

# Phosphor Recycling

## Düngemittel mit Recycling-P

Themenpapier

## **IMPRESSUM**

### **Bearbeitung**

Dr. David Montag, RWTH Aachen, Institut für Siedlungswasserwirtschaft (ISA)

Dr. Hans-Jürgen Pluta und Dr. Andrea Roskosch, Umweltbundesamt (UBA)

Prof. Dr. Diedrich Steffens, Universität Gießen, Institut für Pflanzenernährung

Dr. Christian Kabbe, Kompetenz Zentrum Wasser Berlin gGmbH

Dr. Karl Severin, Landwirtschaftskammer Niedersachsen und VDLUFA

Reinhard Reifenstuhl, Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA)

Dr. Irmgard Leifert, Reterra Service GmbH

Dr. Bertram Kehres und Dr. Christine Waida, Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK)

Axel Heck, VDLUFA-QLA GmbH

### **AG P-Recycling**

Koordination: Dr. Christine Waida

Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.

Von-der-Wettern-Straße 25

51149 Köln-Gremberghoven

**Oktober 2013**

## **Vorwort**

Um die bestehende Diskussion zum Phosphor-Recycling in der Öffentlichkeit weiter anzuregen und voranzutreiben, hat sich ein Arbeitskreis bestehend aus Vertretern verschiedener Institutionen sowie von Fachleuten aus der Pflanzenernährung, der Verfahrenstechnik und von Qualitätssicherungsorganisationen gebildet. Ziel ist es, das Recycling von Phosphor aus Abfällen und Reststoffen zu fördern, um langfristig den Einsatz von Phosphaterzen bei der Herstellung von Düngemitteln weitgehend durch Recycling-P zu ersetzen.

Um eine solche Entwicklung zu unterstützen hat der Arbeitskreis es sich zur Aufgabe gemacht, eine einheitliche Grundlage zur Ausweisung und Qualitätssicherung von Düngern mit Recycling-P-Anteilen zu erarbeiten. Hierzu sollen auch bereits bestehende Instrumente für die Feststellung, Ausweisung und Umsetzung von Maßnahmen des P-Recyclings genutzt werden.

Das vorliegende Papier versteht sich in diesem Zusammenhang zunächst als Diskussionsbeitrag für Gespräche mit den mit der Thematik befassten umweltpolitischen und düngemittelrechtlichen Stellen, der Landwirtschaft, den Düngemittelproduzenten, dem Düngemittelhandel, Fachorganisationen, sowie Organisationen zur Qualitätssicherung von Düngemitteln.

## **Inhalt**

1. Phosphor (P): Unersetzbarer Pflanzennährstoff und endliche Ressource
2. P-Dünger
3. P-Düngung
4. P-Recycling
5. Qualitätssicherung des P-Recyclings

Ausblick

Glossar

Quellen

## 1 Phosphor: Unersetzbarer Pflanzennährstoff und endliche Ressource

Phosphor (P) ist aufgrund seiner essentiellen Bedeutung für das Leben, d.h. für alle biologischen Prozesse und insbesondere als Pflanzennährstoff - eine strategische Ressource.

Die statische Reichweite der kontinentalen abbauwürdigen Phosphatreserven beträgt nach Angaben der Deutschen Rohstoffagentur DERA derzeit zwischen ca. 150 und 400 Jahren. Die Verfügbarkeit von Phosphatgestein mit vergleichsweise niedrigen Gehalten an Schadstoffen ist deutlich kürzer.

Vor diesem Hintergrund ist ein größtmöglicher Einsatz von Phosphor aus Recyclingprozessen anzustreben. Dies gilt insbesondere für die Herstellung und Anwendung von Düngemitteln mit Recycling-P anstelle von P-Düngemitteln aus Rohphosphaterzen.

Düngemittel mit Recycling-P-Anteilen können durch die klassischen Aufbereitungsverfahren wie Kompostierung, Klärschlammverwertung etc. generiert oder durch neue technische Rückgewinnungsverfahren aus Klärschlämmen sowie Klärschlammaschen und Aschen aus der Tierkörperbeseitigung hergestellt werden.

Im Rahmen verschiedener EU-Initiativen wurde das Thema Phosphatrecycling auch auf europäischer Ebene aufgegriffen. So ist bei der EU-Kommission ein „Commission Consultative Communication“ zur nachhaltigen Phosphornutzung in Planung, welches als Diskussionsgrundlage für Interessensvertreter und Institutionen dienen soll um eine nachhaltige Ressourceneffizienzstrategie für Phosphor zu definieren. Zur weiteren Forschungs- und Entwicklungsförderung sollen in dem EU-Projekt „P-REX“ schließlich bereits bestehende Rückgewinnungsverfahren und verfügbare Realdaten der bisher erzeugten P-Produkte hinsichtlich ihrer Verwertbarkeit und Marktpotentiale bewertet werden.

In Deutschland wurden im Rahmen einer BMBF/BMU-Förderinitiative von 2004 bis 2011 verschiedene Forschungs- und Entwicklungsprojekte vom Labor- bis zum Pilotmaßstab gefördert, die die Erprobung neuartiger, bisher nicht angewandter Techniken und Verfahren zum Recycling von Phosphor zum Gegenstand hatten. In den verschiedenen Bundesländern werden ferner Einzelprojekte zur Phosphorrückgewinnung erprobt und gefördert.

Auch im Ressourceneffizienzprogramm der Bundesregierung „ProgRes“ von 2012 sind Maßnahmen zum ressourcenschonenden Einsatz von Phosphat sowie die Förderung und Entwicklung von Verfahren aus P-haltigen Stoffströmen beschrieben.

Die Umweltministerkonferenz (UMK) hat ferner die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) damit beauftragt, verschiedene Handlungsoptionen zur nachhaltigen Nutzung sekundärer Phosphorreserven sowie die bisher bekannten Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit zu bewerten.

Des Weiteren ist seitens der Bundesregierung eine neue Verordnung zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammaschen in Planung. Die sogenannte „Phosphatgewinnungsverordnung“ (AbfPhosV) soll die Mitverbrennung aller Klärschlämme unterbinden, die einen Mindestgehalt an Nährstoffen, insbesondere Phosphat, überschreiten.

