

Einfluss von Boden und P-Düngerform auf die P-Aufnahme einiger mono- und dikotyler Pflanzenarten

Sabine von Tucher^{1*}

Zusammenfassung

Phosphor liegt in den meisten in Böden stark gebunden vor, wobei die vorherrschenden Bindungsformen vor allem vom pH-Wert des Bodens abhängig sind. Unterschiedliche Pflanzenarten verfügen über verschiedene Fähigkeiten, die P-Verfügbarkeit zu erhöhen. Die Wirkung von P-Düngemitteln ist abhängig von der P-Form im Dünger, von den Eigenschaften des Bodens und der angebauten Pflanzenart. Düngemittel mit einem hohen Anteil an wasserlöslichem P (z.B. Superphosphat) zeigen auf allen Böden unabhängig von der Pflanzenart eine hohe P-Verfügbarkeit. Rohphosphate kommen auch nach langjähriger Anwendung nur auf Böden mit niedrigen pH-Werten zur Wirkung. Neuartige Düngemittel wie P-Recycling-Produkte aus Klärschlamm und Klärschlammaschen erreichen eine gute Wirksamkeit, wenn sie einen hohen Anteil an wasserlöslichem P aufweisen oder Magnesiumbasierte Phosphate enthalten. Pflanzenarten mit höherer P-Effizienz wie Raps erschließen sich Düngemittel mit geringerer P-Verfügbarkeit leichter.

Einleitung

Die Phosphat-Aufnahme von Pflanzenarten ist geprägt von der Besonderheit der Bindung von Phosphor in unterschiedlichen Böden: sehr geringe P-Konzentration der Bodenlösung, Boden abhängig starke Sorption von P an Eisen- und Aluminiumoxiden und -hydroxiden in schwach sauren bis sauren Böden, Vorliegen von Calcium-Phosphaten v.a. bei höheren pH-Werten, Vorkommen von organischen P-Verbindungen.

Pflanzenarten verfügen über eine Vielzahl von Eigenschaften und Möglichkeiten, die Verfügbarkeit von P zu verbessern und damit ihre P-Effizienz auch unter ungünstigeren Bedingungen zu erhöhen. Hierzu gehören morphologische Eigenschaften wie die Erhöhung der Wurzellängendichte, geringere Wurzelradien und die vermehrte Bildung und Länge von Wurzelhaaren, die Vergesellschaftung der Wurzel mit Mykorrhizapilzen, physiologische Eigenschaften und die Fähigkeit von Wurzeln durch die chemische Mobilisierung mit

Hilfe von Wurzelausscheidungen wie organischen Säuren direkt Einfluss auf die Konzentration an gelöstem P zu nehmen (z.B. Hinsinger, 2001). Auf Grund solcher Fähigkeiten und Eigenschaften gelten Raps v.a. durch die Abgabe von organischen Säuren (z.B. Hoffland *et al.*, 1989) aber auch Getreidearten und Gräser v.a. durch hohe Wurzellängendichten und eine hohes Wurzel/Sprossverhältnis (z.B. Föhse *et al.*, 1988) als eher P-effizient, Mais v.a. in der Jugendphase als eher P-ineffizient (z.B. Hendriks *et al.*, 1981).

Werden in dem System Pflanze-Boden P-Düngemittel eingesetzt, so treten Wechselwirkungen zwischen diesen einerseits und den Böden und Pflanzen andererseits auf. Wasserlösliche P-Düngerformen (Super-, Triplephosphate, Ammoniumphosphate) besitzen i.d.R. auf allen Böden und für alle Pflanzenarten eine hohe Verfügbarkeit. Rohphosphat-Dünger benötigen als Calcium-Phosphate jedoch saure pH-Bedingungen im Boden für ihren Aufschluss. Neuartige P-Düngemittel wie z.B. Recycling-Produkte aus Klärschlämmen oder Klärschlammaschen weisen ein breites Spektrum an P-Wirksamkeit auf, was vor allem durch die Unterschiede im Herstellungsprozess bedingt ist (Römer, 2013). Für die Ausbringung von P-Düngern spielen auf Grund der Puffercharakteristik von P in Böden die Größe von Düngergranulaten und die räumliche Platzierung (z.B. als Banddüngung) eine wichtige Rolle.

