

Phosphatlöslichkeiten und Phosphatdüngewirkung von Stoffen aus der Klärschlammaufbereitung – Betrachtung unterschiedlicher Aufbereitungsverfahren

Maximilian Severin*, Christian Ahl*, Martin Kücke***, Herman Van den Weghe** und Jörg-Michael Greef***

Zusammenfassung

Ziel dieser Untersuchung war die Ermittlung der P-Düngewirkung von vier mit unterschiedlichen Aufbereitungsverfahren hergestellten P-Düngemitteln aus thermisch sowie chemisch aufgeschlossenen Klärschlammaschen im Vergleich zu zwei unbehandelten Klärschlammaschen. Die P-Verfügbarkeit wurde chemisch durch Extraktion in Wasser, Wasser und neutralem Ammoncitrat und Mineralsäure analysiert. Danach wurde im Gefäßversuch mit Weidelgras die P-Aufnahme im Vergleich zu einer konventionellen Mineraldüngung mit Tricalciumphosphat ermittelt.

Das nasschemisch aus Klärschlamm hergestellte Seaborne Produkt zeigte eine Löslichkeit in Wasser und neutralem Ammoncitrat (WNA) von 95 % von P_{gesamt} und eine P-Aufnahme von 151 % gegenüber der P-Nullvariante (100 %). Die mit Schwefelsäure vollaufgeschlossene Klärschlammäsche zeigte eine WNA-Löslichkeit von 90 % von P_{gesamt} und eine P-Aufnahme von 123 %. Das AshDec Produkt (thermisch vollaufgeschlossene Klärschlammäsche) zeigte eine WNA-P-Löslichkeit von 85 % von P_{gesamt} und eine P-Aufnahme von 132 %. Die Kontrollvariante (Tricalciumphosphat) zeigt gegenüber der Variante P_0 eine P-Aufnahme von 105 %.

Einige Produkte aus aufbereitetem Klärschlamm können P-Löslichkeiten und P-Düngewirkungen wie Thomasphosphat und Superphosphat aufweisen. Verfahren zur Klärschlammaufbereitung sind von großer Bedeutung, um eine P-Versorgung in der Pflanzenproduktion im Hinblick auf die endliche Ressource P in Zukunft gewährleisten zu können.

Schlüsselwörter: *Phosphat, Phosphatverfügbarkeit, Klärschlamm, Klärschlammaufbereitung, Klärschlammäsche, P-Recycling*

Summary

Phosphate solubility and phosphate fertilizer effect of substances from sludge treatment – analysis of different treatment methods

The aim of this study was to determine the P fertilization efficiency of four products from sewage sludge ash conditioned by different digestion processes compared to two undigested sewage sludge ashes. The chemical plant availability of P was determined by extraction with water, water and neutral ammon citrate and mineral acid.

Subsequently, the biological plant availability was determined by measuring the P-uptake in a fertilization pot experiment with ryegrass.

The magnesium-ammonium-phosphate from wet-chemical sludge digestion (Seaborne product) showed a water and neutral ammon citrate (WNA) solubility of 95 % of P_t and a P-uptake of 151 % compared to the zero P-control (100 %). The partially with sulfuric acid digested sewage sludge ash showed a WNA solubility of 90 % of P_t and a P-uptake of 123 %. The AshDec product (thermally treated) has a solubility of 85 % WNA and the P-uptake is 132 %. The P fertilization with tricalciumphosphate resulted in a P-uptake of 105 % compared to the P_0 treatment.

This paper shows that some products from recycled sewage sludge have a P solubility and a P fertilization effect similar to commercial P fertilizers. Therefore sludge treatment is very important to ensure the P supply in plant production, because P will be a finite resource in future.

Keywords: *phosphate, phosphate availability, sewage sludge treatment, sludge ash, p-recycling*

* Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Agrarwissenschaften, Abteilung Agrarpädagogie, Büsgenweg 2, 37077 Göttingen

** Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Agrarwissenschaften, Department für Nutztierwissenschaften, Albrecht-Thaer-Weg 3, 37075 Göttingen

*** Julius-Kühn-Institut, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

Kontakt: maximilian.severin@agr.uni-goettingen.de

1 Einleitung und Zielsetzung

Mit zunehmendem Bevölkerungswachstum und steigendem Fleischkonsum stieg der Phosphatverbrauch in den letzten 100 Jahren rapide an, so dass die natürlichen Phosphatvorkommen nach neuesten Berechnungen in 115 bis 122 Jahren erschöpft sein werden (BGR, 2007; Elsner, 2008; U.S. Geological Survey, 2009). Die wichtigsten Phosphatquellen in der Landwirtschaft sind neben mineralischen P-Düngern aus geogenem Phosphat Wirtschaftsdünger und Klärschlämme.

Klärschlämme können allerdings mit organischen und anorganischen Schadstoffen (Polychlorierte Biphenyle, Dioxine und Furane, Pharmazeutika, Schwermetalle u. a.) sowie Krankheitserregern belastet sein. Die Ausbringung von Klärschlamm ist deshalb rückläufig, nur 30 % des anfallenden Klärschlammes werden in Deutschland landwirtschaftlich verwertet. Stattdessen wird heutzutage ein Großteil (53,2 %) der anfallenden Klärschlämme verbrannt (UBA, 2011). Die entstehenden Aschen werden deponiert, im Straßenbau eingesetzt oder als Düngemittel genutzt.

Gegenüber Superphosphat weisen Klärschlämme eine langsamere P-Düngewirkung im Düngungsjahr auf. Langfristig ist die P-Ausnutzung aus Klärschlamm durch die Pflanze ähnlich hoch wie die von Superphosphat (Suntheim und Dittrich, 2000). Klärschlammaschen haben einen hohen P-Gehalt (4,4 bis 9,0 %), allerdings ist das Phosphat in Klärschlammaschen schlecht pflanzenverfügbar und die Schwermetallgehalte werden aufgrund des Masseverlustes bei der Verbrennung und dem folgenden Aufschluss aufkonzentriert (Schick, 2010; DWA, 2009, Franz 2008). Insbesondere hohe Cadmium-, aber auch Nickel- und Bleigehalte können eine landwirtschaftliche Verwertung unbehandelter Klärschlammaschen einschränken, da die in der Düngemittelverordnung (DüMV) festgelegten Grenzwerte nicht selten überschritten werden (Kördel et al., 2007).

Gegenwärtig werden deshalb verstärkt Verfahren entwickelt, die die Schwermetallgehalte in Klärschlammaschen absenken, den P-Gehalt erhöhen und die P-Verfügbarkeit verbessern sollen. Das Ziel ist es, derartig behandelte Klärschlammaschen als P-Düngemittel handelbar und in der Landwirtschaft einsetzbar zu machen.

