

P-RÜCKGEWINNUNG UND RECYCLING IN EUROPA – SCHLUSSFOLGERUNGEN AUS DEM PROJEKT P-REX

Christian Kabbe und Fabian Kraus, Berlin

1 EINLEITUNG

Dieser Beitrag vermittelt einen Überblick über die im Rahmen des EU Projektes P-REX erzielten Ergebnisse und Schlussfolgerungen. Neben der Bewertung von praxisrelevanten Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad und den jeweiligen Recyclaten geht es vor allem auch um Aspekte zur flächendeckenden Implementierung und Marktentwicklung. Vor allem integrative Ansätze, die auf eine bessere Ausnutzung der bereits vorhandenen Infrastruktur zur Optimierung des Phosphorrecyclings abzielen, bieten vielversprechende und vor allem kurzfristig umsetzbare Lösungen. Um jedoch Anreize für deren Umsetzung zu schaffen, bedarf es Entscheidungen und verlässlicher politischer Weichenstellungen, da unter gegenwärtigen Rahmenbedingungen eine technische Phosphorrückgewinnung aus Abfallströmen nur attraktiv ist, wenn sie mit operativen Vorteilen für die Anlagenbetreiber einhergeht. Zudem ist die Brücke zwischen Rückgewinnung und nährstofflichem Recycling auszubauen, denn ohne Nachfrage (Markt) und entsprechende Qualität der Recyclate wird es nicht gelingen, diese in den Nährstoffkreislauf zurückzuführen.

2 PHOSPHOR – DER FLASCHENHALS DES LEBENS

Welche Rolle der Ressource Phosphor für das Leben auf dem Planeten Erde zukommt wurde bereits im April 1959 hinlänglich von Isaac Asimov in seinem Essay „Life's bottleneck“ (Asimov 1959) dargestellt. In der Terminologie des Zeitgeistes lässt es sich auch so formulieren: Phosphor begrenzt das Biomassepotential unseres Planeten. D. h. angesichts einer stetig wachsenden Erdbevölkerung werden wir uns eines Tages entscheiden müssen: Setzen wir die limitierte Ressource Phosphor ein, um den Hunger der Menschheit zu stillen oder ver(sch)wenden wir diese lebenswichtige Ressource lediglich zur Stillung unseres Energiehungers? Es ist davon auszugehen, dass jene, die bereits heute unter ökonomisch verursachter Phosphorknappheit leiden nicht in dieser Angelegenheit zu Wort kommen werden.

Während wir in der industrialisierten Welt in Überfluss schwelgen und darüber debattieren, ob bzw. wann eine effizientere Ressourcennutzung durch z. B. Recycling aus Abfallströmen ökonomisch sein kann, sterben Menschen durch Ernährungsmangel der unter anderem dadurch verursacht wird, dass sie sich Düngemittel einfach nicht leisten können. Unser *zu viel* steht einem *zu wenig* bei anderen gegenüber. Das anzustrebende Verteilungsoptimum liegt also genau dazwischen.

Global beläuft sich die Ressourceneffizienz für Phosphor entlang der Versorgungskette von der Phosphatmine bis hin zum Nahrungsmittelverzehr auf gerade einmal 20 % [Schröder et al. 2010].

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Davon ausgehend, dass 90 % des als Phosphaterz in Minen abgebauten Phosphors für die Produktion von Nahrungsmitteln eingesetzt werden, wurden im Jahr 2013 von den 225 Millionen Tonnen abgebauten Phosphaterzes [USGS 2015] 203 Millionen Tonnen für die Erzeugung von Nahrungsmitteln eingesetzt, von denen nur ca. 45 Millionen Tonnen veredelt in Form von Lebensmitteln auf unsere Teller gelangten. Diese Zahlen verdeutlichen, dass die oben genannte Wertschöpfungskette ein enormes Ressourceneffizienzsteigerungspotential in sich birgt. Doch was nützt es, nur von Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit zu reden? Die folgenden Worte von *Johann Wolfgang von Goethe* sind aktueller denn je:

„Es ist nicht genug zu wissen, man muss auch anwenden;

Es ist nicht genug zu wollen, man muss auch tun.“

Der Schlüssel liegt also im Zusammenwirken von Dichtern und Denkern mit Machern und dem Mut nötige Entscheidungen zu treffen.

Ein Ansatzpunkt unter vielen, der die Möglichkeit des tatsächlichen Handelns bietet ist die Rückgewinnung des Phosphors aus Abfallströmen und die Rückführung in seiner Funktionalität als Nährstoff in die Nahrungskette (Nährstoffrecycling). Im Reigen der Abfallströme enthalten in industrialisierten Staaten vor allem Gülle, Abwasser und Bioabfälle substantielle Mengen dieses Nährstoffes, die derzeit noch nicht bzw. nur unzureichend genutzt werden. Das EU Projekt P-REX (www.p-rex.eu) widmet sich speziell der P-Rückgewinnung und dem P-Recycling aus dem Abwasserpfad und der Verknüpfung mit Akteuren entlang der nachfolgenden Versorgungskette bis hin zum Endverbraucher. Ein zweiminütiger Animationsfilm, produziert im Rahmen des Projektes, vermittelt anschaulich worum es bei diesem Projekt geht: <http://vimeo.com/84936509>.

3 PHOSPHORRÜCKGEWINNUNG UND –RECYCLING AUS DEM ABWASSERPFAD

Nachdem der traditionelle Weg des Nährstoffrecyclings aus dem Abwasserpfad in Form der Klärschlammausbringung in der Landwirtschaft nicht nur hierzulande, sondern auch in anderen Mitgliedstaaten der Europäischen Union kritisch hinterfragt oder in einigen Ländern sogar strikt verboten wurde, gilt es umso mehr Alternativen zu finden, um den in diesem Stoffstrom enthaltenen Nährstoff Phosphor dennoch in den Nährstoffkreislauf zurückführen zu können. Abbildung 1 spiegelt die Klärschlamm Entsorgung bzw. –verwertung in den Mitgliedsstaaten der EU-27 und der Schweiz im Jahr 2010 wider. Das Spektrum bewegt sich zwischen 100 % Verbrennung (CH, NL) bzw. über 90 % stofflicher Verwertung in der Landwirtschaft (LU). Es sei darauf hingewiesen, dass die Darstellung nur die in den jeweiligen Ländern tatsächlich entsorgten bzw. verwerteten Klärschlammengen reflektiert. Nicht ersichtlich ist zum Beispiel die grenzüberschreitende Entsorgung, wie im Fall des

Klärschlammexports vom Königreich der Niederlande nach Deutschland (Entkopplung Ort des Anfalls vom Ort der Entsorgung/Verwertung).

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik" am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

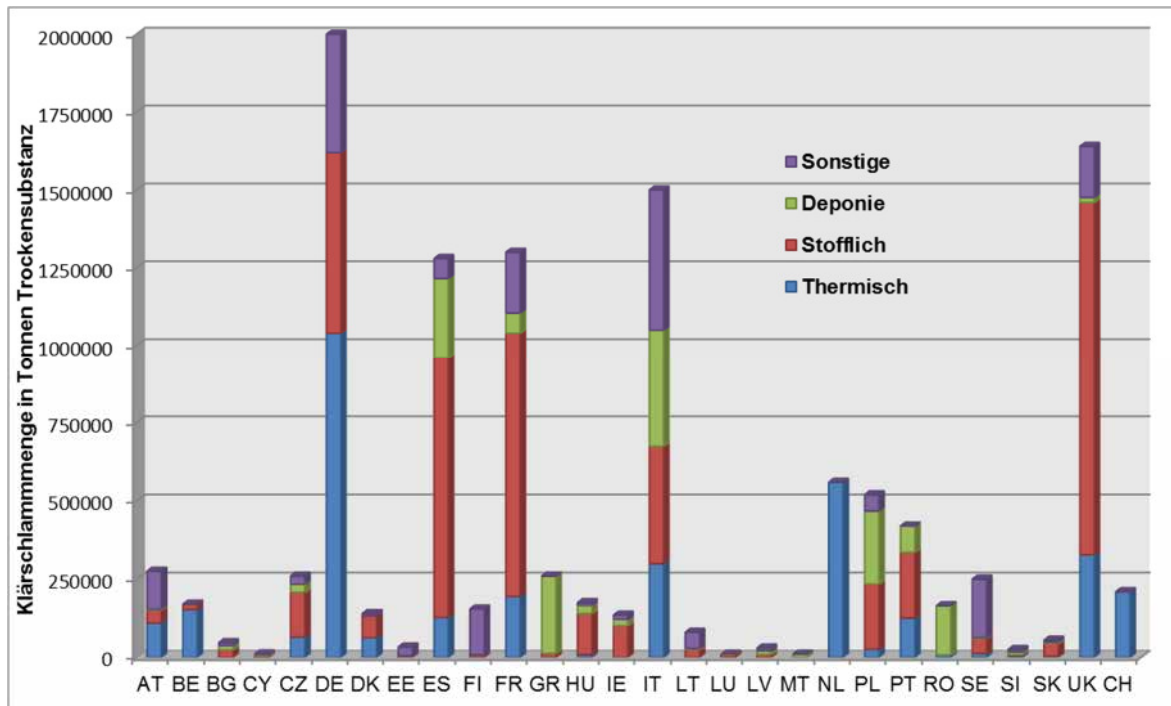


Abb. 1: Klärschlammbehandlungs- und Verwertungsrouten in Europa 2010 [Milieu Ltd 2010]

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus dem Abwasserpfad entwickelt. Einige und vor allem praxisnahe Lösungen haben es bereits in die industrielle Umsetzung geschafft, andere sind über den Labormaßstab nicht hinausgekommen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über bereits realisierte Anlagen bzw. konkret geplante Umsetzungen in Europa. Abbildung 2 ermöglicht eine Zuordnung bzgl. des verfahrenstechnischen Ansatzes.