Im Folgenden werden einige Beispiele für die P-Aufnahme von Pflanzenarten aus verschiedenen mineralischen P-Düngerformen auf unterschiedlichen Böden dargestellt.

Material und Methoden

Versuchsanlage

Langzeitexperiment zur P-Verfügbarkeit von mineralischen P-Düngemitteln

Boden 1: Bodenart Lu Ausgangs-pH-Wert CaCl_2 4,7; CAL-P Gehalt in mg P/100 g Boden: „ohne P“ 0,44; „Super-“ 2,6; „Nova-P“ 2,2; „Hyper-P“ 1,8; Klärschlammasche 1,3; „ungedüngt mit CaCO_3 “ 0,68.

¹ Lehrstuhl für Pflanzenernährung, Technische Universität München, Emil-Ramann-Straße 2, D-85350 FREISING-WEIHENSTEPHAN
* Ansprechpartner: Dr. Sabine von TUCHER, tucher@wzw.tum.de



Boden 2: Bodenart Lu Ausgangs-pH-Wert CaCl_2 7,5; CAL-P Gehalt in mg P/100 g Boden: „ohne P“ 1,3; „Super-P“ 5,3; „Nova-P“ 3,8; „Hyper-P“ 1,5; Klärschlammasche 1,7. Gefäßversuche in 5-Liter-Mitscherlichgefäßen (6,5 kg Boden)

Düngemittel bzw. Behandlungen

ohne P, Superphosphat, Novaphosphat (teilaufgeschlossenes P), Hyperphosphat (Rohphosphat), Klärschlammasche, Kalkung mit CaCO_3 (nur im sauren Boden)

P-Düngung 0,5 P_2O_5 /Gefäß und Jahr (\cong 34 mg P/kg Boden)

Angebaute Kulturen

Getreide (Sommerweizen) - Grünkohl im Wechsel
Anlagejahr des Versuchs 2001; dargestellte Ergebnisse zeigen den Mittelwert der Jahre 2010 und 2011 (d.h. nach 10- bzw. 11-jähriger jährlicher Düngung). Die Mineralstoffversorgung mit N, K, Mg, und S erfolgt bedarfsorientiert.

Kurzfristige P-Wirkung von Klärschlamm- und Klärschlammasche-Produkten

P-Düngewirkung eines mit Säure aufbereiteten Klärschlammasche-Produktes

Boden 1: Bodenart Lu (Ap-Horizont Braunerde); pH-Wert CaCl_2 5,5; CAL-P Gehalt 1,3 mg P/100 g Boden
Boden 2: Bodenart Lu (C-Löss-Unterboden); pH-Wert CaCl_2 7,3; CAL-P Gehalt 0,9 mg P/100 g Boden

Düngemittel bzw. Behandlungen

Prüfdünger: Klärschlammasche-Produkt aus der Aufbereitung von Klärschlammasche nach mit H_3PO_4 (Recophos®); 29,7% Gesamt P_2O_5 ; davon 69% wasserlöslich.

250 und 500 mg P/Gefäß mit 6,5 kg Boden (38 bzw. 77 mg P/kg Boden) vor der Saat

Vergleichsdünger: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ bzw. Mischung $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2/\text{CaHPO}_4$

0, 100, 175, 250, 500 mg P/Gefäß (0, 15, 27, 38, 77 mg P/kg Boden) vor der Saat

Kulturen

Raps und Mais

Die Mineralstoffversorgung mit N, K, Mg, und S erfolgt bedarfsorientiert.

P-Wirkung verschiedener Klärschlamm- und Klärschlammasche-Produkte

Boden 1: Bodenart Lu (Ap-Horizont Braunerde) pH-Wert CaCl_2 4,9; CAL-P Gehalt 0,7 mg/100 g Boden

Boden 2: Bodenart Lu (C-Löss-Unterboden) pH-Wert CaCl_2 7,7; CAL-P Gehalt ungedüngt 0,36 mg P/100 g nach Grunddüngung mit 25 mg P/kg Boden 1,3 mg CAL-P/100 g.