Das Ziel dieser Arbeit war, die chemische Abschätzung der Pflanzenverfügbarkeit des Phosphats in zwei Klärschlammaschen und vier Aufbereitungsprodukten aus Klärschlamm und Klärschlammaschen. Hierzu wurde die Mineralsäure-, Wasser und Neutralammoniumcitrat- sowie Wasserlöslichkeit der Produkte untersucht. Zur Ermittlung der Pflanzenverfügbarkeit wurde ein Gefäßversuch zur Ableitung der potenziellen P-Düngewirkung durchgeführt. Hierdurch können die chemische und die biologische P-Verfügbarkeit im Boden verglichen werden.

2 Material und Methoden

2.1 Phosphatlöslichkeiten

Es wurden wasserlösliches Phosphat (EU Methode 3.1.6, EU-Kommission, 2003), Wasser- und neutral Ammoniumcitrat lösliches Phosphat (VDLUFA Methode 4.1.4, Fresenius-Neubauer, VDLUFA, 1995) und mineralsäurelösliches Phosphat (Aufschluss mit Königswasser VDLUFA Methode 5.1.1.1, VDLUFA, 1995) bestimmt. Die Ergebnisse von P_{KW} werden in dieser Arbeit im Folgenden als P_{gesamt} bezeichnet. Zum Nachweis der schnellen und standortunabhängigen P-Düngewirkung wurde die Extraktion mit Wasser und neutralem Ammoniumcitrat durchgeführt. Es wurde bewusst auf die Extraktion mit Zitronensäure verzichtet, da dieses Lösungsmittel nur für langsam wirkende P-Düngemittel benutzt wird. Nach BMELV (2011) soll die beste möglich verfügbare P-Fraktion im Düngemittel ermittelt werden.

Die P-Gehaltsbestimmung im Extrakt erfolgte mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) (VDLUFA 3.2.2.2).

2.2 Klärschlammprodukte

Zur Untersuchung der P-Düngewirkung wurden zwei nicht aufbereitete Klärschlammaschen und vier Aufbereitungsprodukte aus Klärschlamm und Klärschlammaschen miteinander im Gefäß- und Laborversuch verglichen (Tabelle 1). Bei den nicht aufbereiteten Klärschlammaschen handelt es sich um eine Asche aus der Monoverbrennung und eine Asche aus der Mitverbrennung.

Die unbehandelte Klärschlammasche „**Monoverbrennung**“ resultiert aus der Verbrennung eines kommunalen Klärschlammes, der mittels einer Zentrifuge entwässert und anschließend in einem Wirbelschichtofen verbrannt wurde (Groß, 2011).

Die Klärschlammasche „**Mitverbrennung**“ wurde durch gemeinsame Verbrennung von Klärschlamm mit anderen Abfällen erzeugt (Breuer, 2011). Bei dem eingesetzten Ausgangsprodukt handelt es sich um Klärschlamm aus industriellen Abwässern und Schlämmen.

Das untersuchte Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP, „**Seaborne**“) wurde aus kommunalen Klärschlämmen erzeugt, indem der pH-Wert durch die Zugabe von Schwefelsäure abgesenkt wird und so Schwermetalle und Phosphate in Lösung gebracht werden. Die Schwermetalle fallen aus und können abgeschieden werden. Das Endprodukt ist erdfeucht und amorph (Bayerle, 2011).

Durch den Zusatz von Schwefelsäure (75 %ig) wird aus Klärschlammasche vollaufgeschlossene Klärschlammasche „**A KSA**“ hergestellt.

Zum Aufschluss von 1 t Klärschlammasche wurden 800 kg Schwefelsäure eingesetzt. Die Schwefelsäure verbleibt nach dem Aufschluss in der Asche (Petzet und Cornel, 2011).

Die für das „*Mephrec*“-Verfahren eingesetzten Klärschlämme und Klärschlammaschen werden vor dem Beginn des eigentlichen Verfahrens brikkettiert und anschließend zusammen mit Koks und weiteren Zuschlagstoffen im *Mephrec*-Reaktor (Kupolofen) verbrannt. Es bilden sich Schlacken, die bei durchschnittlich 1450 °C abgestochen werden (Mallon, 2011). Die Phosphatform ist Thomasphosphat hinsichtlich seiner Löslichkeit (16 % zitronensäurelöslich) ähnlich.

Durch das „*AshDec*“-Verfahren wurde der Schwermetallgehalt von unbehandelten Klärschlammaschen durch erneute Verbrennung und Zusetzung von $MgCl_2$ stark reduziert. Zur Verbesserung der P-Verfügbarkeit erfolgte eine weiterführende Behandlung mit Natriumcarbonat. Durch die Zugabe von Natriumcarbonat wird der pH-Wert des Produkts erhöht, Phosphat wird besser verfügbar, weil die Bindung an Schwermetalle geringer wird (Adam, 2012).

2.3 Gefäßversuch mit *Lolium multiflorum* zur Bestimmung der Phosphataufnahme

Zur Versuchsdurchführung wurde ein Unterboden (4 mg P/100 g Boden CAL-P, Bodenart lehmiger Sand) ausgewählt, der zur Erhöhung von Wasserhaltekapazität und Sorptionsfähigkeit mit 6 % Torf gemischt wurde. Dieses Gemisch hatte einen CAL-P-Gehalt von 6 mg P/100 g Boden. Von diesem Gemisch wurden 1500 g in Töpfe mit 16 cm Durchmesser gefüllt. Mit Hilfe eines Vorversuchs zur Einstellung des gewünschten pH-Wertes wurde ermittelt, dass dem Gemisch 15 g kohlenaurer Kalk pro 1500 g zur Einstellung eines leicht sauren pH-Werts hinzugegeben werden müssen. Es wurde ein leicht saurer pH-Wert von 6 angestrebt, um eine optimale P-Verfügbarkeit zu gewährleisten. Nach der Kalkzugabe wurden die Düngemittel in den Boden eingebracht. Jeder Topf wurde mit 100 mg Gesamt-P in Form der oben genannten Düngemittel gedüngt. Der Versuch wurde mit vier Wiederholungen angelegt.

Zusätzlich wurden eine Variante ohne jede P-Düngung (P-Nulldüngung) und eine mit einer mineralischen P-Düngung in Form von Tricalciumphosphat ($TriCaP, Ca_3O_8P_2$) angelegt.

