

Sylvia Kratz, Judith Schick, Raghad Shwiekh, Ewald Schnug

Abschätzung des Potentials erneuerbarer P-haltiger Rohstoffe in Deutschland zur Substitution rohphosphathaltiger Düngemittel

Estimating the potential of renewable P containing raw materials in Germany as a substitute for fertilizers made from rock phosphate

261

Zusammenfassung

Infolge einer Neubewertung der weltweiten P-Vorräte vervierfachte sich die Schätzung der wirtschaftlich ausbeutbaren P-Reserven von 16 Mio t Rohphosphat in 2010 auf 65 Mio t im Jahr 2011. Konservative Berechnungen gehen dennoch davon aus, dass in spätestens 172 Jahren die Reichweite der P-Vorräte erschöpft sein wird. P-Rückgewinnung aus alternativen erneuerbaren Quellen ist daher nach wie vor dringend geboten. Bereits heute (Bezugsjahr 2012) wird gut die Hälfte des jährlichen P-Bedarfs der deutschen Landwirtschaft (326000–458000 t P) mit tierischen Wirtschaftsdüngern (152000–284000 t P) abgedeckt, während P-haltige Mineraldünger nur rund ein Viertel (124000 t P) der ausgebrachten Menge stellen. Weitere bereits heute zur Düngung eingesetzte wichtige P-Quellen sind Schlachtnebenprodukte (33000 t P) und Klärschlamm (12000 t P). Schon seit Jahrzehnten fachlich wie politisch hoch umstritten, soll nach dem Willen der neuen Bundesregierung die direkte landwirtschaftliche Klärschlammmanwendung in Deutschland nicht mehr fortgesetzt werden. Umso wichtiger ist es, die Rückgewinnung von P aus der Abwasseraufbereitung voranzutreiben. Diese Arbeit gibt einen Überblick über die aktuell technisch möglichen Verfahren der P-Rückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm, deren ökonomische Machbarkeit sowie Untersuchungen zur Bewertung der Recycling-P-Produkte aus Sicht der Pflanzenernährung.

Stichwörter: Rohphosphatvorräte, P-Recycling, P-Düngewirkung

Abstract

Due to a re-evaluation of the worldwide P resources, estimates on economically mineable reserves increased from 16 Mt of rock phosphates in 2010 to 65 Mt in the year 2011. Conservative calculations still assume that P resources will be depleted within a maximum time span of 172 years. Already today (reference year: 2012) more than half of the yearly P demand in German agriculture (326000–458000 t P) is covered by farmyard manures and slurries (152000–284000 t P), while P containing mineral fertilizers supply about a quarter (124000 t P) of the total demand. Further important P sources used in agriculture are rendering by-products (33000 t P) and sewage sludge (12000 t P). Being a subject of highly controversial discussion both among scientists and politicians over the last few decades, sewage sludge shall no longer be applied directly to the field according to the plans of the new German government. Therefore, it is even more important to further advance P recycling from waste water treatment. This paper gives an overview of the state-of-the-art procedures of P recycling from waste water and sewage sludge and their economic feasibility and presents different recent investigations on the evaluation of P recycling products from the perspective of plant nutrition.

Key words: Rock phosphate reserves, P-Recycling, P-fertilizing effect

Institut

Julius Kühn-Institut – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Braunschweig

Kontaktanschrift

Dr. Sylvia Kratz, Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, E-Mail: sylvia.kratz@jki.bund.de

Zur Veröffentlichung angenommen

12. März 2014

1 Einleitung

Die weltweiten Rohphosphatreserven sind von endlicher Natur. Darüber hinaus ist aufgrund der politischen Instabilität einiger Förderländer (Marokko/Westsahara) und auch durch den hohen und weiter wachsenden Eigenbedarf (China/USA) eine zukünftige Phosphor-Versorgung Deutschlands in Form von importierten Rohphosphaten nicht gesichert. Eine weitgehende Unabhängigkeit von Phosphatimporten kann nur durch konsequentes Phosphatrecycling aus sekundären Rohstoffen erreicht werden.

Der vorliegende Artikel gibt einen Überblick über die aktuellen Vorräte an für die Düngerproduktion geeigneten Rohphosphaten und das in Deutschland vorhandene Potential an alternativen P-Quellen. Weiterhin werden die derzeit bekannten P-Recyclingverfahren dargestellt und die Wirtschaftlichkeit der daraus hervorgehenden Produkte sowie deren Eignung als P-Dünger aus Sicht der Pflanzenernährung diskutiert.

2 Bewertung der Stoffströme

2.1 Vorräte an geeigneten Rohphosphaten

Vorhandene Rohphosphatreserven werden alljährlich vom US Geological Survey (USGS) publiziert (JASINSKI in Mineral Commodity Summaries, online unter: http://minerals.er.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/).

Während in den vergangenen 10 Jahren (Januar 2004 bis Januar 2013) zunächst von einer stabilen Reserve von 18 000 000 t bzw. 2010 16 000 000 t ausgegangen wurde, stieg die Schätzung im Januar 2011 plötzlich auf 65 000 000 t (s. Tab. 1).

Als **Reserve** wird dabei derjenige Anteil der sogenannten „**reserve base**“ definiert, der zum Zeitpunkt der Feststellung **wirtschaftlich extrahiert bzw. produziert** werden kann. Die **reserve base** umfasst außerdem die **marginal ökonomischen**, d.h. die an der Grenze zur Unwirtschaftlichkeit ausbeutbaren Reserven, sowie einen Teil der **subökonomischen Ressourcen**, die die Kriterien der anderen beiden Kategorien (ökonomische und marginal ökonomische Reserven) nicht erfüllen (USGS, Mineral Commodities Summary, Appendix C Part A). Als Kriterium für die **Wirtschaftlichkeit der Reserven** galt in der Vergangenheit nach Maßgabe des USGS bzw. des USBM (= United States Bureau of Mines) (zuletzt publiziert im Jahr 1993, zitiert nach VAN KAUWENBERGH, 2010) ein erzielbarer Preis von **US \$ 40/t P₂O₅**, während ein Preis von **US \$ 100/t P₂O₅** als **Untergrenze für marginal ökonomisch ausbeutbare Reserven** definiert wurde. Wie VAN KAUWENBERGH (2010) betont, sind diese Zahlen jedoch vom tatsächlich erzielbaren Preis für Rohphosphat abhängig, der gerade in den vergangenen Jahren starken Schwankungen unterlag. Seinen Aussagen zufolge existieren derzeit keine verlässlichen Angaben in der Literatur über aktuelle Produktionskosten, die eine belastbare Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Abbaus

Tab. 1. Entwicklung der Schätzung wirtschaftlich ausbeutbarer Rohphosphatreserven weltweit in den vergangenen 10 Jahren (nach Jasinski, USGS)

Jahr	Rohphosphatreserve (in t)
2004	18.000.000
2005	18.000.000
2006	18.000.000
2007	18.000.000
2008	18.000.000
2009	15.000.000
2010	16.000.000
2011	65.000.000
2012	71.000.000
2013	67.000.000

von Reserven erlauben, da diese von den Unternehmen in aller Regel geheim gehalten werden. Zur Orientierung können daher nur erzielbare Rohphosphatpreise dienen¹. PINNEKAMP et al. (2011) stützen ihre Berechnungen zur Prognose der Preisentwicklung von Rohphosphat bis zum Jahr 2030 auf Angaben der CRU-Gruppe von British Sulphur (CRU, 2003), wonach die **Preisspanne für Rohphosphat** (Abbau und Aufbereitung) im Jahr 2003 **zwischen 21 und 48 US \$/t P₂O₅** lag. Diese Zahlen berücksichtigen jedoch noch nicht den enormen Preisanstieg, der ab 2007 zu beobachten war. Nach VAN KAUWENBERGH (2010) dürften die Preise aktuell (d.h. 2010) ein Plateau von **US \$ 80–110/t P₂O₅** erreicht haben. Derartige Unsicherheiten erschweren die Einordnung von Rohphosphatvorkommen in die oben genannten Kategorien.

Hintergrund der zwischen 2010 und 2011 mehr als vervierfachen Schätzung der verfügbaren Reserven sind Daten des International Fertilizer Development Center (IFDC; s. VAN KAUWENBERGH, 2010), der seine Angaben zu Marokkanischen Reserven von rund 6 auf 51 Mio. t Rohphosphat (sog. „beneficiated“ concentrate) hochkorrigiert hatte. Diese Korrektur wird allerdings in der wissenschaftlichen Literatur sehr kritisch gesehen: Wie EDIXHOVEN et al. (2013) darlegen, verursache die vom IFDC 2010 eingeführte Vereinfachung der Nomenklatur in Bezug auf mineralische Ressourcen mehr Verwirrung als Klarheit. An verschiedenen Beispielen legen die Autoren dar, dass in den vergangenen Jahren bei Abschätzungen der langfristigen Verfügbarkeit der vorhandenen Rohphosphatvorräte mehrfach Angaben zu Roherzen und Konzentraten ebenso wie Einheiten (Masse in Tonnen bzw. Volumen in m³) vertauscht und damit unrealistische Zahlen berechnet worden seien. Dies sei umso schwerwiegender, als bei Abbau und Aufbereitung des Roherzes zum sog. „beneficiated concentrate“, d.h. der Aufkonzentration auf mindestens 30% P₂O₅, je nach Qualität des Roherzes, von einem Massenverlust zwischen 5 und 70% (im Mittel

¹ wobei davon ausgegangen wird, dass der Preis eine Gewinnspanne von 10–15% (je nach Autor) für den Produzenten beinhaltet

50%)² auszugehen sei. Bislang sei auch nicht klar, ob im Fall der USGS-Angaben zum marokkanischen Phosphat tatsächlich von Konzentrat, oder aber von Roherz die Rede sei (EDIXHOVEN et al., 2013, S. 1028f.). Zudem sei es wahrscheinlich, dass es sich bei den mit 51 Mio. t beziffernten marokkanischen Rohphosphatlagern zu mindestens zwei Dritteln um schwer oder gar nicht zugängliche, teilweise auch nur vermutete Ressourcen, nicht aber um Reserven handele. Eine eindeutige Aufklärung der in diesem Fall tatsächlich zutreffenden Kategorien und Einheiten steht offenbar noch aus.