Tab. 1: P-Rückgewinnungs- und Recyclinganlagen in Europa in Betrieb bzw. konkret geplant – Abwasserpfad [Kabbe 2013, Stemann et al. 2014 und Schoumans et al. 2015]

Verfahren	Standort/Betreiber	Status	Recyclat/Produkt
AirPrex®	Waßmannsdorf (DE), BWB	2009/2011	Struvit
	MG-Neuwerk (DE), Niersverband	2009	
	Echten (NL), Reest & Wieden	2013	
	Amsterdam-West (NL), Waternet	2014	
	BS-Steinhof (DE), SE BS / AVB	geplant	
	Uelzen (DE), SE Uelzen	geplant	
	Salzgitter (DE), ASG	geplant	
ANPHOS	Land van Cuijk (NL), Aa en Maas	2011	Struvit
Budenheim	Mainz (DE) und Itzehoe (DE)	2x Pilot geplant	DCP

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

CleanMAP®	EasyMining Sweden, Ragn-Sells (SE)	geplant	MAP/DAP
DüM- Industrie	Produzenten in DE, ES, NL und PL Teilsubstitution von Rohphosphat durch Klärschlammmaschen bzw. Zumischung von z.B. Struvit	geplant	Fertigdünger
EkoBalans	Helsingborg u.a. (SE), EcoBalans	Pilotierung en	Struvit, NPK
EcoPhos	Varna (BG), DecaPhos Dunkerque (FR), EcoPhos	geplant geplant	H ₃ PO ₄ /DCP/MCP
Fix-Phos	Hildesheim (DE), SEHi	2012	CaP/CSH
Gifhorn	Gifhorn (DE), ASG	2007	Struvit
Grundfos	Aarhus (DK), Aarhus Water Herning (DK), Herning Water	2013 planned	Struvit
LysoGest®	Lingen (DE), SE Lingen	2014	Struvit
MEPHREC	Nürnberg (DE), SUN	geplant	P-Schlacke
NuReSys®	Harelbeke (BE), Agristo 2x Niewkuerke (BE), Clarebout Potatoes Waasten (BE), Clarebout Potatoes Leuven (BE), Aquafin Geel (BE), Genzyme Schiphol Airport (NL), Evides Land van Cuijk (NL), Logisticon Apeldoorn (NL), GMB-Imtech	2008 2009/2012 2012 2013 2014 2014 2015 2015	Struvit
PEARL®	Slough (UK), Thames Water Amersfoort (NL), Vallei & Veluwe Reading (UK), Thames Water Madrid (ES), Veolia Iberica	2013 2014 geplant geplant	Struvit
PHORWater	Calahorra (ES), El Cidacos	geplant	Struvit
PHOSPAQ™	Olburgen (NL), Waterstromen Lomm (NL), Waterstromen Nottingham (UK), Severn Trent Water	2006 2008-2013 2014	Struvit
P-RoC	Neuburg (DE), Stadt Neuburg /Donau	geplant	CaP/CSH

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

REPHOS®	Altentreptow (DE), Remondis Aqua	2006	Struvit
STRUVIA™	Brüssel Nord u. a. (BE), Aquiris (Veolia)	mobile Pilotierungen	Struvit
Stuttgart	Offenburg (DE), AZV	2011 (Teilstrom)	Struvit
TetraPhos®	Hamburg (DE), Remondis Aqua	geplant	H ₃ PO ₄
Thermphos	Vlissingen (NL) Thermphos International B.V.	bis 2012	P ₄

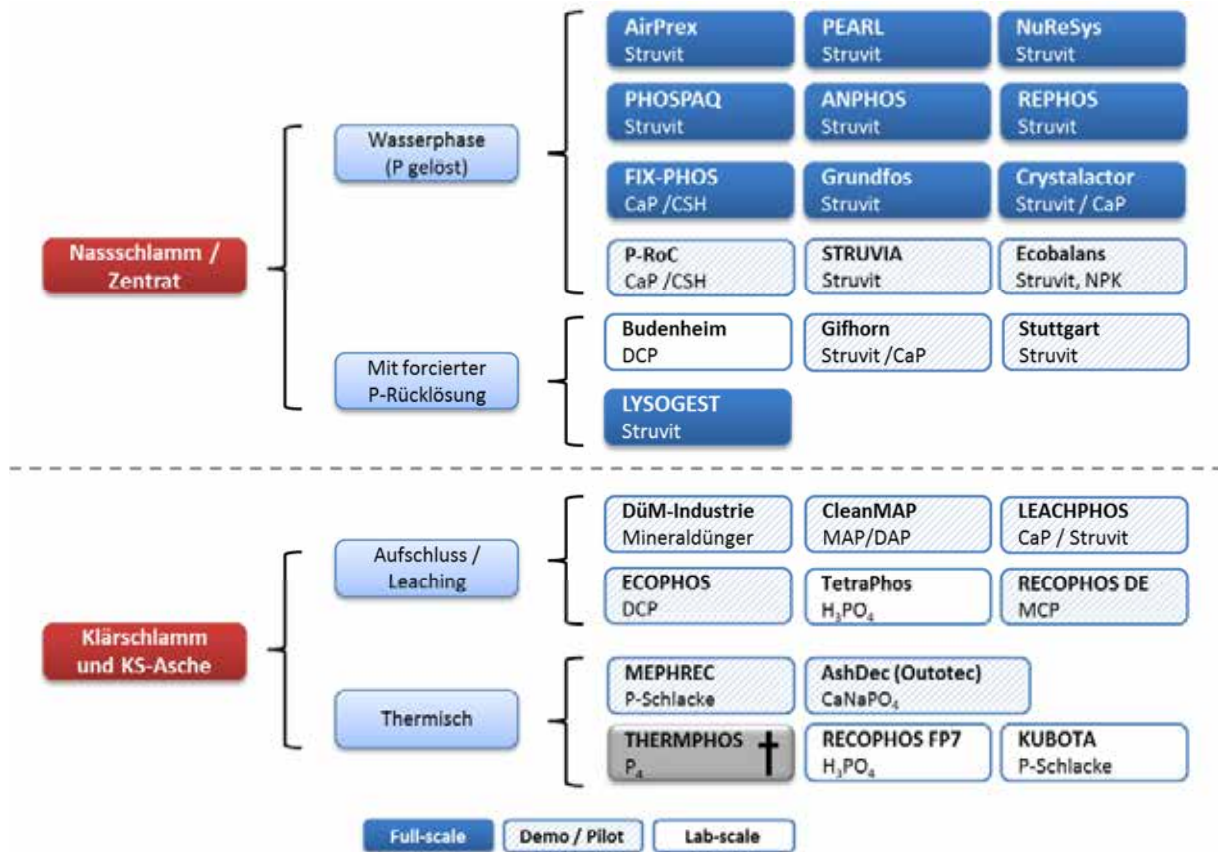


Abb. 2: Vielversprechende P-Rückgewinnungs- und Recyclingverfahren und ihr Stand der Ausgereiftheit [P-REX 2015 unveröffentlicht]

Letztlich sind aber nicht Vielfalt und Vielzahl von Verfahren entscheidend, sondern deren Praktikabilität. Um neue Technologien im betreffenden Markt einführen und etablieren zu können, müssen diese vor allem praktikabel und wirtschaftlich sein. Neben der Demonstration des bereits heute Machbaren werden im Rahmen von P-REX vielversprechende Verfahren unter ökologischen (LCA) und

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

ökonomischen (LCC) Gesichtspunkten analysiert, bewertet und der traditionellen Klärschlammasbringung als Referenzszenario gegenübergestellt.

