



Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

BAND 91 | Ausgabe 1

MAI 2013

AGRARWISSENSCHAFT

FORSCHUNG

—
PRAXIS



Phosphordüngewirkung neuer Phosphatrecyclingprodukte

Von WILHELM RÖMER

1 Zielstellung

In den Jahren 2007/08 mussten die Landwirte zur Kenntnis nehmen, dass der Preis für Phosphordüngemittel sozusagen von gestern auf heute um etwa 300 Prozent anstieg. Inzwischen sind die Preise zwar wieder gefallen, aber nicht auf das Niveau Anfang des Jahrzehnts. Mancher fragte sich, was ist da passiert?

Ein Blick auf die Tabelle 1 zeigt, dass die zurzeit erfassten Rohphosphatvorräte, die den heutigen Qualitätsansprüchen und Abbau- sowie Aufarbeitungsbedingungen entsprechen (18 Milliarden Tonnen) bei einer jährlichen Förderung von 145 Millionen Tonnen nur noch etwa 120 Jahre reichen. Weitere Reserven minderer Qualität gibt es zwar, aber letztlich sind auch diese nur mit viel höheren Kosten zu fördern und ihre Förderung wird endlich sein. Diese Werte allein erklären aber den plötzlichen Preisanstieg nicht. Verschärfend waren offenbar die Tatsachen, dass die USA von 2005 bis 2006 zwei Minen wegen Unrentabilität schlossen und einen P-Dünger-Export verboten. Offenbar stellt auch China seine Exporte ein und Indien tritt stärker als Käufer für Rohphosphate auf dem Weltmarkt auf. Laut CRU-Report: "Phosphate rock: ten year outlook (2011)" (vgl. scope Newsletter No.81, Nov. 2011) hat sich der Rohphosphatmarkt nach zweijährigem Rückgang erholt. Produktion, internationaler Handel und Preise werden aber in den nächsten zehn Jahren steigen!

Tabelle 1: Weltproduktion von Rohphosphat (P_2O_5), die Weltreserve sowie die Basisreserve in Millionen Tonnen (U.S. Geological Survey, 2007).

	Weltproduktion 2006	Reserve ¹⁾	Basisreserve ²⁾
Welt insgesamt	145,0	18.000	50.000
China	32,0	6.600	13.000
United States	30,7	1.200	3.400
Morocco and Western Sahara	25,3	5.700	21.000
Russia	11,0	200	1.000
Tunisia	8,4	100	600
Jordan	6,4	900	1.700
Brazil	5,5	260	370
Syria	3,6	100	800
Israel	3,0	180	800
Egypt	2,7	100	760
South Africa	2,6	1.500	2.500
Australia	2,0	77	1.200
Senegal	1,5	50	160
Togo	1,2	30	60
Canada	1,0	25	200
Other countries	6,7	890	2.200
ausreichend für Jahre		124	345

¹⁾ Teil der Basisreserve, die zu heutigen Qualitätsanforderungen und Bedingungen abbaubar sind.

²⁾ Identifizierte Ressourcen mit geringerer Qualität der Rohphosphate und hohen Kosten für Förderung und Aufarbeitung.

Quelle: U.S. Geological Survey, 2007

Wie dem auch sei, der Preisauftrieb beunruhigte die Landwirte, die Wissenschaftler und sogar die Regierung, denn Deutschland hat keine Rohphosphatlagerstätten und ist zu 100 Prozent auf Importe angewiesen. Sofort stellte sich die Frage nach dem P-Versorgungszustand unserer Böden und nach dem System der P-Düngung wie es etwa vom Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) empfohlen wird und wie die P-Düngung in Zukunft gestaltet werden kann.

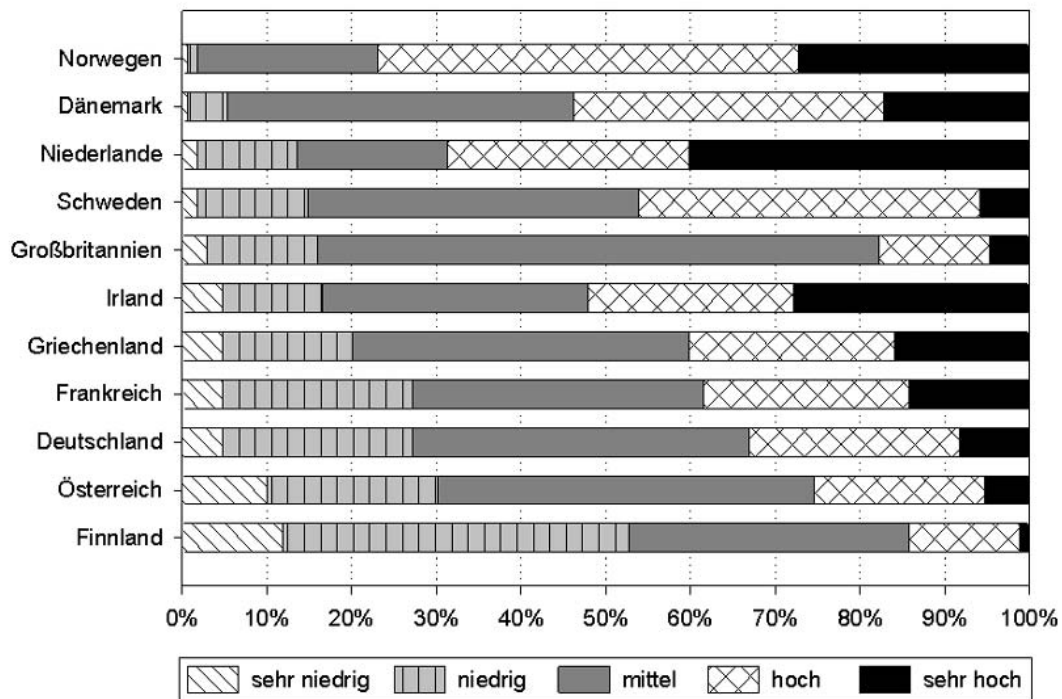


Abbildung 1: Phosphorstatus der Böden in Europa (nach Anonym, 2000).

Ein Blick auf die Abbildung 1 zeigt den Phosphorstatus der Böden in Europa. Es wird schnell klar, dass hier kein Grund zur Panik besteht. In Deutschland (Tabelle 2) sind nur rund fünf Prozent in Gehaltsklasse (GK) A (sehr niedriger Gehalt), aber ungefähr 40 Prozent sind hoch und sehr hoch (GK D, E) mit Phosphor (P) versorgt. Dass es regional drastische Unterschiede gibt, ist bekannt. So existieren in den viehstarken Regionen Nordwestdeutschlands Standorte, wo man 200 Jahre nicht mit Phosphor zu düngen brauchte (vgl. LEINWEBER ET AL., 1993), denn man findet dort noch in 85 Zentimeter Bodentiefe acht bis neun Milligramm Phosphor pro 100 Gramm Boden (Gehaltsklasse C). Wo seit Jahrzehnten nur Pflanzenbau betrieben und sparsam gewirtschaftet wurde, sind die Boden-P-Gehalte deutlich abgesunken.

Tabelle 2: Relative Anteile der Gehaltsklassen A bis E für Phosphor auf dem Ackerland (12 Millionen Hektar) in Deutschland (Werner, 2006).

Gehaltsklasse	Ackerland, Deutschland 2006 in Prozent
E	12
D	29
C	38
B	18
A	3

Quelle: Werner, 2006

Auch stellt sich angesichts der Preisveränderungen die Frage nach der notwendigen Höhe der P-Düngung neu, also auch die Frage, ob die vom VDLUFA 1997 (KERSCHBERGER ET AL., 1997) vorgegebenen Grenzwerte noch

gültig sind. Dieses Problem ist erkannt und wird in den Einrichtungen des VDLUFA bearbeitet und diskutiert (Beiträge auf dem 121. VDLUFA-Kongress, 2009 in Karlsruhe und RÖMER, 2009). Hier soll es um die Frage gehen, wie wir mit den phosphorhaltigen Abfällen in unserem Land umgehen und inwieweit wir, wenn wir sie richtig aufarbeiten, unsere mineralischen Phosphor-Düngerimporte, die zurzeit (2009/2010) jährlich bei rund 103.000 Tonnen (Tabelle 3) liegen, reduzieren können.

Tabelle 3: Jährlicher Anfall P-haltiger Abfälle in Deutschland (nach DWA, 2005; www.fleischindustrie.de, STN, 2007).

P-haltiger Abfall	TM / Jahr in Tonnen		P-Gehalt in Prozent		P-Menge in Tonnen
Klärschlamm	2,4 Mill.	x	2	=	48.000
Tiermehle	400.000	x	ca. 3	=	12.000
Fleischknochenmehl	160.000	x	ca. 6	=	9.600
Summe					ca. 70.000
Aufwand an Mineraldünger-P			2003/2004 ¹⁾		124.000
			2006/2007 ¹⁾		116.000
			2008/2009 ¹⁾		76.000
			2009/2010 ¹⁾		103.000

¹⁾ Nach Stat. Jahrbuch 2011 für die Bundesrepublik Deutschland

Quelle: DWA, 2005; ► www.fleischindustrie.de STN, 2007),

Aus Tabelle 3 geht hervor, dass wir 2,4 Millionen Tonnen Trockenmasse (TM) Klärschlamm (bei 2 –prozentigem Phosphor-Gehalt = 48.000 Tonnen Phosphor) "produzieren" und 400.000 Tonnen Tiermehle (bei 3-prozentigem Phosphor-Gehalt = 12.000 Tonnen Phosphor) und 160.000 Tonnen Fleischknochenmehle (bei 6-prozentigem Phosphor-Gehalt = 9.600 Tonnen Phosphor) anfallen. Mit diesen Phosphor-Mengen, die zwangsweise entstehen, könnten also bei geeigneten Recyclingtechnologien, ein Halb bis zwei Drittel der Phosphor-Mineraldüngerimporte ersetzt werden.

Die Regierung hat das Problem erkannt und deshalb 2004 eine Förderinitiative der drei Bundesministerien für Bildung und Forschung (BMBF), für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) sowie für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) gestartet, um Forschungs- und Industrieprojekte zu fördern, die geeignet erscheinen, Technologien und Pilotanlagen zum Phosphor-Recycling zu entwickeln und in die Praxis umzusetzen (DOHMANN, 2011).

Daneben gibt es auch Projekte gleicher Zielsetzung, die von der EU (zum Beispiel "SUSAN", ADAM et al., 2008) oder anderer Einrichtungen (zum Beispiel die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR); SCHIEMENZ UND EICHLER-LÖBERMANN, 2010) gefördert wurden und werden.