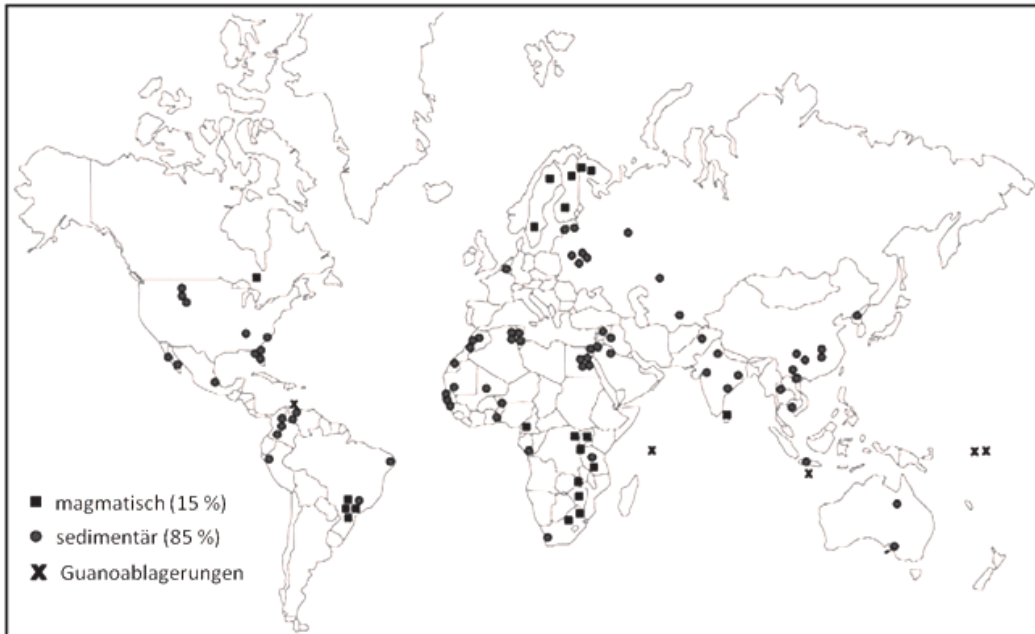


Abbildung 1: Phosphaterz-Lagerstätten weltweit (verändert nach FAO, 2004)

Ca. 90% der globalen geogenen Reserven liegen im Besitz von nur 5 Staaten. Deutschland hat keine eigenen P-Lagerstätten.

Generell müssen die Phosphatlagerstätten unterschieden werden in:

- Reserven: Lagerstätten, die zum derzeitigen Stand der Technik sowie mit vertretbarem ökonomischen Aufwand unter 40 US-\$/Mg Erz abgebaut werden können (Montag, 2008),
- Potentielle Reserven: Lagerstätten, die mit den heutigen Abbautechniken nicht wirtschaftlich abgebaut werden können und deren Abbaukosten bis zu 100 US-\$/Mg Erz betragen (Montag, 2008),
- Ressourcen: bereits entdeckte, jedoch nicht erkundete Lagerstätten unbekannter Größe und Phosphatgehalte (Montag, 2008).

Die statische Reichweite der kontinentalen abbauwürdigen Phosphatreserven beträgt nach Angaben der Deutschen Rohstoffagentur DERA (2011) derzeit ca. 400 Jahre. Die Verfügbarkeit von Phosphatgestein mit vergleichsweise niedrigen Gehalten an Schadstoffen (v.a. Cadmium und Uran) ist deutlich kürzer.

Aufgrund der stetigen Entdeckungen neuer Erzvorkommen und der kontinuierlichen Weiterentwicklung von Abbautechniken, die den Abbau bisher unzugänglicher Lagerstätten ermöglichen, scheint eine Vorhersage der statischen Reichweite jedoch eher spekulativ und für die allgemeine Diskussion zum Thema Phosphatrecycling wenig zielführend. Vielmehr müssen die Phosphatreserven als dynamische Größe gesehen werden (Scholz & Wellmer, 2013).

**Tabelle 1:** Schwermetallgehalte von Rohphosphat unterschiedlicher Herkunft (verändert nach Montag, 2008). Grenzwerte der Düngemittelverordnung: Cd 1,5 mg/kg TM, für Düngemittel ab 5 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (FM) 50 mg Cd/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

mg/kg	Rohphosphate					Hintergrundwerte für Böden (LABO)	
	sedimentär				magmatisch	Sand	Löss
	USA	Marokko	China	Mittl. Osten	Russland (Kola)		
Cd	6,1 - 92	15 - 38	< 2 - 2,5	1,5 - 35	0,1 - 1,3	< 0,3	< 0,3
Cr	60 - 637	75 - 279	18 - 33	25 - 230	13	17	120
Cu	9,6 - 23	1 - 22	k.A.*	5 - 31	15 - 30	7	18
Ni	17 - 37	26	k.A.*	20 - 80	2 - 15	4	28
Zn	204 - 382	261	k.A.*	29 - 630	19 - 23	25	73
Pb	4,6 - 17	7 - 14	1,5 - 6	1 - 33	1,8 - 33	20	43
As	7 - 24	9,2 - 13	9 - 26	2,1 - 35	1 - 10	2	8
V	23 - 769	87 - 200	8 - 80	59 - 303	100	23	69
Hg	0,05 - 0,29	0,04 - 0,86	0,005 - 0,21	0,002 - 0,02	0,004 - 0,01	0,05	0,12
U	65 - 180	75 - 155	23 - 31	40 - 170	10 - 28	0,8 - 11*	0,8 - 11*

\* keine Angabe

\* Böden weltweit

Da Deutschland über keine eigenen P-Lagerstätten verfügt, ist die Landwirtschaft zur Erhaltung ihres Ertragsniveaus auf den Import von P als Pflanzennährstoff angewiesen. Dies geschieht im Wesentlichen über die Einfuhr Phosphatdüngern sowie von Phosphaterzen und daraus hergestellten Mineraldüngern.

Derzeit wird lediglich ein Teil des P-Bedarfs durch bestehende Nährstoffkreisläufe abgedeckt (Wirtschaftsdünger pflanzlichen und tierischen Ursprungs, organische und mineralische Nährstoffträger aus der Kreislaufwirtschaft).

Ziel ist es, den Einsatz von Phosphor aus Recyclingprozessen zu erhöhen. Dies gilt insbesondere für die Herstellung und Anwendung von Düngemitteln mit Recycling-P anstelle von P-Düngemitteln aus Rohphosphaten [ProgRes Teil III Nr. 2.1].

## 2 P-Dünger

### 2.1 P-Dünger

Gemäß deutscher Düngemittelverordnung (DüMV) zugelassene bzw. verkehrsfähige P-Dünger sind

- a) Mineralische Einnährstoffdünger im Sinne der Anlage 1 Abschnitt 1 Nr. 1.2 (P-Dünger)
- b) Mineralische Mehrnährstoffdünger im Sinne der Anlage 1 Abschnitt 2 Nr. 2.1 (NP-Dünger), Nr. 2.3 (PK-Dünger) und Nr. 2.4 (NPK-Dünger)
- c) Organische Düngemittel im Sinne der Anlage 1 Abschnitt 3 Nr. 3.1 (organische P-, NP-, PK- oder NPK-Dünger)
- d) Organisch-mineralische Düngemittel im Sinne der Anlage 1 Abschnitt 3 Nr. 3.2 (organisch-mineralische P-, NP-, PK- oder NPK-Dünger)
- e) EG-Düngemittel nach EG (VO) 2003/2003 (mineralische P-, NP-, PK- oder NPK-Dünger)

Die vorgenannten P-Dünger können sowohl

- Phosphor aus Rohphosphaterzen, als auch
- Phosphor aus Recyclingprozessen enthalten.