Dabei müssen selbstverständlich auch die Eigenschaften und Verwertungsoptionen für die jeweiligen Recyclate Beachtung finden. Denn was nützt es, Phosphor aus Abfallströmen zurückzugewinnen, wenn die resultierenden Materialien keiner sinnvollen Verwendung zugeführt werden können bzw. dürfen. Der denkbar schlimmste Fall wäre, dass Nährstoffe nach der Rückgewinnung als Abfall entsorgt werden müssen, weil das Material nicht für eine nachfolgende Verwertung zugelassen werden kann oder die Spezifikationen nicht den Wünschen bzw. Anforderungen potenzieller Abnehmer entsprechen. Solch volkswirtschaftlichen Unsinn gilt es zu vermeiden. Daher ist es wichtig, bereits bei der Verfahrensentwicklung neben den potenziellen Anlagenbetreibern auch die potenziellen Abnehmer für die Recyclate einzubeziehen. Nur wenn es gelingt, die Lücke zwischen Rückgewinnung und tatsächlicher nährstofflicher Verwertung zu schließen, wird sich ein substantielles Nährstoffrecycling umsetzen lassen.

Für die Anwendung im Düngemittelbereich, dem größten Anwendungsgebiet und damit auch Markt für Phosphate, stehen vor allem die Kriterien *Düngewirksamkeit* (Nährstoffverfügbarkeit für Pflanzen), als auch die *Unschädlichkeit* für Mensch und Umwelt (keine bzw. geringe Schadstoffbelastungen) im Vordergrund. Deshalb werden die am Projekt beteiligten Recyclate hinsichtlich ihrer Pflanzenverfügbarkeit anhand der P-Löslichkeiten sowie in Topf- und Feldversuchen erprobt und bewertet. Neben der Analyse der abfall- und düngemittelrechtlichen Parameter (v.a. Schwermetalle und einige wenige Organika), werden die Materialien auch hinsichtlich ihrer tatsächlichen Umweltwirkung anhand von Biotests untersucht. Während der Nachweis und die Quantifizierung der in den einschlägigen Verordnungen enthaltenen Einzelsubstanzen nur Indizien über die Schädlichkeit oder Unschädlichkeit der Gesamtmatrix geben können, liefern biologische Wirktest Aufschluss über die reale Ökotoxizität heterogener Stoffgemische, einschließlich der möglichen Cocktailwirkungen von Inhaltsstoffen, ohne jeden einzelnen kennen und analysieren zu müssen. Die erhobenen Daten fließen in die für Verfahren und Recyclate kalkulierten Ökobilanzen und Lebenszykluskosten ein.

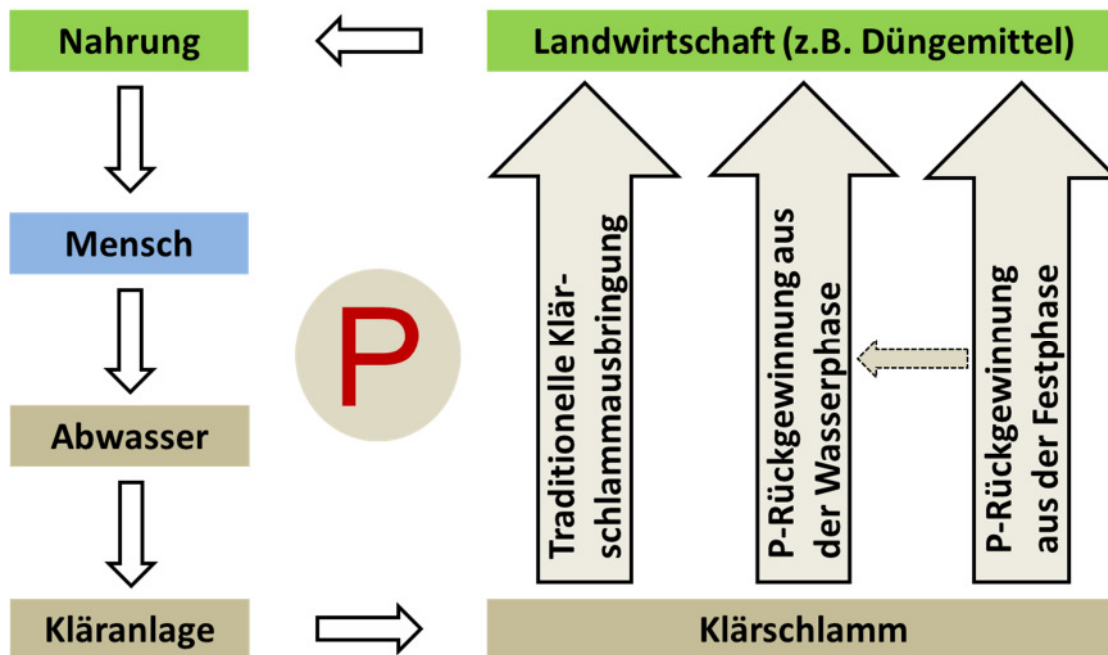


Abb. 3: Haupttrouten für das nährstoffliche P-Recycling: Abwasserpfad – Landwirtschaft

Wie in Abbildung 3 dargestellt, kann man neben der klassischen Klärschlammasbringung zwischen zwei prinzipiellen alternativen und teilweise komplementären Haupttrouten für die technische P-Rückgewinnung mit anschließendem Nährstoffrecycling unterscheiden. Unberücksichtigt bleiben im Rahmen der nachfolgenden Ausführungen die Rückgewinnungsoptionen in dezentralen Sanitärsystemen, welche nicht Gegenstand von P-REX sind.

Ausgehend davon, dass in Kläranlagen mit Phosphatelimination über 90 % des im Zulauf befindlichen Phosphors in den Schlamm überführt und dort in der Festphase konzentriert werden, empfiehlt sich die Rückgewinnung aus dem vom Abwasserhauptstrom abgetrennten Schlamm. Zwar gibt es auch Kläranlagen, bei denen Phosphor in Form des Minerals Struvit ($MgNH_4PO_4 \times 6H_2O$) aus dem Abwasserhauptstrom zurückgewonnen wird, jedoch handelt es sich dabei um industrielle Abwässer (Lebensmittel- und Pharmaindustrie) mit entsprechend hohen ortho-Phosphat- und Ammoniumkonzentrationen (NuReSys®, REPHOS®, PHOSPAQ™).

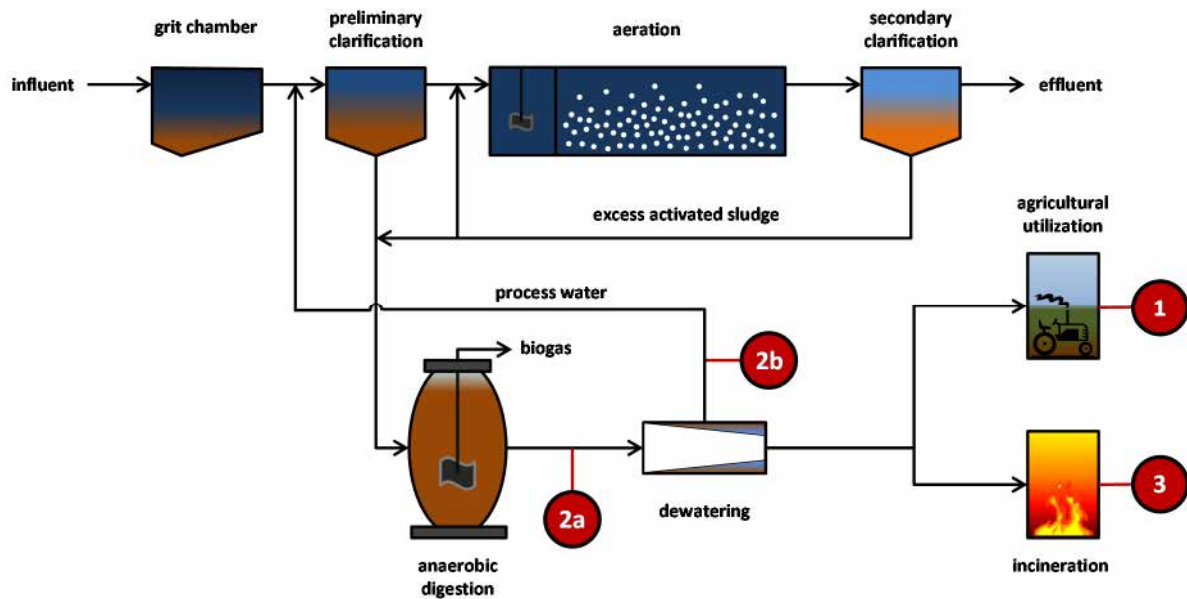


Abb. 4: Hot-spots für Phosphorrückgewinnung und -recycling auf Kläranlagen bzw. bei der nachfolgenden Klärschlammverwertung [Kabbe 2013] 1 – Traditionelles Nährstoffrecycling als stoffliche Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft, 2 – Phosphorrückgewinnung aus der Wasserphase bzw. nach forcierter Rücklösung auch partiell aus der Festphase; 3 – Phosphorrückgewinnung während oder nach unverdünnter thermischer Verwertung