Aus den jetzt folgenden, kurz dargestellten Verfahren des Phosphor-Recyclings gingen einige "Versuchsprodukte" hervor, deren Phosphor-Düngewirkung, also deren agronomische Effizienz von verschiedenen Einrichtungen getestet wurde, um das weitere Vorgehen bei der Aufarbeitung der Phosphor-haltigen Abfälle in die richtigen Bahnen zu lenken. Diese Resultate sollen hier vergleichend wiedergegeben und diskutiert werden.

2 Prozesse des Phosphatrecyclings

2.1 Thermische Verfahren

2.1.1 Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlammaschen (KSA)

Grundvoraussetzung dieser Technologie ist die Monoverbrennung von Klärschlämmen. Die Asche ist dann frei von allen organischen Schadstoffen und Mikroben. Um den Gehalt an Schwermetallen (SM) zu reduzieren, wird beim sogenannten SUSAN-Projekt (Sustainable and Safe Re-use of Municipal Sewage Sludge for Nutrient Recovery) die KSA mit Chloriden (zum Beispiel CaCl_2 , MgCl_2) durchmischt und nochmals auf 1.000 Grad Celsius erhitzt. Schwermetalle bilden unter diesen Bedingungen gasförmige und damit flüchtige Chloride, die separat aufgefangen werden können und damit die Asche entlasten. Solche Aschen enthalten etwas sechs bis elf Prozent Phosphor. Es gibt die Vorstellung, solche Aschen direkt zur Düngung oder zur Herstellung von Mehrnährstoffdüngern zu nutzen (J. SCHICK et al., 2008). Die Phosphor-Düngewirkung solcher Aschen wurde geprüft von J. SCHICK, 2010, CH. WAIDA UND WEINFURTNER, 2011, sowie CABEZA, 2010.

2.1.2 Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm-Briketts; Mephrec-Prozess

Nach SCHEIDIG et al., 2009, können trockener Klärschlamm (KS), Tiermehle und deren Aschen zu Briketts verfestigt in einem speziellen Ofen (Kupolofen) bis auf 2.000 Grad Celsius erhitzt werden, so dass eine Metallschmelze, ähnlich wie im Hochofen, erreicht wird. Durch Zugabe von Kalkstein bildet sich über der Metallschmelze, die abgestochen wird, eine Schlacke, die gemahlen der Düngung dienen soll. Die Absicht ist, schädliche Schwermetalle (SM) in das geschmolzene Metall zu überführen, um die Schlacke von Schwermetallen abzureichern. Diese Prozedur ist also der Gewinnung des ehemaligen Thomasphosphates ähnlich. Die Schlacke enthält ungefähr fünf bis zwölf Prozent P_2O_5 . Eine Kupolofenschlacke wurde von Cabeza (2010) mit geprüft.

2.1.3 Phosphor -Rückgewinnung aus Tiermehlen

Seit Tiermehle, unter anderem Fleischknochenmehle, nicht mehr in der Tierfütterung eingesetzt werden dürfen, sind sie begehrt als Energieträger. Bei ihrer Verbrennung bleiben Aschen übrig, die, falls geeignet, direkt zur P-Düngung eingesetzt werden könnten. Sie sind von vorneherein arm an Schwermetallen. Werden solche Tiermehle bereits im Drehrohrofen mit Soda (Na_2CO_3) und Quarzsand umgesetzt (bei 1.000 Grad Celsius, basischer Aufschluss = Alkalisinterphosphat, Rhenaniaphosphat), so entstehen Sinterphosphate. Sie enthalten CaNa-Phosphate, die eine deutlich höhere Löslichkeit besitzen als Ca-Phosphate, wie zum Beispiel die in Knochen vorkommenden Apatite. Ein solches Sinterprodukt ist ULO-Phos (VTS Koop., Schiefer GmbH, Thüringen KG, Unterloquitz), dessen Phosphor-Düngewirkung geprüft wurde (CABEZA, 2010).

2.1.4 Phosphor-Rückgewinnung aus Pflanzenaschen

Unter der Losung der Energiegewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen läuft auch die Verbrennung von "Abfallprodukten" wie Stroh, Rapsextraktionsschrot oder auch direkt von Getreide. Hier stellt sich ebenfalls die Frage nach der direkten Nutzung dieser Aschen als Phosphor-Quelle (SCHIEMENZ UND EICHLER-LÖBERMANN, 2010).

2.2 Chemische Verfahren

2.2.1 Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlämmen (KS)

Nach dem Verlassen der Klärschlämme aus dem Faulturm können sie mit konzentrierten Säuren behandelt werden. Dabei geht auch Phosphat in Lösung. Nach der Abtrennung verbliebener fester Bestandteile wird die Lösung mit Sulfiden (zum Beispiel Na_2S) oder H_2S behandelt, um Schwermetalle zu fällen. Durch Anhebung des pH-Wertes und der Zugabe von Mg-, Ca- oder Fe-Salzen fallen entsprechende Phosphate aus, die nun separiert werden können (Seaborne-Verfahren, Vesterager, 2003). Wird zur pH-Anhebung $\text{Mg}(\text{OH})_2$ benutzt und wird gleichzeitig Ammoniak (NH_3 oder NH_4) zugeführt, kommt es zur Fällung von Magnesium-Ammonium-Phosphat ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$), als Struvit oder auch als MAP bezeichnet. Diese Verbindung fällt auch oft in Klärwerken spontan aus und führt zu Verstopfungen in Rohren und Apparaten, was zu starken Störungen in Kläranlagen führen kann. Die Berliner Wasserbetriebe haben deshalb eine spezielle Technologie zur Gewinnung von MAP entwickelt (HEINZMANN UND ENGEL, 2003).

Neben der Zersetzung der Klärschlämme mittels Säuren zur Freisetzung des Phosphates wurden neue Technologien entwickelt (Gewässerschutz. Wasser. Abwasser 228, Förderinitiative "Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor"; ISSN 0342-6068, Aachen 2011). Aber bei den meisten steht am Ende die Fällung des Phosphates als MAP, dessen Phosphor-Düngewirkung hier an drei Beispielen diskutiert werden soll.

Erfolgt die Fällung mit $\text{Ca}(\text{OH})_2$, so fallen Ca-Phosphate unterschiedlicher Natur aus (primäre, sekundäre, tertiäre Ca-Phosphate und möglicherweise Apatit), deren Phosphor-Düngewirkung ebenfalls zu hinterfragen ist.

2.2.2 P-Rückgewinnung aus Abwasser durch Kristallisation

Da Phosphationen eine hohe Affinität zu Ca-Ionen oder Ca-haltigen Oberflächen aufweisen, werden Phosphorhaltige Abwässer zum Beispiel über Absorber aus Ca-Silikat-Hydrat (CSH), synthetisch hergestellt oder als natürlicher Tobermorit eingesetzt (EHBRECHT et al., 2009; BERG et al., 2007). Es könnten dabei unter anderem kristalline Hydroxylapatite entstehen. Ihre Phosphor-Düngewirkung war ebenfalls zu prüfen.

3 Ergebnisse der Experimente zur Prüfung der Phosphor-Düngewirkung von Versuchsprodukten des Phosphor-Recyclings

Einleitend wird darauf hingewiesen, dass die Zahlenwerte in den meisten Tabellen durch "Abgreifen" aus den Säulendiagrammen abgeleitet wurden, das heißt, es kann kleinere Abweichungen zu den tatsächlichen Werten der Autoren geben, die aber keinen gravierenden Einfluss auf die grundsätzlichen Differenzen zwischen den verschiedenen P-Recyclingprodukten haben.

3.1 Klärschlammaschen (KSA)

Bei den Klärschlammaschen (KSA) in Tabelle 4 handelt es sich nach J. SCHICK (2009) bei der Rohasche KSA 1 um eine eisenarme, aluminiumreiche (Fe: 2 Prozent, Al: 13 Prozent) KSA aus Sindlingen (D), bei KSA 2 um eine Asche mit durchschnittlichen Eisen- und Aluminiumgehalten (Fe: 11 Prozent, Al: 5 Prozent) aus Slabverwerking, Noord-Brabant (NL). Zur Entfernung von Schwermetallen wurden die Rohaschen mit Chloriden nochmals auf 1.000 Grad Celsius erhitzt, wobei Schwermetallchloride in der Gasphase entweichen. Für diese Maßnahme wurden CaCl_2 oder MgCl_2 benutzt, wobei die Erhitzung entweder elektrisch (indirekt) oder mittels Gasverbrennung (direkt) erfolgte. Ferner wurde in einigen Fällen die Asche zusätzlich durch Zugabe von Schwefelsäure teilaufgeschlossen. Daraus ergaben sich die Produkte, die in den Gefäßversuchen geprüft wurden (Tabellen 4, 5).

Tabelle 4: Gefäßversuch: P-Aufnahme von Mais (Sorte "Prinz") innerhalb von zehn Wochen aus einem Boden (Gemisch: Sandboden, anmooriger Boden, 50:50, CAL-P: 2,1 mg/100 g Boden) nach Applikation von 500 mg P/ 8 kg Boden in Form speziell aufbereiteter Klärschlammaschen (KSA) sowie von einfachem Superphosphat (SSP). (Werte abgeschätzt aus der Abb. 4.13 von Schick, 2009).

Nr.	Variante	mg P/Gefäß	mg P aus dem Dünger	Relativ zu SSP
1	Ohne P	78 a	---	---
2	SSP	98 b	20	100
3	KSA 1	CaCl_2 (direkt)	77 a	0
4	KSA 1	CaCl_2 (indirekt)	80 a	2
5	KSA 1	CaCl_2 (indirekt)	86 ab	8
6	KSA 2	CaCl_2 (direkt)	82 a	4
7	KSA 2	CaCl_2 (indirekt)	78 a	0
8	KSA 2	CaCl_2 (indirekt)	82 a	4
9	KSA 2	CaCl_2 (direkt)	82 a	4
10	KSA 2	CaCl_2 (indirekt)	84 ab	6

Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede.

Quelle: Werte abgeschätzt aus der Abb. 4.13 von Schick, 2009

Tabelle 4 zeigt die Phosphor-Aufnahme der zehn Wochen alten Maispflanzen aus einem Phosphor-armen

Bodengemisch und zwar in Relation zur Phosphor-Aufnahme aus einfachem Superphosphat (SSP). Die Phosphor-Aufnahme aus den Ascheprodukten erreichte in Bezug auf SSP 0 bis 40 Prozent. Die Zugabe von $MgCl_2$ beim Wiedererhitzungsprozess bewirkte die beste Phosphor-Verfügbarkeit für den Mais. Die Resultate für vier Ascheprodukte die durch Winterweizensorten geprüft wurden, sind in Tabelle 5 dargestellt. Hier lag die Phosphor-Aufnahme bezogen auf SSP bei 5 bis 67 Prozent, wobei wiederum die Variante KSA 1 mit $MgCl_2$ (indirekt) am besten abschnitt.