Die meisten landwirtschaftlichen P-Dünger werden in Deutschland nach der europäischen Verordnung (EG) Nr. 2003/2003 in Verkehr gebracht. Diese Verordnung gilt ausschließlich für mineralische Düngemittel. Eine Ausweitung des Geltungsbereiches auch auf organische Düngemittel ist in Vorbereitung.

Unabhängig davon, auf welcher Rechtsgrundlage P-Dünger in Verkehr gebracht werden, werden im hier diskutierten Zusammenhang die Bestimmungen und Anforderungen der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV) zugrunde gelegt.

Düngemittel mit Spurennährstoffen bzw. Spurennährstoffdünger nach Anlage 1 Abschnitt 4 sowie Düngemittel für Rasen und Zierpflanzen nach Anlage 1 Abschnitt 5 DüMV bleiben unberücksichtigt. Ebenfalls unberücksichtigt bleiben Bodenhilfsstoffe nach § 2 Nr. 6 und Kultursubstrate nach § 2 Nr. 8 DüG.

Neben den klassischen Düngemitteln (Handelsdünger) sind auch Wirtschaftsdünger pflanzlichen oder tierischen Ursprungs gemäß § 2 Nr. 2 Düngengesetz (DüG) zu berücksichtigen.

Im hier diskutierten Zusammenhang wird unterschieden zwischen dem

- innerbetrieblichen Einsatz von Wirtschaftsdüngern und dem
- überbetrieblichen Einsatz.



Tabelle 2a: Absatz/Einsatz P-haltiger Mineraldünger (Zahlen gerundet)

Absatz/Einsatz von P-haltigen Mineraldüngern [1]	Absatz-/Anfall-Menge pro Jahr	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Gehalt	P-Menge [t]*
	in 1000 t P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	[%]	in 1000 t P
(Triple-) Superphosphat	12	(46) 18	(2,4) 0,94
andere Phosphat-Dünger (z.B. Rohphosphat)	7	23 - 26	0,70 - 0,79
PK-Dünger	19	k.A.	-
NP-Dünger	161	k.A.	-
NPK-Dünger	47	5 - 16	1,0 - 3,28
Gesamtmenge P-Dünger	247	4 - 32	4,3 - 34,5

Tabelle 2b: Anfallmenge und P-Potential P-haltiger Düngemittel aus Recyclingprozessen (Zahlen gerundet)

Abfälle mit relevanten P-Gehalten	Anfallmenge pro Jahr	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Gehalt	Theoretisches P-Potential
Absatz/Einsatz von P aus Sekundärrohstoffdüngern	in 1000 t	[%]	in 1000 t P
Klärschlamm (TM) [2]	1890	4 - 7	76 - 132
davon als Aschen aus der Monoverbrennung (TM) [3]	250	6-10	15 - 25
Kompost (FM) [4]	4037	0,66	27
Gärprodukte (FM) [4]	2942	1,6 - 5,8	47 - 171
Tiermehl (TM) [5]	400	7	28
Fleischknochenmehl [5]	160	14	22
Holzasche (naturbelassen) (TM) [6]	210	1,5 - 4	3 - 8
Gesamtmenge P-Dünger aus Recyclingprozessen	9639	1,5 - 14	203 - 388

Tabelle 2c: Absatz/Einsatz und P-Potential verschiedener Wirtschaftsdünger

Anfall/Einsatz von P aus Wirtschaftsdüngern [7]	Anfallmenge pro Jahr	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Gehalt	P-Potential
Anfall/Einsatz von P aus Wirtschaftsdüngern [7]	In 1000 [t]/[m <sup>3</sup> ] FM	[kg/m <sup>3</sup> ]	in 1000 t P
Rindergülle	115.012	1,4 - 2,1	70 - 105
Schweinegülle	36.654	1,2 - 3,9	19 - 62
Geflügel- und sonstige Gülle	431	5,8	1
Jauche	7024	0,2 - 0,4	0,6 - 1,2
Flüssiger Biogasgärrest	31.568	1,3 - 7,9	18 - 109
Gesamtmenge flüssiger Wirtschaftsdünger	190.689	2 - 6	167 - 499
Feste Wirtschaftsdünger [t]	in 1000 [t] TM	[kg/t]	in 1000 t P
Festmist	25.707	3,0 - 21,8	34 - 245
Geflügeltrockenkot	1665	10,04	7,3
Fester Biogas Gärrest	915	1,3 - 7,9	0,5 - 3,2
Gesamtmenge feste Wirtschaftsdünger	28.287	1,3 - 21,8	16 - 269

\* Umrechnungsfaktoren: P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in P = 0,436; P in P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 2,29

[1] DESTATIS (2012): Fachserie 4 Reihe 8.2. Produzierendes Gewerbe. Düngemittelversorgung. Wirtschaftsjahr 2011/2012.

[2] BMU (2012): Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland.

[3] Adam, C. & Vogel, C. (2010): Technische Möglichkeiten der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen. VDI Wissensforum.

[4] DESTATIS (2012): Fachserie 19 Reihe 1. Umwelt. Abfallentsorgung.

[5] Römer, W. (2013): Phosphordüngewirkung von P-Recyclingprodukten. Korrespondenz Abwasser, Abfall. 2013 (60) Nr.3.

[6] Angaben der Bundesgütegemeinschaft Holzasche (BGH), 2012.

[7] DESTATIS (2011): Fachserie 3 Reihe 2.2.2. Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in landwirtschaftlichen Betrieben - Erhebung zur Wirtschaftsdüngerabbringung.

In Deutschland werden rund 108.000 t Phosphor (P) in Form verschiedener Mineraldünger importiert und zur Düngung genutzt. Die P-Einfuhr über Futtermittelimporte ist hier nicht aufgeführt, liefert aber zusätzlich rund 122.600 Tonnen Phosphor (P) pro Jahr (Gethke-Albinus, 2012).

Der jährliche Anfall P-haltiger Abfälle, die sich für ein Phosphorrecycling besonders eignen, liegt bei insgesamt rund 10 Mio. t pro Jahr, wobei die  $P_2O_5$ -Gehalte dieser Stoffe erheblich variieren können und das tatsächliche Phosphor-Düngepotenzial somit zwischen etwa 203.000 t bis etwa 388.000 t P/a liegt (vgl. Tabelle 2). Wirtschaftsdünger bleiben aufgrund des überwiegend innerbetrieblichen Kreislaufes unberücksichtigt. Der nach Deutschland importierte Anteil an Mineraldünger-P könnte somit vollständig durch Recycling-P aus organisch mineralischen und mineralischen P-haltigen Reststoffdüngern abgedeckt werden, wobei das theoretische Potenzial von Recycling-P aus Abfällen den Bedarf von Mineraldünger-P sogar um ein Mehrfaches übersteigt (Faktor 1,5 bis 3,5).