Weiterhin halten die Autoren auch die derzeit für Schätzungen gebräuchliche statische jährliche Verbrauchsrate von 160 Mt Rohphosphat (weltweit) für unrealistisch. Diese führte den IDFC (VAN KAUWENBERGH, 2010) zu dem Schluss, dass die derzeitigen Reserven (60000 Mt) noch 300–400 (statt vorher 100–150) Jahre ausreichen sollten. Noch optimistischer sei die Einschätzung von SCHOLZ und WELLMER (2012), wonach die Phosphatvorräte unter Berücksichtigung der wohl größten (allerdings auch größtenteils schwer oder unzugänglichen) Phosphatformation weltweit, des „Western Phosphatic Field“ in den USA, noch mindestens 1000 Jahre ausreichen sollen (bei einer jährlichen Verbrauchsrate von 178,5 Mt Konzentrat). Dem sei nicht nur die technische Unzugänglichkeit des Western Phosphatic Field entgegenzuhalten, sondern auch die Erkenntnis, dass die **Phosphatverbrauchsrate weltweit derzeit kontinuierlich ansteige**, 2011 bereits bei 198 Mt Konzentrat lag und 2013 auf 256 Mt ausgeweitet wurde. Mit einer Stabilisierung rechnen Analysten erst zum Ende des 21. Jahrhunderts (EDIXHOVEN et al., 2013, S. 1012). Entsprechend gehen ROSEMARIN et al. (2011) auch je nach betrachtetem Szenario (verschiedene Annahmen zu Bevölkerungswachstum, Ausweitung der Landwirtschaft in Afrika, sowie der Produktion von Biokraftstoffen) von einer **Reichweite der derzeitigen Reserven (sogar unter der Annahme von 60000 Mt Rohphosphat-Konzentrat) von 48–172 Jahren** aus.

2.2 Vorräte an zur Düngung geeignetem wiederverwertbarem Phosphat

2.2.1 P-haltige Mineraldünger. Der Absatz P-haltiger Mineraldünger in Deutschland ist in den letzten acht Wirtschaftsjahren mit Ausnahme des Jahres 2008/2009 auf einem relativ stabilen Niveau geblieben (Abb. 1).

Basierend auf den vom Statistischen Bundesamt (2013) herausgegebenen Zahlen für das Wirtschaftsjahr 2012/2013 müssten jährlich ca. 125000 t P aus verschiedenen Rohstoffen rückgewonnen werden, um komplett auf importiertes Rohphosphat bzw. daraus hergestellte P-Dünger verzichten zu können (Tab. 2).

2.2.2 Wirtschaftsdünger. In landwirtschaftlichen Betrieben fallen Wirtschaftsdünger in Form von Stallmist, Jauche, Kot oder Gülle an. Die aus der Vergärung von in landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen oder gartenbaulichen

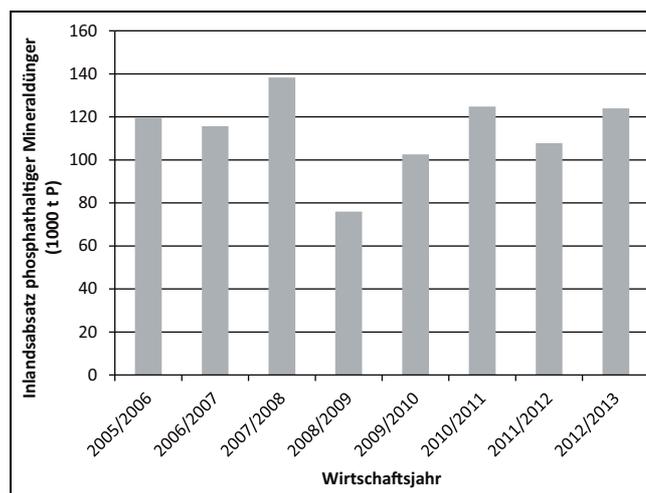


Abb. 1. Inlandsabsatz phosphathaltiger Mineraldünger in den Wirtschaftsjahren 2005/2006–2012/2013 (Quelle: IVA, 2013).

Tab. 2. Inlandsabsatz phosphathaltiger Mineraldünger im Wirtschaftsjahr 2012/2013 (Quelle: DESTATIS, 2013a)

Sorte	Absatz (t P ₂ O ₅)	Absatz (t P) ¹
Superphosphat/ Triplesuperphosphat	15728	6864
Andere Phosphatdünger ²	4947	2159
PK-Dünger	26128	11402
NP-Dünger	187351	81760
NPK-Dünger	50014	21826
Insgesamt	284168	124011

¹ Umrechnungsfaktor: 0,4364

² Weicherdiges Rohphosphat, teilaufgeschlossenes Rohphosphat, Dicalciumphosphat, Rohphosphat mit wasserlöslichem Anteil; Thomasphosphat, Rohphosphat mit kohlenstoffsaurem Kalk

Betrieben angefallenen Gärreste, die auch mit tierischen Ausscheidungen gemischt sein können, zählen ebenfalls zu den Wirtschaftsdüngern. Werden dagegen bei der Biogasgewinnung z.B. Bioabfälle mitvergoren, handelt es sich nach der Düngemittelverordnung um organische Düngemittel (WENDLAND und ATTENBERGER, 2009). Zwischen 2000 (241 Mio. t) und 2010 (246 Mio. t) ist die Menge der anfallenden Wirtschaftsdünger nur um wenige Prozent angestiegen (BLOEM und KRATZ, unveröffentlicht). Exakte Aussagen über das P-Potential dieser Stoffgruppe sind aufgrund ihrer Heterogenität nicht möglich, es können vielmehr nur Größenordnungen angegeben werden. Des Weiteren liegt aktuell keine genaue Statistik über den Gärrestanfall vor. WEILAND (2010) schätzt, dass von den ca. 200 Mio. t/a Gülle und Festmist etwa 15% zur Biogasgewinnung verwendet werden, was einem Gärrestanfall von ca. 29 Mio. t/a entspräche. Mangels detaillierter

² Vgl. IFDC (2010) gibt P₂O₅-Verluste durch Abbau und Verarbeitung je nach Qualität der Mine mit 21–60% an

ter Angaben geht die Berechnung in Tab. 3 davon aus, dass die Angaben der offiziellen Statistik zur Ausbringung der verschiedenen Wirtschaftsdüngertypen die zu Biogas verarbeiteten Anteile bereits beinhalten.

Aus den insgesamt angefallenen Mengen ergibt sich daher für das Jahr 2010 ein P-Potential von 253 000–489 000 t P. Der nicht landwirtschaftlich verwertete Rest besitzt ein P-Potential von 101 000–205 000 t P (Tab. 3).

2.2.3 Produkte aus der Abwasserreinigung, Klärschlämme und Klärschlammaschen.

Klärschlamm. Seit 2006 hat die Menge des in Deutschland anfallenden Klärschlammes um etwas weniger als 10% abgenommen (Abb. 2).

Im Jahr 2012 fielen in Deutschland insgesamt mehr als 1,8 Millionen Tonnen kommunaler Klärschlämme an, von denen rund 55% thermisch behandelt, etwa 29% landwirtschaftlich verwertet und 13% bei der Kompostierung und im Landschaftsbau eingesetzt wurden. Die übrigen 3% wurden anderweitig stofflich verwertet (DESTATIS, 2013b). Ausgehend von einem P-Gehalt von 2,3% P (KRATZ und SCHNUG, 2006), besitzt der komplett angefallene Klärschlamm ein P-Potential von mehr als 41 000 t, der landwirtschaftlich verwendete Anteil entspricht ca. 12 000 t P.

Bezüglich der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm hat die Große Koalition in dem im November 2013 unterschriebenen Koalitionsvertrag festgehalten (ANONYM, 2013):

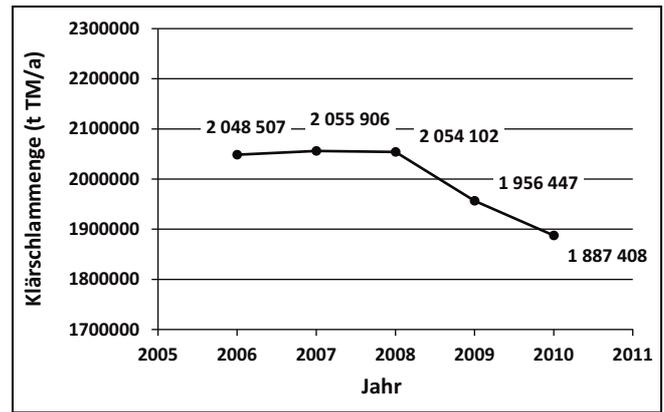


Abb. 2. Entwicklung der anfallenden Klärschlammmenge von 2006–2010 (t TM/a) (DESTATIS, 2010).

„Der Schutz der Gewässer vor Nährstoffeinträgen sowie Schadstoffen soll verstärkt und rechtlich so gestaltet werden, dass Fehlentwicklungen korrigiert werden. Wir werden die Klärschlammausbringung zu Düngezzwecken beenden und Phosphor und andere Nährstoffe zurückgewinnen.“ (Koalitionsvertrag, Seite 120)

So ist die Rückgewinnung von P aus Klärschlamm von besonderem Interesse, da die Option „landwirtschaftliche Klärschlammverwertung“ im Fall einer tatsächlichen Umsetzung des formulierten Ziels zukünftig ausgeschlossen sein wird.