Tabelle 5: Gefäßversuch: Phosphor-Aufnahme von Winterweizen (Sorten: "Disponent" = D, "Monopol" = M) in zwölf Wochen bei einer Phosphor-Gabe von 500 mg P/ 8 kg Boden (Abschätzungen aus der Grafik 4.15b von Schick, 2009).

Nr.	Variante	mg P/Gefäß		mg P aus dem Dünger		Relativ (%) zu SSP	
		D	M	D	M	D	M
1	Ohne P	66 a	58 a	---	---	---	---
2	SSP	108 e	98 d	42	40	100	100
3	KSA 1 CaCl ₂ (indirekt)	82 bc	67 a	16	9	38	23
4	KSA 1 MgCl ₂ (indirekt)	89 c	85 bc	23	27	54	67
5	KSA 2 CaCl ₂ (indirekt)	82 bc	60 a	16	2	38	5
6	KSA 2 CaCl ₂ , H ₂ SO ₄ (indirekt)	87 bc	79 b	21	19	50	48

Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede.

Quelle: Abschätzungen aus der Grafik 4.15b von Schick, 2009

Eine von der Ash-Dec-Umwelt AG (Wien) hergestellte Asche wurde von CABEZA (2010) in einem Gefäßversuch mit drei Böden über zwei Jahre (2007, 2008) mit Mais geprüft, und zwar im Vergleich mit dem ebenfalls wasserlöslichen Triplesuperphosphat (TSP). Tabelle 6 gibt die Phosphor-Aufnahmewerte wieder; die relativen Phosphor-Aufnahmen (bezogen auf TSP) lagen in der Summe von beiden Jahren zwischen 17 und 46 Prozent. Auf den beiden Böden (Düshorn, pH 4,4 und Sattenhausen, pH 5,6) trat zwar in Bezug auf die TSP-Variante eine relative Verbesserung der Phosphor-Aufnahme im zweiten Anbaujahr ein, aber absolut blieben die Phosphor-Aufnahmen deutlich hinter der aus TSP zurück.

Tabelle 6: Gefäßversuch: Phosphor-Aufnahme von Mais (Sorte "Atletico") in 70 oder 80 Tagen (2007, 2008) auf den drei verwendeten Böden: Düshorn, Gieboldehausen, Sattenhausen.

Tabelle 6a: Bodenkenndaten

Ort	Ton	Schluff	Sand	Org. Substanz	pH	CAL-P
			%		(CaCl ₂)	mg/100 g
Düshorn	2	5	93	5,3	4,4	2,4
Gieboldehausen	25	70	5	2,8	6,8	2,0
Sattenhausen	11	87	2	1,7	5,6	1,9

Tabelle 6b: Phosphor-Aufnahme nach Phosphor-Düngung: Triplesuperphosphat (TSP) im Vergleich mit einer Asche, die mittels Chloriden an Schwermetallen abgereichert war (Ash-Dec); P-Gabe: 360 mg P/6kg Boden in Mitscherlich-Gefäßen (nach Cabeza, 2010).

Variante	Düshorn			Gieboldehausen			Sattenhausen		
	2007	2008	Summe	2007	2008	Summe	2007	2008	Summe
----- mg P-Aufnahme/Gefäß-----									
Ohne P	73	74	147	58	49	107	98	101	199
TSP	132	91	223	123	105	228	157	108	265
Ash-Dec ¹	81	79	160	92	71	163	117	106	223
----- Dünger-P-Aufnahme (mg P/Gefäß) ² -----									
TSP	59	17	76	65	56	121	59	7	66
Ash-Dec ²	8	5	13	34	22	56	19	5	24
Relativwerte (%) der Dünger-P-Aufnahme									
TSP	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Ash-Dec ²	14	29	17	52	39	46	32	71	36

¹ Ash-Dec-Umwelt AG, Wien

² Dünger-P-Aufnahme = P-Aufnahme der gedüngten Variante minus P-Aufnahme der Kontrolle (Gefäß ohne P-Düngung)

Weitere derartige Ascheprodukte (Ash-08, Ash-09) sowie Produkte der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) wurden von CH. WAIDA UND WEINFURTNER (2011) in mehreren Gefäßversuchen mit Mais geprüft. Auf einem Sandboden (Tabelle 7) sowie einem Lösslehmboden (Tabelle 8) erreichten die Ash-Dec-Produkte bezogen auf die Phosphor-Aufnahme aus TSP 24, 33 und 40 Prozent. Auf dem Sandboden waren die Produkte also der Wirksamkeit von Rohphosphat (RP) gleichzusetzen und lagen weit hinter der Wirkung von TSP. Auf dem Lehmboden wurden aber auch nur unbefriedigende 40 Prozent gegenüber TSP erreicht.

Tabelle 7: Gefäßversuch (Klimakammer-Versuch): Phosphor-Aufnahme von Mais (Sorte: KX-5011, Erstfrucht) aus einem Sandboden (pH: 4,7 (CaCl₂), CAL-P: 5,7 mg/100 g Boden) nach Applikation von 360 mg P/6 kg Boden aus speziell aufbereiteten Klärschlammaschen (KSA), sowie von TSP und Rohphosphat; nach Abb. 5.27, 1. Versuchsreihe von Waida und Weinfurter, 2011.

Varianten	1. Anbau			2. Anbau		
	P-Aufnahme mg P/Gefäß	Dünger-P-Aufnahme mg P/Gefäß	relativ (%)	P-Aufnahme mg P/Gefäß	Dünger-P-Aufnahme mg P/Gefäß	relativ (%)
Ohne P	165	0	---	144	---	---
TSP	252	87	100	180	36	100
RP	183	18	21	156	12	33
Ash-08 ¹	186	21	24	156	12	33

¹ Produkt von Ash-Dec Umwelt AG, Wien 2009

Tabelle 8: Gefäßversuch wie Tabelle 7, aber mit einem Lösslehm Boden (pH: 5,4 (CaCl₂), CAL-P: 3,3 mg/100 g Boden), nach Abb. 5.30 (2. Versuchsreihe) von Waida und Weinfurter, 2011)

Variante	P-Aufnahme	Dünger-P-Aufnahme	
	mg P/Gefäß	mg P/Gefäß	relativ (%)
Ohne P	217	0	---
TSP	259	42	100
RP	217	0	0
Ash-09	234	17	40

Die Prüfung des BAM-Produktes (Sandboden, Tabelle 9; Lehmboden, Tabelle 10) erbrachte eine Phosphor-Aufnahme von 45 und 49 Prozent der von TSP, obwohl bei der Aufarbeitung der Klärschlammaschen MgCl₂ zugesetzt war.

Tabelle 9: Gefäßversuch wie Tabelle 7, Phosphor-Aufnahme von Mais auf einem Sandboden (3. Versuchsreihe) mit einem Produkt der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM); nach Abb. 5.31 von Waida und Weinfurter, 2011.



Variante	1. Anbau		
	P-Aufnahme mg P/Gefäß	Dünger-P-Aufnahme mg P/Gefäß	relativ (%)
Ohne P	129	0	---
TSP	200	71	100
RP	129	0	0
BAM	161	32	45

Tabelle 10: Gefäßversuch wie Tabelle 7, P-Aufnahme von Mais (1. Und 2. Frucht) auf einem Lösslehm Boden (pH: 5,4 (CaCl₂), CAL-P: 3,3 mg/100 g Boden) nach Abb. 5.32 von Waida und Weinfurter, 2011.

Variante	1. Anbau				
	P-Aufnahme			Dünger-P-Aufnahme	
	mg P/Gefäß			mg P/Gefäß	relativ (%)
	1. Frucht	2. Frucht	Summe		
Ohne P	143	183	326	0	---
TSP	194	200	394	68	100
RP	133	202	335	9	13
BAM ¹	172	187	359	33	49

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Damit zeichnet sich insgesamt ab, dass die mit Chloriden nochmals auf 1.000 Grad Celsius erhitzten KSA zu Produkten führt, die weit hinter der Phosphor-Wirkung von Super- und Triplesuperphosphat liegen.

3.2 Tiermehlasche, ULO-Phos, Kupolofenschlacke

Die Tabelle 11 gibt die Resultate für die drei genannten Produkte wieder. Geprüft wurde mit Mais auf drei Böden im Vergleich mit TSP und einem handelsüblichen Rohphosphat (CABEZA, 2010).

Tabelle 11: Gefäßversuch: Phosphor-Aufnahme von Mais (Sorte "Atletico") in mg/Gefäß aus drei verschiedenen hergestellten Phosphor-Recycling-Produkten (Tiermehlasche (TM-Asche), Tiermehl gesintert mit Soda und Quarzsand (ULO-Phos) und Kupolofenschlacke (Kupol)) im Vergleich mit Triplesuperphosphat (TSP) und Rohphosphat. Bedingungen wie in Tabelle 6 (nach Cabeza, 2010).

Dünger-Variante	Düshorn		Gieboldehausen		Sattenhausen	
	(pH 4,4)		(pH 6,8)		(pH 5,6)	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008
	----- mg P/Gefäß -----					
Ohne P	73	74	58	49	98	101
TSP	132	91	124	105	157	108
Rohphosphat	89	92	50	61	100	99
TM-Asche	81	73	78	65	95	117
ULO-Phos ¹	115	98	101	85	125	123
Kupol ²	79	86	130	125	n.g.	n.g.

Summe der P-Aufnahmen aus dem P-Dünger in den Jahren 2007 und 2008

	Düshorn		Gieboldehausen		Sattenhausen	
	mg P/Gefäß	Relativ (%)	mg P/Gefäß	Relativ (%)	mg P/Gefäß	Relativ (%)
TSP	76	(100)	122	(100)	66	(100)
Rohphosphat	34	(45)	4	(3)	0	(0)
TM-Asche	7	(9)	36	(30)	13	(20)
ULO-Phos ¹	66	(87)	79	(65)	49	(74)
Kupol ²	18	(24)	148	(121)	n.g.	n.g.

¹ Lieferant: VTS Koop Schiefer GmbH & Co. Thüringen KG, Unterloquitz.