Die tatsächlich eingesetzte Menge an Recycling-P ist jedoch weitaus geringer. So werden von den jährlich rund 1,9 Mio. t Klärschlamm-Trockenmasse insgesamt nur 30 % landwirtschaftlich verwertet. Tier- und Fleisch-/Knochenmehle dürfen nach den gesetzlichen Vorgaben nur unter bestimmten Voraussetzungen als Düngemittel eingesetzt werden, so dass hier nur geringe Teilmengen verwertet werden. Klärschlammaschen werden derzeit überwiegend deponiert oder bspw. in der Bauindustrie eingesetzt. Der darin enthaltene Phosphor geht somit verloren. Nur etwa 10 % der monoverbrannten Klärschlammaschen wird direkt zur Düngung genutzt.

Tatsache ist also, dass der Großteil der Phosphor-Potentiale, die durch Recyclingprozesse erschlossen werden könnten, momentan nicht ausgeschöpft werden. Hier gilt es Lenkungsmaßnahmen zu finden, um diese Potential nutzbar zu machen.

## 2.2 Entwicklung der Marktpreise für mineralische P-Dünger

Seit den 1990er Jahren lagen die Preise für Rohphosphaterz im Mittel konstant bei 40 €/t. Zwischen 2006 und 2008 stiegen die Preise rasant bis auf eine Rekordhöhe von über 300 €/t an, fielen bis zum Jahresende 2009 jedoch wieder auf etwa 60 €/t herab. Seitdem steigen die Preise für Rohphosphat wieder stetig an und liegen derzeit (2012) bei rund 150 €/t Phosphaterz (Abbildung 2).

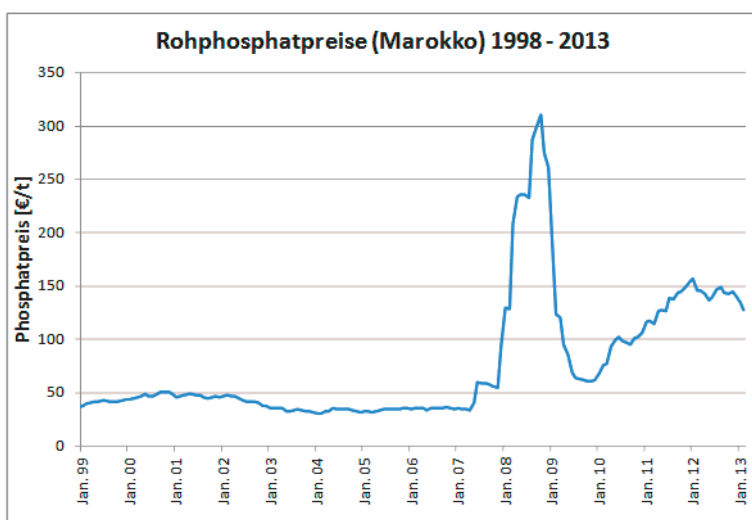


Abbildung 2: Entwicklung der Rohphosphatpreise (Herkunft Marokko) über den Zeitraum von 1998 - 2013 [in € pro Tonne Erz] (Quelle: indexmundi.com, 2013)

Der deutliche Anstieg der Phosphaterzpreise beruht auf der steigenden Weltbevölkerung sowie einer Steigerung des Lebensstandards, insbesondere in Asien und den Drittländern, welcher mit einer entsprechend steigenden Nachfrage nach Nahrungs- und Düngemitteln einhergeht. Die Endlichkeit der Ressource Phosphor verstärkt den Preisanstieg zusätzlich.

In Deutschland lagen die Preise für eine Tonne mineralischen P-Dünger im Wirtschaftsjahr 2010/2011 bei rund 980 €, die Tendenz ist steigend (Abbildung 3).

Die Preisentwicklung für P-Düngemittel in Deutschland verläuft weitgehend analog der Entwicklung der weltweiten Preise für Rohphosphaterze. Die weitere Entwicklung der Preise ist derzeit nur schwer abzuschätzen. Die Rohphosphatpreise werden auch künftig weiter steigen, in welcher Höhe und über welche Zeitspanne ist jedoch ungewiss.

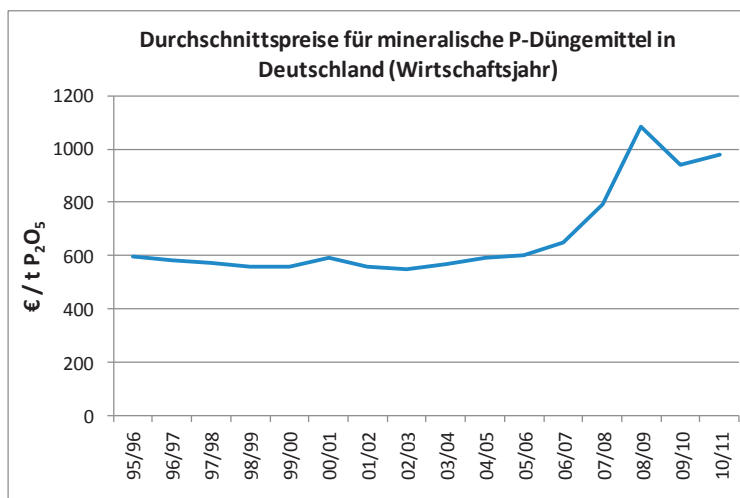


Abbildung 3: Durchschnittliche Preise für mineralische P-Düngemittel in Deutschland in den Wirtschaftsjahren 1995/1996 - 2010/2011 [in € je Tonne P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>] (Quelle: IVA, 2007 und 2011).

### 3 P-Düngung

#### 3.1 Phosphor als Pflanzennährstoff

Phosphor ist ein Pflanzennährstoff, der in seiner Funktion nicht substituierbar ist. Als Baustein der Nukleinsäuren in DNA und RNA ist er fester Bestandteil der Erbsubstanz und spielt als Komponente des Adenosintriphosphats (ATP) eine entscheidende Rolle im Energiestoffwechsel der Zellen.

Phosphor ist limitierender Faktor beim Pflanzenwachstum. Er fördert die Blüten-, Frucht- und Samenbildung. Phosphor-Mangel führt bei Pflanzen somit zu kümmerlichem Wuchs, Rotfärbung der Blätter, Blattabwurf und Unfruchtbarkeit.

#### 3.2 Bedarf von Pflanzenkulturen bzw. Fruchtfolgen nach guter fachlicher Praxis

In Abhängigkeit vom spezifischen Nährstoffbedarf der angebauten Kulturpflanze, ihrem standortbedingten Ertragsniveau und dem Gehalt des Bodens an pflanzenverfügbaren Nährstoffen ergibt sich ein schlagspezifischer Düngebedarf.

Der Bedarf wird durch die ‚Gute fachliche Praxis der Düngung‘ gemäß der Düngeverordnung (DüV) konkretisiert.

#### 3.3 P-Löslichkeit in Düngemitteln

Zur Charakterisierung der Phosphor-Pflanzenverfügbarkeit eines Düngemittels wird üblicherweise dessen Phosphor-Löslichkeit in verschiedenen Reagenzien herangezogen. Als leichtlöslich und sofort verfügbar gelten neutralammoncitrat- und wasserlösliche Dünger, wie z.B. Super- und Triplesuperphosphat, Monoammonphosphat (MAP) und Diammonphosphat (DAP).