Tab. 3. Angefallene und landwirtschaftlich ausgebrachte Wirtschaftsdüngermengen (für das Jahr 2010)

Produkt	P-Gehalt (kg/t bzw. kg/m ³) ^{1; 2}	Angefallene Menge (1000 t/a bzw. 1000 m ³ /a) ³	P-Potential angefallene Menge (1000 t P)	Ausgebrachte Menge (1000 t/a bzw. 1000 m ³ /a) ⁴	Differenz Angefallene Menge – Ausgebrachte Menge (= Rest) (1000 t/a bzw. 1000 m ³ /a)	P-Potential – Rest (1000 t P)
Rindergülle	0,79–0,96	81 128	64–78	81 128	0	0
Schweinegülle	1,0–1,9	118 372	119–222	36 654	81 718	82–153
Festmist	Rind	26 727	61–153		9 422	28–78
	Schwein	635		25 707		
	Sonstige ⁵	7 767				
Jauche	Rind	7 775		7 024	1 583	0,14–0,62
	Schwein	832				
Geflügel- und sonstige Gülle + Hühnertrockenkot ⁶	2,4–11,3	2 991	7–34	2 096	895	2,1–10
Σ Wirtschaftsdünger⁷ (in t)		246 227	253–489	152 609	93 618	101–205

¹ LWK-Niedersachsen (2013), ² 1 m³ Geflügel/sonstige Gülle entsprechen 1 t; ³ Quelle: BLOEM und KRATZ (unveröffentlicht);

⁴ Quelle: DESTATIS (2011), Ausnahme: Rindergülle, (zu hoher) Wert reduziert auf die bei BLOEM und KRATZ berechnete Anfallmenge;

⁵ Exklusive Hühner und Putenmist; ⁶ Inklusiv Hühner und Putenmist; ⁷ Die aus Wirtschaftsdüngern hergestellte Menge an Biogasgärresten wird von WEILAND (2010) auf ca. 15% des Gesamtaufkommens an Gülle und Festmist geschätzt und vollständig landwirtschaftlich verwertet. Mangels detaillierter Angaben geht diese Berechnung davon aus, dass die Angaben der offiziellen Statistik zur Ausbringung der verschiedenen Wirtschaftsdüngertypen die zu Biogas verarbeiteten Anteile bereits beinhalten.

Da die Monoverbrennung von Klärschlamm ein hohes P-Rückgewinnungspotential besitzt (90% Rückgewinnungspotential bezogen auf die Zulauffracht (ADAM, 2008)), durch die Verbrennung eine weitgehende Zerstörung der organischen Schadstoffe stattfindet und gleichzeitig die thermische Energie des Schlammes genutzt werden kann, sollte dieses Verfahren in Kombination mit adäquaten Methoden zur anschließenden P-Rückgewinnung aus der Asche bevorzugt verwendet werden.

2.2.4 Schlachtnebenprodukte. Seit dem 1. Januar 2001 ist die Verwendung von Schlachtabfällen zur Futterzwecken nicht mehr erlaubt. Der Einsatz von Fleischknochenmehl, Knochenmehl und Fleischmehl als Düngemittel ist dagegen unter bestimmten Voraussetzungen zugelassen, die in der Verordnung (EG) 1774/2002 („EG-Hygieneverordnung“) vom 3. Oktober 2002 und der Düngemittelverordnung (DüMV) vom 16. Dezember 2008 festgelegt sind. Tierische Nebenprodukte werden in der Verordnung 1774/2002 entsprechend ihrer Entsorgungsbzw. Verwertungsmöglichkeiten in drei Kategorien unterteilt:

Kategorie 1: Nebenprodukte von Tieren, die von Tierseuchen (z.B. BSE) befallen waren und spezifiziertes Risikomaterial. Das Material der Kategorie 1 muss in Tierkörperbeseitigungsanlagen verbrannt werden. Häufig erfolgt dies in Form von Mitverbrennung in Zementwerken oder Kraftwerken (ALBERT, 2008).

Kategorie 2: Nebenprodukte von Tieren, die weder durch eine Seuche oder Schlachtung gestorben sind und Material von nicht schlachtauglichen Tieren.

Kategorie 3: Nebenprodukte, die bei der Schlachtung und Zerlegung gesunder Tiere anfallen (z.B. Hufe und Hörner) oder Körperteile die genusstauglich sind, aus kommerziellen Gründen aber nicht für den menschlichen Verzehr bestimmt sind.

Produkte der Kategorie 2 und 3 dürfen bereits jetzt schon als NP-Dünger verwendet werden. Berücksichtigt man darüber hinaus auch die Produkte der Kategorie 1 und beschränkt ihre Verbrennung auf eine Monoverbrennung oder Mitverbrennung mit P-reichen Substanzen

wie Klärschlämme oder Wirtschaftsdünger, könnte auch das in diesen Materialien enthaltene P für die Pflanzenernährung genutzt werden.

Im Vergleich mit anderen organischen Düngemitteln liegt der durchschnittliche P-Gehalt von Schlachtnebenprodukten mit 3–14% P vergleichsweise hoch (KRATZ et al., unveröffentlicht). Betrachtet man die Entwicklung der Anfallsmenge von Schlachtnebenprodukten der Kategorien 1 bis 3 innerhalb von 7 Jahren (2005–2012) ist eine starke Zunahme zu erkennen, was diesen Rohstoff als P-Quelle zunehmend interessanter werden lässt (Tab. 4).

Die Verwendung von Schlachtnebenprodukten der Kategorie 3 als Düngemittel („technische Verwendung“), hat von 2006 bis 2011 sowohl total, als auch prozentual abgenommen, die Tendenz geht deutlich zu einer Verwertung als Futtermittel für Heim- und Pelztiere. Die Mengen, die thermisch verwertet oder verbrannt werden, sind vernachlässigbar gering (Tab. 5).

Im Jahr 2010, wurden etwa 44% des anfallenden Materials der Kategorie 3 technisch verwendet. Ausgehend von einem durchschnittlichen P-Gehalt von 6,1% (www.stn-vvtn.de) entspricht das einer P-Menge von 10178 t. Da die Zahlen für die landwirtschaftliche Verwertung von Schlachtnebenprodukten der Kategorie 3 für das Jahr 2012 noch nicht vorliegen, können sie an dieser Stelle nur abgeschätzt werden. Geht man von einem gleichbleibenden Anteil der landwirtschaftlichen Verwertung im Vergleich zu dem Jahr 2011 aus (34%), würden 540204 t des Materials der Kategorie 3 als Dünger verwendet, das entspräche 32953 t P. Das bislang landwirtschaftlich nicht genutzte Potential der insgesamt 129224 t P aus den Schlachtnebenprodukten der Kategorien 1 bis 3 läge demnach bei 96272 t P (s. auch Tab. 6).

Kompost. Im Jahr 2011 wurden in allen biologischen Behandlungsanlagen³ 4187700 t Kompost abgesetzt (DESTATIS, 2013c). Geht man von einem vergleichsweise geringen, durchschnittlichen P-Gehalt von 2 kg/t FM

³ Bioabfallkompostierungsanlagen, Grünabfallkompostierungsanlagen, Biogas-/Vergärungsanlagen, Klärschlammkompostierungsanlagen, sonstige biologischen Behandlungsanlagen

Tab. 4. Entwicklung des Anfalls und des P-Potentials von Schlachtnebenprodukten von 2005–2012 (ALBERT, 2008; BMELV, 2012; www.stn-vvtn.de)

	2005		2009		2012	
	Anfall (t)	P-Menge (t)	Anfall (t)	P-Menge (t)	Anfall (t)	P-Menge (t)
Kategorie 1	280000	8300	259335	7687 ¹	956430	28351 ¹
Kategorie 2	61500	2100	45765	24522	127555	3954
Kategorie 3	200000	13300	379200		1588838	96919
Insgesamt	541500	23700	684300	32209	2873270	129224

¹ Berechnung der P-Mengen aus Schlachtabfällen der Kategorie 1 basierend auf den Zahlen von Anfall und P-Menge aus dem Jahr 2005.

Tab. 5. Anfall und Verwertung von Schlachtnebenprodukten der Kategorie 3 (Quelle: BMELV, 2012) (t)

Jahr	Herstellung	Verwendung				
		Futtermittel	Technische Verwendung	Anteil technische Verwendung (%)	Thermische Verwertung	Verbrennung
2006	294100	71200	212100	72	2700	1100
2007	338100	147900	187700	55	2500	–
2008	338100	152700	183700	54	–	1700
2009	379200	182900	188800	50	7500	–
2010	398100	222500	175700	44	–	0
2011	421100	276600	143800	34	700	–

Tab. 6. Anfall, P-Potential und landwirtschaftlich verwendete Menge organischer und mineralischer P-Quellen

P-Quelle	Anfallmenge (in 1000 t bzw. m ³)	P ₂ O ₅ -Gehalt (%)	P-Gehalt (%)	P-Potential (in 1000 t P)
Klärschlamm (TM) (2012)	1800 ¹	5,3	2,3 ²	41
Fleischknochenmehle (2012)	2873 ³			129
Kompost (FM) (2011)	4188 ⁵	0,45 ⁴	0,2	8,4
Wirtschaftsdünger (2010)	246227 ⁶		0,01–11,3 ⁷	253–489
P-Potential gesamt (in t)	255088			431–667

P-Quelle	Verwendete Menge 2010 (in 1000 t bzw. m ³)	P-Menge (in 1000 t P)
Mineralisches P (2012/2013)		124 ⁸
Klärschlamm (2012)	522 ¹	12
Wirtschaftsdünger (2010)	152609	152–284
Fleischknochenmehle (2012)	540 ⁹	33
Kompost (2011)	2555 ⁵	5,1
Landwirtschaftlich verwendetes P (organische + mineralische Quellen)		326–458

¹ DESTATIS (2013d); ² KRATZ UND SCHNUG (2006); ³ www.stn-vvtn.de; ⁴ BGK (2013); ⁵ DESTATIS (2013c); ⁶ BLOEM UND KRATZ (unveröff.); ⁷ LWK-NDS (2013); ⁸ DESTATIS (2013a); ⁹ Kalkuliert basierend auf Anfallmengen 2012 und dem Prozentsatz des landwirtschaftlich verwendeten Anteil von 2011 (34% des Materials der Kategorie 3)

(BGK, 2013) aus, besitzt Kompost ein P-Potential von 8400 t P. Allerdings wurde im Jahr 2011 bereits mehr als die Hälfte (2554700 t/5100 t P) in der Land- und Forstwirtschaft verwendet (DESTATIS, 2013c). Die bislang noch nicht landwirtschaftlich genutzten 3300 t P könnten darüber hinaus mittels geeigneter Recyclingstrategien zur Deckung des P-Bedarfes von Kulturpflanzen genutzt werden.