² Kupolofenschlacke bezogen über VTI Thüringer Verfahrenstechnisches Institut, Saalfeld, vgl. Scheidig et al., 2009.

n.g. = nicht gemessen

Mit der Tiermehlasche wurden nur Phosphor-Aufnahmeraten bezogen auf TSP von neun Prozent (Düshorn) bis 30 Prozent (Gieboldehausen) erreicht. Damit verhielt sich aber die Tiermehlasche deutlich anders als Rohphosphat, aus dem auf dem sauren Boden deutlich mehr Phosphor aufgenommen wurde als auf dem nahezu neutralen, wo das Rohphosphat erwartungsgemäß völlig als Phosphor-Quelle versagte. Bemerkenswert aber ist, dass der basische Aufschluss im Drehrohrofen (Zugabe von Na₂CO₃ und Quarzsand) zu Phosphor-Aufnahmewerten bei ULO-Phos von 65 bis 87 Prozent führte. Diesem Resultat gebührt insofern besondere Beachtung, da die Herstellungstechnologie dieses Recyclingproduktes relativ einfach ist, damit wenig störanfällig und ein vergleichsweise gutes Produkt für einen P-Dünger liefert. Vom Produkt Kupolofenschlacke liegen dem Autor nur die Resultate aus Tabelle 11 vor, wo diese auf zwei Böden getestet wurde. Da es ein dem Thomasphosphat verwandtes Produkt sein soll, überrascht die geringe Phosphor-Wirkung auf dem sauren Boden (Düshorn) von nur 24 Prozent. Dagegen war die Wirkung auf dem Boden Gieboldehausen der des TSP ebenbürtig oder sogar etwas höher.

3.3 Pflanzenaschen

In Tabelle 12 werden Resultate eines Feldversuches mit Pflanzenaschen (Rapsextraktionsschrotasche = RESA; Getreideasche (GA)) auf einem lehmigen Sandboden in der Nähe von Rostock wiedergegeben (SCHIEMENZ UND EICHLER-LÖBERMANN, 2010). Auf die Werte aus Strohasche wurde verzichtet, da von ihr eine völlig abweichende Phosphor-Gabe ausgebracht worden war. Es ist bei den Werten zu beachten, dass die Variante "Kontrolle" weder Kalium (K) noch Magnesium (Mg) erhalten hat, obwohl mit den 52 Kilogramm Phosphor pro Hektar mit den Aschen gleichzeitig ungefähr 50 Kilogramm Kalium und 17 bis 35 Kilogramm Magnesium pro Hektar ausgebracht wurden und die pH-Werte der Aschen bei 12,6 bis 12,9 lagen. Mit RESA wurden 650 Kilogramm pro Hektar Asche (8 Prozent Phosphor) und mit Getreideasche 500 Kilogramm pro Hektar Asche (10,8 Prozent Phosphor) ausgebracht.

Tabelle 12: Feldversuch: Einfluss von Pflanzenaschen auf Phosphor-Aufnahme und Ertrag von Sommergerste (2007) und Mais (Ganzpflanze, 2008) nach Düngung mit 52 kg P/ha auf einem lehmigen Sand (SI2), pH 5,7; DL-P: 6,7 mg P/100 g Boden, Feldversuch nahe Rostock (auszugsweise nach Schiemenz und Eichler-Löbermann, 2010).

Nr.	Variante	Sommer-Gerste (Korn)		Mais	
		P-Aufnahme kg/ha	Ertrag dt/ha	P-Aufnahme kg/ha	Ertrag dt/ha
(1)	ohne P, K, Mg	11,6 a	30 a	32 a	162 a
(2)	Rapsex.-Asche	13,1 b	35 b	33 ab	165 a
(3)	Getreide-Asche	12,7 b	33 ab	37 bc	178 b
Relativwerte (%)					
(1)	ohne P, K, Mg	100	100	100	100
(2)	Rapsex.-Asche	113	116	103	102
(3)	Getreide-Asche	109	110	115	110

Rapsex.-Asche = Rapsextraktionsschrotasche, Getreideasche aus der Verbrennung von Roggen.

Quelle: auszugsweise nach Schiemenz und Eichler-Löbermann, 2010)

Man kann der Tabelle 12 entnehmen, dass unter den genannten Bedingungen von der Sommergerste 9 bis 13 Prozent und vom Mais 3 bis 15 Prozent mehr Phosphor im Vergleich zur völlig ungedüngten Kontrollvariante aufgenommen wurden. Da es keine SSP oder TSP-Variante gab, kann keine relative Effizienz für die Phosphor-Aufnahme aus den Aschen angegeben werden. Die Experimente auf den anderen Standorten sowie die Gefäßversuche lassen ebenfalls keine Phosphor-Effizienzberechnung zu und wurden deshalb hier nicht aufgeführt.

3.4 Phosphat gebunden an Calcium-Silikat-Oberflächen (Kristallisierte P-Verbindungen)

Bei diesem Produkt handelt es sich nicht um mit Kalk ($\text{Ca}(\text{OH})_2$; CaCO_3 ; CaO) gefälltes Phosphat, sondern um Phosphat, das an Calcium-Silikat-Hydrat-Oberflächen aus Abwasser gebunden war. Die Art der Phosphatbindungen befindet sich noch in der Aufklärungsphase. Ein solches Produkt (Ca-Phosphat) der Gruppe BERG et al., 2007, wurde mit den anderen Recyclingprodukten – wie in Tabelle 6 dargestellt – geprüft.

Tabelle 13: Gefäßversuch: Dünger-Phosphor-Aufnahme in den Versuchsjahren 2007 und 2008 aus einem kristallisierten Ca-Phosphat-Produkt (an Ca-Silikathydrat sorbiertes Phosphat), Triplesuperphosphat (TSP) und Rohphosphat (RP) nach Applikation in drei Böden (Düshorn, Gieboldehausen, Sattenhausen) (vgl. Tabelle 6), nach Cabeza, 2010.

Dünger-P-Aufnahmen (= Netto-P-Aufnahme¹) in mg P/Gefäß und relativ.

Dünger-Variante	Düshorn (pH 4,4)		Gieboldehausen (pH 6,8)		Sattenhausen (pH 5,6)	
	mg P/Gefäß	%	mg P/Gefäß	%	mg P/Gefäß	%
TSP	76	(100)	122	(100)	66	(100)
Rohphosphat	34	(45)	4	(3)	0	(0)
"Ca-Phosphat" ²	66	(87)	31	(25)	10	(15)

¹ Netto-P-Aufnahme = Differenz aus P-Aufnahme der gedüngten und der ungedüngten Pflanzen

² bezogen von Berg et al., 2007

Tabelle 13 gibt die Werte der Phosphor-Aufnahmen aus dem Phosphor-Dünger wieder. Man erkennt, dass das "Ca-Phosphat"-Produkt auf dem sauren Boden eine relativ hohe Phosphor-Aufnahme ermöglichte (87 Prozent), weil es dort im Boden offenbar ausreichend rasch umgesetzt wird, was auf dem schwach sauren oder nahezu neutralen Boden nicht möglich ist. Seine Wirkung ist zwar deutlich besser als die von Rohphosphat, aber für schwach saure bis neutrale Böden ist dieses Produkt offenbar ungeeignet. Die Dünger-P-Aufnahme betrug nur 15 bis 25 Prozent bezogen auf TSP.

Tabelle 14: Gefäßversuch wie Tabelle 7 und 8. Relative P-Aufnahmewerte aus Ca-Phosphaten bezogen auf die Dünger-P-Aufnahme aus TSP bei Applikation in Sand- und Lehmböden nach Waida und Weinfurtner, 2011 (Abb. 5.27, 5.30, 5.31, 5.32).

Variante	Sandboden		Lehmboden	
	Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 3	Versuchsreihe 2	Versuchsreihe 3
	1. Anbau ¹	1. Anbau ²	1. Anbau	1. Anbau
TSP	100 %	100 %	100 %	100 %
RP	21 %	0 %	0 %	0 %
P-Roc 08 ³	34 %			
P-Roc 09 ³			0 %	
Fix-Phos ⁴			0 %	
SESAL ⁵			0 %	
Pasch I ⁶	34 %			
Pasch II ⁶		55 %		51 %
Pasch III ⁶		45 %		51 %

¹ Beim 2. Anbau sehr ähnliche Relationen

² Beim 2. Anbau lagen alle Werte der gedüngten Varianten im Bereich der Kontrolle (P-0, hier nicht aufgeführt), d.h. es gab keine messbare Phosphor-Aufnahme aus der Düngung.

³ vgl. Berg, 2005

⁴ vgl. fix-Phos-Verfahren nach Petzelt und Cornel, 2010.

⁵ vgl. Petzelt et al., 2011.

⁶ vgl. Montag, 2008; Montag et al., 2009.

Sieben Calcium-Phosphate unterschiedlicher Gewinnungsverfahren wurden in mehreren Gefäßversuchen von Ch. WAIDA UND WEINFURTNER (2011) geprüft (Tabelle 14). Die Produkte P-Roc 2008 und 2009 sind Abwasserrecyclate bei denen Phosphat an Ca-Silikat-Hydrat-Oberflächen (CSH) kristallin gebunden wird. Fix-Phos ist ein Klärschlammrecyclat, wobei auch Phosphat an CSH gebunden ist. SESAL ist ein Produkt bei dem Phosphat nach dem nasschemischen Aufschluss mittels CaCl_2 gefällt wird. Die "Pasch-Produkte" entstehen nach nasschemischer Behandlung und anschließender Phosphatfällung mittels $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Bemerkenswert ist, dass die an CSH gebundenen Phosphate P-Roc, Fix-P aber auch SESAL auf dem Lösslehm Boden, obwohl dieser einen pH-Wert von 5,4 hatte, völlig als Phosphor-Quellen versagten. Auf dem Sandboden wurde nur eine Phosphor-Aufnahme von 34 Prozent bezogen auf TSP erreicht. Mit den Pasch II und -III-Produkten wurden auf beiden Böden etwa 50 Prozent der TSP-Varianten erzielt. Diese Befunde ergaben sich aus dem ersten Anbau von Mais. Aber auch beim zweiten Anbau ergaben sich keine Verbesserungen der Calcium-Phosphat-Produkte.