Dünger, welche in einer schwachen Säure wie z.B. Neutral-Ammoncitrat oder Zitronensäure löslich sind, werden in der Regel innerhalb einer Vegetationsperiode für die Kultur verfügbar.

Die nahezu ausschließliche Löslichkeit in einer starken Säure (Mineralsäure) charakterisiert hingegen Nährstoffe, die für die Pflanzen nur langfristig verfügbar werden können. Tabelle 3 zeigt die P-Löslichkeit verschiedener P-Mineraldünger und deren Wirkungsgeschwindigkeit.

Tabelle 3: Löslichkeit und Wirkungsgeschwindigkeit verschiedener P-Mineraldünger (KTBL, 2009; Kratz und Schnug, 2008)

Düngemittel	Aufschlussgrad	Gesamtgehalt P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [%]	P-Löslichkeit	Wirkungsgeschwindigkeit
Superphosphat	Vollaufschluss	18	neutral-ammoncitrat, 17 % wasserlösliches P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	schnell
Triple-Superphosphat	Vollaufschluss	46	neutral-ammoncitrat, 43 % wasserlösliches P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	schnell
Teilaufgeschlossenes Rohphosphat	Teilaufschluss	ca. 23	Mineralsäure	schnell und langsam
Weicherdiges Rohphosphat	-	> 25	mind. 55 % in Ameisensäure (2 %ig)	sehr langsam

Die P-Löslichkeit organischer Dünger lässt sich deutlich schwieriger charakterisieren als die von mineralischen P-Düngern. Die theoretische Löslichkeit in verschiedenen Reagenzien spiegelt hier in der Regel nicht die tatsächliche Pflanzenverfügbarkeit bzw. Anrechenbarkeit des Düngemittels wider. Tabelle 4 zeigt die P-Bindungsformen und die P-Löslichkeiten verschiedener organischer Dünger.

Tabelle 4: Löslichkeit verschiedener Dünger (verändert nach Kratz und Schnug, 2008)

Düngemittel	P-Gesamtgehalt [% TM]*	P-Bindungsformen	P-Löslichkeit
Wirtschaftsdünger	0,5 - >10	60 - 90 % anorganisch im Feststoff	organische Formen (je nach Tierart): 5 - 50 % wasserlöslich
Kompost	< 1	55 - 95 % anorganisch	3 - 20 % wasserlöslich, organische Formen ca. 20 -40 % CAL-löslich
Klärschlamm	1 - 5	60 - 90 % anorganisch	abhängig von der P-Fällung: < 1 - 38 % wasserlöslich
Klärschlammasche	3,7 – 10,1**	ca. 100 % anorganisch	schwer löslich

\* Umrechnungsfaktoren: P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in P = 0,436; P in P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 2,29

\*\* (BMU, 2012)

Nach der Düngemittelverordnung müssen ausschließlich die P-Gesamtgehalte gekennzeichnet werden. Der Phosphor in organischen Düngemitteln ist mittelfristig für Pflanzen verfügbar.

## 4 P-Recycling

### 4.1 Zielstellung des P-Recyclings

Vorrangiges Ziel ist die Substitution des Einsatzes von Phosphaterzen in Düngemitteln durch Recycling-P.

Mittelfristig wird eine deutliche Erhöhung der P-Substitutionsrate angestrebt, langfristig eine möglichst weitgehende Substitution von Phosphaterzen in Düngemitteln durch Recycling-P.

### 4.2 Quellen für P aus Recyclingprozessen

Wesentliche Quellen für Recycling-P zur Substitution von Phosphaterzen sind

- a) Tierkörperverwertung  
Tierkörper- und Fleisch-/Knochenmehl.  
Aschen aus der Verbrennung von Tierkörpern und Knochen sind in e) enthalten.
- b) Abwasser und Klärschlamm  
Direkte landwirtschaftliche Verwertung unbedenklicher Klärschlämme als P-Düngemittel ohne weitere Aufbereitung.  
Ferner kommen zusätzliche Aufbereitungs- und Rückgewinnungsverfahren (z.B. MgAP-Verfahren aus Abwässern, oder Extraktionsverfahren aus Klärschlamm und Klärschlammaschen aus der Monoverbrennung) in Betracht. Aschen aus der Monoverbrennung von Klärschlamm sind in e) enthalten.
- c) Bioabfälle  
in Form von Kompost oder Gärprodukten aus der Verarbeitung von Bioabfällen aus der getrennten Sammlung.  
Auch Bioabfälle aus dem gewerblichen Bereich, etwa Produktionsrückstände aus der Nahrungs- und Futtermittelproduktion, oder der Nutzung von Biomasse für energetische Zwecke (z.B. Herstellung von Bioethanol).
- d) Gärrückstände (Gärprodukte)  
aus der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen in Biogasanlagen mit und ohne Wirtschaftsdünger.
- e) Aschen  
aus der Verbrennung von pflanzlichen und tierischen Stoffen sowie von naturbelassenem Holz und Klärschlamm.
- f) Wirtschaftsdünger pflanzlicher und tierischer Herkunft (soweit in Verkehr gebracht, d.h. nicht innerbetrieblich verwertet).

### 4.3 P-Recyclingverfahren

Bei den P-Recyclingverfahren können ‚Aufbereitungsverfahren‘ und ‚Rückgewinnungsverfahren‘ unterschieden werden.

Unter Aufbereitungsverfahren werden im Folgenden solche Verfahren verstanden, bei denen P-haltige Stoffe wie Klärschlamm oder Bioabfälle zu Düngemitteln oder zu Ausgangsstoffen für Düngemittel aufbereitet werden. Dies beinhaltet auch die Trocknung und Granulierung der Stoffe.

Insgesamt fielen 2010 in Deutschland ca. 1,9 Mio. t TS Klärschlamm aus Kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen an, von denen 588.000 t (= 30%) als Dünger in der Landwirtschaft verwertet wurden (Statistisches Bundesamt, BMU, 2012).

Aus ca. 7,5 Mio. t Bio- und Grünabfällen werden ca. 3,75 Mio. Tonnen Komposte hergestellt, die zu ca. 65 % direkt als organischer Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt werden (Statistisches Bundesamt 2010, BGK 2013).

Unter Rückgewinnungsverfahren werden im Folgenden Verfahren verstanden, bei denen Phosphate oder P-reiche Fraktionen aus einem Material (z.B. Klärschlamm) separiert oder aufkonzentriert werden. Hierzu zählt beispielsweise die Abscheidung von MgAP (Magnesiumammoniumphosphat) aus Abwasser. Auch die Monoverbrennung P-haltiger Stoffe (ggf. mit nachfolgender weitergehender Aufbereitung der Aschen) wird im Folgenden als Rückgewinnungsverfahren eingestuft. Hier führt die Verbrennung der Organik zu einer erheblichen Aufkonzentrierung des Phosphors in der Asche. Die gewonnen P-reichen Fraktionen können entweder direkt als Düngemittel oder als Ausgangsstoffe für die Herstellung von Düngemitteln genutzt werden.