P-Potentiale. Da nicht für alle anfallenden organischen P-Quellen Zahlen für das Jahr 2012 vorliegen, musste für

die Berechnung der P-Potentiale für Kompost und Wirtschaftsdünger auf die jeweils aktuellsten Zahlen, also auf 2011 bzw. 2010 zurückgegriffen werden.

Das P-Potential aller angefallenen Wirtschaftsdünger, Klärschlämme, Fleischknochenmehle und Kompost liegt in einem Rahmen von 431000–667000 t P. Eingesetzt wurden dagegen etwa 326000–458000 t P in organischer und mineralischer Form (Tab. 6). Der P-Bedarf der deutschen Landwirtschaft könnte demzufolge durch ein konsequentes Nährstoffrecycling vollständig abgedeckt werden.

3 Bereits genutzte und technisch mögliche Hauptverwertungswege ausgesuchter sekundärer Rohstoffe und deren Bewertung aus Sicht von Ökonomie und Pflanzenernährung

Zu P-Recyclingverfahren zählt man zum einen Methoden, die der Aufbereitung P-haltiger Stoffe wie Klärschlamm oder Bioabfälle direkt zu Düngemitteln oder zu Ausgangsstoffen zur Düngemittelherstellung dienen. Aufbereitungsprozesse beinhalten Verfahrensschritte wie Trocknung und Granulierung (MONTAG et al., 2013). Zu den Rückgewinnungsverfahren zählen dagegen Methoden, deren Ziel die Separierung oder Aufkonzentrierung von P aus einem P-reichen Material ist. Rückgewinnungsverfahren werden eingesetzt um (MONTAG et al., 2013):

- P aus Stoffen wieder zu gewinnen, die z.B. wegen erhöhter Schadstoffgehalte nicht direkt als Düngemittel oder als Ausgangsstoff für die Düngemittelherstellung geeignet sind
- die P-Konzentration zu erhöhen
- eine günstige Beschaffenheit des Recyclates im Hinblick auf die Herstellung eines Düngemittels zu gewährleisten
- Vorteile für den Anlagenbetrieb (z.B. Kläranlagen) mit Ressourcenschutz und erhöhter Energieeffizienz zu kombinieren.

Die am intensivsten betrachteten Stoffströme mit Blick auf die P-Rückgewinnung sind derzeit aufgrund ihres Potentials Produkte aus der Abwasserreinigung (Klärschlamm, Klärschlammaschen, Abwasser) und Schlachtnebenprodukte. Daher soll sich die Betrachtung der Hauptverwertungswege an dieser Stelle auf das P-Recycling aus Produkten dieser Produktgruppe konzentrieren. Grundsätzlich kann dies mittels thermischer oder chemischer Verfahren erfolgen.

3.1 Bewertung der P-Recyclingprodukte aus Sicht der Ökonomie

Ein entscheidendes Kriterium für die Wirtschaftlichkeit⁴ von P-haltigen Recyclingprodukten ist die Preisentwicklung von Rohphosphaten oder den daraus hergestellten Düngemitteln am Weltmarkt. Im Wirtschaftsjahr 2012/2013 lag der Preis mineralischer Düngemittel pro t P₂O₅ bei 925 € (925 €/436 kg P → ca. 2 €/kg P) (IVA, 2013). Allerdings basieren diese Preise bereits auf fertig hergestellten Düngerprodukten. Für die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit derjenigen Recyclingprodukte, die, ähnlich den Rohphosphaten, noch weiter verarbeitet werden müssen, ist daher vielmehr der Preis für Rohphosphate relevant. Der aktuelle Preis für ein marokkanisches Rohphosphat (P₂O₅-Gehalt: 31–33%; Stand: Februar 2014) liegt bei 102,20 US \$/t (STONEGATE, 2014; Y-CHARTS, 2014). Daraus errechnet sich ein Preis für 1 kg P von ca. 0,51–0,55 €.

⁴ Die Kosten des Rückgewinnungsprozesses liegen mindestens auf dem gleichen Niveau wie der durchschnittliche Preis von Rohphosphaten oder daraus produzierten P-haltigen Düngemitteln

In Tab. 7 sind die produktspezifischen Kosten für verschiedene Rückgewinnungsverfahren aus Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche zusammengestellt.

Es zeigt sich eine sehr große Preisspanne von 0,38 €/kg P → 14 €/kg P und es ist ersichtlich, dass die meisten Rückgewinnungsverfahren aus wirtschaftlicher Sicht derzeit noch nicht konkurrenzfähig sind. Ausnahme ist lediglich das Produkt „Berliner Pflanze“, das bereits erfolgreich an Düngemittelhersteller vertrieben werden konnte. Die Preise für 1 kg P liegen hier für dieses Produkt zwischen 0,38–0,67 € (HEINZMANN und LENGEMANN, 2013). Grundsätzlich zeigen sich einige Verfahren nicht mehr weit von der wirtschaftlichen Rentabilität entfernt. Als für die Zukunft besonders vielversprechend erscheinen das FIX-Phos- und das AshDec-Verfahren, deren Kosten sich je nach Infrastruktur derzeit im Bereich von 2 €/kg P und weniger bewegen. Nach Berechnungen von PINNEKAMP et al. (2011) kann die P-Rückgewinnung aus dem Klärschlammwasser durch das FIX-Phos-Verfahren und aus Klärschlammasche durch das AshDec-Verfahren schon in knapp 10 bzw. 15 Jahren wirtschaftlich rentabel sein. Momentan werden nach Angaben der Hersteller die Verfahren DHV-Crystalactor im Industrieabwasserbereich und Ostara auf kommunalen Kläranlagen wirtschaftlich rentabel umgesetzt (HORN et al., 2011). Nach SCHEIDIG et al. (2010) ist auch von dem Mephrec-Verfahren ein wirtschaftlicher Betrieb zu erwarten, da hier P-Recycling und Energiegewinnung in einem Verfahrensschritt erfolgen. Allerdings können an dieser Stelle keine Zahlen genannt werden, die die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens belegen.

3.2 Bewertung der P-Recyclingprodukte aus Sicht der Pflanzenernährung

Neben der Wirtschaftlichkeit ist auch die Qualität des Produktes aus Sicht der Pflanzenernährung zu beachten.

Ein wesentliches Kriterium zur schnellen Einschätzung der Pflanzenverfügbarkeit eines Produktes ist dessen Löslichkeit in verschiedenen Extraktionsmitteln nach DüMV bzw. EU-VO 2003/2003. Auf gut versorgten Ackerböden sollten bevorzugt solche Produkte Verwendung finden, die eine hohe Löslichkeit und damit eine sofortige oder doch kurzfristig realisierbare Pflanzenverfügbarkeit aufweisen. Dies sind in erster Linie Produkte mit hoher Löslichkeit in Wasser oder Ammoniumcitrat (neutral: NAC, alkalisch: AAC). Geringe Löslichkeiten in Wasser, NAC oder AAC, aber gute Löslichkeiten in Zitronensäure kennzeichnen dagegen Produkte, die erst mittelfristig verfügbar werden und sich daher eher zur Grunddüngung von Ackerböden eignen. Produkte, die nur in Ameisensäure eine höhere Löslichkeit aufweisen, wie beispielsweise weicherdeige Rohphosphate, lösen sich nur über längere Zeiträume und typischerweise nur unter besonderen Standortbedingungen, wie im Fall der Rohphosphate bei saurem Boden-pH (vgl. dazu ausführlicher KRATZ und SCHNUG, 2009).

Wie Tab. 8 und 9 zeigen, gibt es hinsichtlich der P-Gehalte und P-Löslichkeiten der verschiedenen hier ange-

Tab. 7. Methoden zur P-Rückgewinnung: Prinzip, Stand der Technik, Kosten (verändert nach WAIDA und WEINFURTNER, 2011; MONTAG et al., 2013)

Methode	Einsatzstelle ⁺	Verfahrensprinzip	Maßstab [*]	Produkt	Kosten (€ kg/P)	Weiterführende Quellen
P-Roc		Kristallisation mit CSH	Pilot	Ca-P	4 ^{1,2}	BERG (2005)
Ostara Pearl™		Kristallisation	Voll	MAP	k.A.	BRITTON (2009)
Berliner Wasserbetriebe	Wässrige Phase ^o	MAP-Fällung	Voll	MAP	0,38–0,67 ³	HEINZMANN und LENGEMANN (2012)
PRISA		P-Fällung mit Mg	Halbtech.	MAP	7,72 ⁴	MONTAG (2008)
CRYSTALACTOR®		Kristallisation	Voll		6–7 ⁷	GIESEN (2009)
Seaborne (Gifhorn)	KKS	Säureaufschluss und MAP-Fällung	Voll	MAP	14,22 ⁵	BAYERLE (2009)
FIX-Phos		Kristallisation mit CSH	Voll	Ca-P	2,0 ^{1,6}	PINNEKAMP et al. (2011)
SESAL-Phos		Laugung mit Natronlauge	Labor	Ca-P	9 ¹	PINNEKAMP et al. (2011)
PASCH	KSA	HCl-Aufschluss + Fällung	Halbtech.	Ca-P	4,4 ^{1,8}	MONTAG (2008)
BAM/AshDec		Thermochemisch unter Zugabe von MgCl ₂	Voll	Mg-P	1,5–2,8 ⁹	ADAM et al. (2009)
Ulophos®	TMA	Thermochemisch unter Zugabe von Additiven	Voll	Ca-P	k.A.	–
Mephrec	KS, KSA, TMA	Schmelzvergasung bei ca. 2000°C	Voll	P-haltige Schlacke	k.A.	SCHEIDIG et al. (2010)
Marokkanisches Rohphosphat (Stand: Februar 2014) ¹⁰					0,51–0,55	
P-Düngemittel (Wirtschaftsjahr 2012/2013) ¹¹					2,0	

⁺ KS = Klärschlamm, KSA = Klärschlammasche, TMA = Tiermehlasche; ^o Abwasser (behandelt) oder Schlamwasser;

^{*} Voll = großtechnisch realisiert; ¹ PINNEKAMP et al. (2011); ² auf Kläranlagen mit Ausbaugröße ab 1 Mio. EW mit 4 €/kg P;