3.5 Ca-, Mg-, Fe-Fällungsprodukte

Tabelle 15 gibt Resultate eines Keimpflanzenversuches (RÖMER, 2006) mit den drei Fällungsprodukten Ca-, Mg- und Fe-Phosphat der Firma Seaborne (Owschlag, Schleswig-Holstein) wieder. Sie resultieren aus der Phosphor-Fällung nach der Säurebehandlung von Klärschlamm, der nachfolgenden Anhebung des pH-Wertes und der Zugabe der entsprechenden Salze. Bemerkenswert ist, dass bezogen auf primäres, also wasserlösliches Ca-Phosphat mit dem Produkt Mg-Phosphat die höchste Phosphor-Aufnahme (110 Prozent) der Roggenpflanzen erreicht wurde, aus dem Produkt Ca-Phosphat nur 63 Prozent und aus dem Fe-Fällungsprodukt nur 13 Prozent. Über die Anteile primärer, sekundärer oder tertiärer Mg- und Ca-Phosphate in den Fällungsprodukten ist nichts bekannt. Aber die P-Aufnahmen aus den Reinchemikalien zeigen deutlich, dass der Roggen aus dem Tricalciumphosphat nur relativ 60 Prozent Phosphor aufnehmen konnte. Das legt den Schluss nahe, dass in dem Produkt Ca-Phosphat von Seaborne diese Verbindung vorherrschen dürfte.

Tabelle 15: Gefäßversuch mit Roggenkeimpflanzen: Netto-P-Aufnahme aus zwölf verschiedenen Phosphor-Verbindungen von Roggen, 21 Tage alt, Sandkultur (nach Römer, 2006).

P-Verbindung	Herkunft	Netto-P-Aufnahmen ¹⁾	
		mg P/Gefäß	Relativ (%)
Ca (H ₂ PO ₄) ₂ · H ₂ O	Fluka	13,6	100
Ca (H PO ₄) ₂ · H ₂ O	Merck	12,7	93
Ca ₃ (PO ₄) ₂ · H ₂ O	Budenheim ²⁾	8,2	60
Apatit	Kola-Halbinsel	1,4	10
Mg (H ₂ PO ₄) ₂	Budenheim ²⁾	13,2	97
Mg H PO ₄ · 3 H ₂ O	Budenheim ²⁾	16,0	117
Mg ₃ (PO ₄) ₂ · 4 H ₂ O	Budenheim ²⁾	13,8	101
Fe PO ₄	Budenheim ²⁾	0,1	< 1
Al PO ₄ · H ₂ O	Budenheim ²⁾	6,8	47
Mg-Phosphat	Seaborne ³⁾	15,9	110
Ca-Phosphat	Seaborne ³⁾	9,0	63
Fe-Phosphat	Seaborne ³⁾	1,8	13
GD _{5%} Tukey		3,3	24

¹⁾ Differenz aus der P-Aufnahme der gedüngten und ungedüngten Pflanzen

²⁾ Chemische Fabrik Budenheim

³⁾ Seaborne/Owschlag (Schleswig-Holstein)

Quelle: Römer, 2006

Die Werte der Phosphor-Aufnahmen aus der Chemikalie FePO₄ und dem Fe-Fällungsprodukt zeigen sehr große Ähnlichkeit und sind Ausdruck einer völlig unakzeptablen Phosphor-Düngewirkung. Die hohe Verfügbarkeit der Mg-Phosphate, sowohl der reinen Chemikalien als auch des Mg-Fällungsproduktes finden eine gewisse Bestätigung in der besseren Wirkung der aufgearbeiteten Aschen, in denen MgCl₂ zugesetzt war (Tabellen 4, 5). Das prinzipiell gleiche Resultat ergab die Testung eines Mg-Phosphates, das nach dem Seaborne-Verfahren hergestellt war und auf einem Sandboden von CH. WAIDA UND WEINFURTNER (2011) getestet wurde. Es bewirkte die gleiche P-Aufnahme wie aus TSP (relativ 107 Prozent) und MAP-Stuttgart (relativ 103 Prozent) (Tabelle 17 unten).

3.6 Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP = MgNH₄ PO₄ · 6 H₂O, Struvit)

Zur Prüfung dieses Produktes standen Substanzen von drei Herstellern zur Verfügung: Seaborne/ Owschlag (Sb), Klärwerk Gifhorn (Gf, Pilotanlage) und Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Universität Stuttgart (St, Laborprodukt). Sie wurden unter denselben Bedingungen wie in Tabelle 6 geprüft.

Tabelle 16: Gefäßversuch: P-Aufnahmen von Mais (Sorte "Atletico") aus drei Böden (Düshorn, Gieboldehausen, Sattenhausen) im Jahr 2007 (1. Anbaujahr) aus drei Magnesium-Ammonium-Phosphat-Produkten (MAP) (drei Herkünfte: Seaborne/Owschlag (Sb); Gifhorn (Gf); Stuttgart (St)); Bedingungen wie in Tabelle 6 (nach Cabeza, 2010).

Variante	----- Düshorn -----			----- Gieboldehausen -----			----- Sattenhausen -----		
	mg P-Aufnahme		Relativ	mg P-Aufnahme		Relativ	mg P-Aufnahme		Relativ
	pro Gefäß	aus dem Dünger-P	(%)	pro Gefäß	aus dem Dünger-P	(%)	pro Gefäß	aus dem Dünger-P	(%)
ohne P	73 a	---		58 a	---		98 a	---	
TSP	132 b	59	(100)	123 b	65	(100)	157 c	59	(100)
MAP-Sb ¹	149 c	76	(129)	124 b	66	(102)	136 b	38	(64)
MAP-Gf ²	111 b	38	(64)	118 b	60	(92)	128 b	30	(50)
MAP-St ³	121 b	48	(81)	127 b	69	(106)	157 c	59	(100)
Mittel der 3 MAP-Varianten			(91)			(100)			(71)
Mittel von MAP Sb+St			(105)			(104)			(82)

Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede.

¹ MAP-Sb geliefert vom Klärwerk Owschlag, Schleswig-Holstein (Seaborne-EPM-AG, 2010).

² MAP-Gf geliefert vom Klärwerk Gifhorn (Niedersachsen), vgl. Günther et al., 2008.

³ MAP-St geliefert vom Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Universität Stuttgart (Weideler, 2010).

Quelle: Cabeza, 2010

Aus Tabelle 16 geht hervor, dass relative P-Aufnahmeraten (bezogen auf TSP) von 71 Prozent (Sattenhausen), 91 Prozent (Düshorn) bis 100 Prozent (Gieboldehausen) erreicht wurden. Diese Werte erhöhen sich auf 82 bis 105 Prozent, wenn das Produkt aus Gifhorn (64, 92, 50 Prozent) ausgeklammert wird. Damit kann die Wirkung des MAP faktisch dem des TSP gleichgestellt werden. Die Ursache für die geringere Wirkung des MAP aus Gifhorn wird weiter unten diskutiert.

Tabelle 17: Gefäßversuch: P-Aufnahme von Mais (Sorte: KX 5011) aus einem Sandboden (vgl. Tabelle 7), nach Abb. 5.27 von Waida und Weinfurter, 2011.

Variante	mg P-Aufnahme bei 1. Anbau		
	pro Gefäß	aus dem Dünger-P	Relativ
Ohne P	165 a	---	---
TSP	252 b	87	100
MAP-St ¹	255 b	90	103
MAP-Gf ²	204 ab	39	45
Mg-Phosph. v. Seaborne	258 b	93	107

Unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede.
¹⁺² vgl. Tab. 16

Quelle: nach Abb. 5.27 von Waida und Weinfurter, 2011

In Gießen (CH. WAIDA UND WEINFURTER, 2011) wurden ebenfalls MAP-Produkte aus Stuttgart und Gifhorn auf einem Sandboden (Tabelle 17) geprüft. Während die Phosphor-Aufnahmen aus MAP-Stuttgart der aus TSP gleich war, lag der Wert bei MAP-Gifhorn wiederum deutlich niedriger mit nur 45 Prozent.

4 Diskussion

Der Pflanzenertrag ist das Kriterium des Pflanzenbaues, das den Landwirt vordergründig interessiert. Da der Phosphor einer der drei Makronährstoffe ist, die am Wichtigsten von den sechs Makro- und sieben Mikronährstoffen ist, werden bei der Phosphorzufuhr in Mangelsituationen große Effekte erwartet. Der Ertrag ist aber nicht nur vom Angebot der 13 Nährelemente abhängig, sondern auch von der Bodenart, dem Wurzeltiefgang, der Wasserversorgung, der Temperatur, der Lichteinstrahlung, der Tageslänge und anderen Faktoren. Dagegen hängt die Phosphataufnahme im Wesentlichen von der Phosphor-Verfügbarkeit im Boden ab und die wiederum von der Phosphor-Löslichkeit der Phosphor-Dünger und deren Umsetzung im Boden. Dessen Chemismus ist dabei von großem Einfluss.

Deshalb wurden die Experimente in erster Linie nach der Phosphor-Aufnahme der Pflanzen ausgewertet, denn was die Pflanze dann mit dem aufgenommenen Phosphat an Biomasse produziert, hängt sehr von der inneren P-Verwertung (Verwertungseffizienz) der Pflanzen (-art) und den übrigen Wachstumsfaktoren ab. Also ist die aufgenommene Phosphor-Menge ein gutes Maß für die Beurteilung der Phosphor-Düngewirkung, somit auch der Phosphor-Recyclingprodukte. Da in den vergangenen Jahrzehnten in der konventionellen Landwirtschaft (in Deutschland rund 94 Prozent) nur noch wasserlösliche Phosphor-Dünger, zum Beispiel Ammoniumphosphate und Triplesuperphosphat (TSP) eingesetzt werden, deren Düngewirkung rasch eintritt, wurde in den Testversuchen stets einfaches Superphosphat (SSP) oder TSP als Bezugsbasis eingesetzt.

Tabelle 18: Zusammenfassende Gruppierung der Phosphor-Recyclingprodukte in vier "Phosphor-Effizienzgruppen" bezogen auf die Phosphor-Aufnahmeeffizienz von Superphosphat (SSP bzw. TSP) = 100 %.