Rückgewinnungsverfahren werden eingesetzt, um

- P aus Stoffen zu gewinnen, die z.B. aufgrund erhöhter Gehalte an Schadstoffen als Düngemittel oder als Ausgangsstoff für Düngemittel nicht direkt geeignet sind, oder
- die Konzentration von Recycling-P in Düngemitteln zu erhöhen, oder
- eine geeignete Beschaffenheit des Recyclates zu gewährleisten, etwa im Hinblick auf Zumischungen bei der Herstellung von Düngemitteln.
- operative Vorteile für den Anlagenbetrieb (z.B. Kläranlagen) mit den Aspekten Ressourcenschutz und erhöhter Energieeffizienz zu kombinieren.

**Tabelle 5:** Stand der Technik der Phosphorrückgewinnungsverfahren aus Abwasser, Klärschlamm sowie Klärschlamm- und Tiermehlasche (verändert nach Kabbe, Ch., 2013)

P Rückgewinnung aus Schlamm			
Prozess	Standort/Betreiber	Maßstab	Produkt
AirPrex®	Waßmannsdorf (DE) BWB	voll	MAP Berliner Pflanze
AirPrex®	MG-Neuwerk (DE) Niersverband	voll	MAP
AirPrex®	BS-Steinhof (DE) SE BS/AVB	voll	MAP im Schlamm
AirPrex®	Wieden-Echten (NL)	voll	MAP
AirPrex®	Amsterdam (NL) In Vorbereitung	voll	MAP
LYSOGEST®	Lingen (DE) SE Lingen	voll	MAP
NuReSys®	Leuven (BE) Aquafin	voll	MAP BIOSTRU®
PHOSPAQ	Olburgen (NL) Waterstromen	voll	MAP
PHOSPAQ	Lomm (NL) Waterstromen	voll	MAP
CRYSTALACTOR®	Geestmerambacht (NL)	voll	CaP
Gifhornprocess	Gifhorn (DE) ASG	voll	MAP
Fix-Phos	Hildesheim (DE) SEHi	voll	CaP im Schlamm
Stuttgarter Verfahren	Offenburg (DE)	Pilot	MAP
BudenheimVerfahren	Mainz (DE)	Pilot	CaP

P-Rückgewinnung aus dem Prozesswasser			
Prozess	Standort / Betreiber	Maßstab*	Produkt
REPHOS®	Molkerei Altentreptow (DE) Remondis Aqua	voll	MAP
PEARL® (PEARL 500)	Slough (UK) Thames Water	voll	MAP Crystal Green™
NuReSys®	Molkerei (BE)	voll	MAP BIOSTRU®
NuReSys®	Kartoffelverarbeitung (BE) Harelbeke	voll	MAP BIOSTRU®
NuReSys®	Kartoffelverarbeitung (BE) Nieuwerkerke	voll	MAP BIOSTRU®
NuReSys®	Kartoffelverarbeitung (BE) Waasten	voll	MAP BIOSTRU®
NuReSys®	Pharmaindustrie (BE) Geel	voll	MAP BIOSTRU®
P-RoC	Neuburg (DE)	Pilot	CaP
PHOSTRIP	Brüssel Nord (BE) Aquiris (Veolia Eau)	Pilot	MAP oder CaP
P-Rückgewinnung während oder nach thermischer Verwertung			
Prozess	Standort / Betreiber	Maßstab*	Produkt
MEPHREC®	Nürnberg (DE) SUN	voll	P-Schlacke
SUSAN	Königs Wusterhausen(DE) RETERRA	voll	P-Dünger
ICL Düngemittelproduktion	Amsterdam (NL) Ludwigshafen (DE)	voll	P-Dünger
LeachPhos	MSWI plant of Bern (CH)	Pilot	MAP oder CaP
EcoPhos/SNB/HVC	EcoPhos (BE)	voll	DCP

\*Anlagen bereits im Betrieb oder Bau in Planung

<sup>1</sup> „voll“ großtechnisch realisiert

Man kann nasschemische und thermische bzw. thermochemische Recyclingverfahren voneinander unterscheiden. Nasschemische Verfahren setzen sich in der Regel aus mehreren hintereinandergeschalteten Säurebehandlungen und Laugungsprozessen zusammen. Sie finden bisher meist bei der Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser oder Klärschlamm Anwendung. Hier setzt auch die Fällung von Magnesiumammoniumphosphaten (MgAP) an. Thermochemische Verfahren werden überwiegend zur Behandlung von (Klärschlamm-) Aschen eingesetzt. Nach der chemischen Vorbehandlung wird das Aschematerial zusätzlich thermisch aufgeschlossen.



Neben den vorgenannten Verfahren ist auch eine biologische P-Rückgewinnung mit Hilfe von Mikroorganismen möglich. Auch an der Rückgewinnung von Phosphor aus Wirtschaftsdüngern wurde in den 1990er Jahren intensiv geforscht. Aktuell gibt es in diesem Bereich jedoch keine weiteren Entwicklungen. Eine großtechnische Anwendung dieser Verfahren findet bisher nicht statt.

Bei der Beurteilung der Effizienz von Rückgewinnungsverfahren sind u.a. folgende Aspekte von Bedeutung:

- Rückgewinnungsquote: Anteil an P, welcher in einem Rückgewinnungsverfahren bezogen auf die im Ausgangsstoff enthaltene P-Menge extrahiert und als Düngemittel oder Ausgangsstoff für Düngemittel verwendet werden kann.  
Angabe in % des Gesamt-P im Ausgangsstoff.
- Löslichkeit von Recycling-P: Anteil des in einem Recycling-P-Dünger enthaltenen Phosphates, das in einem bestimmten Lösungsmittel (Wasser, verschiedene Säuren) in Lösung geht und als Maß herangezogen werden kann, um die Pflanzenverfügbarkeit und die für die Düngung anrechenbaren P-Anteile zu bewerten. Es werden hohe Ammoniumcitratlöslichkeiten angestrebt.
- Vor- bzw. Nachteile bei der Anwendung der entsprechenden Verfahren für die Gesamtanlage (operativ, ökonomisch) und die Umwelt (ökologisch).

Im Fokus der P-Recyclingdiskussion stehen derzeit v.a. verschiedene technische Rückgewinnungsverfahren (s. Tabelle 5).

## 5 Qualitätssicherung des P-Recycling

### 5.1 Ausweisung von Recycling-P in Düngemitteln

Die Entwicklung des P-Recycling kann durch qualitative und quantitative Zielvorgaben gelenkt und gefördert werden.

Um Maßnahmen und Zielvorgaben zu verifizieren, sollte in Düngemitteln enthaltenes P aus Recyclingprozessen - z.B. durch ein P-Recycling-Zeichen - kenntlich gemacht werden.

Es sollten sowohl Ausgangsstoffe für Dünger, das Herstellungsverfahren als auch Düngemittel einschließlich ihrer P-Löslichkeit qualifiziert werden.