³ eigene Kalkulation basierend auf Herstellerangaben: 60–80 €/t und 12–16% P_{ges} (deklarierte Gehalte) (HEINZMANN und LENGEMANN, 2013); ⁴ MONTAG (persönliche Mitteilung; zitiert nach HORN et al. 2011); ⁵ HORN et al. (2011); ⁶ in der kostengünstigen Variante (unter Rückgriff auf vorhandene Faulbehälter) mit weniger als 2 €/kg P (bei 1 Mio. bzw. 100.000 EW Ausbaugröße); ⁷ ADAM (2010);

⁸ in Anlage mit Jahreskapazität von 30.000 Tonnen Asche (entsprechend knapp 3 Mio. EW) mit 4,40 €/kg P; ⁹ HERRMANN (2014);

¹⁰ STONEGATE (2014); Y-CHARTS (2014); ¹¹ IVA (2013)

sprochenen P-Recyclingprodukte eine große Streubreite. Die Wasserlöslichkeit ist bei allen Produkten sehr gering, eine Ausnahme bildet lediglich die mit Schwefelsäure nachbehandelte Asche von AshDec. Hohe Löslichkeiten in NAC weisen vor allem die verschiedenen Magnesium-Ammonium-Phosphate (MAP, Struvit) auf, allerdings liegen hier leider nur für einige der aufgeführten Produkte Analysen vor. Die Löslichkeiten in AAC spiegeln jene in NAC nur teilweise wider, während diese beiden Extrakte in anderen Fällen sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern. Dies mag daran liegen, dass die AAC-Methode nur für ganz bestimmte chemische Zusammensetzungen von Düngemitteln vorgesehen ist, insbesondere solche, die Dicalciumphosphat (DCP) und pflanzenverfügbare Fe-/Al-Phosphate enthalten, während NAC ein größeres Spektrum an P-Formen extrahiert (Monocalciumphosphat, DCP, ca. 80% der Fe-/Al-Phosphate und basisches Ca-Phosphat [Hydroxylapatit, Tricalciumphosphat], vgl. KRATZ und SCHNUG, 2009). Mit Ausnahme des Knochenmehls und eines Ca-Phosphats von AshDec aus Klärschlamm-

asche weisen alle Produkte eine mittlere bis sehr gute Löslichkeit in Zitronensäure (mind. 50% von des Gesamt-P) auf. Dies deutet bereits darauf hin, dass es sich bei den bisher vorhandenen Recyclingprodukten mit Ausnahme der MAPs bzw. der mit Schwefelsäure teilaufgeschlossenen Produkte in erster Linie um mittel- bis langfristig wirksame Produkte handelt, die zur Grunddüngung, nicht aber zur Bereitstellung schnell verfügbarer P-Gaben geeignet sind.

Beim Vergleich der Löslichkeitsangaben verschiedener Autoren zu denselben oder ähnlichen Produkten (z.B. MAP, AshDec und BAM) fällt auf, dass die einzelnen Muster zum Teil recht unterschiedliche Löslichkeiten aufweisen (Tab. 9). Dies offenbart das derzeit noch ungelöste Problem der Herstellung homogener Produkte mit zuverlässig gleichbleibenden Qualitäten. Hier ist noch weitere technische Entwicklung erforderlich, insbesondere dort, wo die Produkte nicht direkt als solche auf den Acker gelangen, sondern als Rohstoffe für die Düngemittelindustrie dienen sollen.

Tab. 8. Gesamt-P-Gehalte (löslich in Mineralsäure oder Königswasser) in verschiedenen P-Recyclingprodukten, nach verschiedenen Autoren

Produkt ...		P-Gehalt (%)	Referenz
aus Abwasser/chemisch behandelt			
Ca-Phosphat	P-Roc	5,9–10,4	PINNEKAMP et al. (2011)
	P-Roc	11,1	CABEZA et al. (2011)
aus Klärschlamm/chemisch behandelt			
Ca-Phosphat	FIX-Phos	8,3	PINNEKAMP et al. (2011)
	SESAL	15,6	PINNEKAMP et al. (2011)
Mg-Phosphat	Seaborne	14,8	PINNEKAMP et al. (2011)
MAP	MAP Seaborne	11,0	CABEZA et al. (2011)
	MAP Gifhorn	17,5	PINNEKAMP et al. (2011)
	MAP Gifhorn	9,6	CABEZA et al. (2011)
	MAP Gifhorn (feucht)	3,9	KRATZ et al. (2010)
	MAP Stuttgart	17,0	PINNEKAMP et al. (2011)
	MAP Stuttgart	11,8	CABEZA et al. (2011)
	MAP Berlin	12,0	KRATZ et al. (2010)
aus Klärschlammasche (KSA)/thermisch behandelt			
KSA unbehandelt		10,0	SCHICK (2010)
KS verglüht	Sinter-P	11,3	CABEZA et al. (2011)
KS Schlacke	Kupolofenschlacke	2,9	CABEZA et al. (2011)
Ca-Phosphat	PASCH	7,1–10,9	PINNEKAMP et al. (2011)
	AshDec	7,0–10,0	PINNEKAMP et al. (2011)
	AshDec	7,2	SCHICK (2010)
	AshDec mit H ₂ SO ₄	6,5	SCHICK (2010)
Mg-Phosphat	BAM	8,9	PINNEKAMP et al. (2011)
	BAM	7,8	CABEZA et al. (2011)
	BAM	7,6	SCHICK (2010)
	BAM	9,3	KRATZ et al. (2010)
Al-Phosphat	Al-P	3,9–4,1	PINNEKAMP et al. (2011)
aus (Fleisch-)knochenmehl (FKM) oder FKM-Asche			
Knochenmehl		6,5	KRATZ et al. (2010)
Fleischknochenmehl		7,6	KRATZ et al. (2010)
FKM-Asche unbehandelt		11,3	KRATZ et al. (2010)
FKM-Asche		16,4	CABEZA et al. (2011)
Ca-Phosphat	Ulophos	17,1	PINNEKAMP et al. (2011)

Zur eingehenderen Beurteilung der Effizienz von P-Düngemitteln ist es erforderlich, Vegetationsversuche durchzuführen, in denen man üblicherweise die Parameter Trockenmasseertrag und P-Entzug prüft und diese mit jenen eines oder mehrerer herkömmlicher Referenzdünger vergleicht. Dazu eignen sich bekannte Produkte wie weicherdiges Rohphosphat (schlechte Löslichkeit und Verfügbarkeit) und (Triple-) Superphosphat (sehr gute Löslichkeit und Verfügbarkeit).

Im Folgenden werden die Ergebnisse verschiedener Versuchsansteller dargestellt und diskutiert.

SCHICK (2010) untersuchte die agronomische Effizienz von thermochemisch behandelten Klärschlammaschen

(AshDec/BAM Verfahren) in einem Gefäßversuch mit Mais. Betrachtet wurden die Parameter Trockenmasseertrag, P-Aufnahme und CAL-P-Gehalte im Versuchsboden nach der Ernte. Wie aus Tab. 9 ersichtlich, wiesen drei der vier Aschen so gut wie kein wasserlösliches P auf (< 0,1%). Durch den Teilaufschluss mit Schwefelsäure konnte der Gehalt der vierten Asche auf 34% P_{Wasser} erhöht werden. Während das in NAC und AAC lösliche P durch die thermochemische Behandlung reduziert wurde, stiegen die Gehalte an in Zitronen- und Ameisensäure löslichem P an. Die mit MgCl₂ behandelten Aschen erwiesen sich als besser löslich als jene, die mit CaCl₂ behandelt wurden.

Tab. 9. Löslichkeit von P-Recyclingprodukten in verschiedenen Extraktionsmitteln nach DüMV bzw. EU-VO 2003/2003, nach verschiedenen Autoren (W = Wasser, NAC = Neutrales Ammoniumcitrat, AAC = Alkalisches Ammoniumcitrat, ZS = Zitronensäure, AS = Ameisensäure; k.A. = keine Angabe)

Löslichkeit (% von P _{Mineralsäure}) in:	Produktname	W	NAC	AAC	ZS	AS	Referenz
aus Abwasser/chemisch behandelt							
Ca-Phosphat	P-RoC	0,05–0,16	k.A.	56–66	83–100	99–100	PINNEKAMP et al. (2011)
	P-RoC	4,1			49		CABEZA et al. (2011)
aus Klärschlamm/chemisch behandelt							
Ca-Phosphat	FIX-Phos	2,2	k.A.	39	97	96	PINNEKAMP et al. (2011)
	SESAL	2,4	k.A.	29	84	99	PINNEKAMP et al. (2011)
Mg-Phosphat	Seaborne	0,93	k.A.	91	74	91	PINNEKAMP et al. (2011)
MAP	MAP Seaborne	1,1			51		CABEZA et al. (2011)
	MAP Gifhorn	0,45	k.A.	100	85	77	PINNEKAMP et al. (2011)
	MAP Gifhorn	0,80			47		CABEZA et al. (2011)
	MAP Gifhorn (feucht)	0,40	88	80	84	57	KRATZ et al. (2010)
	MAP Stuttgart	1,2	k.A.	67	80	93	PINNEKAMP et al. (2011)
	MAP Stuttgart	1,9			44		CABEZA et al. (2011)
	MAP Berlin	0,73	92	6,3	100	97	KRATZ et al. (2010)
aus Klärschlamm (KSA)/thermisch behandelt							
KSA unbehandelt		0,03	40	26	42	28	SCHICK (2010)
KS verglüht	Sinter-P	0,3			35		CABEZA et al. (2011)
KS Schlacke	Kupolofenschlacke	k.A.			k.A.		CABEZA et al. (2011)
Ca-Phosphat	PASCH	0,02–2,3	k.A.	52–100	89–95	85–100	PINNEKAMP et al. (2011)
	AshDec	6,2	k.A.	41	46	42	PINNEKAMP et al. (2011)
	AshDec	0,04	13	0,39	90	82	SCHICK (2010)
	AshDec mit H ₂ SO ₄	34	37	40	100	78	SCHICK (2010)
	Mg-Phosphat	BAM	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	BAM	6,4			31		CABEZA et al. (2011)
	BAM	0,07	28	7,1	92	84	SCHICK (2010)
	BAM	0,13	21	4,8	65	75	KRATZ et al. (2010)
Al-Phosphat	Al-P	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	PINNEKAMP et al. (2011)
aus (Fleisch-)knochenmehl (FKM) oder FKM-Asche							
Knochenmehl		0,93	27	8,5	34	76	KRATZ et al. (2010)
Fleischknochenmehl		0,99	48	16	74	91	KRATZ et al. (2010)
FKM-Asche unbehandelt		0,04	15	7,0	50	48	KRATZ et al. (2010)
FKM-Asche		0,10			24		CABEZA et al. (2011)
Ca-Phosphat aus FKM-Asche	Ulophos	0,08	k.A.	81	60	75	PINNEKAMP et al. (2011)

Wie aus Tab. 10 hervorgeht, bestanden für alle Extraktionsmittel außer Wasser signifikante und enge Korrelationen mit dem Trockenmasseertrag. Nur NAC (mit und ohne vorhergehende Wasserextraktion) zeigte signifikante und enge Korrelationen mit der pflanzlichen P-Aufnahme und CAL-P im Boden. Für die Beurteilung stark apatithaltiger Düngeprodukte aus KSA erscheint dieses Extrakt daher am besten geeignet. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen schon

CHIEN und HAMMOND (1978) sowie LÉON et al. (1986), die die agronomische Effizienz von Rohphosphaten prüften.