Produkt	Sandböden				Lehmböden			
	0-25 %	26-50 %	51-75 %	76-100 %	0-25 %	26-50 %	51-75 %	76-100 %
Thermische Produkte:								
Tab. 4	8 Therm. Prod.	6	2					
Tab. 5	4 Therm. Prod.	2	1	1 (Mg-P)				
Tab. 6	Ash-Dec	1	1			3	1	
Tab. 7	Ash-08	1	1					
Tab. 8	Ash-09					1		
Tab. 9	BAM		1					
Tab. 10	BAM					1		
Summe		10	6	1		5	1	
Tab. 11	Tiermehlasche	1			1	1		
	Ulo-Phos			1			2	
	Kupolofenschlacke	1						1
Ca-Phosphate (Fällungen, Kristallisation)								
Tab. 13	Ca-Phosphat			1	2			
Tab. 14	P-Roc 08		1					
	P-Roc 09				1			
	Fix-Phos				1			
	SESAL				1			
	Pasch I		1					
	Pasch II			1			1	
	Pasch III		1					
Tab. 15	Seaborne						1	
	Ca-Phosphat			1				
	Ca ₃ (PO ₄) ₂ ·H ₂ O			1				
Mg-Phosphate								
Tab. 15	Seaborne:							
	Mg-Phosphat			1				
	Mg ₃ (PO ₄) ₂ ·H ₂ O			1				
Tab. 17	Seaborne:							
	Mg-Phosphat			1				
Tab. 16	MAP, 9 Tests			1		1	1	4
Tab. 17	MAP, 2 Tests		1					1
Fe-Phosphate								
Tab. 15	Seaborne:							
	Fe-Phosphat	1						
	Budenheim:							
	FePO ₄	1						

In Tabelle 18 ist eine Übersicht über die relative P-Aufnahme aus allen Phosphor-Produkten im Vergleich zur Phosphor-Aufnahme aus dem wasserlöslichen Ca (H₂PO₄)₂ · H₂O (= SSP, TSP) zusammen gestellt, wobei vier Gruppen für die Effizienz der Phosphor-Aufnahme (0 bis 25 Prozent, 26 bis 50 Prozent, 51 bis 75 Prozent, 76 bis 100 Prozent) gebildet wurden. Diese Gruppierung steht für die verbale Beurteilung: völlig ungeeignet, weitgehend ungeeignet, bedingt geeignet und empfehlenswert.

Die Gruppe der thermischen Produkte (an Schwermetallen abgereicherte Aschen durch nochmalige Erhitzung auf etwa 1.000 Grad Celsius unter Chloridzugabe) ist am Intensivsten geprüft worden und zwar von drei Institutionen. Von den 23 Experimenten in denen artverwandte Produkte eingesetzt wurden, erreicht nur eine Substanz auf dem Sandboden die Gruppe 51 bis 75 Prozent Aufnahmeleistung. Bemerkenswert dabei ist, dass es das Ascheprodukt war, das mit MgCl₂ umgesetzt worden war (Tabelle 5). Das eine positive Resultat auf dem Lehmboden ist kein belastbares Ergebnis, da die gedüngten Pflanzen nur fünf bis sieben Milligramm Phosphor mehr als die Kontrollpflanzen (101 Milligramm) aufgenommen hatten, was statistisch gesehen nicht signifikant

war.

Insgesamt gesehen haben also die Pflanzen, vorrangig der Mais, in den 23 Tests in 15 Fällen (= 65 Prozent) weniger als 25 Prozent und in sechs Fällen (= 26 Prozent) zwischen 25 und 50 Prozent Phosphor, bezogen auf TSP aufgenommen. Wenn also in rund zwei Drittel aller Fälle die Phosphor-Aufnahmeeffizienz weniger als 25 Prozent, bezogen auf TSP, beträgt, so können derartige Phosphor-Recyclingprodukte nicht als Phosphor-Dünger empfohlen werden. Sie sind ungeeignet oder weitgehend ungeeignet. Ein wahrscheinlicher Grund für die geringe Phosphor-Lieferbereitschaft der Asche-Produkte ist die Bildung von Chlorapatiten während der zweiten Erhitzungsperiode. Solche Mineralien wurden von NANZER et al., 2009 in derartigen Produkten identifiziert. Vor der Herstellung eines Mehrnährstoffdüngers aus solchen Produkten durch Zusatz von Stickstoff- und Kalium- und auch wasserlöslichen Phosphor-Komponenten zu einem NPK-Dünger wird gewarnt, da sie den Landwirten einen Phosphor-Düngeeffekt nahe legen, den es so nicht gibt.

Dass auch Tiermehlasche keine befriedigende Phosphor-Bereitstellung gewährt, zeigen die Resultate sowohl auf den Sand- als auch Lehmboden. Erfolgt aber die Sinterung des Tiermehles mit Soda und Quarzsand zu ULO-Phos, so werden immerhin relative Phosphor-Aufnahmen von 87 Prozent auf Sandboden und 65 und 74 Prozent auf dem Lehmboden laut Tabelle 11 erreicht. Das heißt, das Produkt ist bodenabhängig geeignet und empfehlenswert. Bei diesem Produkt wird also der basische Aufschluss wie er früher zur Herstellung von Rhenania- oder Alkalisinterphosphat benutzt wurde, positiv wirksam. Dieses Verfahren (schwermetallarmes Rohmaterial) hat den großen Vorteil, dass keine störanfälligen nasschemischen Prozesse nötig sind, sondern nur ein gut funktionierender Drehrohrofen!

Auf die Phosphor-Aufnahmeeffizienz aus Pflanzenaschen wird hier nicht weiter eingegangen, da es keine Superphosphat oder Rohphosphatvarianten zum Vergleich gibt und außerdem in den Kontrollvarianten keine Kalium- und Magnesium-Ausgleichsdüngung erfolgte. Bei der Düngung mit Pflanzenaschen ist jedoch unbedingt zu beachten, dass die Aschen pH-Werte von 11 bis 13 aufweisen, also pH-Werte nahezu von Löschkalk (SCHIEMENZ UND EICHLER-LÖBERMANN, 2011, BIERTÜMPFEL et al., 2010) besitzen. Das hat zur Folge, dass bei Ersatz der Phosphor- und Kalium-Düngung durch Pflanzenaschen die Boden-pH-Werte deutlich ansteigen. Der Anstieg auf einem an sich relativ stark puffernden Tonboden in Dornburg/Saale betrug 0,6 pH-Einheiten (von 6,9 auf 7,5) (BIERTRÜMPFEL et al., 2010). Bei gleichem Ascheaufwand kann es auf wenig gepufferten Sandböden zu wesentlich höheren pH-Anstiegen kommen, die dann zur Festlegung von einigen Mikronährstoffen führen, was unerwünscht ist.

Das Kupolofenprodukt versagte auf dem Sandboden, wirkte aber auf einem Lehmboden mit pH 6,8 bestens. Diese zwei sehr divergierenden Ergebnisse werfen Fragen nach dem warum auf, die aber vorerst nicht zu beantworten sind. Hier sind natürlich weitere Prüfungen zwingend nötig.

Was die ganze Gruppe der Ca-Phosphate betrifft, ob an CSH sorbiert oder mit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gefällt entstanden, so zeigt sich ein heterogenes Bild (Tabelle 18). Ein "Ca-Phosphat" sowie P-Roc 09, Fix-P und SESAL versagten auf dem Lehmboden völlig. Sie gehören in die Gruppe 0 bis 25 Prozent. Die Pasch-Produkte erreichten auf dem Sandboden die Gruppen 26 bis 50 Prozent, aber auch einmal die Gruppe 51-75 Prozent sowohl auf Sand- als auch auf Lehmboden. Aus Tabelle 15 (Keimpflanzenversuch mit Roggen) geht exemplarisch hervor, dass mit der Zunahme des Calcium-Gehaltes in den Phosphaten bis hin zum Apatit die Phosphor-Verfügbarkeit kontinuierlich abnimmt. Bei allen Ca-Phosphat-Produkten dürfte es sich um Gemische aus primären, sekundären und tertiären Ca-Phosphaten und Apatit handeln.

Ihre Düngewirksamkeit wird durch deren Anteile bestimmt. Bei den derzeitigen benutzten Technologien dürfte es aber schwer sein, die Sorptions- und Fällungsprozesse so zu steuern, dass vorrangig primäre und sekundäre Ca-Phosphate entstehen, die die wünschenswerten sind. Notfalls müssten wenig wirksame Ca-Phosphate wieder mit H_2SO_4 oder H_3PO_4 aufgeschlossen werden, wie es ganz konventionell mit den Rohphosphaten geschieht (Herstellung von SSP oder TSP). Eine Alternative wäre auch die Möglichkeit, den Phosphor mit Hilfe von Kohlenstoff (Koks) unter reduktiven Bedingungen als elementaren Phosphor zu gewinnen, der dann weiterverarbeitet wird, wie es bei Thermophos (Niederlande) geschieht (SCHIPPER et al., 2001).

Bemerkenswert ist die relativ gute Phosphor-Düngewirkung der geprüften Mg-Phosphate die nach dem Seaborne-Verfahren hergestellt wurden. Sie erzielten gleiche Resultate wie die Chemikalie $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$. Dieser Befund spricht für die wesentlich bessere Phosphor-Verfügbarkeit der Mg-Phosphate im Vergleich zu den adäquaten Ca-Phosphaten (Tabelle 15). Dieser Effekt trat auch in der Mg-Asche (Tabelle 5) zu Tage.

Mit den Werten der höchsten Effizienz der Phosphor-Aufnahme tritt das Magnesium-Ammonium-Phosphat (Struvit) hervor. Es ist ein eindeutig empfehlenswertes Phosphor-Produkt. Mit dem Produkt MAP Stuttgart (MAP St) wurden auf vier Böden von zwei Versuchsanstellern Werte der Phosphor-Aufnahme von 81 bis 103 Prozent, für MAP Seaborne (MAP Sb) von 64 bis 129 Prozent und nur für das Produkt MAP Gifhorn (MAP Gf) wurden lediglich Werte zwischen 45 und 92 Prozent gefunden (Tabelle 16). Die hohe Phosphor-Aufnahme aus den MAPs wurde bereits durch Roggenkeimpflanzen von RÖMER (2006) nachgewiesen. Warum das Produkt der MAP-Anlage in Gifhorn deutlich in seiner Phosphor-Aufnahmeeffizienz abfiel, ist sehr wahrscheinlich in der dortigen Verarbeitung eisenreicher Klärschlämme zu suchen. Das Endprodukt enthielt mit 5,5 Prozent deutlich mehr Eisen als die anderen MAPs (0,4 bis 1 Prozent; nach Cabeza et al., 2011). Da aber die Phosphor-Verfügbarkeit von Eisenphosphaten deutlich schlechter ist als zum Beispiel die der Mg- oder Ca-Phosphate (Tabelle 15), so dürfte die geringe Phosphor-Verfügbarkeit des MAP Gf durch noch zu hohe Eisenphosphatgehalte im Produkt bedingt sein. Die hohe Düngewirksamkeit des MAP an sich überrascht zunächst, denn während die Wasserlöslichkeit von SSP bei 84 Prozent und die von TSP bei 93 Prozent liegt, sind unter gleichen Bedingungen nur etwa zwei Prozent Phosphor im MAP wasserlöslich (RÖMER, 2006; CABEZA et al., 2011).