In jedem Topf wurden 70 Samen Welsches Weidelgras (*Lolium multiflorum* LAM.) der Sorte Gisel gleichmäßig ausgesät und mit etwas Bodentorf gemischt bedeckt. Anschließend wurden die Töpfe im Gewächshaus (18 bis 22 °C) in Unterschalen randomisiert aufgestellt. Die Pflanzen wurden regelmäßig manuell und nach Bedarf bewässert. Das Gießwasser wurde unter den Töpfen mit Untersetzern aufgefangen und den Pflanzen erneut zugeführt, um Düngemittelausträge zu vermeiden. Der Versuch erstreckte sich über einen Zeitraum von 20 Wochen, in denen 3 Schnitte geerntet wurden. Nach den Schnitten wurden die Pflanzen jeweils mit einer P-freien Stickstofflösung gedüngt (insgesamt 954 mg N Gefäß⁻¹). Die Düngung nach dem ersten Schnitt erfolgte mit Flory (18 % N, 22 % K_2O , 3,3 % MgO , 0,02 % B, 0,04 % Cu, 0,1 % Fe, 0,05 % Mn, 0,01 % Mo und 0,01 % Zn). Nach dem zweiten Schnitt erfolgte die Düngung mit KAS (27 % N, 4 % MgO).

Es wurden drei Schnitte in 4 cm Höhe über der Bodenoberfläche vorgenommen und die Frischmasse ermittelt.

Nach einer 48 stündigen Trocknung bei 60 °C erfolgte die Bestimmung der Trockenmasse. Die Messung der P-Gehalte im Pflanzenmaterial erfolgte mit ICP-OES (VDLUFA Methode 2.1.3) (VDLUFA, 2011; VDLUFA, 2008a; VDLUFA, 2008b).

3 Ergebnisse

3.1 Phosphatlöslichkeiten

Die in den Extrakten (Mineralsäure, Wasser- und neutrales Ammonicitrat sowie Wasser) vorliegenden Phosphatgehalte wurden durch ICP-OES bestimmt. Als Referenzprobe wurde ein mineralischer NPK-Dünger (5,3 % P, im Folgenden NPK-Referenz genannt) genutzt, dessen Nährstoffgehalte zuvor in einem Ringversuch analysiert wurden. Die untersuchten Produkte wiesen Gesamt-P-Gehalte zwischen 4,4 und 15,7 % P (Tabelle 1).

Tabelle 1

Nährstoffgehalte der untersuchten Klärschlammaschen (Eigene Untersuchungen, 2012 und Adam, 2012)

Variante-n nummer	Proben- bezeichnung	P [%]	K [%]	Mg [%]	S [%]	Ca [%]
1	Monoverbrennung	9,0	0,6	1,8	0,7	9,0
2	Mitverbrennung	4,0	0,5	1,5	2,1	11,5
3	Seaborne	15,7	0,4	5,9	1,3	16,1
4	A KSA	5,1	u. B.	0,3	10,9	3,4
5	Mephrec	4,4	0,1	2,3	0,1	20,1
6	AshDec	4,7	0,3	5	0,3	7,8

u. B. = unter Bestimmungsgrenze

Die Variante Monoverbrennung hat in neutralem Ammonicitrat und Wasser eine Löslichkeit von 34 % von P_{gesamt} , die Variante Mitverbrennung eine Löslichkeit von 62 % von P_{gesamt} . Die Wasserlöslichkeit beider Produkte betrug nahezu 0 % (Tabelle 2). Das Seaborne Produkt zeigte eine sehr hohe Wasser und Neutralammonicitratlöslichkeit (95 % von P_{gesamt}) und eine geringe Wasserlöslichkeit (15 % von P_{gesamt}). Bei der mit Schwefelsäure vollaufgeschlossenen Klärschlammasche lagen die Wasser und Neutralammonicitratlöslichkeit und die Wasserlöslichkeit bei 90 % von P_{gesamt} . Die beiden thermisch behandelten Klärschlammaschen (*Mephrec* und *AshDec*) zeigten eine Wasser und Neutralammonicitratlöslichkeit von 23 % von P_{gesamt} (*Mephrec*) und 85 % von P_{gesamt} (*AshDec*). Beide Produkte haben eine Wasserlöslichkeit von < 1 %. Auch die Varianten Mono- und Mitverbrennung liegen auf einem vergleichbaren Niveau.

Die Produkte Seaborne (15 % H_2O von P_{gesamt}), A KSA (90 % H_2O von P_{gesamt}) und NPK-Referenz (76 % H_2O von P_{gesamt}) hatten eine Wasserlöslichkeit über diesem Niveau (Tabelle 2).

Die Ermittlung der Schwermetallgehalte (Tabelle 3) zeigt, dass die Schwermetallgrenzwerte nach Abfallklärschlammverordnung 1992 teilweise stark überschritten werden. Dies betrifft vor allem die nicht aufbereiteten Klärschlammaschen.

Tabelle 2

P_{W-NAC} und P_{H_2O} im Vergleich zu P_{gesamt} Tukey $\alpha < 0,05$

Produkt	P_{gesamt}	SA	Signifikanz	P_{W-NAC} % von P_{gesamt}	SA	Signifikanz	P_{H_2O} % von P_{gesamt}	SA	Signifikanz
Minimum	9,03	0,04	b	34,03 %	8,61 %	a	0,05 %	0,00 %	a
Maximum	4,07	0,04	f	62,12 %	0,42 %	a	0,11 %	0,00 %	a
Seaborne	15,72	0,05	a	95,00 %	2,47 %	b	14,61 %	2,49 %	b
A KSA	5,14	0,07	cd	90,11 %	1,55 %	c	89,61 %	0,05 %	c
Mephrec	4,41	0,03	cde	23,12 %	4,11 %	d	0,25 %	20,00 %	a
AshDec	4,69	0,09	cd	85,21 %	13,46 %	ce	0,98 %	4,76 %	a
NPK-Referenz	5,61	0,04	c	100,20 %	9,52 %	cf	76,35 %	0,21 %	dc

SA = Standardabweichung

Tabelle 3

Schwermetallgehalte der untersuchten Klärschlammaschen (Adam, 2012)

Variante-nummer	Proben-bezeichnung	As [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Zn [mg/kg]
1	Minimum	17	3	98	2399
2	Maximum	29	5	594	2789
3	Seaborne	2	u. B.	3	35
4	A KSA	25	1	59	1551
5	Mephrec	10	u. B.	119	56
6	AshDec	12	0	266	1153

u. B. = unter Bestimmungsgrenze

3.2 Wachstum und P-Aufnahme von Weidelgras

Die Erträge von Weidelgras (Summe über drei Schnitte, Abbildung 1) lagen durchschnittlich bei 25 g TM pro Gefäß. Hinsichtlich des Untersuchungsparameters „Ertrag“ zeigten sich zwischen den einzelnen Düngungsvarianten und der P-Nullvariante keine signifikanten Unterschiede.

Nach Düngung mit dem Seaborne Produkt zeigten die Pflanzen eine signifikant erhöhte P-Aufnahme gegenüber den anderen Düngemitteln, der Kontrolle und der Nullvariante (Tabelle 2). Die AshDec Variante zeigte eine erhöhte P-Aufnahme gegenüber der Kontrolle und der Nullvariante, nicht aber gegenüber den anderen Varianten. Nach Düngung mit dem letzteren war die P-Aufnahme nur gegenüber den beiden Kontrollvarianten signifikant höher. Gegenüber der Null- und Kontrollvariante zeigten alle anderen Düngemittel nur tendenziell, nicht signifikant erhöhte P-Aufnahmen.