Korrelationen zwischen Standardmethoden für Dünger-P (W, NAC, AAC, ZS, AS und Mineralsäure [MS]) und der Pflanzenaufnahme von P bei verschiedenen Recycling-P-Düngern wurden auch in einem modifizierten Neubauer-versuch von KRATZ et al. (2010) untersucht. Folgende Produkte wurden betrachtet:

Tab. 10. Korrelationen (Pearson) zwischen P-Löslichkeiten (% von P_{KW}) und Düngereffekt (Trockenmasseertrag, P-Aufnahme und P_{CAL} -Gehalte im Boden nach der Ernte) thermochemisch behandelter Klärschlammmaschen (SCHICK, 2010)

Extrakt	Trockenmasseertrag	P-Aufnahme	P_{CAL}
	Korrelationskoeffizient (r)	Korrelationskoeffizient (r)	Korrelationskoeffizient (r)
Wasser	0,645	0,443	0,469
Alkalisches Ammoniumcitrat	0,794*	0,631	0,662
Wasser + neutrales Ammoniumcitrat	0,885**	0,817*	0,930**
Neutrales Ammoniumcitrat	0,801*	0,869**	0,944**
Zitronensäure, 2% (w/v)	0,952**	0,585	0,696
Ameisensäure, 2% (w/v)	0,791*	0,409	0,545

* = $p < 0,05$ ** = $p < 0,005$ **Recyclingprodukte**

- 1 Organischer NP-Dünger aus Knochenmehl (OrgNP_{BM})
- 2 Organischer NP-Dünger aus Fleischknochenmehl Kat. 3 (Org NP_{MBM})
- 3 Asche aus Fleischknochenmehl Kat. 1 (MBMA)
- 4 Organischer NP-Dünger aus der Klärschlammfällung (OrgNP_{SS})
- 5 MAP Berlin aus Abwasserfällung (Struvit)
- 6 P-Dünger aus thermochemisch behandelter Klärschlammmasche (P-SSA_{TC})

Mineralische Kontrolldünger

- 7 laborreines Monocalciumphosphat (MCP)
- 8 Single-Superphosphat (SSP)
- 9 Diammoniumphosphat (DAP)
- 10 teilaufgeschlossenes Rohphosphat (tg RP)

Auch hier lag die Wasserlöslichkeit der betrachteten Produkte nahe Null (s. Tab. 11). Während die beiden Fäl-

lungsprodukte aus Klärschlamm sowie die thermochemisch behandelte KSA hohe Löslichkeiten in NAC aufwiesen, zeigten Fleischknochenmehl und Knochenmehl nur in Zitronen- bzw. Ameisensäure mittlere Löslichkeiten. Auch die Korrelationen der Löslichkeiten mit der P-Aufnahme waren nur von mäßiger Stärke, aber in den meisten Fällen signifikant (Tab. 8). Die stärksten Korrelationen wurden für P-Aufnahme (Sprosse und Wurzeln) und Zitronensäure gefunden, gefolgt von NAC (mit oder ohne vorhergehender Wasserextraktion). Dies spiegelt die niedrige Löslichkeit der getesteten Produkte wider. Im Vergleich mit den bereits von SCHICK (2010) untersuchten KSA zeigte sich erneut die zumindest zum Zeitpunkt dieser Untersuchungen noch heterogene chemische Qualität dieser Produkte, die eine allgemein gültige Aussage über die Eignung verschiedener Extraktionsmittel ebenso erschwert wie einen Einsatz dieser Produkte als Rohstoff in der Herstellung von Düngemitteln.

Tab. 11. Pearson Korrelationskoeffizienten (r) für die Beziehung zwischen P-Löslichkeit in verschiedenen chemischen Extraktionsmitteln und P-Aufnahme im Neubauversuch (aus KRATZ et al., 2010)

	Sprosse 1. Schnitt	Sprosse 2. Schnitt	Sprosse 3. Schnitt	Wurzeln	Sprosse 1.-3. Schnitt + Wurzeln
n	84	81	76	84	76
MinS-P (%)	-0,550**	0,303**	0,222	-0,365**	-0,150
AS (%MinS)	0,414**	0,241*	0,469**	0,249*	0,395**
ZS (%MinS)	0,590**	0,277*	0,488**	0,530**	0,722**
NAC _{EU} (%MinS)	0,479**	0,271*	0,480**	0,540**	0,625**
W + NAC _{FN} (%MinS)	0,588**	0,086	0,283*	0,518**	0,550**
AAC (%MinS)	0,611**	-0,170	-0,060	0,516**	0,385**
W (%MinS)	0,865**	-0,323**	-0,093	0,461**	0,387**

Signifikanzen: ** = $p < 0,01$, * = $p < 0,05$

MinS = Mineralsäure, AS = Ameisensäure, ZS = Zitronensäure, NAC = Neutrales Ammoniumcitrat (EU = EU-Methode, FN = Methode nach Fresenius-Neubauer), AAC = Alkalisches Ammoniumcitrat, W = Wasser

Während hinsichtlich der Trockenmasseerträge keine eindeutige Bewertung möglich war (Daten hier nicht gezeigt), erbrachte die P-Aufnahme eine deutliche Differenzierung zwischen Recyclingprodukten und zur Kontrolle eingesetzten verschiedenen Mineraldüngern (MCP, SSP, teilaufgeschlossenes RP und DAP). Tab. 12 zeigt die P-Aufnahmen sowie die Ausnutzungsgrade in den verschiedenen Düngungsvarianten. Deutlich ist zu erkennen, dass die Varianten mit Mineraldünger (Nrn. 8–11) fast durchweg höhere P-Aufnahmen zeigten und anders als die Varianten mit Recyclingprodukten (Nrn. 1–6) auch auf eine Steigerung der P-Rate noch mit weiterer P-Aufnahme reagierten. Unter den Recyclingprodukten zeigte sich das MAP Berlin (Struvit) als überlegen, wenn gleich der Unterschied zu den anderen Produkten in vielen Fällen nicht signifikant war. Die hohen Ausnutzungsgrade sind auf die spezielle Versuchsanlage des Neubauer Versuches zurückzuführen, der mit einem sehr weiten Saatgut:Boden-Verhältnis darauf ausgerichtet ist, dass der gesamte Nährstoffvorrat im Verlauf des Versuches aufgebraucht wird.

Eine Untersuchung verschiedener P-Recyclingprodukte im zweijährigen Gefäßversuch mit Mais auf einem sandigen und einem lehmigen Boden wurde von CABEZA et al. (2011) durchgeführt. Darin wurden vier Produkte aus chemischer Rückgewinnung (Ca-P; MAP Seaborne, MAP Gifhorn und MAP Stuttgart) sowie vier aus thermischer Behandlung (Sinter-P (Glühphosphat), Kupolofenschlacke aus KS, thermochemisch behandelte KSA (BAM) und Fleischknochenmehlasche (FKMA)) mit TSP und Rohphosphat verglichen. Als Effizienzkriterium wurde die P-Aufnahme betrachtet. Hierbei wurde festgestellt, dass die chemisch gewonnenen Produkte, insbesondere die drei

MAPs, den thermischen (ebenso wie dem Rohphosphat) in Bezug auf die P-Aufnahme im ersten Jahr deutlich überlegen waren und an die P-Aufnahme des TSP heranreichten, während dieser Unterschied im zweiten Jahr geringer und in einigen Fällen nicht mehr signifikant war. Von den thermischen Produkten schnitten das Sinter-P (nur bei niedrigem Boden-pH auf Sand) sowie die Kupolofenschlacke (v.a. auf dem neutralen Lehmboden) besser ab als die BAM-KSA und die FKMA. Die Autoren fanden nur schwache Korrelationen zwischen P-Aufnahme und P-Löslichkeit der Produkte in Wasser (bei durchweg geringen Löslichkeiten zwischen 0,1–6,4% von P-gesamt) oder Zitronensäure (Löslichkeiten der thermischen Produkte 24–35%, chemische Produkte: 44–51% von P-gesamt). Dagegen zeigte sich eine enge und signifikante Korrelation zwischen P-Aufnahme und isotopisch austauschbarem P (IEP), welches hier als Maß für die Menge an P verwendet wurde, die in der Bodenlösung vorliegt und mit dem Boden reagiert und somit pflanzenverfügbar ist. Die verbesserte P-Aufnahme bei den thermischen Produkten im zweiten Jahr wurde als typisch für die in diesen Produkten vorherrschenden langsam verfügbaren P-Formen erkannt. Die geringe Effektivität der KSA und FKM wurde auf die gering löslichen P-Komponenten Chlorapatit und Stanfieldit sowie die Gegenwart von Al und Fe zurückgeführt. Entsprechend empfahlen auch CABEZA et al. (2011), solche Ascheprodukte eher als Rohstoff für die Düngemittelindustrie weiter zu verarbeiten, was jedoch deren Verbesserung hinsichtlich einer homogenen und stabilen Zusammensetzung und Qualität voraussetzt.