Düngemittel bzw. Behandlungen

Prüfdünger: Klärschlamm- und Klärschlammasche-Produkt (Tabelle 1)

500 mg P/Gefäß mit 6,5 kg Boden (77 mg P/kg Boden) vor der Saat

Referenzdünger: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ bzw. Mischung $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2/\text{CaHPO}_4$ bzw. KH_2PO_4

0, 250, 500, 1000 mg P/Gefäß (0, 38, 77, 154 mg P/kg Boden) vor der Saat

Kultur

Mais

Die Mineralstoffversorgung mit N, K, Mg, und S erfolgt bedarfsorientiert; auf den Boden mit pH 7,7, Gabe von Spurenelementen.

Ermittelte Parameter

Trockenmasse-Erträge, P-Gehalte der Pflanzen (nach Druckaufschluss mit $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, Bestimmung mit ICP-OES), P-Aufnahme der Pflanzen.

Ergebnisse und Diskussion

Langzeitexperiment zur P-Verfügbarkeit von mineralischen P-Düngemitteln

Die P-Aufnahme von Weizen nach Düngung mit verschiedenen P-Düngemitteln wird sowohl von der P-Form des Düngers als auch vom Boden beeinflusst (Abbildung 1 A). Gegenüber dem wasserlöslichen Superphosphat zeigt das teilaufgeschlossene Novaphosphat in beiden Böden eine gute Wirkung. Aus Hyperphosphat, einem nicht aufgeschlossenen Rohphosphat kann der Weizen im Vergleich zu Superphosphat auf dem sauren Boden noch etwa 75% P aufnehmen, auf dem neutralen Boden jedoch nur noch 6% im Vergleich zur P-Aufnahme aus Superphosphat. Die P-Aufnahme von Weizen aus der unbehandelten

Tabelle 1: Charakterisierung der Klärschlammasche (KSA)- und Klärschlamm (KS)-Produkte

Bezeichnung	Verfahren/Prozess/Zusatzstoffe	Ges. P_2O_5 (%)	Löslicher Anteil (%) am Ges. P_2O_5 nach DüMV				Alkal. Ammonicitrat
			pH-Wert	H_2O	Zitronensäure	Ameisensäure	
KSA	unbehandelte Asche, biolog. P-Elimination	21,0	9,0	0,3	42,0	56,5	12,7
KSA-P 1	MgCl_2 , thermisch	38,1	3,7	33,4	68,0	74,1	58,7
KSA-P 2	H_3PO_4	35,7	3,0	42,7	61,0	58,8	81,5
KSP-P 3	Zugabe von Kalk, K, S	22,5	8,2	0,4	36,9	41,3	10,9
KSA-P 4	Bakterieller Aufschluss	32,3	2,8	0,3	3,5	3,4	53,6
KS-P 1	Prozesswasser/P-Sorption an Calcium-Silikat-Hydrat	12,6	8,5	1,2	85,0	89,1	73,4
KS-P 2	MgO , NaOH , $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ (MAP)	20,2	8,0	0,9	84,1	47,3	43,2
KS-P 3	MgCl_2 , $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ (MAP)	27,4	7,3	2,3	82,3	88,6	21,1

Klärschlammasche liegt im sauren Boden bei etwa 60%, im neutralen Boden jedoch nur bei 20% im Vergleich zu Superphosphat.

Auch die P-Aufnahme von Grünkohl (Abbildung 1B) ist abhängig von P-Form und Boden, jedoch zeigen sich vor allem mit Hyperphosphat Unterschiede zum Weizen, da die P-Aufnahme von Grünkohl mit dem Rohphosphat im sauren Boden das Niveau des wasserlöslichen Superphosphats erreicht. Auch die Klärschlammasche wird in diesem Boden von Grünkohl mit einer etwa 20% höheren P-Aufnahme tendenziell besser genutzt als von Weizen. Wenn auch auf sehr niedrigem Niveau liegt die P-Aufnahme von Grünkohl aus Hyperphosphat auf dem neutralen Boden mit knapp 20% deutlich über der von Weizen. Dies gilt insbesondere für den Vergleich gegenüber der ungedüngten Kontrolle. Auf dem sauren Boden können beide Kulturen (Weizen knapp 2%, Grünkohl 6%) nach einer reinen Kalkung mit CaCO_3 ohne P-Düngung geringe Mengen mehr P gegenüber der unbehandelten Variante aufnehmen.