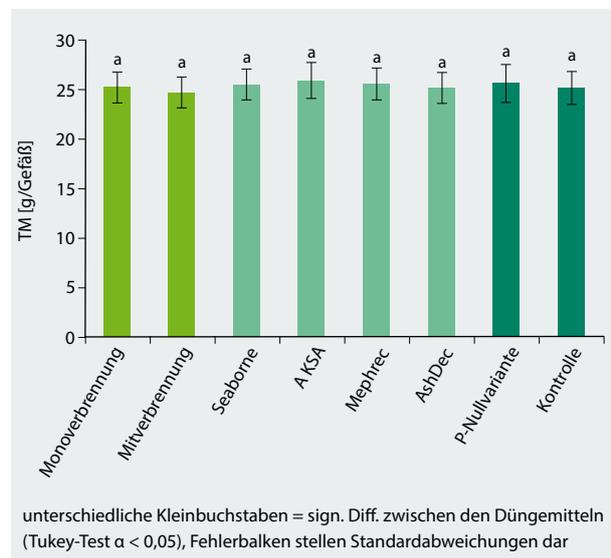


Abbildung 1

Trockenmasseerträge von Weidelgras (Summe von drei Schnitten [g TM/Gefäß]) nach Düngung mit 100 mg P/Gefäß mit verschiedenen Klärschlammprodukten und Tricalciumphosphat (Kontrolle)

Bei Betrachtung der einzelnen drei Schnitte zeigte sich beim ersten Schnitt eine signifikant höhere P-Aufnahme der Varianten Seaborne und AshDec gegenüber allen anderen Varianten. Der zweite und dritte Schnitt zeigten, dass die schnelle Wirksamkeit des AshDec Produkts im Wachstumsverlauf nicht aufrechterhalten wurde und auf das Niveau der anderen Düngungsvarianten absank. Beim dritten Schnitt lagen alle Düngemittel leicht über dem Niveau der Null- und Kontrollvariante. Die Seaborne Variante zeigte über alle drei Schnitte und in der Gesamtbetrachtung signifikant höhere P-Aufnahmen als die anderen Düngemittel.

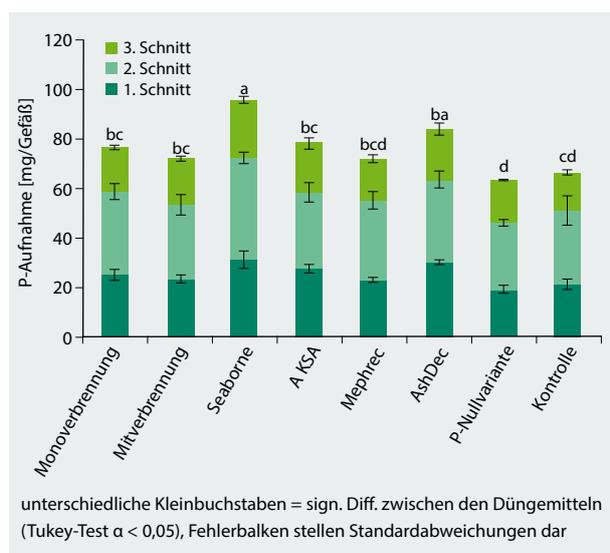


Abbildung 2

P-Aufnahme von Weidelgras (Summe der drei Schnitte [mg P/Gefäß]) nach Düngung mit 100 mg P/Gefäß mit unterschiedlichen Klärschlammprodukten und Tricalciumphosphat (Kontrolle)

Eine Überprüfung des Zusammenhangs zwischen den im Labor ermittelten Löslichkeiten und der P-Aufnahme durch das Weidelgras zeigte, dass nur für die Löslichkeit in Wasser und Neutralammoncitrat ein signifikanter Zusammenhang besteht.

Die Korrelation zwischen der P-Aufnahme und der Löslichkeit in Wasser und neutralem Ammoncitrat beträgt $R = 0,83$. Die Korrelation zwischen der P-Aufnahme und dem P_{gesamt} der Düngemittel liegt bei $R = 0,73$. Diese beiden Korrelationen sind signifikant. Zwischen der Wasserlöslichkeit und der P-Aufnahme besteht eine nicht signifikante Korrelation von $R = 0,56$.

4 Diskussion

4.1 P-Löslichkeiten

Nach BMELV (2011) fordert der wissenschaftliche Beirat für Düngungsfragen für P-Düngemittel eine Wasser oder Neutralammoncitratlöslichkeit, die sehr nah am P-Gesamtgehalt des Düngemittels liegt, da ansonsten kein nennenswerter Düngungseffekt zu erwarten ist. Ein Großteil des gedüngten Phosphats bliebe im Boden gebunden und wäre nur sehr langsam und langfristig pflanzenverfügbar. Die unterschiedlichen Extraktionsmethoden deuten auf eine unterschiedlich schnelle Verfügbarkeit hin.

Die unbehandelte Klärschlammmasche aus der Monoverbrennung weist einen P_{gesamt} von 9 %, eine Wasser und Neutralammoncitrat von 34 % von P_{gesamt} und eine niedrige Wasserlöslichkeit (unter 1 % von P_{gesamt}) auf. Die Asche aus der Mitverbrennung weist einen mittleren P-Gehalt von 4 % P, eine mittlere Wasser und Neutralammoncitratlöslichkeit (62 % von P_{gesamt}) und eine schlechte Wasserlöslichkeit (unter 1 % von P_{gesamt}) auf (Tabelle 2).

Dagegen wies das Seaborne Produkt von allen untersuchten Düngemitteln mit 15 % P_{gesamt} den höchsten P-Gehalt auf. Die Löslichkeit in Wasser und Neutralammoncitrat beträgt 95 % und in Wasser 16 % von P_{gesamt} , was auf eine gute Pflanzenverfügbarkeit des Phosphats in diesem Produkt hindeutet (Tabelle 2).

Bei dem mit Schwefelsäure vollaufgeschlossenen Produkt (A KSA) wurde sowohl eine hohe Wasser und Neutralammoncitrat- (85 % von P_{gesamt}) als auch eine hohe Wasserlöslichkeit (90 % von P_{gesamt}) festgestellt. Dies spricht für eine sehr gute P-Verfügbarkeit des Produkts.

Das Mephrec Produkt ließ hinsichtlich seiner P-Löslichkeiten (Wasser und Neutralammoncitratlöslichkeit von 21 %; Wasserlöslichkeit von unter 1 % von P_{gesamt}) keine guten P-Düungeigenschaften erwarten (Tabelle 2). Zudem war das vorliegende Produkt in seiner Konsistenz nicht homogen und hat sich teilweise entmischt. Das stellt einen Nachteil für die Ansprüche an ein qualitativ gleichbleibendes und hochwertiges Düngemittel dar.