Eine weitere umfangreiche Untersuchung verschiedener Recyclingprodukte wurde von PINNEKAMP et al. (2011) vorgelegt. Hier wurden zweijährige Gefäßversuche mit

Tab. 12. Mittlere Netto-P-Aufnahmen und Ausnutzungsgrade (AG, in Prozent der P-Gabe) durch den gesamten Trockenmasseertrag (Sprosse und Wurzeln) für die verschiedenen P-Düngervarianten (Var.) im Neubauer Versuch von KRATZ et al. (2010)

P Stufe 20			P Stufe 40			P Stufe 60		
Var.	P Aufnahme (mg)	AG (%)	Var.	P Aufnahme (mg)	AG (%)	Var.	P Aufnahme (mg)	AG (%)
1	7,9 a	40	1	8,0 a	20	1	8,3 a	14
3	8,1 a	40	3	9,4 ab	23	3	9,1 ab	15
2	9,4 a	47	6	11,5 ab	29	6	10,9 abc	18
6	9,5 ab	47	4	11,8 ab	30	2	12,5 abc	21
5	10,0 ab	50	2	12,1 b	30	4	13,9 bc	23
4	10,3 ab	51	5	12,7 b	32	5	15,1 c	25
11	13,0 bc	65	9	17,8 c	44	11	24,0 d	40
9	15,7 cd	78	8	18,4 c	46	9	24,7 d	41
8	16,0 cd	80	11	21,5 cd	54	8	25,5 d	42
10	18,3 d	92	10	24,2 d	61	10	29,3 d	49

Verschiedene Buchstaben weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den Varianten hin (Tukey, $p < 0,05$)

1 = orgNP_{BM}, 2 = OrgNP_{MBM}, 3 = MBMA, 4 = OrgNP_{SS} (Gifhorn), 5 = MAP Berlin, 6 = P-SSA_{TC}, 8 = laborreines MCP, 9 = SSP, 10 = DAP, 11 = tg RP

Haupt- und Nachfrucht (beides Mais) durchgeführt, wobei folgende Produkte zum Einsatz kamen:

- a) Aus Abwasserrecyclat: P-RoC 2008, P-RoC 2009
- b) Aus Klärschlammrecyclat: MAP Gifhorn, MAP Stuttgart, Seaborne, FIX-Phos, SESAL
- c) Aus Klärschlammasche: Al-P, Al-P entfrachtet, PASCH I-III, AshDec 2008, AshDec 2009, BAM
- d) Aus Tiermehlasche: Ulophos

Zum Vergleich wurden auch Varianten ohne P, mit weicherdigem Rohphosphat und TSP angesetzt. In einem parallel angesetzten Inkubationsversuch ohne Pflanzen zeigte sich, dass – je nach Testboden – einige der Produkte (P-RoC 2008 u. 2009, PASCH I-III, Al-P entfrachtet, FIX-Phos; auf Lehm) eine ähnlich starke Auswirkung auf den CAL-P-Gehalt des Bodens hatten wie TSP, während andere (Al-P, SESAL, AshDec 2009; auf Sand) sich in ihrem P-CAL-Gehalt nicht von der P-Null-Variante unterschieden. Hinsichtlich der Trockenmasseerträge lagen viele der getesteten Produkte auf ähnlichem Niveau wie die TSP-Variante. Bei einigen Produkten (MAP Gifhorn, MAP Stuttgart, P-RoC 2008, Seaborne, PASCH I, Ulophos) wurden auf dem Lehmboden sogar mehr als 30% höhere Erträge erzielt als bei TSP. Die geringsten Erträge erbrachten SESAL, Al-P und AshDec 2009. Die P-Entzüge in diesem Versuch ergaben jedoch kein eindeutiges Bild: Mit Ausnahme der ersten Versuchsreihe auf Sand wiesen die Varianten Rohphosphat und TSP nicht die erwarteten Unterschiede im P-Entzug auf, entweder lagen sie auf gleichem Niveau, oder die TSP-Variante zeigte sogar geringere Entzüge als die Rohphosphatvariante. Teilweise bestand auch zur P-Null-Variante kein signifikanter Unterschied. Während die Versuchsansteller die Gründe in einer ungünstigen Lagerung ihres Versuchsbodens suchten, erscheint es doch vielmehr so, als habe der gute P-Versorgungsgrad der drei Versuchsböden hier den möglichen Einfluss der Düngung überlagert: Der Sand wies zu Versuchsbeginn einen P-CAL-Gehalt von 57 mg/kg P-CAL auf, der Lösslehm I 49 mg/kg, der Lösslehm II wenigstens nur noch 33 mg/kg. Somit lagen die ersten beiden Böden in Gehaltsklasse C nach VDLUFA, waren also optimal mit P versorgt, der Lösslehm II lag immerhin noch in Gehaltsklasse B. Es ist somit wahrscheinlich, dass hier ein unbekannter Anteil des Bodenvorrats an leicht verfügbarem P zur Versorgung der Testpflanzen beigetragen hat, wodurch Unterschiede in der Wirksamkeit der Dünger nivelliert wurden. Daher ist die Aussagekraft dieser Versuchsreihe fraglich. Dies gilt umso mehr, als laut Versuchsbeschreibung der notwendige Stickstoffausgleich nicht in Abhängigkeit vom N-Gehalt der Versuchsprodukte durchgeführt wurde. Vielmehr erhielten alle Varianten unabhängig von der bereits mit dem Versuchsdünger zugeführten N-Menge eine gleich hohe N-Gabe. Dies könnte auch für die überdurchschnittlich gute Ertragswirkung ammoniumstickstoffhaltiger Produkte (MAP und Seaborne) eine entscheidende Rolle gespielt haben.

Anders als Produkte aus der Abwasserreinigung und Schlachtnebenprodukte werden **Wirtschaftsdünger (in-**

klusive Gärreste) häufig bereits innerbetrieblich genutzt. Daher besteht am P-Recycling speziell aus diesem Rohstoff kein großes Interesse. Allerdings sollten die Anteile der anfallenden Wirtschaftsdünger, die nicht zur Deckung des Nährstoffbedarfes auf dem Betrieb, bzw. auf einem benachbarten Betrieb dienen, ebenfalls weiter behandelt werden, um insbesondere das enthaltene P nutzen zu können. Da Gülle in der Regel ein für die Pflanzenernährung ungünstig enges N:P-Verhältnis besitzt und so eine auf den N-Bedarf ausgerichtete Düngung unweigerlich zu P-Überschüssen im Boden führt, ist eine Separierung sinnvoll. Die Auftrennung von Gülle in eine P-reiche feste Phase und N-reiche flüssige Phase kann zur Reduzierung der P-Akkumulation im Boden beitragen und gleichzeitig die bessere Nutzung der in der Gülle enthaltenen Nährstoffe gewährleisten. Typische N:P-Verhältnisse der festen und flüssigen Phase einer Schweinegülle (Ursprungsverhältnis: 4,4:1) nach der Zentrifugierung liegen beispielsweise bei 1,1:1 in der festen Phase und bei 16:1 in der flüssigen Phase (GILKINSON und FROST, 2007).

Während eine Verwendung der flüssigen Fraktion idealer Weise direkt vor Ort als N-Quelle erfolgt, kann die feste Phase in Gebiete mit nur sehr geringer Viehbesatzdichte und hohem P-Bedarf transportiert werden. Hier zeigt sich noch ein weiterer Vorteil des Trennungsprozesses: Der Transport der festen Phase ist aufgrund des deutlichen Masseverlustes deutlich kostengünstiger als ein Transport unbehandelter Gülle, und somit kann sie auch deutlich flexibler eingesetzt werden. Neben einer direkten Verwendung als P-Quelle ist z.B. der Einsatz zur Biogasgewinnung oder aber eine Weiterbehandlung wie von Klärschlamm, in Form von Monoverbrennung möglich.

Bioabfallkomposte spielen im Vergleich zu den anderen organischen P-Quellen nur eine untergeordnete Rolle hinsichtlich ihres Beitrages zum Gesamt-P-Potential (siehe Tab. 6). Aufgrund ihres vergleichsweise geringen P-Gehaltes sind sie aus Sicht der Pflanzenernährung auch eher als Quelle organischer Substanz und erst in zweiter Linie als Nährstofflieferanten zu betrachten. Zwar liegt der Phosphor im Bioabfallkompost zu 55–95% in anorganischer Form vor. Nur ca. 3–20% davon sind jedoch wasserlöslich. 20–50% liegen in Form relativ schwer löslicher, schwach kristalliner Ca-P-Verbindungen (Apatit, Octocalciumphosphat) vor. Ca. 20–40% des Gesamt-P sind löslich in CAL (FROSSARD, 2002; TIMMERMANN et al., 1999; beide zitiert nach KRATZ und SCHNUG, 2009).

Fazit

Infolge einer Neubewertung der weltweiten P-Vorräte stieg die Schätzung der wirtschaftlich ausbeutbaren P-Reserven im Jahr 2011 auf das Vierfache der für 2010 geschätzten Menge. Die Betonung liegt hierbei auf „wirtschaftlich ausbeutbar“, denn mit steigenden Marktpreisen für P vergrößern sich dadurch zwangsläufig auch die Reserven. Durch die Neuberechnung und den nunmehr größe-

ren Zeithorizont ändert sich aber nichts an der Tatsache, dass die mineralischen P-Ressourcen endlich und entsprechend nachhaltig zu bewirtschaften sind. Dies kann nur durch ein konsequentes Nährstoffrecycling aus alternativen erneuerbaren Quellen realisiert werden. Derzeit machen mineralische P-Dünger etwa ein Viertel des P-Verbrauchs der Landwirtschaft in Deutschland aus. Rund die Hälfte des Bedarfs wird über Wirtschaftsdünger gedeckt, ein Zehntel liefern Klärschlämme und Fleischnochenmehle. Theoretisch könnte bereits heute der P-Bedarf der deutschen Landwirtschaft vollständig mit alternativen P-Quellen abgedeckt werden. Allerdings muss neben dem gesamten P-Potential auch die Pflanzenverfügbarkeit des Recycling-P berücksichtigt werden. Anders als vollaufgeschlossene Mineraldünger besitzen unbehandelte Recyclingprodukte meist eine nur sehr geringe Wasserlöslichkeit und in den meisten Fällen eine mittlere bis sehr gute Löslichkeit in Zitronensäure (mindestens 50% des Gesamt-P). Um eine 100%ige Ausnutzung zu gewährleisten, sollte das enthaltene P allerdings mindestens mehr oder weniger vollständig in neutralem Ammonicitrat löslich sein. Daher ist häufig eine entsprechende Weiterbehandlung unumgänglich, um so eine ausreichende Pflanzenverfügbarkeit zu erzielen. Neben einer guten Düngewirkung ist auch der Aspekt der Wirtschaftlichkeit zu beachten, hier muss ein Recyclingprodukt mit konventionellen Düngern konkurrenzfähig sein. Diese Voraussetzungen sind bisher nur bei einzelnen Ausnahmen, wie z.B. Struvit (MAP) aus den Berliner Wasserwerken, gegeben.