Insgesamt zeigt sich, dass nicht wasserlösliche Rohphosphate nur unter sauren Bodenbedingungen P für die Pflanze zur Verfügung stellen können ggf. mit leichten Vorteilen für die dikotyle Brassica-Art. Unter nicht-sauren Bodenbedingungen kommen solche Dünger selbst nach jahrelanger Anwendung nicht zur Wirkung.

Kurzfristige P-Wirkung von Klärschlamm- und Klärschlammasche-Produkten

P-Düngewirkung eines mit Säure aufbereiteten Klärschlamm-Produkt

Im Gegensatz zu unbehandelten Klärschlammaschen lässt sich durch die Aufbereitung mit Säuren eine Erhöhung der P-Verfügbarkeit beobachten. Im Fall von Mais (Abbildung 2 A) wird auf dem Boden mit pH 5,5 mit dem aufbereiteten Klärschlamm-Produkt

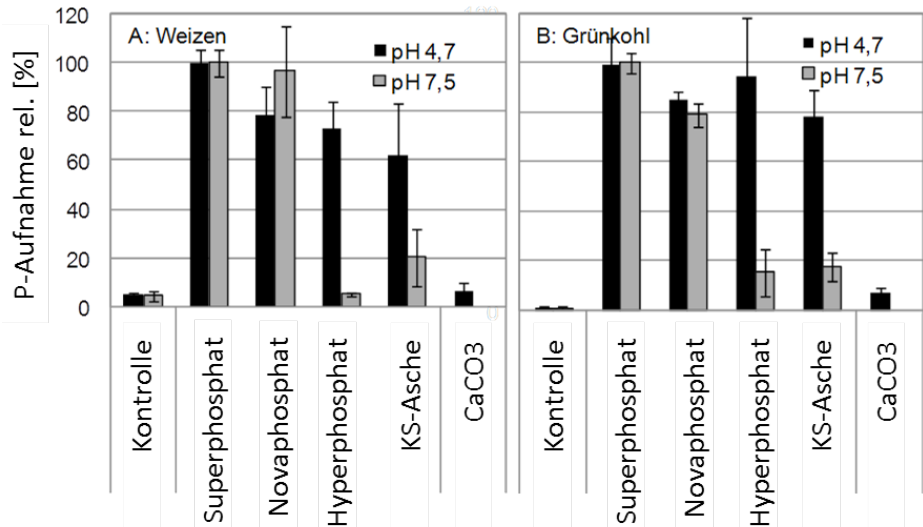


Abbildung 1: P-Aufnahme von Weizen (A) und Grünkohl (B) aus unterschiedlichen P-Düngern auf saurem und neutralem Boden (Mittelwerte aus 10- und 11-jähriger Anwendung von jährlich 34 mg P/kg Boden) sowie aus einer unbehandelten Kontrolle und einer Kalkung ohne P-Düngung. P-Aufnahme berechnet relativ zu Superphosphat jeweils für die Kultur und den Boden. Fehlerbalken stellen +/- eine Standardabweichung dar.