Das AshDec Produkt hat zwar eine Wasser und Neutralammoncitratlöslichkeit von über 80 % von P_{gesamt} , doch ist die Wasserlöslichkeit mit 1 % von P_{gesamt} sehr gering (Tabelle 2). Aufgrund des hier gefundenen engen Zusammenhanges zwischen der Wasser- und Neutralammoniumcitratlöslichkeit und dem P-Entzug durch Weidelgras kann aber davon ausgegangen werden, dass sich die Pflanzenverfügbarkeit vielmehr durch diese als durch die Wasserlöslichkeit charakterisieren lässt. Die unbehandelten Klärschlammaschen „Monoverbrennung“ und „Mitverbrennung“ sind in ihrer Wasserlöslichkeit vergleichbar mit den Ergebnissen von Kratz und Schnug (2008). Die Wasser und Neutralammoncitratlöslichkeit ist bei der in unserer Arbeit verwendeten Probe „Monoverbrennung“ allerdings deutlich höher.

Das untersuchte AshDec Produkt wurde mit dem von Schick (2010) verglichen. Mehrere von Schick (2010) untersuchte AshDec-Produkte wiesen eine Wasserlöslichkeit von unter 1 % von P_{gesamt} und eine Wasser- und Neutralammoncitratlöslichkeit (Fresenius-Neubauer) von je nach Behandlung von 15 bis 40 % von P_{gesamt} auf. Adam et al. (2006) konnte ähnliche P-Löslichkeiten wie Schick (2010) ermitteln. Im Vergleich zu vorherigen Untersuchungen wurden die in diesem Versuch untersuchten Produkte durch einen veränderten Herstellungsprozess in ihrer P-Löslichkeit verbessert. Die Wasser und Neutralammoncitratlöslichkeit liegt mit über 80 % im Bereich herkömmlicher NPK Dünger. Allerdings ist die Wasserlöslichkeit mit 1 % von P_{gesamt} sehr niedrig.

Im Gegensatz zu den in dieser Arbeit erzielten Ergebnissen konnten Cabeza Perez et al. (2011b) für das AshDec Produkt eine Wasserlöslichkeit von 6,4 % vom Gesamt-P Gehalt feststellen. Hierbei ist davon auszugehen, dass die damals untersuchten Produkte nicht den heutigen AshDec Produkten entsprechen. Die damals untersuchten Aschen wurden mit anderen Verhältnissen von Aufschlusssubstanzen aufgeschlossen, als die in dieser Arbeit untersuchten Produkte.

Bestandteile des AshDec Produkts sind größtenteils Chlorapatit, Quarz und Hämatit. Dies begründet die schlechte Wasserlöslichkeit (Schick, 2010).

Tabelle 4

Veränderungen der P-Gehalte und P-Löslichkeiten von Klärschlammprodukten im Verlauf verschiedener Projekte von 2009 bis 2012

Produkt	Quelle	Jahr	P _{gesamt} [% P]	WNAC [%P _{gesamt}]	H ₂ O [% P _{gesamt}]	Veränderung*
AshDec	Eigene Untersuchungen	2012	5,5	85,0	1,0	
AshDec	Schick	2010	4,9	10,0 – 40,0	0,2 - 0,5	+110 %
AshDec	Perez et al.	2011	7,8	k. A.	6,4	-140 %
AshDec	Pinnekamp et al.	2011	9,1	k. A.	6,2	-165 %
Mephrec	Eigene Untersuchungen	2012	4,4	23,0	0,3	
Mephrec	Perez et al.	2011	2,9	k. A.	k. A.	+ 50 %
Seaborne	Eigene Untersuchungen	2012	15,7	95,0	14,6	
Seaborne	Perez et al.	2011	9,6	k. A.	0,8	+60 %/+1000 %
Seaborne	Pinnekamp et al.	2011	12,0	k. A.	0,5	+30 %/+1500 %

* Veränderung der untersuchten Produkte gegenüber Literaturangaben
k. A. = keine Angabe
WNAC = Wasser und Neutralammoncitrat

Für die Wasser und Neutralammoncitratlöslichkeit des Seaborne Produkts wurden keine Vergleichswerte in der vorhandenen Literatur gefunden. Perez et al. (2011) und Pinnekamp et al. (2011) konnten Wasserlöslichkeiten von unter 1 % von P_{gesamt} feststellen. Die in dieser Arbeit analysierten Wasserlöslichkeiten liegen bei 16 % von P_{gesamt} und zeigen demnach eine Verbesserung des Produktionsprozesses im Vergleich zu früheren Untersuchungen. Generell kann aus dem Vergleich der Ergebnisse verschiedener Projekte zur P-Löslichkeit von Stoffen aus der Klärschlammaufbereitung festgestellt werden, dass bei den Produkten AshDec, Mephrec und Seaborne in den letzten Jahren eine Verbesserung der P-Löslichkeit erzielt wurde, was auf eine Optimierung der Herstellungsverfahren hindeutet (Tabelle 4).

Bei den dargestellten Verbesserungen muss berücksichtigt werden, dass die Ausgangsaschen zur Herstellung von Düngemitteln nicht homogen sind, sondern sich mit jeder Charge unterscheiden. Des Weiteren spielt bei geringen P-Gehalten der Analysenfehler eine große Rolle, so dass bei der Wasserlöslichkeit in den meisten Fällen keine Verbesserung erreicht wurde.

4.2 P-Aufnahme

Die im Gefäßversuch mit Weidelgras ermittelte P-Aufnahme zeigte, dass die kurzfristige P-Verfügbarkeit der Varianten Seaborne und AshDec im Vergleich zu den anderen Produkten höher sind. Für das AshDec Produkt konnten ähnliche Ergebnisse wie von Schick (2010) nachgewiesen werden. Das Seaborne Produkt wurde 2009 von Cabeza Perez et al. (2011b) untersucht, allerdings konnte damals eine verbesserte P-Aufnahme gegenüber einer mineralischen Kontrolle (Superphosphat) nicht einwandfrei nachgewiesen werden. Auch dies deutet auf einen optimierten Herstellungsprozess bei dem hier untersuchten Seaborne Produkt hin. Es ist auch denkbar, dass der von Cabeza Perez et al. (2011a) verwendete

Boden aufgrund von Textur und niedrigem pH-Wert (Sandboden pH 4,7 und Lehmboden pH 6,6) verhältnismäßig viel P in Form von Aluminium- und Eisenphosphaten nicht pflanzenverfügbar gebunden hat. Gegenüber Perez et al. (2011) konnte Simons (2008) für ein Magnesiumammoniumphosphat mit ähnlichem Herstellungsprozess wie das in dieser Arbeit genutzte Seaborne Produkt eine höhere P-Aufnahme gegenüber einer TSP-Kontrollvariante nachweisen. Der Versuch wurde unter ähnlichen Bedingungen durchgeführt und ist mit den eigenen Ergebnissen vergleichbar. Pinnekamp et al. (2007) konnte mit einer Seabornedüngung Ergebnisse erzielen, die auf dem Niveau der in dieser Arbeit besprochenen Untersuchungsergebnisse liegen.