Literatur

- ANONYM, 2013: Deutschlands Zukunft gestalten. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 18. Wahlperiode. Abschließende Fassung vom 27. November 2013. [www.tagesschau.de/inland/koalitionsvertrag136.pdf] (aufgerufen am 18.02.2014).
- ADAM, C., 2008: Optionen der landwirtschaftlichen Verwertung von P aus der Abwasserreinigung. Technische Möglichkeiten. Vortrag Braunschweiger Nährstofftage 11.11.2008: „Ressourcen schonender Einsatz von Phosphor in der Landwirtschaft“.
- ADAM, C., 2010: Phosphorrückgewinnung im Bereich der kommunalen Abwasserreinigung. Vortrag ProcessNet. Sitzung des Fachausschusses Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung. 7.-8.10.2010, Fichtenau-Neustädlein.
- ADAM, C., C. VOGEL, S. WELLENDOF, J. SCHICK, S. KRATZ, E. SCHNUG, 2009: Phosphorus recovery by thermo-chemical treatment of sewage sludge ash – results of the European FP6 project SUSAN. Proceedings of the International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams. Vancouver, Kanada, 10.–13. Mai 2009.
- ALBERT, E., 2008: Optionen der landwirtschaftlichen Verwertung von P aus Schlachtnebenprodukten. Vortrag Braunschweiger Nährstofftage 11.11.2008: Ressourcen schonender Einsatz von Phosphor in der Landwirtschaft.
- BAYERLE, N., 2009: P-P-Recycling in Gifhorn with the modified Seaborne process. Baltic 21-Konferenz “Phosphorus Recycling and Good Agricultural Practice”, 20.–30. September 2009, Berlin.
- BERG, U., 2005: P-RoC – Ein Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Abwässern durch Abscheidung von Calciumphosphat-Mineralphasen an Tobermorit. 75. Darmstädter Seminar Abwassertechnik. Schriftenreihe WAR 167, Darmstadt, 2005.
- BLOEM, E., S. KRATZ, (unveröffentlicht) Organic Xenobiotics.
- BMELV, 2012: Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland, Münster-Hiltrup, Landwirtschaftsverlag.
- Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK), 2013: BGK Information. Humus- und Düngewert von Kompost und Gärprodukten.
- BRITTON, A., 2009: P-Recovery in North America – Ostara’s Pearl Process. Baltic 21-Konferenz “Phosphorus Recycling and Good Agricultural Practice”, 20.–30. September 2009, Berlin.
- CABEZA, R., B. STEINGROBE, W. RÖMER, N. CLAASSEN, 2011: Effectiveness of recycled P products as P fertilizers as evaluated in pot experiments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 91, 173-184.
- CRU, 2003: The Competitiveness of Phosphate Fertilizer Producers to 2020: Coping with Changing Production Costs, Resource Availability and Market Structures. CRU Group international of British Sulphur Consultants. Confidential.
- DESTATIS (Statistisches Bundesamt), 2011: Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in landwirtschaftlichen Betrieben – Erhebung zur Wirtschaftsdünger- ausbringung. Fachserie 3, Reihe 2.2.2.
- DESTATIS (Statistisches Bundesamt), 2013a: Produzierendes Gewerbe – Düngemittelversorgung. Wirtschaftsjahr 2010/2013. Fachserie 4, Reihe 8.2.
- DESTATIS (Statistisches Bundesamt), 2013b: 2012: 5% weniger Klärschlamm entsorgt. Pressemitteilung vom 12. Dezember 2013 – 421/13.
- DESTATIS (Statistisches Bundesamt), 2013c: Umwelt. Abfallentsorgung 2011. Fachserie 19, Reihe 1.
- DESTATIS (Statistisches Bundesamt), 2013d: Umwelt. Abwasserbehandlung – Klärschlamm – Ergebnisbericht 2010.
- EDIXHOVEN, J.D., J. GUPA, H.H.G. SAVENLE, 2013: Recent revisions of phosphate rock reserves and resources: reassuring or misleading? An in-depth literature review of global estimates of phosphate rock reserves and resources. *Earth System Dynamic Discussions* 4, 1005-1034.
- GIESEN, A., 2009: P-Recovery with the Crystalactor process. Baltic 21-Konferenz “Phosphorus Recycling and Good Agricultural Practice”, 20.–30. September 2009, Berlin.
- GILKINSON, S., P. FROST, 2007: Evaluation of mechanical separation of pig and cattle slurries by a decanting centrifuge and a brushed screen separator. <http://www.afbini.gov.uk/evaluation-of-mechanical-separation-of-pig.pdf> (aufgerufen am 18.02.2014).
- HEINZMANN, B., A. LENGEMANN, 2012: Vom Betriebsproblem zum marktfähigen Produkt – Phosphorrückgewinnung in der Kläranlage Waßmannsdorf. Vortrag 31. Berliner Wasserwerkstatt 23. August 2012: Klärschlamm und Verwertung – Neue Wege zur Rückgewinnung der endlichen Ressource Phosphor.
- HEINZMANN, B., A. LENGEMANN, 2013: Die Berliner Pflanze – MAP – Kristallisationsverfahren der Berliner Wasserbetriebe. Vortrag Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm am 9. Oktober 2013.
- HERRMANN, L., 2014: (Persönliche Kommunikation).
- IVA, 2013: Wichtige Zahlen Düngemittel, Produktion, Markt, Landwirtschaft 2012–2013, Frankfurt am Main, Industrieverband Agrar.
- KRATZ, S., S. HANEKLAUS, E. SCHNUG, 2010: Chemical solubility and agricultural performance of P-containing recycling fertilizers. *Landbauforschung – vTI Agriculture and Forestry Research* 60(4), 227-240.
- KRATZ, S., E. SCHNUG, 2006: Vergleichende Bewertung der Nähr- und Schadstoffgehalte von Düngemitteln und Klärschlamm. In: PINNEKAMP, J., H. FRIEDRICH (Hrsg.): Siedlungswasser- und Siedlungsabfallwirtschaft Nordrhein-Westfalen. Klärschlamm entsorgung, eine Bestandsaufnahme, S. 357-361.
- KRATZ, S., E. SCHNUG, 2009: Zur Frage der Löslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor in Düngemitteln. *Journal für Kulturpflanzen* 61(1), 2-8.
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 2013: Nährstoffgehalte in organischen Düngern. Stand 26.02.2014. [<http://www.lwk-niedersachsen.de/download.cfm/file/340,732c9a47-b3db-5e0ca107d4633d2785ec~pdf.html>] (aufgerufen am 25.03.2014).
- MONTAG, D., H.J. PLUTA, D. STEFFENS, C. KABBE, K. SEVERIN, R. REIFENSTUHL, I. LEIFERT, B. KEHRES, C. WAIDA, A. HECK, 2013: Düngemittel mit Recycling P. Themenpapier.
- MONTAG, D., 2008: Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung – Entwicklung eines Verfahrens zur Integration in kommunalen Kläranlagen. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- PINNEKAMP, J., W. EVERDING, K. GETHKE, D. MONTAG, K. WEINFURNER, C. SARTORIUS, J. VON HORN, F. TETTENBORN, S. GÄTH, C. WAIDA, H. FEHRENBACH, J. REINHARDT, 2011: Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland (PhoBe). Abschlussbericht.
- ROSEMARIN, A., J. SCHRÖDER, L. DAGERSKOG, D. CORDELL, B. SMIT, 2011: Future supply of phosphorus in agriculture and the need to maximise efficiency of use and reuse, IFD proceedings 685, Leek (UK).

- SCHEIDIG, K., J. MALLON, M. SCHAAF, 2010: Zukunftsfähige Klärschlamm-Verwertung. KA – Korrespondenz Abwasser. Abfall 57, Nr. 9, 902-915.
- SCHICK, J., 2010: Untersuchungen zur P-Düngerwirkung und Schwermetallgehalten thermochemisch behandelter Klärschlammaschen, Dissertation, TU Braunschweig.
- SCHOLZ, R.W., F.W. WELLMER, 2012: Approaching a dynamic view on the availability of mineral resources: what we may learn from the case of phosphorus? *Global Environmental Change* **23**, 11-27.
- VAN KAUWENBERGH, S.J., 2010: World Phosphate Rock Reserves and Resources. IFDC Report.
- WEILAND, P., 2010: Flaschenhals Gärrestverwertung. Vortrag IFA-Tulln, 30. September 2010.
- WENDLAND, M., E. ATTENBERGER, 2009: Wirtschaftsdünger und Gewässerschutz. Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern in der Landwirtschaft. LfL-Information.

Webseiten

- <http://www.stn-vvtn.de> (letzter Aufruf: 6.02.2014)
- <http://www.stonegateagricom.com/s/PhosphatePrices.aspx> (letzter Aufruf: 18.02.2014)
- http://ycharts.com/indicators/morocco_phosphate_rock_pricev (letzter Aufruf: 18.02.2014)

Rechtsnormen

- EU-VO 1774/2002 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 3. Oktober 2002 mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte (ABl. L 273 vom 10.10.2002, S. 1)
- Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV) vom 16. Dezember 2008. BGBl. I Nr. 6-0 S. 2524ff.)