3.1 P-Rückgewinnung aus der wässrigen Phase

Aus der wässrigen Schlammphase kann Phosphor auf Kläranlagen mit biologischer P-Elimination nach der Faulung entweder vor der Schlammentwässerung (2a in Abb. 4) oder nach Entwässerung im Zentrat (2b in Abb. 4) durch Fällung bzw. kontrollierte Kristallisation zurückgewonnen werden. Da Fällungs- bzw. Kristallisationsprozesse Gleichgewichtsreaktionen sind, bedarf es in diesen Fällen immer Mindestkonzentrationen der beteiligten Ionen. D.h. es müssen ausreichend ortho-Phosphat und Ammonium in der Wasserphase vorliegen und fehlende Reaktionspartner wie im Fall der Magnesiumionen hinzu dosiert werden. Für eine effiziente Struvitfällung ist zudem ein erhöhter pH-Wert von ca. 8 bis 8,5 erforderlich. Die dafür nötige pH-Wertanhebung kann durch CO₂-Ausblasen oder Zugabe von Laugen (NaOH) erfolgen. Die in Betrieb befindlichen Struvit-Anlagen haben in der Regel ortho-P-Konzentrationen > 100 mg/l. Allgemein wird davon ausgegangen, dass die Mindestkonzentration des gelösten P für eine Struvitfällung über 50 mg/l betragen sollte. Diese Bedingungen werden zumeist nur von Kläranlagen erfüllt, auf denen der Phosphor biologisch eliminiert wird (EBPR) und eine Faulung des Schlammes stattfindet. Hierbei liegt der in der Biomasse akkumulierte Phosphor nach biologischem Abbau wieder in gelöster Form in der Wasserphase vor. Eine Rücklösung chemisch an Eisen oder Aluminium gebundenen Phosphors durch Faulung ist vernachlässigbar.

Somit ist das Rückgewinnungspotenzial aus dem Schlammwasser mittels der klassischen Struvitverfahren bezogen auf die P-Fracht im Kläranlagenzulauf begrenzt. Derzeit bewegt sich die reale

Rückgewinnung, d.h. der Teil des Phosphors, der tatsächlich als Recyclat ausgeschleust bzw. geerntet wird, in den meisten Fällen zwischen 5 – 15 %.

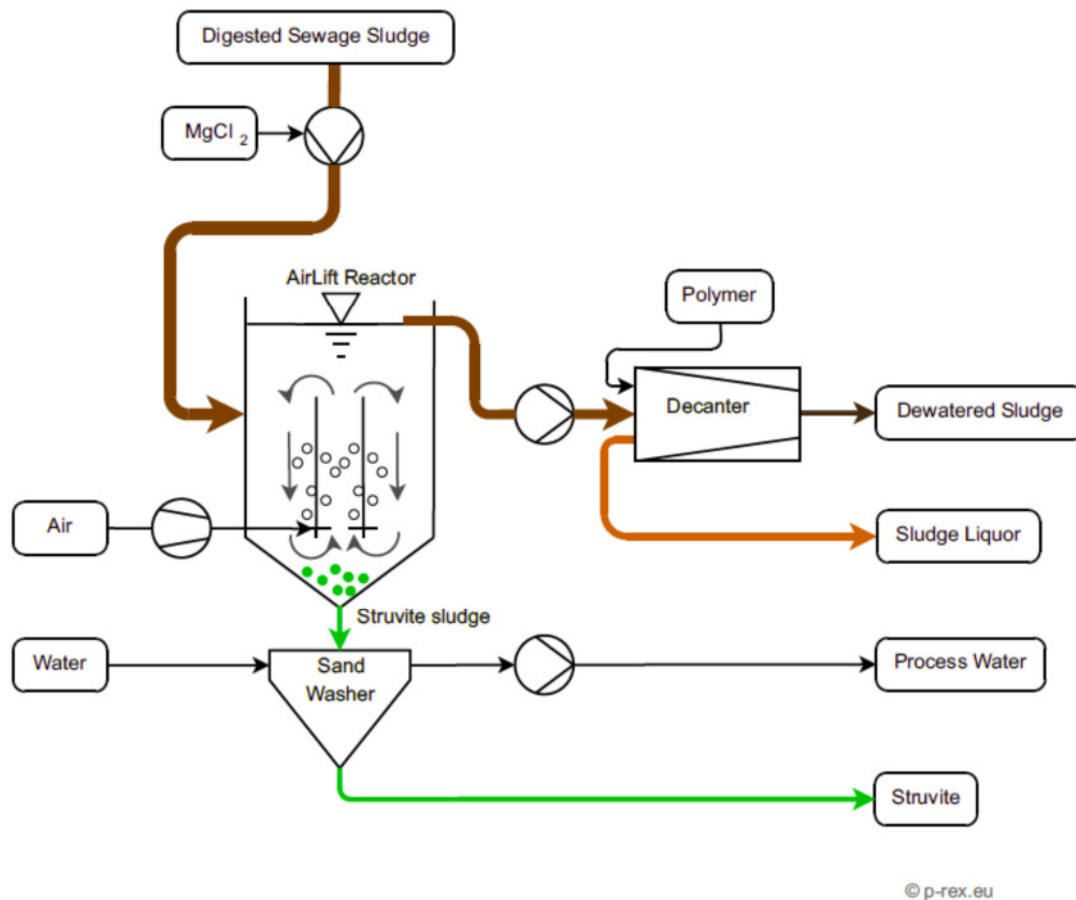


Abb 5: Schematische Darstellung der Phosphorrückgewinnung mit dem AirPrex®-Verfahren aus der Wasserphase des Faulschlammes vor der Entwässerung [©P-REX Technical Factsheet von Jossa und Remy 2015]

Erfolgt die Struvitfällung direkt nach der Faulung im Nassschlamm vor der Entwässerung (schematisch in Abbildung 5 dargestellt) wie mit dem von den Berliner Wasserbetrieben entwickelten und unter dem Namen AirPrex® vermarkteten Verfahren, kann die nachfolgende Schlammbehandlung positiv beeinflusst werden. Operative und damit auch monetäre Vorteile stellen sich in diesem Fall als verbesserte Entwässerbarkeit des Schlammes und als geringerer Polymerverbrauch für die Flockung dar. Durch die dadurch deutlich verringerte Schlammmenge (der TS kann um mehrere Prozentpunkte höher liegen) sinken die Entsorgungs- und Betriebsmittelkosten. Bei großen Kläranlagen wie Wassmannsdorf (Berliner Wasserbetriebe) oder Mönchengladbach-Neuwerk (Niersverband) kann das zu jährlichen Kosteneinsparungen von mehreren hunderttausend Euro führen [Ewert & Wagenbach 2013, Heinzmann & Lengemann 2013]. In allen Fällen führt die Struvit-Fällung zu einer Reduzierung der Rückbelastung durch ortho-Phosphat und Ammonium im Zentrat und der Verringerung von

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Instandhaltungskosten, die durch ungewollte Struvitablagerungen in Rohrleitungen und Aggregaten der Schlammbehandlung entstehen.

Eine Option zur Erhöhung der Struvitausbeute ist die Kombination mit einer Hydrolyse vor der Faulung (LD) oder innerhalb einer Faulungskaskade (DLD), angewandt für die Desintegration des Überschussschlamm. Somit lassen sich gleichzeitig Biogasausbeute, als auch Struvitausbeute steigern. Bei großen Anlagen bietet sich der Einsatz einer Thermalhydrolyse (z.B. CAMBI, EXELYS), bei kleineren Anlagen hingegen der Einsatz einer chemischen Hydrolyse (z.B. PONDUS) an. Die getrennte Behandlung von Primär- und Überschussschlamm bietet ferner den Vorteil, dass der hohe P-Gehalt im Überschussschlamm nicht durch den P-armen Primärschlamm verdünnt wird. Auch die separate Entwässerung beider Schlammströme bietet Vorteile für die Entwässerung. Somit lassen sich z. B. bei der Umsetzung des von der Fa. CNP-Technology Water and Biosolids GmbH vermarkteten LysoGest-Konzeptes eine Steigerung der Energieeffizienz bei gleichzeitiger Erhöhung der Phosphorrückgewinnungsrate erzielen. Es gilt noch zu zeigen, ob sich durch diese Kombination Phosphorrückgewinnungsraten von 50% bezogen auf den Kläranlagenzulauf, wie sie im Rahmen der Novelle der Klärschlammverordnung für P-reiche Schlämme diskutiert werden, erzielen lassen. Bei der Definition der Rückgewinnungsrate ist allerdings darauf zu achten, dass diese sich auf die P-Fracht im Kläranlagenzulauf bezieht und der tatsächlich ausgeschleuste Phosphor für die Bilanzierung herangezogen wird. Es genügt nicht, wie bereits vielfach in wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht, den gefällten Phosphor anzugeben, da in der Regel nur die größeren Kristalle geerntet werden können.

Generell ist festzustellen, dass einer gezielten Rücklösung des in der Festphase fixierten Phosphors im Prinzip jedes der gängigen Fällungs- und Kristallisationsverfahren nachgeschaltet werden.