Tabelle 5Relative agronomische Effizienz der P-Aufnahme aller Varianten gegenüber der P-Nullvariante, WNA = Wasser und Neutralammoncitrat, P_{gesamt} = Mineralsäureaufschluss

Düngevariante	Effizienz der P-Aufnahme [%]	WNA (% von P _{gesamt})
P-0-Variante	100	-
Monoverbrennung	121	34
Mitverbrennung	114	62
Seaborne	151	95
A KSA	123	90
Mephrec	114	23
AshDec	132	85
Kontrolle	105	-

Ein Vergleich der P-Entzüge kann als agronomische Effizienz der P-Aufnahme (Vergleichsdünger/Nullvariante*100) dargestellt werden (Tabelle 3). Hierbei zeigt sich, dass alle unter-

suchten Produkte zu einer verbesserten P-Aufnahme gegenüber der Nullvariante und der Tricalciumphosphatkontrolle führen. Die Effizienz der P-Aufnahme ist bei allen Produkten unterschiedlich stark ausgeprägt. Die höchste agronomische Effizienz zeigen die Produkte Seaborne und AshDec. Alle anderen Varianten liegen in ihrer Effizienz zwischen Kontrolle und AshDec Produkt. Es kann festgehalten werden, dass die Wasser und Neutralammoncitratlöslichkeit bei vielen Produkten die Effizienz der P-Aufnahme widerspiegelt. Bei der Maximum-Variante und der mit Schwefelsäure vollaufgeschlossenen Klärschlammasche wird die P-Aufnahme durch die Wasser und Neutralammoncitratlöslichkeit überbewertet (Tabelle 5).

Die A KSA kann mit einem RecoPhos Produkt von Weigand et al. (2013) verglichen werden. In der von Weigand et al. (2013) durchgeführten Untersuchung konnten Erträge auf dem Niveau einer Superphosphatdüngung festgestellt werden. Nach Cabeza Perez et al. (2011b) ist die P-Düngewirkung von thermisch aufbereiteten Klärschlammaschen geringer als die von TSP und liegt auf dem Niveau von Rohphosphaten. Cabeza Perez et al. (2011b) gehen von einer P-Festlegung im Boden aus und betrachten dies als eine langfristige P-Deposition. Diese Aussage trifft nicht auf die eigenen Untersuchungsergebnisse zu, da die Düngewirkung höher war als die von Tricalciumphosphat, was mit einem Rohphosphat vergleichbar ist. Bei weiteren Vergleichen zu bisherigen Untersuchungen sollte auch beachtet werden, dass P-Düngemittel sehr standortabhängige Wirkungen (pH-Wert, Sorptionskapazität und Bodenzusammensetzung) zeigen (Chien et al., 1990).

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Wasser und Neutralammoncitratlöslichkeit (nach Fresenius-Neubauer) entspricht bei drei getesteten Klärschlammaschen (Seaborne, A KSA und AshDec) mit über 80 % Löslichkeit (von P_{gesamt}) der eines Superphosphats. Bei der Wasserlöslichkeit hat nur die vollaufgeschlossene KSA eine Löslichkeit von 90 % erreicht, was der Löslichkeit von Triplesuperphosphat entspricht. Die Wasserlöslichkeit der anderen Produkte liegt zum Großteil unter 1 % vom P-Gesamtgehalt. Zukünftig muss noch intensiver an einer verbesserten Wasserlöslichkeit der Produkte gearbeitet werden, um den Vorgaben des wissenschaftlichen Beirats für Düngungsfragen und der effizienten Pflanzenernährung gerecht zu werden (BMELV, 2011). Vorstellbar ist ein Aufschluss der Produkte mit Schwefelsäure, um die Wasserlöslichkeit zu erhöhen.

Die im Gefäßversuch ermittelten P-Aufnahmen zeigen, dass es möglich ist, Recyclingprodukte aus Klärschlamm herzustellen, die mit konventionellen mineralischen Düngemitteln in ihrer P-Düngewirkung konkurrieren können. Im Vergleich zu ähnlichen wissenschaftlichen Untersuchungen der letzten Jahre zeigt sich, dass einzelne Produkte hinsichtlich ihrer P-Verfügbarkeit und Qualität deutlich verbessert wurden. Aufgrund der ständigen Veränderungen der Produkte kann allerdings in den meisten Fällen kein direkter Vergleich vorgenommen werden. Jede Untersuchung einer neuen Produktcharge stellt eine Momentaufnahme dar, alle zusammen können lediglich einen Trend aufzeigen. Besonders das

AshDec- und das Seaborne Produkt zeigen bei der P-Düngewirkung ein großes Potenzial, zukünftig großflächig als Düngemittel Verwendung zu finden. Die chemisch vollaufgeschlossene Klärschlammasche zeigt eine Wirkung hinsichtlich der P-Aufnahme zwischen Minimum-Variante und AshDec Produkt. Das AshDec Verfahren zeigt, dass aus einer Rohasche mit mittlerer P-Verfügbarkeit durch die geeigneten Zusätze und Behandlungsschritte ein P-Düngemittel aus Klärschlammaschen hergestellt werden kann, dass auf hohem Niveau mit konventionellen mineralischen P-Düngemitteln bezüglich der P-Aufnahme konkurrieren kann. Ob dies auch unter Praxisbedingungen gilt, ist in mehrjährigen Feldversuchen zu untersuchen.

Das Mephrec Produkt kann im Gefäßversuch nicht überzeugen und erreicht nur P-Aufnahmen auf dem Niveau der unbehandelten Rohaschen (Mono- und Mitverbrennung).

Eine abschließende Produktbewertung kann durch die Gegenüberstellung der Löslichkeit, der P-Effizienz und der Produktpreise vorgenommen werden. Die unbehandelten Klärschlammaschen (Minimum und Maximum) können hierbei vernachlässigt werden, weil diese beiden Produkte hinsichtlich ihrer P-Löslichkeit und der P-Aufnahme wenig konkurrenzfähig gegenüber aufgeschlossenen mineralischen P-Düngemitteln, wie beispielsweise Superphosphaten sind und nur zur vergleichenden Bewertung innerhalb der Versuche gedient haben.