Durch unterschiedliche Farbgebung oder ergänzende Bezeichnungen kann zwischen Aufbereitungs- und Rückgewinnungsverfahren unterschieden werden (Abbildung 4).

Die Ausweisung kann quantitative Angabe enthalten, z.B. die Angabe der Menge an Recycling-P in kg  $P_2O_5$  je Tonne des jeweiligen Düngemittels oder des prozentualen Anteils an Recycling-P in Bezug auf den Gesamt-P-Gehalt des Düngemittels.



Aufbereitungs- bzw. Rückgewinnungsverfahren  
Anteil Recycling-P



Themen-Logo

### 5.2 Qualitätssicherung des P-Recycling

Die Ausweisung von Recycling-P in Düngemitteln oder in Ausgangsstoffen für Düngemittel sollte nach definierten, einheitlichen und überprüfbaren Kriterien erfolgen.

Die Ausweisung sollte im Rahmen von Prüfungen anerkannter und unabhängiger Qualitätssicherungsorganisationen erfolgen.

Es sollten nachfolgende Kriterien berücksichtigt werden:

a) **Art und Herkunft des Recycling-P**

Angaben über

- Art und Herkunft des eingesetzten Recycling-P im Düngemittel
- Rückverfolgbarkeit des eingesetzten Recycling-P (im Rahmen der Eigenüberwachung, z.B. durch innerbetriebliche Betriebstagebücher)

b) **Verkehrsfähigkeit**

Verkehrsfähigkeit und Zulässigkeit der Anwendung des Düngemittels nach Maßgabe der düngerechts- und abfallrechtlichen Bestimmungen. Darin sind u.a. enthalten

- die Zulässigkeit der verwendeten Ausgangsstoffe (nach der für das Inverkehrbringen geltenden Rechtsgrundlage)
- die Unbedenklichkeit (Einhaltung von Grenz- und Kennzeichnungswerten)
- eine zutreffende und vollständige düngerechtliche Kennzeichnung

c) **Qualitätskriterien – P-Löslichkeit und Schadstoffschwellen**

Wirksamkeit des Recycling-P im Düngemittel neben weiteren Kriterien u.a. nach Maßgabe der Löslichkeit und niedriger Schadstoffgehalte (noch näher zu bestimmen)

d) **Prüfung**

Prüfung der Anforderungen durch die Qualitätssicherungsorganisation

- im Rahmen bestehender Qualitätssicherungen für Düngemittel

e) **Bescheinigung**

Bescheinigung der Qualitätssicherungsorganisation, welche die Ergebnisse der Prüfungen des Düngemittels abbildet (z.B. in Form von Prüfzeugnissen) insbesondere

- Handelsbezeichnung des jeweiligen Düngemittels, Name und Anschrift des Herstellers sowie die jährlich von diesem Hersteller im Rahmen der Qualitätssicherung in Verkehr gebrachte Menge
- Ergebnisse der Untersuchung des jeweiligen Düngemittels inkl. Angaben zur Löslichkeit und „Anrechenbarkeit des Recycling-P“ bei der Düngung
- Anteil von Recycling-P am Gesamt-P im jeweiligen Düngemittel, sowie Angabe der Menge an Recycling-P, die mit dem jeweiligen Düngemittel jährlich in Verkehr gebracht wird
- Bestätigung der Übereinstimmung mit den düngerechts- und ggf. abfallrechtlichen und veterinärrechtlichen Bestimmungen. Hierbei muss sichergestellt werden, dass für jegliche Düngemittel, egal ob Mineraldünger oder Düngemittel aus der Kreislaufwirtschaft, dieselben Maßstäbe gelten.
- Bestätigung der ordnungsgemäßen düngerechtlichen Kennzeichnung des Düngemittels

Die Ausweisung von P-Recycling in Düngemitteln sollte nach bundesweit und möglichst auch europaweit einheitlichen Mindeststandards erfolgen.

## Ausblick

Der Erfolg des Phosphor-Recyclings hängt u.a. von den Lenkungsmaßnahmen ab, die seitens der Politik in den gesetzlichen Regeln verankert werden. Ferner gilt es durch gezielte Aufklärungsarbeit die Anwendung von P-Recyclingdüngern in der Landwirtschaft zu etablieren und zu fördern. Gezielte Förderinstrumente könnten darüber hinaus dazu beitragen, die Marktchancen der Recyclingphosphate zu verbessern.

Seitens des Gesetzgebers und in Fachkreisen werden bereits heute zahlreiche Maßnahmen diskutiert, die zu einer Erhöhung der P-Substitutionsrate führen können. So sind z.B. für Klärschlämme durch das BMU entsprechende Regelungen im Zuge der Novelle der Klärschlammverordnung sowie der geplanten Phosphatrückgewinnungsverordnung „AbfPhosV“ angekündigt worden.

Im Folgenden werden beispielhaft mögliche Maßnahmen aufgezeigt, für deren Umsetzung ausgewogene Regelungen so zu entwickeln sind, dass das P-Recycling gefördert wird und gleichzeitig die Entsorgungssicherheit der betroffenen Abfälle gewahrt bleibt.

- Einschränkung der Mitverbrennung von Abfällen mit hohen P-Gehalten, insbesondere wenn diese nach den Bestimmungen des Abfall- und Düngerechtes als Düngemittel stofflich verwertet werden können.
- Einführung von P-Rückgewinnungsquoten bei der thermischen Behandlung von Abfällen mit hohen P-Gehalten durch Rückgewinnung des Phosphors vor der Verbrennung oder aus der Asche. Alternativ rückholbare Ablagerung der Asche.
- Aschen, die nach Anlage 2 Nr. 7.3.16 DüMV als Bestandteil von Düngemitteln zulässig und geeignet sind, sollten vorrangig als Düngemittel verwertet werden oder aber rückholbar abgelagert werden. Dies gilt u.a. für Aschen aus der Verbrennung von naturbelassenem Holz, die heute noch häufig deponiert werden.
- Regeln zum Abfallende von Stoffen aus der Kreislaufwirtschaft nach § 5 KrWG, die als Ausgangsstoff für Düngemittel oder als Düngemittel bestimmt sind - ggf. unter Nutzung bestehender Systeme der Qualitätssicherung nach § 12 KrWG (z.B. für Düngemittel aus aus P-Rückgewinnungsverfahren wie P-Recyclate aus Klärschlamm und Klärschlammaschen).
- Einheitliche, überprüfbare und nachvollziehbare Regeln zum Nachweis von P-Recycling - ggf. unter Nutzung bestehender Systeme der Qualitätssicherung nach § 12 KrWG.

## Glossar

### **Verwertung**

Verfahren, als dessen Hauptergebnis Abfälle einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie andere Materialien ersetzen, die sonst zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären [§ 3 Absatz 23 KrWG]. Im vorliegenden Themenpapier ist hierunter die Verwertung als Düngemittel zu verstehen.