Nach CABEZA et al. (2011) sind die Parameter Wasserlöslichkeit und Citratlöslichkeit des Phosphors in den Phosphor-Düngern nicht die geeignetsten Parameter zur Beurteilung der möglichen Phosphor-Düngewirkung. Sie beobachteten relativ enge Korrelationen zwischen der Phosphor-Aufnahme der Pflanzen und den Phosphor-Konzentrationen der Bodenlösungen (Li) sowie des isotopisch austauschbaren Phosphates (IEP) in Bodenproben ohne Pflanzen, denen drei Wochen vor den Phosphor-Analysen die einzelnen Recyclingprodukte zugesetzt waren. Da hatte sich gezeigt, dass mit den Mg NH₄ PO₄-Produkten gleich hohe Werte für Li und IEP gefunden wurden wie für TSP. Ein klarer Anstieg von IEP wurde auch für die Kupolofenschlacke im neutralen Boden gefunden, wo es eine gute Phosphor-Versorgung der Pflanzen bewirkt hatte, im Gegensatz zum sauren Sandboden, wo der IEP-Wert deutlich niedriger war. Das gleiche Ergebnis in umgekehrter Weise gilt für das Ca-Phosphat (Tabelle 13) das auf dem sauren Boden gut, auf dem neutralen Boden aber kaum wirksam wurde. Die Autoren kommen deshalb zu dem Schluss, dass die agronomische Effizienz der Phosphor-Recyclingprodukte besser charakterisiert werden kann, wenn ihre Auflösung im Boden und ihre Wirkung auf die Menge an isotopisch austauschbarem Phosphor geprüft wird.

5 Schlussfolgerungen

Aus Sicht der Pflanzenernährung ergibt sich für die Beurteilung der Phosphor-Düngewirkung der Recyclingprodukte ein deutlich differenziertes Bild: TSP = MAP > Mg-P = Sinter-P > Ca-P, (Kupol-Schlacke) > Klärschlammaschen (KSA) > Tiermehlasche, Eisen-Phosphate (Fe-P).

Phosphor-Aufnahmewerte, vergleichbar denen aus den Superphosphaten werden nur vom MgNH₄PO₄*6 H₂O (Struvit, MAP) auf allen Testböden erreicht, wenn es eine relativ hohe Reinheit besitzt. Unakzeptabel niedrige Phosphor-Aufnahmen werden dagegen auch bei mehrmaligem Anbau der Kulturpflanzen erreicht von Fe-P, Tiermehlaschen und KSA, auch wenn sie mittels thermischer Verfahren unter Chloridzugabe "behandelt" wurden. Zwischen beiden Gruppen (MAP und Aschen) sind die übrigen Produkte wie Ca- und Mg-Sorptions- oder Fällungsprodukte sowie Phosphor-haltige Schlacken einzuordnen, wobei die Mg-Phosphate zu favorisieren sind auf Grund ihrer leichteren Umsetzbarkeit in den Böden. Ca-Phosphate, wenn es sich vorwiegend um tertiäre Phosphate und Apatite handelt, sind als Phosphor-Dünger ungeeignet und müssen aufgeschlossen werden (sauer, basisch oder mit C (Koks)reduziert) bevor sie als Phosphor-Dünger dienen können. Dagegen sind abhängig von der Bodenreaktion mit alkalisch (Soda) aufgeschlossenem Tiermehl (zum Beispiel ULO-Phos) und Phosphor-haltiger Schlacke (beispielsweise Kupolofenschlacke in einem neutralen Lehmboden) akzeptable Phosphor-Aufnahmen zu erreichen. Zu entwickelnde oder zu optimierende Technologien für das Phosphor-Recycling sollten auf diesen Befunden aufbauen.

Die bisher durchgeführten agronomischen Experimente sind aber insbesondere in Form von längerfristigen Feldversuchen fortzuführen, da die Umsetzungsreaktionen von Phosphor-Verbindungen in den Böden sehr viel komplizierter sind als um Beispiel von Stickstoffdüngern. Aber mittels bestimmter Methoden (zum Beispiel mittels des isotopisch austauschbaren Phosphates (IEP)) lässt sich die Phosphor-Verfügbarkeit in den Böden genauer bestimmen als über die etwaige Löslichkeit der Substanzen in diversen Extraktionsmitteln.

Zusammenfassung

Hier wird berichtet über die agronomische Effizienz der im Rahmen der BMBF/BMU-Förderinitiative "Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor" von 2004 bis 2011 und des EU-Projektes SUSAN synthetisierten und an den Universitäten Gießen und Göttingen sowie am Julius-Kühn-Institut in Braunschweig getesteten Phosphor-Recyclingprodukte:

17 P-Recyclingprodukte aus Klärschlammaschen (KSA), eine Tiermehlasche, ein Sinterphosphat aus Tiermehl, eine Kupolofenschlacke, neun Ca-Phosphat-Produkte aus der Ca-Kristallisation an CSH-Substraten und aus Fällungen ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCl_2 , etc) wie P-ROC, Fix-P, SESAL, Pasch, Seaborne-Ca-Phosphat, chemisch reine Ca-Phosphate und Mg-Phosphate sowie Seaborne-Mg-Phosphat und Struvit-Produkte aus drei Institutionen (Pilotanlagen, Laboranlagen) wurden in diversen Gefäßversuchen als Phosphor-Dünger eingesetzt und zwar im Vergleich zu den wasserlöslichen Superphosphaten (SSP, TSP) und Rohphosphat. Es wurden Sand- und Lehmböden (pH-Werte 4,7 bis 6,8; CAL-P-Gehalte: 3,3 bis 4,9 Milligramm pro 100 Gramm Boden) und vorrangig Mais als Kulturpflanze benutzt. Die Phosphor-Aufnahme aus Superphosphat (Phosphor-Menge in den gedüngten Pflanzen minus Phosphor-Menge in den ungedüngten Pflanzen) wurde als Bezugsbasis gleich 100 Prozent gesetzt und die Phosphor-Aufnahmen aus allen Phosphor-Recyclingprodukten dazu ins Verhältnis gesetzt.

Folgende Resultate ergaben sich: Aus 65 Prozent aller KSA-Produkte (= 15 Produkte) wurden weniger als 25 Prozent des Phosphors der Superphosphatvarianten aufgenommen, in 26 Prozent der Tests (= sechs Produkte) zwischen 25 bis 50 Prozent. Mit nur einem Magnesium-haltigen Ascheprodukt wurden 67 Prozent erreicht. Die Kupolofenschlacke erreichte auf dem sauren Sandboden nur 24 Prozent aber auf dem neutralen Lehmboden gleiche Werte wie TSP. Die Ergebnisse für die Calcium-Phosphate lagen zwischen 0 und maximal 50 Prozent. Mg-Phosphat-Fällungsprodukte hatten stets eine bessere Phosphor-Lieferbereitschaft als adäquat erzeugte Calcium-Phosphate. Die höchsten und sichersten Werte der Phosphor-Aufnahmen wurden mit $\text{Mg NH}_4 \text{ PO}_4 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$ (Struvit, MAP) erreicht. Es war dem TSP gleichwertig.

Mögliche Ursachen für die unterschiedlichen Wirkungen der Phosphor-Produkte sowie deren weitere Verwendung zum Beispiel als Rohstoffe zur Phosphor-Düngerherstellung werden diskutiert.

Schlagwörter

Phosphorrecycling, Phosphordünger, Gefäßversuche, Mais, Weizen, Roggen, Klärschlammasche, Tiermehlasche, Pflanzenasche, Calciumphosphat, Magnesiumphosphat, Magnesium-Ammonium-Phosphat, Struvit, Eisenphosphate, Rohphosphat

Summary: Phosphor fertilization effects of phosphorus recycling products

P uptake from different P products of P recycling were tested in pot experiments: 17 products of recycled sewage sludge ashes (SSA), 1 meat and bone meal ash, 1 sinter product of meat and bone meal, 1 cupola furnace slag, 9 Ca phosphates from Ca crystallization on CSH substrates or from precipitation by $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and CaCl_2 such as P-ROC, Fix-P, SESAL, Pasch, Seaborne-Ca-phosphates, Seaborne-Mg-phosphate and struvites from 3 institutions. These P products were tested in comparison with simple super phosphate (SSP) or triple super phosphate (TSP), and row phosphate. Sandy and loamy soils (pH: 4,7-6,8; CAL-P: 33-49 ppm) were used. Maize was used predominantly as the test plant. The P uptake from super phosphate (P amount of plants with P fertilizer minus P amount of plants without P) was set as the reference value (= 100 %) for all P products. The following results were found: (1) plants took up less than 25 % P in 65 % of all SSA (15 products). (2) 6 products (26 %) resulted in P uptake of 25 and 50 % relatively to TSP. In only one Mg product P uptake reached 67 %. With cupola furnace slag 24 % P uptake was reached on sandy soil and nearly the same value as TSP on loamy soil. The uptake results of Ca phosphates were between 0 and 50 %. Mg products from precipitation processes consistently showed a better P supply in relation to comparable Ca compounds. With struvite the same P uptake as TSP was reached. Reasons for the different P efficiency of recycling products and perspectives of their use are discussed.

Key words

phosphorus recycling, phosphorus fertilizer, pot experiments, maize, wheat, rye, sewage sludge ash, meat and

bone meal ash, plant ash, calcium phosphates, magnesium phosphates, magnesium-ammonium-phosphate, struvite, iron phosphate, raw phosphate

Résumé: Les effets de fertilisation avec phosphore des nouveaux produits de recyclage de phosphate

L'article informe sur l'efficacité agronomique des produits de recyclage de phosphore testés, entre 2004 et 2011, aux universités de Gießen et de Göttingen et à l'Institut Julius-Kühn à Braunschweig, dans le cadre de l'initiative de soutien des Ministères allemands de l'éducation et de la recherche [BMBF] et de l'environnement [BMU], Economie de circuit fermé pour les substances nutritives végétales, notamment le phosphore, et synthétisés dans le cadre du projet SUSAN de l'Union européenne:

17 produits de recyclage P, à base de cendres d'incinération de boue d'épuration (CBE), un produit à base de farine animale, un phosphate calciné à base de farine animale, une scorie de cubilot, neuf produits à base de phosphate de calcium issus de la cristallisation de calcium sur des substrates CSH et de précipitations (Ca (OH)₂, CaCl₂, etc.), comme le P-ROC, le Fix-P, le SESAL, le Pasch, le phosphate Seaborne-Ca, des phosphates de calcium chimiquement purs et des phosphates de magnésium ainsi que du phosphate de magnésium Seaborne et des produits Struvit de trois institutions (installations pilotes, laboratoires) furent utilisés, dans diverses expériences en pots, comme engrais à base de phosphore, notamment par rapport aux superphosphates hydrosolubles (SSP, TSP) et au phosphate naturel. Furent utilisés des sols sableux et argileux (valeur pH entre 4,7 et 6,8; teneur en CAL-P: 3,3 à 4,9 milligrammes par 100 grammes de sol) alors que le maïs fut la culture préférée. L'absorption de phosphore de superphosphate (quantité de phosphore dans les plantes fertilisées moins la quantité de phosphore dans les plantes non-fertilisées) fut établie en tant que point de référence, à 100 pour cent, pour le mettre en relation avec les absorptions de phosphore de tous les produits de recyclage phosphore.