Beim Vergleich der Produkte hinsichtlich ihrer Löslichkeit und Düngewirkung ergibt sich für die untersuchten Düngemittel die in Tabelle 6 dargestellte Reihenfolge. Unter Einbeziehung des aktuellen Herstellungspreises liegt das AshDec Produkt im Bezug zur P-Aufnahme und Nachhaltigkeit vor allen anderen Produkten. Auch die Nachhaltigkeit des Herstellungsprozesses kann überzeugen, da in einem derart komplexen Verfahren die Prozessenergie durch die Monoverbrennung erzeugt werden kann und die Abwärme von anderen Industriezweigen nutzbar ist (Scheidig, 2012). Aufgrund der hohen P-Düngewirkung und einem hohen Anteil in Wasser und Neutralammoncitrat löslichem P kann das Seaborne Produkt hinter dem AshDec Produkt eingeordnet werden. Allerdings sind die Herstellungskosten mit 12 Euro/kg Phosphat vergleichsweise hoch. Die vollaufgeschlossene Klärschlammasche zeigt eine sehr hohe P-Löslichkeit und eine mittlere P-Aufnahme durch die Pflanzen. Die Herstellungskosten von aufgeschlossenen Klärschlammaschen sind konkurrenzfähig gegenüber den anderen untersuchten Produkten. Allerdings schränkt der teerähnliche klebrige und zähe Zustand die Verwendbarkeit ein. Das Mephrecprodukt konnte eine ähnlich hohe P-Aufnahme wie die mineralische Kontrollvariante erzielen, allerdings weist dieses Produkt nur eine sehr geringe Löslichkeit in Wasser und Wasser und Neutralammoncitrat auf (Tabelle 3).

Aus Sicht der Nachhaltigkeit können alle Produkte auf unterschiedliche Weise zur Schließung von P-Kreisläufen und des Klärschlammrecyclings beitragen.

Allerdings sind die untersuchten Recyclingdüngemittel aus Sicht des Produktpreises gegenüber einem Triplesuperphosphat (TSP) zurzeit nur begrenzt konkurrenzfähig (Tabelle 6).

Tabelle 6

Ranking der untersuchten Produkte (Jung et al., 2003; Pinnekamp et al. 2011; Adam und Simon, 2010 und Agrarmarkt NRW, 2012)

Platzierung	Produkt	Produkt- preis [Euro/kg P]	P- Effizienz [%]	WNA Löslich- keit [%]	Wasser- löslich- keit [%]
1	AshDec	1,80 - 2,30	132	81	1
2	Seaborne	12	151	95	16
3	A KSA	1,20 - 4,40	123	86	91
4	Mephrec	unbekannt	114	21	< 1
	TSP	2,55	-	> 80	> 80

In Deutschland und anderen EU-Staaten wird eine Verringerung der direkten landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm empfohlen. Deshalb sind zukünftig alternative Verwertungswege für Klärschlamm anzustreben (SRU, 2007; Schipper et al. 2004). Eine Möglichkeit zur Klärschlammverwertung stellt die Monoverbrennung mit anschließender thermischer Aufbereitung der Klärschlammaschen dar. Die Möglichkeiten einzelner Verfahren hinsichtlich der P-Düngerwirkung (P-Aufnahme und Ertrag) sind insgesamt als positiv zu bewerten.

Durch die Novellierung der Klärschlammverordnung mit Einführung eines Qualitätssicherungssystems für Klärschlamm werden die Kosten für die konventionelle Klärschlammverwertung steigen. Eine Monoverbrennung wird im Verhältnis hierzu günstiger (Wiechmann, 2012). Die Einführung der Deponieverordnung 2005 führte zu einer erhöhten thermischen Verwertung von Klärschlamm in Mitverbrennungsanlagen (DepV, 2002).

Zukünftig müssen die Aschen aufbereitet werden, um die P-Gehalte zu erhöhen und vor allem die Löslichkeit zu verbessern. Wie diese und andere Untersuchungen gezeigt haben, muss vor allem die Wasser und Neutralammoniumcitratlöslichkeit in Zukunft stärker beachtet und verbessert werden.

Durch diese Form der Phosphatrückgewinnung können an jedem Standort mit Klärschlammanfall Phosphatdüngemittel gewonnen werden. Dies mindert Abhängigkeiten von wenigen weltweiten Phosphatvorkommen und garantiert eine nachhaltige, regionale Versorgung mit P-Düngemitteln.

Danksagung

An dieser Stelle ist der LUFA Nord-West und den Mitarbeitern des Instituts für Pflanzenbau und Bodenkunde des Julius-Kühn-Instituts für die Anlage und Pflege des Gefäßversuches (Dörthe Stolte, Petra Schwabe, Melanie Salewski, Inge Bargmann) und für die Durchführung der Analytik (Birgit Pohl) zu danken. Des Weiteren ist Herrn Dr. Adam (BAM Berlin) für die Herstellung von Versuchsmustern und die Analytik einiger Aschen sowie die sehr gute Zusammenarbeit zu danken.

Literatur

- Adam C (2012) Schriftliche Mitteilung über den Gesamtnährstoff und Schwermetallgehalt der untersuchten Düngemittel – Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
- Adam C, Simon F-G (2010) Phosphorrückgewinnung im Bereich der kommunalen Abwasserreinigung [online]. Zu finden in <http://processnet.org/processnet_media/Neumann/FA_AuW/Vortrag+Adam.pdf> [zitiert am 09.07.2013]
- Adam C, Schick J, Kratz S, Schnug E (2006) Optionen der landwirtschaftlichen Verwertung von P aus der Abwasserreinigung : Dünger aus thermochemisch behandelten Klärschlammaschen, Vortrag zum SUSAN Projekt Agrarmarkt NRW (2012) Düngemittelpreise : Stand 16.07.2012 [online]. Zu finden in <<http://www.agrarmarkt-nrw.de/duengermarkt.shtm>> [zitiert am 23.07.2012]
- Bayerle N (2011) Schriftliche Mitteilung über die Inhaltsstoffe und Herstellung des zu untersuchenden Düngers Seaborne - Abwasser- und Straßenreinigungsbetrieb Stadt Gifhorn (ASG)
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2007) Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe für Metall- und Nichtmetallrohstoffe [online]. Zu finden in <<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/P-R/rohstoffwirtschaftliche-steckbriefe,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>> [zitiert am 09.07.2013]
- BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2011) Nachhaltiger Umgang mit der begrenzten Ressource Phosphor durch Recycling und Erhöhung der Phosphoreffizienz der Düngung : verabschiedet am 22.02.2011 [online]. Zu finden in <http://www.bmelv.de/SharedDocs/Downloads/Ministerium/Beiraete/Duenungsfragen/Phosphor.pdf?__blob=publicationFile> [zitiert am 09.07.2013]
- Breuer J (2011) Schriftliche Mitteilung über die Inhaltsstoffe und Herstellung des zu untersuchenden Düngers „Maximum“ – Reterra Service GmbH
- Cabeza Perez R, Steingrobe B, Römer W, Claassen N (2011a) Effectiveness of recycled P products as P fertilizers, as evaluated in pot experiments. *Nutr Cycl Agroecosyst* 91:173-184
- Cabeza Perez R, Steingrobe B, Claassen N (2011b) Phosphorrecycling : Charakterisierung der Düngewirkung recycelter Phosphatdünger in Feld- und Gefäßversuchen : Abschlussbericht. Göttingen, 50 p
- Chien SH, Sale PWG, Friesen DK (1990) A discussion of the methods for comparing the relative effectiveness of phosphate fertilizers varying in solubility. *Fert Res* 24:149-157
- DepV (2002) Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung) vom 24. Juli 2002 (BGBl. I S. 2807), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 13. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2860) geändert worden ist [online]. Zu finden in <<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/depv/gesamt.pdf>> [zitiert am 09.07.2013]
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2009) Entwurf zum Merkblatt DWA-M-387 : thermische Behandlung von Klärschlammen, Mitverbrennung. In: Wiechmann B (2012) Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Bonn : Umweltbundesamt, pp 9-56
- Elsner H (2008) Stand der Phosphatreserven weltweit [online]. Zu finden in <http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam_uploads/_koordinierend/bs_naehrstofftage/phosphor_landwirtschaft/2_Elsner.pdf> [zitiert am 09.07.2013]
- EU-Kommission (2003) EU-Methode 3.1.6 ABL. L304 vom 21.11.2003. In: Verordnung (EU) Nr. 223/2012 der Kommission vom 14. März 2012 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates über Düngemittel zwecks Anpassung ihrer Anhänge I und IV an den technischen Fortschritt [online]. Zu finden in <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:075:0012:0023:DE:PDF>> [zitiert am 16.07.2013]
- Franz M (2008) Phosphate fertilizer from sewage sludge ash (SSA). *Waste Manag* 28(10):1809-1818
- Groß D (2011) Schriftliche Mitteilung über die Inhaltsstoffe und Herstellung des zu untersuchenden Düngers „Minimum“ - Bundesstadt Bonn Zentrale Schlammbehandlung und Klärschlammverbrennung