3.2 P-Rückgewinnung aus der Festphase

Wie bereits erwähnt, befindet sich der größte Teil des Phosphors nach der Elimination aus dem Abwasser in der Festphase des Schlamm. Während die klassischen Struvitverfahren in ihrer Anwendbarkeit und Rückgewinnungsrate oder Ausbeute durch die erforderliche Mindestkonzentration von gelöstem ortho-Phosphat und Ammonium in der Wasserphase limitiert sind, können die Verfahren, die Phosphor aus der Festphase zurückgewinnen sowohl für Bio-P (EBPR), als auch für Chem-P-Schlämme eingesetzt werden. Für den Nassschlammbereich, als auch für die Rückgewinnung aus der Asche von Monoverbrennungsanlagen, in der die höchste P-Konzentration des Abwasserpfades zu erreichen ist, gibt es verschiedene Verfahrensansätze.

Die nasschemische Rücklösung des Phosphors erfolgt in der Regel durch starke Mineralsäuren. Dabei hängt die Rücklösungsrate direkt vom pH-Wert ab. Je niedriger der pH-Wert, desto höher die Rücklösungsrate. Bei pH = 3 wurden Rücklösungsraten von über 80 % und anschließende Struvit-ausbeuten von über 60 % erreicht. Leider geschieht dies zum Preis eines hohen Säureverbrauchs für die Rücklösung und einem entsprechenden Laugeneinsatz für die pH-Wertanhebung auf über 8 zur Struvitfällung. Um zu verhindern, dass die gleichzeitig in Lösung gebrachten Schwermetalle das P-

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Recyclat verunreinigen, müssen diese entweder durch Komplexbildung (Stuttgarter Verfahren) oder mittels Sulfidfällung (Gifhorn) maskiert bzw. separiert werden. Als praktikabler Kompromiss zeichnet sich die Rücklösung bei einem pH-Wert um 5 ab.

Als schonende Alternative zu diesen klassischen Mineralsäureaufschlussverfahren von Nassschlamm zeichnet sich das chemikalienarme Budenheim-Verfahren [Schnee & Stössel 2014] ab, bei dem lediglich CO₂ unter Druck für die Rücklösung des Phosphors eingesetzt wird. Das für diesen Kohlensäureaufschluss verwandte CO₂ wird prozessintern recycelt. Nach Rücklösung und anschließender Fest-Flüssig-Trennung wird ein gut pflanzenverfügbares Phosphat aus der wässrigen Phase gefällt. In diesem Fall Dicalciumphosphat (DCP). Im Labor- und Technikumsmasstab wurden bislang Rückgewinnungsraten von ca. 50% erzielt. In der großtechnischen Umsetzung werden 70% angestrebt.

Besteht die Möglichkeit, Klärschlamm unverdünnt in einer Monoverbrennungsanlage zu verbrennen erhält man Klärschlammaschen (KSA), die als Ausgangsmaterial für eine P-Rückgewinnung dienen können.

Auch für diese Matrix gibt es nasschemische Aufschlussverfahren, die den Phosphor, aber auch Schwermetalle rüchlösen. Der Vorteil gegenüber dem Säureaufschluss im Nassschlamm liegt im Chemikalienverbrauch. Während bei Nassschlamm, der hauptsächlich aus Wasser besteht, allein für die pH-Wertabsenkung des Wassers ein großer Teil der Säure verbraucht wird, wirkt die Säure im Fall der Aschen vollständig für die Rücklösung. Aber auch hier müssen die Schwermetalle abgereichert werden, wenn die Verfahren universell für Klärschlammaschen einsetzbar sein sollen. Letztlich werden sich die Verfahren durchsetzen, die unabhängig von der Aschequalität ein verwertbares Produkt liefern. Ansonsten besteht die Gefahr, dass nur ein Bruchteil der Aschen verwertet werden kann und bestehende Rückgewinnungsanlagen um eine geringe Aschemenge konkurrieren und gleichzeitig die „unsauberen“ Aschen und der darin enthaltene Phosphor nach wie vor im Bergversatz verloren gehen. Neben den Aufschlussverfahren gibt es auch thermochemische, metallurgische und biologische Verfahren, auf die hier aber nicht detailliert eingegangen werden soll.

Wichtig ist, dass nach dem Rückgewinnungsaufwand Material zur Verfügung steht, welches den darin enthaltenen Phosphor verwertbar macht. Wird die direkte Verwertung als Düngemittel angestrebt, müssen Wirksamkeit und Unschädlichkeit direkt gegeben sein. Zudem müssen die Materialien als Düngemittel zugelassen sein. Soll das Material lediglich als Rohmaterial für weitere Veredelungsprozesse dienen, kommt es auf die Spezifikationen der Nachfolgeprozesse an. Hier ist zum Beispiel die Pflanzenverfügbarkeit kein zwingendes Kriterium.

4 MARKTASPEKTE FÜR SUBSTANZIELLES PHOSPHORRECYCLING

Neben den Prozessen und Anlagen, die speziell auf die Rückgewinnung von Phosphor aus Abfallströmen abzielen sollten wir uns auch Gedanken über bereits bestehende Infrastrukturen machen, die ohne Neubau von Aufbereitungskapazitäten eine P-Rückgewinnung oder im besten Fall ein kurzfristig umsetzbares Nährstoffrecycling ermöglichen. Hier kann der Düngemittelindustrie eine

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

tragende Rolle zukommen. Gerade im Fall der Säureaufschlussverfahren sind die Ähnlichkeiten zwischen den als Rückgewinnungsverfahren entwickelten oder adaptierten und der gängigen Praxis im Düngemittelbereich offensichtlich. Leider wurde es in der Vergangenheit versäumt, die Düngemittelproduzenten in die Phosphorreyclingdiskussion angemessen einzubeziehen. Vielleicht

ließen sich bereits heute ohne zusätzliche Investitionen Klärschlammaschen als Teilsubstitut für importiertes fossiles Rohphosphat einsetzen. Düngemittelhersteller in den Niederlanden, Deutschland, Polen und Spanien beschäftigen sich seit geraumer Zeit mit dieser Fragestellung und haben bereits erfolgreiche Teilsubstitutionsversuche durchgeführt [Langeveld & ten Wolde 2013, Langeveld 2014]. Wie sich im Dialog mit der Düngemittelindustrie herausstellt, wird der Einsatz von Klärschlammaschen als Teilsubstitut (5-10%) für Rohphosphat als Option und Chance gesehen, die Düngemittelproduktion in Europa nachhaltiger zu gestalten und vor allem nachhaltig zu sichern. Natürlich ist nicht davon auszugehen, dass von heute auf morgen alle Klärschlammaschen derart verwertet werden. Aber man hätte die Akteure motivieren können, ihre Prozesse für die neuen Herausforderungen anzupassen, anstatt auf die Neuerfindung des Rades zu fokussieren. Zudem gibt es auch Möglichkeiten Klärschlammaschen qualitativ den Erfordernissen der Düngemittelindustrie anzupassen. Wie das von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung 2014 abgeschlossene und von BMUB/UBA im Rahmen des UFOPLANs (FKZ 37 11 33 321) finanzierte Klärschlammaschemonitoring [Krüger & Adam 2014] offenbarte, liefern Monoverbrennungsanlagen, die allein kommunale Klärschlämme verbrennen gute Qualitäten bei hohen P-Gehalten. Wie in Abbildung 6 ersichtlich, liefern Monoverbrennungsanlagen, die ausschließlich kommunale Schlämme verbrennen Aschen mit über 6% P. Anlagen, die ausschließlich industrielle Schlämme verbrennen liegen bei unter 3% P in der Asche. Das macht deutlich, dass es zweckmäßig ist, das Monoverbrennungsmanagement so umzustellen, dass nur noch kommunale Schlämme in die Monoverbrennung gehen und industrielle Schlämme im Gegenzug in der Mitverbrennung verbrannt werden. So ließen sich phosphorreiche und gleichzeitig schwermetallarme Aschen generieren, die definitiv geeigneter für ein direktes Phosphorreycling sind, als die phosphorarmen und schwermetallreichen Industrie- bzw. Mischschlämme. Da aber auch Eisen- als auch Chlorgehalt für einen Einsatz in der Düngemittelproduktion stark limitierend sind, sollte ebenfalls so verbrannt werden, dass eisenreiche nicht mit eisenarmen Schlämmen vermischt verbrannt werden. Zudem darf der Anteil der Restorganik nach der Verbrennung 1 Gew.-% nicht überschreiten, muss also auf ein gutes Verbrennungsregime geachtet werden. Dies sind lediglich logistische Aspekte, die man auf nationaler Ebene mit einem sinnvollen (smarten) Klärschlammverbrennungsmanagement kurzfristig umsetzen kann, ohne dafür hohe Investitionen in Kauf nehmen zu müssen. Bevor viel Geld in neue Monoverbrennungskapazitäten und Aschezwischenlager investiert wird, die die Rückgewinnung in die Zukunft vertagen, sollte lieber das Bestmögliche aus der bestehenden Infrastruktur herausgeholt werden.