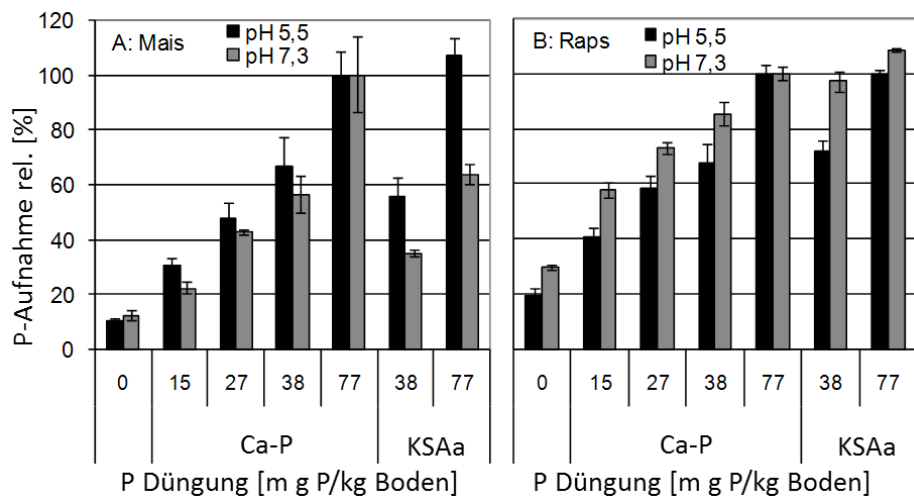


Abbildung 2: P-Aufnahme von Mais (A) und Raps (B) aus einem Klärschlamm-Produkt nach Säureaufbereitung (KSAa) auf saurem und neutralem Boden; Referenzdünger „Ca-P“: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ bzw. $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2/\text{CaHPO}_4$. P-Aufnahme berechnet relativ zu Ca-P der Düngestufe 77 mg P/kg Boden jeweils für die Kultur und den Boden. Fehlerbalken stellen +/- eine Standardabweichung dar.

die P-Aufnahme des vollständig wasserlöslichen Vergleichsdüngers „Ca-P“ auf beiden Düngestufen erreicht. Auf dem Boden mit pH 7,3 liegt die P-Aufnahme aus dem Klärschlamm-Produkt jedoch deutlich niedriger. Dies bedeutet, dass die etwa 70%ige Wasserlöslichkeit von P in dem Produkt in dem sauren Boden auch für den als P-ineffizient geltenden Mais für eine kurzfristig sehr gute P-Wirkung völlig ausreichend ist, in dem neutralen Boden bleibt die P-Verfügbarkeit des Asche-Produkts zu Mais jedoch deutlich unter der des Vergleichsdüngers.

Für die Kultur Raps ergibt sich ein etwas anderes Bild (Abbildung 2 B): die P-Aufnahme aus der aufbereiteten Klärschlamm-Asche erreicht auf beiden Böden und mit beiden Düngestufen mindestens die des

Vergleichsdüngers. Auf dem neutralen Boden übertrifft das Klärschlammasche-Produkt den Vergleichsdünger sogar. Dies kann einerseits damit zusammenhängen, dass das Klärschlammasche-Produkt in Granulat-Form vorliegt und es damit lokal zu einer höheren P-Konzentration der Bodenlösung im Vergleich zur gleichmäßigen Verteilung des Referenzdüngers kommen kann. Zum anderen kann ein gewisser Überschuss an Säure in dem Klärschlammasche-Produkt für die Löslichkeit in dem neutralen Boden von Bedeutung sein.

Im Vergleich der Kulturen wir aber wiederum deutlich, dass die von Raps bekannten Fähigkeiten der chemischen P-Mobilisierung wie die Exsudation von organischen Säuren auf beiden Böden von Bedeutung sind: sowohl bei pH 5,5 insbesondere aber bei pH 7,3 liegt die P-Aufnahme von Raps bereits ohne P-Düngung über der von Mais. Dies setzt sich vor allem in den unteren beiden Düngungsstufen auch nach der Düngung mit wasserlöslichem Ca-P fort.

P-Wirkung verschiedener Klärschlamm- und Klärschlammasche-Produkte

Die Wechselwirkung zwischen Böden und P-Düngern wird auch deutlich, wenn chemisch unterschiedlich behandelte Düngerprodukte aus Klärschlammaschen verglichen werden. Zunächst zeigen sich auf dem Boden mit pH 4,9 erhebliche Unterschiede zwischen den P-Düngern (Abbildung 3). Die Trockenmasseerträge von Mais liegen zwar für die meisten Dünger auf dem Niveau des wasserlöslichen Referenzdüngers. Mit der unbehandelten Klärschlammasche (KSA) und den Klärschlammasche-Produkten (KSA-P) P 3 und P 4 sind die Erträge jedoch deutlich geringer. Diese drei Produkte enthalten kein wasserlösliches P (siehe Tabelle 1) und auch die P-Löslichkeit in Zitronensäure nach DüMV ist geringer als in den anderen Produkten. Die gute Wirkung der Klärschlamm-Produkte (KS-P) P 2 und P 3 in diesem Boden hängt mit der häufig beobachteten besseren Verfügbarkeit von Magnesium-(Ammonium-) Phosphaten zusammen (Römer, 2013). Im Boden mit pH 7,7 fällt zusätzlich die unbefriedigende Ertragswirkung des Klärschlammasche-Produkts P 2 und des Klärschlamm-Produkts P 1 gegenüber dem Referenzdünger auf. Außerdem wirken diese beiden