- Jung R, Halsch E, Anzer T, Faulstich M (2003) Potential der Phosphorrückgewinnung aus Kläranlagen, *Gewässerschutz Wasser Abwasser* 190:52-53
- Kördel W, Herrchen M, Müller J, Schnug E, Kratz S, Fleckenstein J, Saring JT, Haamann H, Reinhold (2007) Begrenzung von Schadstoffeinträgen bei Bewirtschaftungsmaßnahmen in der Landwirtschaft bei Düngung und Abfallverwertung [online]. Zu finden in <<http://opus.kobv.de/zb/volltexte/2007/1338/pdf/Schadstoffeintraege.pdf>> [zitiert am 09.07.2013]
- Kratz S, Schnug E (2008) Agronomische Bewertung von Phosphatdüngern [online]. Zu finden in <http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam_uploads/_koordinierend/bs_naehrstofftage/phosphor_landwirtschaft/15_Kratz.pdf> [zitiert am 11.07.2013]
- Mallon J (2011) Schriftliche Mitteilung über die Inhaltsstoffe und Herstellung des zu untersuchenden Düngers Mephrec – Ingitec GmbH, Ingenieurbüro für Gießereitechnik GmbH, Leipzig
- Perez R, Steingrobe B, Claassen N (2011) Phosphorrecycling – Charakterisierung der Düngewirkung recycelter Phosphatdünger im Gefäß- und Feldversuch. Wissenschaftlicher Abschlussbericht. Förderkennzeichen 02WA0786
- Petzet S, Cornel P (2011) Towards a complete recycling of phosphorus in wastewater treatment : options in Germany. *Water Sci Technol* 64(1):25-39
- Pinnekamp J, Weinfurter KH, Sartorius C, Gäth S (2011) Verbundvorhaben „Phosphorrecycling – ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzeptes für Deutschland“ (PhoBe) : gemeinsamer Schlussbericht der Teilvorhaben. Aachen, 358 p
- Pinnekamp J, Montag D, Gethke K, Goebel S, Herbst H (2007) Rückgewinnung eines schadstofffreien, mineralischen Kombinationsdüngers „Magnesiumammoniumphosphat – MPA“ aus Abwasser und Klärschlamm : Schwerpunktstudie. Aachen, 271 p, UBA-FB 01,9
- Scheidig K (2012) Zur Ressourcen-Effizienz beim P-Recycling, *UmweltMagazin* 09:36-37
- Schick J (2010) Untersuchungen zu P-Düngewirkung und Schwermetallgehalten thermochemisch behandelter Klärschlammaschen, Braunschweig : Univ, 179 p
- Schipper WK, Klapwijk A, Potjer B, Rulkens WH, Temmink BG, Kiestra FDG, Lijmbach ACM (2004) Phosphate recycling in the phosphorus industry. *Phosphorus Res Bull* 15:47-51
- Simons J (2008) Eignung nährstoffreicher Substrate aus zentraler und dezentraler Abwasserbehandlung als Düngemittel. Bonn : Univ, 149 p
- SRU - Sachverständigenrat für Umweltfragen (2007) Arzneimittel in der Umwelt. Berlin : SRU, 51 p, Stellungnahme / SRU 12
- Suntheim L, Dittrich B (2000) Untersuchungen zur Phosphat-Düngewirkung von Klärschlämmen und Komposten, Alva-Jahrestagung : Bericht 2000:33-34
- UBA- Umweltbundesamt (2011) Klärschlamm Entsorgung : Stand 2011 [online]. Zu finden in <<http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodent=2307>> [zitiert am 25.05.2012]
- US Geological Survey (2009) Mineral Commodity Summaries [online]. Zu finden in <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2009/mcs2009.pdf>> [zitiert am 16.07.2013]
- VDLUFA (2011) Methodenbuch : Band 7: Umweltanalytik. Darmstadt : VDLUFA-Verl
- VDLUFA (2008a) Methodenbuch : Band 2.1: Die Untersuchung von Düngemitteln. Darmstadt : VDLUFA-Verl, Ergänzungslief 1-4
- VDLUFA (2008b) Methodenbuch : Band 2.2: Die Untersuchung von Sekundärrohstoffdüngern, Kultursubstraten und Bodenhilfsstoffen. Darmstadt : VDLUFA-Verl, Ergänzungslief 1
- VDLUFA (1995) Wasser- und ammoniumlösliches Phosphat und Mineralsäurelösliches Phosphat. In: Methodenbuch VDLUFA. Darmstadt : VDLUFA-Verl, Band II.1.4.1.4
- Weigand H, Bertau M, Hübner W, Bohndick F, Bruckert A (2013) RecoPhos: full-scale fertilizer production from sewage sludge ash. *Waste Manag* 33(3):540-544
- Wiechmann B (2012) Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland, Bonn : Umweltbundesamt, 114 p