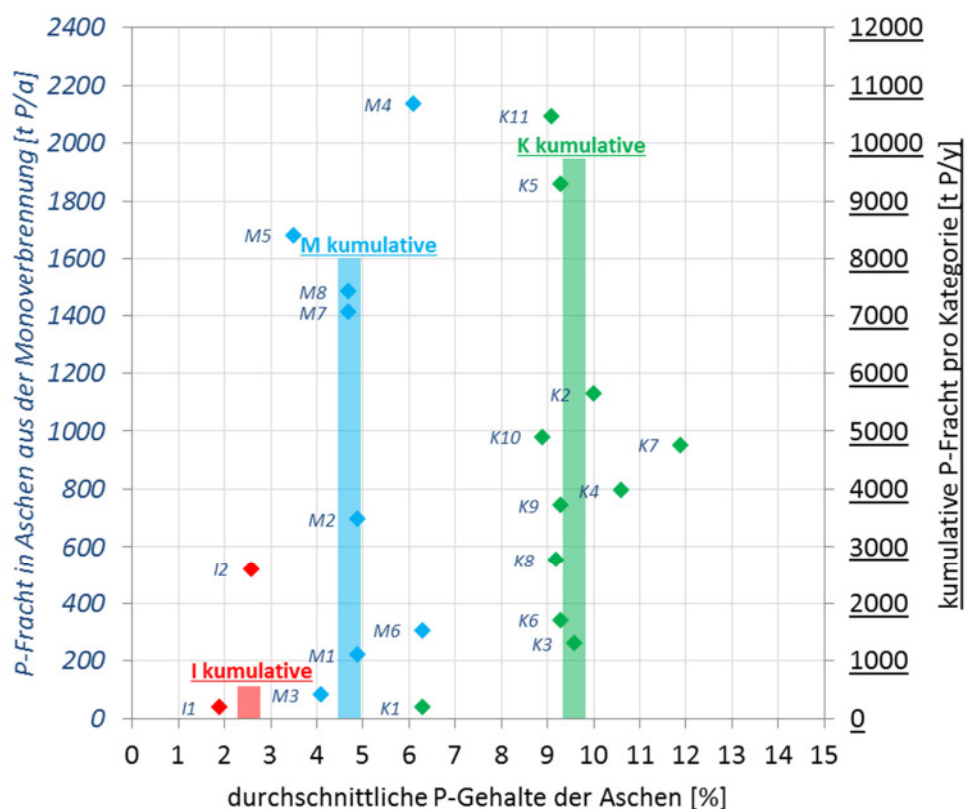


Abb. 6: Verteilung der P-Gehalte in Monoverbrennungsaschen in Deutschland [Kraus 2015 nach Krüger und Adam 2014]; I – Industrieschlämme; M – gemischte Verbrennung von Industrie- und Kommunalschlämmen; K – ausschließliche Verbrennung kommunaler Schlämme

Ebenso wichtig für die potenziellen Abnehmer sind Lieferzuverlässigkeit, Mengenverfügbarkeit, stabile Zusammensetzung und natürlich der Preis. Vorstellungen, Recyclate als Rohstoff für die Düngemittelproduktion zu einem Preis von aufbereitetem P_2O_5 zu verkaufen sind illusorisch. Letztlich wird dafür nicht mehr bezahlt werden, als für das Rohphosphat, welches am jeweiligen Produktionsstandort eingesetzt wird. Höhere Preise werden sich nur erzielen lassen, wenn das Material direkt als Einmischkomponente oder im besten Fall als fertiger Dünger verwertet werden kann. Das erfordert jedoch neben der Rückgewinnung weitere Veredlungsschritte, die es bereits in der Düngemittelproduktion in vielfach größerer Kapazität gibt. Als ebenfalls vielversprechende Ansätze zeichnen sich zwei Verfahren ab, die aus sogenanntem low-grade Material saubere Phosphorsäure gewinnen. Anlagen für das EcoPhos-Verfahren [De Rooter 2014] sind in Dunkerque (FR) und Varna (BG) geplant. EcoPhos hat Ende Februar 2015 mit den beiden größten Monoverbrennern in den Niederlanden (SNB und HVC) einen Liefervertrag für Klärschlammaschen in der Größenordnung von 60.000 t pro Jahr für die Anlage in Dunkeque abgeschlossen. Remondis Aqua plant eine Aufbereitungsanlage nach dem TetraPhos-Verfahren in Hamburg, die jährlich den Phosphor aus ca. 20.000 bis 25.000 t Klärschlammasche zu Phosphorsäure veredeln soll [Lebek 2014]. Das Recyclingprodukt Phosphorsäure bietet neben einem höheren Marktwert im Vergleich zu

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik" am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Rohphosphaten bzw. Düngerphosphaten auch ein deutlich breiteres Anwendungsspektrum. Das wiederum ist ein entscheidender Wettbewerbsvorteil für die Betreiber solcher Ascheaufbereitungsanlagen im Vergleich zu jenen, die ihr Recyclat lediglich im Düngerbereich als Rohstoff abgeben können.

Aber Rückgewinnung und Veredlung sind nur eine Seite der Medaille. Während die Düngemittelindustrie bereits über ein etabliertes Vermarktungs- und Distributionsnetz verfügt und ihre Produkte als solche verkauft, fehlen den meisten heute in begrenzten Mengen verfügbaren Recyclaten nicht nur die Zulassung als Düngemittel sondern auch die Bestätigung des Produktstatus. Beide Voraussetzungen, um chemische Stoffe oder Stoffgemische in Europa überhaupt als Düngemittel herstellen und handeln zu dürfen.

Das in Wassmannsdorf produzierte Struvit haben die Berliner Wasserbetriebe im Jahr 2013 erfolgreich gemäß REACH registriert. Für die Registrierungspflicht gilt derzeit noch eine Mindestmenge von 100 Tonnen pro Jahr. Ab 1. Juni 2018 sinkt diese auf eine Tonne pro Jahr, so dass ab diesem Zeitpunkt quasi alle Struvit-Produzenten registrierungspflichtig sind. Nationale Interpretationen zur Registrierungspflicht von Recyclaten, die heute noch existieren und Ausnahmen erlauben, werden bis dahin von der Kommission geprüft worden sein.

Derzeit verzögert sich die Novellierung der Europäischen Düngemittelverordnung EC 2003/2003. Unter anderem sollen Recyclate in der Neufassung stärker berücksichtigt werden. Ein Diskurs über die Definition von „End-of-Waste“-Kriterien (Kriterien zur Bestimmung des Endes der Abfalleigenschaft) ist in vollem Gange.

Jedoch dürfen bei der Diskussion auch nicht die Endverbraucher bzw. Landwirte vergessen werden. Während erst letztendlich über die Akzeptanz für Recyclate in der Nahrungskette entscheiden (können sollten), sofern sie überhaupt die Möglichkeit haben, zwischen Produkten zu wählen, die zum Beispiel auf mit Klärschlamm gedüngten Flächen produziert wurden oder ob cadmium- und uranreichere Phosphate zum Einsatz kamen. Derzeit hat der Verbraucher keine Chance, diese Aspekte nachzuvollziehen, geschweige denn zu wählen.

Bei den Landwirten kommen neben preislichen Aspekten auch praktische zum Tragen. Sind die Recyclingdünger lagerfähig, mit bereits vorhandenem Equipment auszubringen (Streufähigkeit und Wurfweite) und ausreichend verfügbar?

Während alle Düngemittel als Mindestanforderung die rechtlichen Vorgaben erfüllen müssen, entscheiden letztlich die potenziellen Abnehmer über den Markterfolg.

5 AUSBLICK

Nachdem die technischen Voraussetzungen für ein Phosphorrecycling hinlänglich entwickelt wurden, ist es nun an der Zeit, unser Wissen anzuwenden. Im Bereich der Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad zeichnet sich bereits ab, dass die Struvitrückgewinnung auf Kläranlagen mit biologischer P-Elimination und Faulung aus betrieblicher Sicht vorteilhaft ist. Jedoch ist das P-Rückgewinnungspotenzial in diesen Fällen begrenzt und die bereits laufenden Anlagen wurden auch

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

nicht vordergründig zum Zwecke der P-Rückgewinnung, sondern aufgrund betrieblicher Erfordernisse installiert.

Um jedoch den Phosphor, der in der festen Phase des Klärschlammes gebunden ist, verfügbar zu machen, ist ein deutlich höherer Aufwand zu betreiben, der nicht unmittelbar mit der Erfüllung der zentralen Aufgabe von Kläranlagen, nämlich der Reinigung bzw. Behandlung von Abwasser verbunden ist.