Ont été obtenus les résultats suivants: Parmi les 65 pour cent de tous les produits CBE (= 15 produits) moins de 25 pour cent du phosphore des variantes de superphosphates furent absorbés, tandis que dans 26 pour cent des expériences (= six produits) le taux était entre 25 et 50 pour cent. 67 pour cent furent obtenus avec un seul produit à base de cendre et contenant du magnésium. Sur le sol sableux acide, la scorie de cubilot parvint à 24 pour cent seulement tandis que sur un sol argileux neutre, les valeurs égalèrent celles du TSP. Les résultats pour le phosphate de calcium se situaient entre 0 et un maximum de 50 pour cent. Des produits de précipitation de phosphate de magnésium étaient toujours plus disposés à fournir du phosphore que des phosphates de calcium produits de façon adéquate. Les valeurs d'absorption des phosphore les plus élevées et les plus sûres furent obtenues avec Mg NH₄ PO₄ H₂O (Struvit, MAP). Il était égale au TSP.

Les causes possibles des effets variés des produits phosphore et leur utilisation en tant que matière première dans la production de fertilisants à base de phosphore sont discutées.

Mots clés

recyclage phosphore, engrais/ fertilisant phosphorique, expériences an pots, maïs, blé, seigle, cendres de boue d'épuration, cendre de farine animale, cendre végétale, phosphate de calcium, phosphate de magnésium, phosphate de magnésium et d'ammonium, Struvit, phosphates de fer, phosphate naturel

LITERATUR

1. Adam, C., Peplinsk, B., Kley, G., Kratz, S., Schick, J., Schnug, E., 2008: Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen – Ergebnisse aus dem EU-Projekt SUSAN. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft. Heft 3-4 (Sonderausgabe "IFTAT 2008"), S. 55-64.
2. Anonym, 2000: Understanding Phosphorus and its use in Agriculture. Aus Publikationen der web site der European Fertilizer Manufacturers Association (EFMA):
3. www.efma.org/publications/phosphorus/understanding%20phosphorus/Final%20phosphorus.pdf, Seite

4. Berg, U., 2005: P-Roc – Ein Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Abwässern durch Abscheidung von Calciumphosphat-Mineralphasen an Tobermorit. 75. Dornstädter Seminar. Abwassertechnik. Schriftenreihe WAR 1679. Darmstadt, 2005.
5. Berg, U., Knoll, G., Kaschka, E., Kreutzer, V., Weidler, P., Nüesch, R., 2007: P-ROC- phosphorus recovery from waste water by crystallisation of Ca phosphate compounds. *J. of Residuals Sci. Techn.* 4, 121-126.
6. Biertümpfel, A., Heydrich, R., Graf, T., Vetter, A., 2010: Düngung mit Presskuchen und Strohasche – Auswertung 14jähriger Versuchsergebnisse. Thüringische Landesanstalt für Landwirtschaft.
7. Cabeza Perez, R.A., 2010: Phosphorus dynamics in soil and plant availability of fertilizers from phosphorus recycling evaluated in field and pot experiments. Dissertation. Cuvillier Verlag Göttingen.
8. Cabeza Perez, R.A., Steingrobe, B., Römer, W., Claassen, N., 2011: Effectiveness of recycled P products as P fertilizers, as evaluated in pot experiments. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 91, 173-184.
9. Dohmann, M., 2011: Entstehung und Begleitung der Förderinitiative P-Recycling. *Gewässerschutz · Wasser · Abwasser, GWA* 228, 1/1-1/7.
10. DWA, 2005: Stand der Klärschlammbehandlung und Entsorgung in Deutschland. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (Hrsg.), Okt. 2005. ISBN 3-937758-29-1.
11. Ehbrecht, A., Patzig, D., Schönauer, S., Schwotzer, M., Schuhmann, R., 2009: Crystallisation of calcium phosphate from sewage: efficiency of batch mode technology and quality of the generated products. In: K. Ashley et al., (Eds.), *Intern. Conf. on Nutrient Recovery from waste water streams*. IWA Publishing, London, pp. 521-530.
12. Günther, L., Dockhorn, T., Dichtl, N., Müller, J., Urban, I., Phan, L., Weichgrebe, D., Rosenwinkel, K., Bayerle, N., 2008: Technical and scientific monitoring of the large-scale seaborne technology at the WWTP Gifhorn. *Water Pract. Technol.* 3 (1). Doi: 10.2166/wpt.2008.006
13. Heinzmann, B., Engel, G., 2003: Phosphor-Recycling bei Kläranlagen mit biologischer Phosphorelimination. In: *Tagungsband zum Symposium "Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall"* des UBA, Berlin, 6.-7 Febr. 2003, 13/1-13/13.
14. Kerschberger, M., Hege, U., Jungk, A., 1997; Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. VDLUFA-Standpunkt, Eigenverlag Darmstadt.
15. Leinweber, P., Geyer-Wedell, K., Jordan, E., 1993: Phosphorversorgung der Böden im agrarischen Intensivgebiet Südoldenburg. *Vechtaer Druckerei und Verlag GmbH*, S. 1-67.
16. Montag, D., 2008: Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung. Entwicklung eines Verfahrens zur Integration in Kommunalen Kläranlagen. Dissertation, RWTH, Aachen.
17. Montag, D., Gethke, K., Pinnekamp, J., 2009: Different strategies for recovering phosphorus: technologies and costs. In: Ashley, K., Mavinic, D., Koch, F. (eds.) *International Conference on nutrient recovery from waste water streams*. Vancouver, Canada. IWA Publishing, London, pp 159-167.
18. Nanzer, S., Janousch, M., Huthwelker, T., Eggenberger, U., Hermann, L., Oberson, A., Frossard, E., 2009: Phosphorus speciation of sewage sludge ashes and potential for fertilizer production. In: Ashley, K., Mavinic, D., Koch, F. (eds.) *International Conference on nutrient recovery from waste water streams*. Vancouver, Canada. IWA Publishing, London, pp 609-614.
19. Petzelt, S., Cornel, P., 2010: Neue Wege des Phosphorrecyclings aus Klärschammaschen. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* (2010), (57), Nr. 4.
20. Petzelt, S., Peplinski, B., Cornel, P., 2011: Phosphorus and Aluminum recovery from sewage sludge ash by a novel two step wet chemical elution process (SESAL-Phos-Recovery Process). *Proceedings of the WEF/IWA conference: Nutrient Recovery and Management 2011*. Miami/Florida (USA).
21. Römer, W., 2006: Vergleichende Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit von Phosphat aus verschiedenen P-Recycling-Produkten im Keimpflanzenversuch. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169, 826-832.

22. Römer, W., 2009: Ansätze für eine effizientere Nutzung des Phosphors auf der Basis experimenteller Befunde. Berichte über Landwirtschaft. Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft, Bd. 87, S. 5-30.
23. Scheidig, K., Schaaf, M., Mallon, J., 2009: Profitable recovery of phosphorus from sewage sludge and meat & bone meal by the Mephrec process – a new means of thermal sludge and ash treatment. In: K. Ashley et al., (Eds.), Intern. Conf. on Nutrient Recovery from waste water streams. IWA Publishing, London, pp. 563-566.
24. Schiemenz, K., Eichler-Löbermann, B., 2010: Nutzung von Biomasseaschen für die Phosphorversorgung im Pflanzenbau (Schlussbericht für die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. in Gülzow (Mecklenburg-Vorpommern)).
25. ► www.fnr-server.de/ftp/paf/berichte/22016206.pdf.
26. Schick, Judith, 2009: Untersuchungen zur P-Düngerwirkung und Schwermetallgehalten thermochemisch behandelte Klärschlammaschen. Dissertation. TU Braunschweig. Druckjahr: 2010.
27. Schick, J., Kratz, S., Adam, C., Herrmann, L., Kley, G., Schnug, E., 2008: Agronomical Potential of P fertilisers made from sewage sludge ashes – The EU-Project SUSAN. Vortrag: EUROSÖIL-Kongress, Wien, 25.-29. Aug. 2008.
28. Schipper, W.J., Klapwijk, A., Potjer, B., Rulkens, W.H., Temmink, B.G., Kiestra, F.D.G., Lijmbah, A.C.M., 2001: Phosphate recycling in the phosphorus industry. Environmental Technology, Vol. 22, No. 11, pp. 1337-1346.
29. Seaborne-EPM-AG, 2010: Seaborne umwelttechnik. In: ► www.seaborne-erl.de/englisch/index.html
30. STN (Servicegesellschaft Tierische Nebenprodukte), 2007: www.stn-vvtn.de/fakten_zahlen.php; sowie www.stn-vvtn.de/produkte.php
31. Vesterager, N.O., 2003: Erfahrungen zur Phosphorrückgewinnung mit dem Seaborne-Verfahren. In: Tagungsband zum Symposium "Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall" des UBA, Berlin, 6.-7. Febr. 2003, 17/1-17/9.
32. Waida, Christine, Weinfurter, K.-H., 2011: Untersuchung der in der Förderinitiative erzeugten Produkte. Im Abschlussbericht: Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzeptes für Deutschland (PhoBe), Aachen, Nov. 2011, S. 97-162.
33. Weideler, A., 2010: Phosphorrückgewinnung aus kommunalem Klärschlamm als Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP). Ph.D. Thesis, University of Stuttgart.
34. Werner, W., 2006: Düngung von Böden. Handbuch der Bodenkunde. 26. Ergänzung Lfg. 11/06, Kap. 6.4, 1-63.

Dank

Gedankt wird Frau M. Niebuhr für ihre technische Hilfe im Rahmen der Erstellung des Manuskriptes.

Autor

Prof. Dr. agr. habil. W. Römer, Universität Göttingen, Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Abteilung Pflanzenernährung und Ertragsphysiologie, Carl-Sprengel-Weg 1, 37075 Göttingen. E-Mail: ► awroemer@web.de