### **Recycling / Recyclingverfahren**

Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen für einen bestimmten Zweck aufbereitet werden. Die Aufbereitung organischer Materialien ist inbegriffen, nicht aber zur Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung. [§ 3 Absatz 25 KrWG]

### **P-Recycling / P-Recyclingverfahren**

Hier:

- a) Aufbereitungsverfahren.
- b) Rückgewinnungsverfahren

### **Aufbereitungsverfahren**

Hier: Aerobe, anaerobe oder mechanische Behandlung zum Zweck der Herstellung eines P-Düngemittels (z.B. als Kompost, Gärprodukt, Klärschlamm, 'Düngepellet').

### **Rückgewinnungsverfahren**

Hier: Chemisch/technische Extraktionsverfahren zur Gewinnung von P-Recyclaten als Düngemittel oder Ausgangsstoff für P-Düngemittel (z.B. in Form von Magnesiumammoniumphosphaten (MgAP), Calciumphosphaten (CaP) oder Magnesiumphosphaten (MgP)).

### **Rückgewinnungsquote**

Hier: Anteil an P, welches in einem Rückgewinnungsverfahren aus dem ursprünglichen Stoff extrahiert und als Düngemittel oder Ausgangsstoff für Düngemittel verwendet werden kann. Bei abwasserbürtigen Recyclingprozessen Angabe in % Gesamt-P bezogen auf den Kläranlagenzulauf, sonst auf den ursprünglichen Stoff.

### **Recycling-P**

Hier: In P-Düngemitteln enthaltenes P aus P-Recyclingverfahren.

### **P-Recyclat**

Hier: Durch Rückgewinnungsverfahren aus P-haltigen Stoffen extrahierter Phosphor zur Verwendung als P-Düngemittel oder als Bestandteil von P-haltigen Düngemitteln.

### **Mineral-P**

Hier: In P-Düngemitteln enthaltenes P aus Rohphosphaterzen.

### **P-Düngemittel**

Hier: Düngemittel im Sinne der Düngemittelverordnung oder der VO EG 2003/2003 mit kennzeichnungspflichtigen Anteilen an Phosphor.

### **P-Substitutionsrate**

Hier: Menge an Recycling-P in Düngemitteln im Verhältnis zum Gesamtgehalt an P in Düngemitteln, die in Deutschland in Verkehr gebracht werden.

## Quellen

- ADAM, C & VOGEL, C. (2010): Technische Möglichkeiten der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen. VDI Wissensforum.
- BMU (2011): Entwurf des BMU für ein Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) - Programm zum Schutz natürlicher Ressourcen in einer ökologisch-sozialen Marktwirtschaft. 2011.
- BMU (2012): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Beschluss des Bundeskabinetts vom 29.2.2012. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin.
- BMU (2012): Klärschlamm entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland.
- BMU (2012): Klärschlamm-Statistik, (<http://www.bmu.de/detailansicht/artikel/klaerschlamm-statistik/>), zuletzt aufgerufen am 23.05.2013.
- DESTATIS (2010): Statistisches Bundesamt, Fachserie 3, Reihe 2.2.2, Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in landwirtschaftlichen Betrieben – Erhebung zur Wirtschaftsdünger ausbringung. Wiesbaden 2011.
- DESTATIS (2012): Fachserie 19, Reihe 1. Umwelt. Abfallentsorgung.
- DESTATIS (2012): Fachserie 4, Reihe 8.2. Produzierendes Gewerbe. Düngemittelversorgung. 1. Vierteljahr 2012. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden, 2012.
- DMK (2010): Gesamtviehdichte je Hektar Landwirtschaftliche Nutzfläche für 2010. Übersichtskarte auf [http://www.maikomitee.de/web/public/Fakten.aspx/Statistik/Deutschland/Maisanbau\\_\\_Viehbesatz](http://www.maikomitee.de/web/public/Fakten.aspx/Statistik/Deutschland/Maisanbau__Viehbesatz). Aufgerufen am 30.08.2012.
- DÜG (2009): Düngegesetz.
- DÜMV (2008): Düngemittelverordnung. Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln.
- DÜV (2007): Düngeverordnung. Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen.
- FACHVERBAND BIOGAS (2012): Branchenzahlen 2011 und Branchenentwicklung 2012/2013. [http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE\\_Branchenzahlen](http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen). Aufgerufen am 30.08.2012.
- FAO (2004): Use of phosphate rocks for sustainable agriculture. FAO Fertilizer And Plant Nutrition Bulletin. No 13. Food And Agriculture Organization Of The United Nations. Rome, 2004.
- FREDE, H.G. UND BACH, M. (2011): Strategien des Wirtschafts- und Mineraldüngereinsatzes in Pflanzenbausystemen im Focus von Umweltverträglichkeit und Effizienz. Tagungsbeitrag: BMELV-Fachtagung „Landwirtschaft 2025“. Soest, 23. und 24. Februar 2011
- GETKE-ALBINUS, K. (2012): Verfahren zur Gewinnung von Sekundärphosphaten aus flüssigen Stoffströmen und deren Einfluss auf die deutsche Phosphor bilanz. Dissertation. RWTH Aachen.
- INDUSTRIEVERBAND AGRAR (IVA) (2011): Wichtige Zahlen Düngemittel, Produktion, Markt, Landwirtschaft 2010-2011, Industrieverband Agrar, Frankfurt am Main 2011.

- ISA-ABSCHLUSSBERICHT ZUR BMBF/BMU FÖRDERINITIATIVE „KREISLAUFWIRTSCHAFT FÜR PFLANZENNÄHRSTOFFE, INSBESONDERE PHOSPHOR“ (2011): Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzeptes für Deutschland. Aachen, 2011.
- KABBE, CH. (2013): Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery, bluefacts 2013, 36-41
- KRATZ, S. UND SCHNUG, E. (2008): Agronomische Bewertung von Phosphat-Düngern. JKI-Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde Braunschweig. Tagungsbeitrag: Ressourcenschonender Einsatz von Phosphor in der Landwirtschaft. Symposium am 10./11.11.2008 in Braunschweig.
- KRWG (2012): Kreislaufwirtschaftsgesetz. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen.
- KTBL (2009): Faustzahlen für die Landwirtschaft. 14. Auflage. KTBL. Darmstadt.
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN (2012): Hinweise zum Einsatz von Wirtschaftsdüngern, organischen und organisch-mineralischen Düngern. Ratgeber 2012.
- MONTAG, DAVID (2008): Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung - Entwicklung eines Verfahrens zur Integration in kommunale Kläranlagen. GWA Band 212, Hrsg: Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Dissertation Aachen 2008.
- RÖMER, W. (2013): Phosphordüngewirkung von P-Recyclingprodukten. Korrespondenz Abwasser, Abfall. 2013 (60) Nr. 3.
- 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, 11-27
- WWW.INDEXMUNDI.COM (2013): Rock phosphate monthly price - Euro per metric ton (Oct. 1998-Jul. 2012). <http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=rock-phosphate&months=240&currency=eur>. Aufgerufen im April 2013.