D.h. unter den derzeit geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen ist die Installation solcher Anlagen nicht gebührenfähig und die Frage, wer den potenziellen Mehraufwand bezahlen soll, nach wie vor unbeantwortet. Da die derzeitigen Preise für Phosphate niedriger sind als die Kosten für die Rückgewinnung und Aufbereitung aus der Festphase des Klärschlammes, können nur ordnungspolitische Anreize bzw. Anforderungen den Rahmen für Investitionen in diese Richtung schaffen. Die hierzulande diskutierte Novelle der Klärschlammverordnung kann ein erster Schritt in diese Richtung sein. Es sollte jedoch unbedingt darauf geachtet werden, dass nicht nur über Rückgewinnungsziele gesprochen wird, sondern auch das tatsächliche Recycling stattfinden kann. Wenn man Abwasserentsorgern das Mandat zur Rückgewinnung auferlegt, muss auch gewährleistet sein, dass sie das zurückgewonnene Material einer sinnvollen Verwertung zuführen können. Nun ist es aber nicht die gesellschaftliche Aufgabe von Kläranlagenbetreibern z. B. Düngemittel herzustellen und zu vertreiben. Hier muss die Folgekette einbezogen werden. Und wer, wenn nicht die Düngemittelindustrie und der existierende Vertrieb können das am besten? Eine Beimischungsquote für Recyclingphosphate ist sicher nicht verkehrt, jedoch muss deren Festlegung unter Einbeziehung aller Beteiligten erfolgen, um unrealistische Vorgaben zu vermeiden. Letztlich kann man solche Ziele nur erreichen, wenn alle Akteure der betreffenden Wertschöpfungskette in die Diskussionen zur Umsetzung einbezogen werden.

Es ist auch nicht nötig, von vornherein überhöhte Anforderungen zu stellen oder einseitige Erwartungen zu wecken. Es ist besser Stück für Stück eine Brücke zu bauen, als fortwährend Anlauf zu nehmen und den Sprung über den Abgrund am Ende doch nicht zu wagen. Was nützt es, über 80 bis 90% Phosphorrecycling zu debattieren, wenn dabei das bereits Machbare ignoriert wird.

Um Brücken zu bauen benötigt man Material. Somit stellen die Struvitrückgewinnung und das begonnene Recycling als Düngemittel einen ersten Schritt dar, der auch für andere Recyclate den Weg zu einer nährstofflichen Verwertung ebnet. Erste legislative Hürden können genommen werden und Akzeptanz für derlei „Produkte“ kann generiert werden. Sogar die Anwendung im Ökolandbau ist denkbar, wo derzeit lediglich weicherdiges Rohphosphat als mineralische P-Quelle eingesetzt werden darf. Die Frage, ob die Schließung von lokalen oder regionalen Nährstoffkreisläufen durch Recycling aus ohnehin anfallenden Stoffströmen ökologischer ist als der Import von Nährstoffen, die zuvor in riesigen Tagebauen aus der Erde gerissen wurden, ist leicht zu beantworten. Neben der Listung geeigneter Recyclate im Anhang I der EC 889/2008 ist die Akzeptanz der Ökolandwirte, ihrer Verbände und selbstverständlich der Verbraucher essenzielle Voraussetzung. Akzeptanz und Vertrauen lassen sich am besten durch offenen Dialog und Transparenz entlang der Versorgungskette schaffen.

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik" am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Für die Entwicklung von Strategien zur Umsetzung flächendeckenden Phosphorrecyclings ist es erforderlich, die betreffenden Stoffströme und die darin verborgenen Phosphorpotenziale zu kennen. Derzeit wird nahezu ausschließlich mit statistischen Daten gearbeitet, die nicht zwingend die Realität widerspiegeln. Gerade bei nationalen Durchschnittswerten läuft man Gefahr, die regionalen Besonderheiten zu ignorieren. Wenn es um den Einsatz von Steuergeldern geht, sollten diese auch dort eingesetzt werden, wo es für die Gesellschaft am meisten Sinn macht. D.h. steht eine begrenzte Summe für die Umsetzung von P-Rückgewinnungsanlagen zur Verfügung, sollten sie dort investiert werden, wo am meisten Phosphor in einer verwertbaren Form „geborgen“ werden kann. Diese Rückgewinnungsschwerpunkte lassen sich nur anhand von Realdaten bestimmen. Zudem sollte ein integrativer Umsetzungsansatz verfolgt werden, der kurzfristig dazu führt, dass das Maximum an P-Rückgewinnung und Recycling mit der bereits vorhandenen Infrastruktur und sinnvollem Stoffstrommanagement erreicht wird. Abbildung 7 macht deutlich, dass bereits heute substantielle Mengen des essentiellen Nährstoffes Phosphor auch aus Klärschlammaschen zurückgewonnen und recycelt werden können. Abbildung 8 zeigt, wo die sogenannten Hot-spots in Deutschland liegen, also ggf. notwendige Investitionen am meisten Sinn machen. Ein Blick auf die Phosphormengen, die von den Kläranlagen, die am DWA Leistungsvergleich 2013 teilnahmen und unterteilt nach Größenklassen und der jeweiligen Anzahl behandelt werden macht deutlich, dass bereits 50% der P-Fracht des kommunalen Abwasserpfads in den ca. 200 Anlagen der GK5 (> 100.000 EW) zu heben sind. Weitere ca. 41% der P-Fracht finden sich in den Anlagen der GK4 (>10.000). Jedoch ist bei dieser Größenklasse schon genau abzuwägen, bei welcher der ca. 1.700 Kläranlagen eine P-Rückgewinnung Sinn macht und wo nicht. Hier wird die vorhandene Klärschlammverwertungsinfrastruktur und mögliche Clusterbildung für die Aufbereitung eine umso bedeutendere Rolle spielen. Völlig illusorisch erscheint eine forcierte P-Rückgewinnung bei den Anlagen der GK 3 bis 1. Diese behandeln lediglich 9% der gesamten P-Fracht verteilt auf mehrere tausend Anlagen.

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik" am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

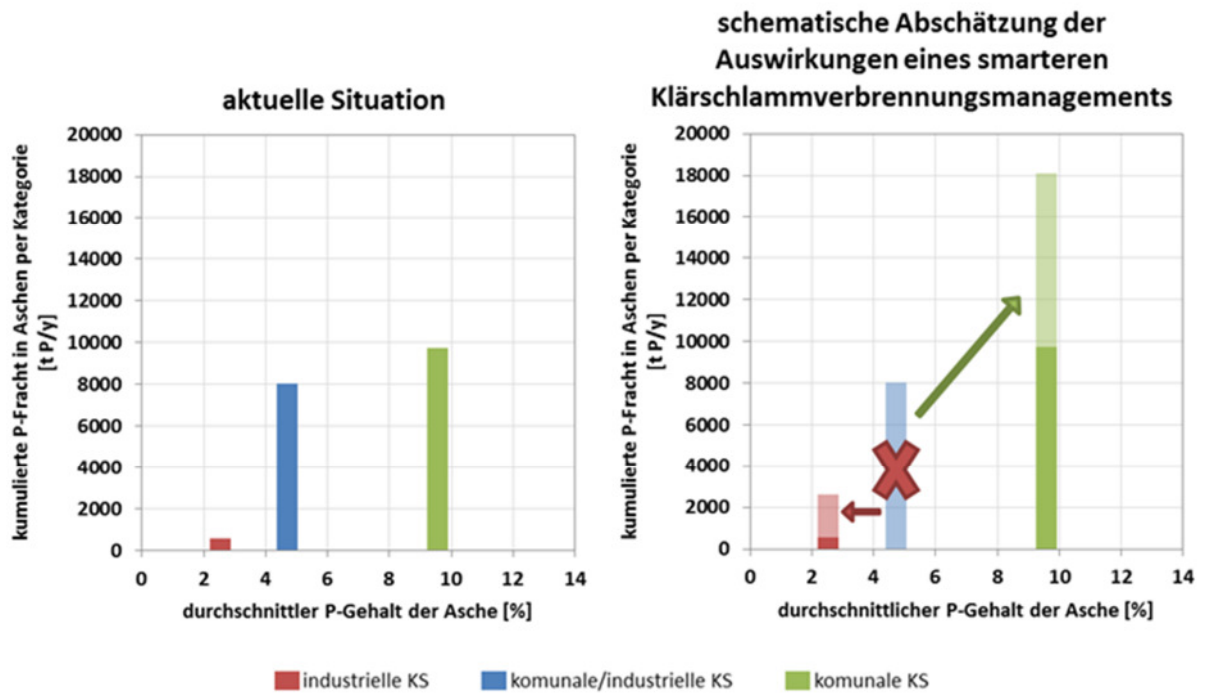


Abb. 7: P-Rückgewinnungspotenzial eines smarteren Klärschlammmonoverbrennungsmanagements [Kraus 2015, P-REX Regionalstudie Deutschland]

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
 am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