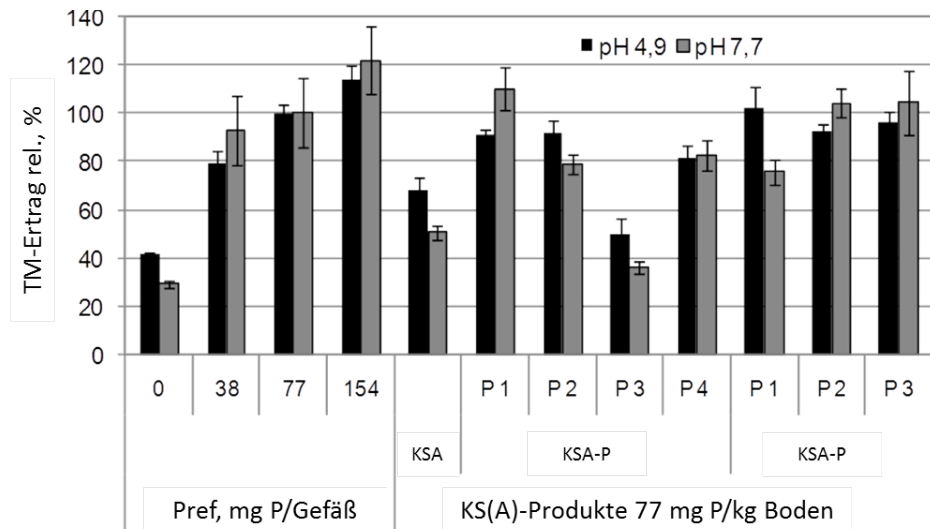


Abbildung 3: Trockenmasseertrag von Mais nach Düngung mit Klärschlammasche- und Klärschlamm-Produkten auf saurem und schwach basischem Boden. Trockenmasseertrag berechnet relativ zu Pref der Düngestufe 77 mg P/kg Boden für den jeweiligen Boden. Fehlerbalken stellen +/- eine Standardabweichung dar.

wie auch die unbehandelte Klärschlammasche und KSA-P 3 im Boden mit pH 7,7 deutlich schlechter als im Boden mit pH 4,9. Im Gegensatz dazu steht das Asche-Produkt P 1, das im Boden mit pH 7,7 erheblich besser abschneidet als bei pH 4,9.

Schlussfolgerungen

P-Düngemittel mit einem hohen Anteil an wasserlöslichem P kommen unabhängig vom Boden und der Pflanzenart gut zur Wirkung. Unter den P-Düngern mit einer geringen Wasserlöslichkeit schneiden Magnesiumbasierte Phosphate in der Regel besser ab als solche mit Calciumphosphaten aus Klärschlammaschen oder Rohphosphaten.

Die beiden letzteren benötigen für eine Düngewirkung die Erhöhung ihrer Löslichkeit durch Anwendung in sauren Böden. P-effiziente Pflanzenarten insbesondere solche mit der Fähigkeit zur chemischen Mobilisierung können nicht wasserlösliche P-Formen besser nutzen.

Literatur

- Föhse, D., Claassen, N., Jungk, A., 1988: Phosphorus efficiency of plants. I. External and internal requirement and P uptake efficiency of different plant species. *Plant Soil* 110, 101-109.
- Hendriks, L., Claassen, N., Jungk, A., 1981: Phosphatverarmung des wurzelnahen Bodens und Phosphataufnahme von Mais und Raps. *Z. Pflanzenern. Bodenkde.* 144, 486-499.
- Hinsinger, P., 2001: Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant Soil* 237, 173-195.
- Hoffland, E., Findenegg, G.R., Nelemans, J.A., 1989: Solubilization of rock phosphate by rape II. Local root exudation of organic acids as a response to P-starvation. *Plant Soil* 113, 161-165.
- Römer, W., 2013: Phosphor-Düngewirkung von P-Recyclingprodukten. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 60, 202-215. DOI: 10.3242/kae2013.03.003.