolgerungen

Aufgrund des detektierten signifikanten Unterschiedes zwischen den Boden-P<sub>DL</sub>-Gehalten der Leguminosen und deren Begleitvegetation ist es unter Umständen möglich, mit der P-Verfügbarkeit das Auftreten von Grünlandleguminosen zu erklären. Dafür bedarf es weiterer Untersuchungen unter Einbeziehung der tatsächlichen Entzüge. Zwischen der P-Verfügbarkeit und Phytodiversität konnte auf einer kleinen räumlichen Skala auf Dauergrünlandstandorten kein Zusammenhang gefunden werden.

## Danksagung

Das Projekt (2812OE008) wurde dankenswerterweise vom BMEL im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft (BÖLN) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Arbeit ist zudem im Leibniz-WissenschaftsCampus Phosphorforschung Rostock eingebunden.

## Literatur

- Ceulemans T, Stevens CJ, Duchateau L, Jacquemyn H, Gowing DJG, Merckx R, Wallace H, Van Rooijen N, Goethem T, Bobbink R, Dorland E, Gaudnik C, Alard D, Corcket E, Muller, S, Dise, NB, Dupré C, Diekmann M & Honnay O (2014) Soil phosphorus constraints biodiversity across European grasslands. *Global Change Biology* 2: 3814-3822.
- Hedley MJ, Stewart JWB & Chauhan BS (1982) Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal* 46: 970-976.
- Heuwinkel H, Locher F, Gutser R & Schmidhalter U (2004) How and why does legume content of multispecies legume-grass vary in the field? In: Frankow-Lindberg BE, Collins RP, Lüscher A, Sébastia MT & Helgadóttir Á (Hrsg.) *Adaption and Management of Forage Legumes – Strategies for Improved Reliability in Mixed Swards*. Ystad, Sweden: 262-265.
- Høgh-Jensen H, Schjoerring JK & Soussana JF (2002) The influence of phosphorus deficiency on growth and nitrogen fixation of white clover plants. *Annals of Botany* 90(6): 745-753.