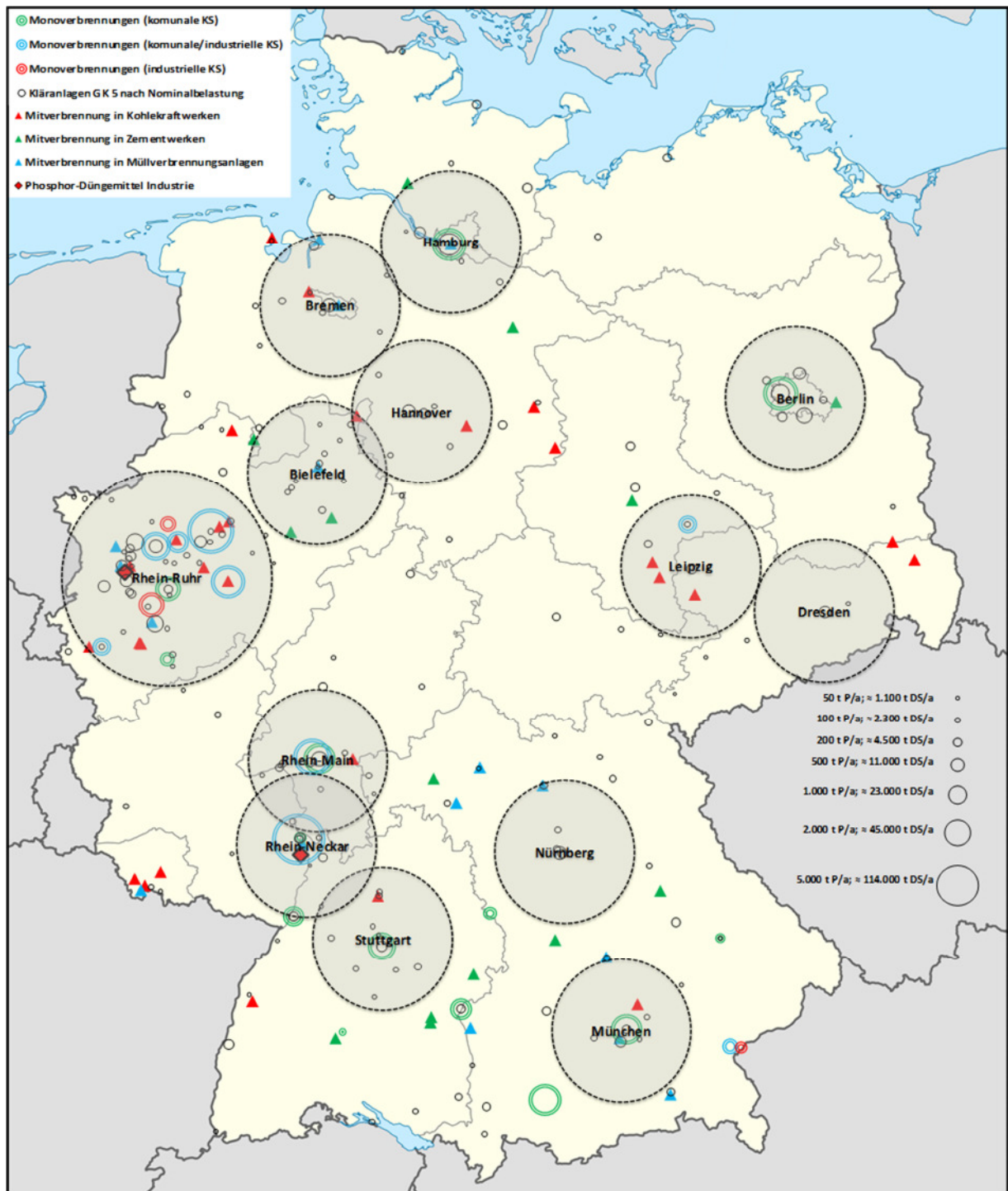


Abb. 8: Phosphorrückgewinnungsschwerpunkte und vorhandene Infrastruktur [Kraus 2015, P-REX Regionalstudie Deutschland]

Wie bei der Erstellung der P-Rückgewinnungspotenzialstudie für das Land Berlin [Kabbe et al. 2014] festzustellen war, werden Abfallströme zwar hinsichtlich ihrer Schadstoffgehalte überwacht, selten aber deren Wertstoffgehalte erhoben. Das von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

durchgeführte Klärschlammaschemonitoring (Krüger & Adam 2014) hat Klarheit für diesen Stoffstrom gebracht und sollte in ähnlicher Form auch bei anderen Stoffströmen durchgeführt werden.

Durch die immer besser werdende Verzahnung der Akteure aus Wissenschaft, Politik und Industrie, wie sie vor allem von den verschiedenen Phosphorplattformen und anderen Initiativen vorangetrieben wird, ist zu erwarten, dass noch in diesem Jahrzehnt erste Weichenstellungen erfolgen, die Europa tatsächlich zu einer höheren Ressourceneffizienz führen und vor allem Planungssicherheit für Investitionen geben. Ein konkretes Instrument, um eine Brücke zwischen Rückgewinnung und Recycling zu bauen ist der im Rahmen von P-REX erstellte eMarket – eine nicht kommerzielle Onlineplattform, die Betreiber von Rückgewinnungsanlagen und potenzielle Abnehmer für die Recyclate vernetzt. Der eMarket ist auf der Homepage der Europäischen Phosphorplattform (ESPP) leicht und dauerhaft zugänglich: <http://e-market.phosphorusplatform.eu/>

Think forward, act circular!

DANKSAGUNG

Das Projekt P-REX wird durch Mittel aus dem 7. Rahmenprogramm der Europäischen Kommission (GA #308645) ermöglicht. Das Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH wird bei diesem Projekt zudem von den Berliner Wasserbetrieben und Veolia Wasser kofinanziert.

Die Ergebnisberichte, Factsheets und Publikationen, die im Rahmen von P-REX erarbeitet wurden, stehen auf der Projektwebsite zum Download bereit (www.p-rex.eu).

Asimov, I. (1959). Life's bottleneck. In The Magazine of Fantasy and Science Fiction. Mercury Press, Inc.

Cordell D. et al (2009): The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Global Environmental Change. 19. S. 292-305.

De Ruiter, R. (2014). The EcoPhos technology to close the P cycle and to safeguard the world's food chain. Abwasser-Phosphor-Dünger-Workshop inklusive Fachgespräch zum UFOPLAN-Projekt Klärschlammaschemonitoring, Berlin, 28.-29. Januar 2014

Ewert, W., Wagenbach A. (2013). Praktische Umsetzung der MAP-Rückgewinnung aus der Flüssigphase. 8. Klärschlammstage. Fulda, 4.-6. Juni 2013

Heinzmann B., Lengemann A. (2013): Vom Betriebsproblem zum Berliner Verfahren - Phosphorrückgewinnung als Magnesiumammoniumphosphat in der Kläranlage Wassmannsdorf. 8. Klärschlammstage. Fulda. 4.-6. Juni 2013.

Kabbe C. (2013): Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery, Bluefacts S. 36-41

Kabbe C., Bäger D., Mancke R. (2014): Phosphorpotenziale im Land Berlin - Abschlussbericht, Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH. Berlin 2014.

Kongress "Phosphor-Rückgewinnung als wichtiger Baustein der Ressourcenpolitik"
am 24. und 25.06.2015 im Kursaal Stuttgart Bad Cannstatt

Kraus, F. (2015). P-REX Regionalstudie Deutschland

Krüger O., Adam C. (2014): Monitoring von Klärschlammmonoverbrennungsaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotentiale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik, UBA Texte 49/2014. Dessau-Roßlau

Langeveld, C.P., ten Wolde, K.W. (2013). Phosphate recycling in mineral fertiliser production. Proceedings International Fertiliser Society 727. ISBN 978-0-85310-364-6

Langeveld, C.P. (2014). Phosphate recycling in the mineral fertiliser industry. Abwasser-Phosphor-Dünger-Workshop inclusive Fachgespräch zum UFOPLAN-Projekt Klärschlammaschemonitoring, Berlin, 28.-29. Januar 2014

Lebek, M. (2014). Die stoffliche Verwertung von Klärschlammaschen nach dem neuen TetraPhos-Verfahren von Remondis. BDE Tagung, Aus für die stoffliche Klärschlammverwertung? – Ressourcenschutz und P-Recycling in Deutschland. Köln, 3. Dezember 2014

Milieu Ltd (2010): Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land, part I: Overview report. milieu Ltd. WRc. RPA. 2010

P-REX (2015). Technical factsheets and deliverables with more details available for download here: www.p-rex.eu

Schnee, R., Stössel, E. (2014). Extraktion von Phosphaten mit Kohlendioxid. Abwasser-Phosphor-Dünger-Workshop inclusive Fachgespräch zum UFOPLAN-Projekt Klärschlammaschemonitoring, Berlin, 28.-29. Januar 2014

Scholz R.W., Wellmer F.W. (2013): Approaching a dynamic view on the availability of mineral resources: what we may learn from the case of phosphorus? Global Environmental Change. 23. S. 11-27.

Schoumans O.F., Bouraoui F., Kabbe C., Oenema O., van Dijk K.C. (2015): Phosphorus management in Europe in a changing world, AMBIO, 44. S. 180-192

Schröder J.J., Cordell, D., Smit, A.L., Rosemarin, A. (2010): Sustainable use of phosphorus. Report 357. Plant Research International, Part of Wageningen UR.

Stemann J., Kabbe C., Adam C. (2014): Aus Wasser und Asche. ReSource 2014(2) S. 25-31

USGS (2015): Phosphate Rock. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries. Januar 2015. S. 118-119