

## **8. Bewertung verschiedener Behandlungsverfahren von Abwasser und Klärschlamm zur Herstellung von phosphorhaltigen Sekundärrohstoff-Düngern**

Christine Waida, Stefan A. Gäth, Gießen

### **1 Einleitung**

Phosphor (P) ist ein essentieller Pflanzennährstoff, der in seiner Form nicht ersetzt werden kann. Die globalen Phosphaterzlagerstätten sind jedoch begrenzt und bereits in beträchtlichem Ausmaß abgebaut [1]. Die verbliebenen Erzreserven sind zunehmend mit Schadstoffen wie z.B. Cadmium und Uran kontaminiert, weshalb Phosphaterz bereits als limitierte Ressource bezeichnet und nach Möglichkeiten gesucht wird, weitere Phosphorquellen zu erschließen. Im Zuge dieser Problematik werden bereits seit mehreren Jahrzehnten verschiedene Technologien und Verfahren entwickelt, die eine Rückgewinnung von Phosphor aus sekundären Rohstoffquellen wie Klärschlamm, Fleisch- und Knochenmehlen in möglichst hochkonzentrierter Form zum Ziel haben. Diese Materialien enthalten neben den Nährelementen jedoch auch hohe Anteile an Schadelementen, welche es durch die verschiedenen Herstellungsverfahren zu reduzieren gilt. Generell ist eine Phosphorrückgewinnung mittels nasschemischer- oder thermochemischer Behandlungsverfahren möglich [2]. Ziel der Wiedergewinnungsprozesse ist es, die Phosphor-Gehalte in den Produkten optimal zu steigern und dabei gleichzeitig die Schadstoffe auszuscheiden. Im Rahmen des Begleitprojektes PhoBe „Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzeptes für Deutschland“ wurden daher verschiedene, neuartig entwickelte Phosphor-Recycling-Produkte hinsichtlich der P-Aufkonzentrierung und der Schadstoffentfrachtung untersucht.

### **2 Material und Methoden**

#### **2.1 Phosphorhaltige Sekundärrohstoff-Dünger**

Insgesamt wurden sechszehn verschiedene, teils in der Förderinitiative erzeugte Sekundärrohstoffe und deren Basissubstrate (soweit verfügbar) betrachtet (s. Tabelle 1), so dass die Phosphor-Anreicherung sowie die Schwermetall-Reduktion vom Ausgangsstoff zum recycelten Phosphor-Endprodukt vergleichend untersucht und bewertet werden konnte. Darüber hinaus wurden alle Produkte im Vergleich zu einem handelsüblichen Triple-Superphosphat sowie einem Rohphosphat-Dünger untersucht.

**Tabelle 1: Charakterisierung und Zuordnung der Ausgangsstoffe zu den entsprechenden Endprodukten: KS-Klärschlamm, ÜSS-Überschussschlamm, KSA-Klärschlamm-Asche, TMA-Tiermehl-Asche**

Basis-substrat	Testsubstanz	Materialtyp	Herstellungschemie	Produktart
KS	P-RoC 2008	Abwasser-Recyclat	Kristallisation mit CSH	Ca-Phosphat
KS	P-RoC 2009			
-	MAP Gifhorn	Klärschlamm-Recyclat	Säureaufschluss, Sulfidbehandlung	MAP
-	MAP Stuttgart		Säureaufschluss, Laugung	MAP
-	Seaborne		Säureaufschluss, Sulfidbehandlung	Mg-Phosphat
ÜSS	FIX-Phos		Kristallisation mit CSH	Ca-Phosphat
ÜSS	SESAL-Phos		Säureelution, Laugung	Ca-Phosphat
ÜSS	Al-P	Klärschlamm-Asche	Säureaufschluss	Al-Phosphat
ÜSS	Al-P <sub>entfrachtet</sub>		wiederholter Säureaufschluss	
KSA	PASCH I		Laugung, Solventextraktion, Kalkmilch-Fällung	Ca-Phosphat
KSA	PASCH II			
KSA	PASCH III			
-	Ash Dec 2008		Säure- und Chloridbehandlung, thermische Nachbereitung	Ca-Phosphat
-	Ash Dec 2009			
KSA	BAM		Zugabe von Mg-Chloriden	Mg-Phosphat
TMA	Ulophos	Tiermehl-Asche	Zugabe von Additiven	Ca-Phosphat
-	TSP	Mineral-Dünger	Säureaufschluss	Ca-Phosphat
-	RP		unbehandelt	

Bei den untersuchten Basissubstraten handelt es sich um Klärschlamm (KS), Überschussschlamm (ÜSS), Klärschlamm-Asche (KSA) sowie um Tiermehl-Asche (TMA). Die gewonnenen phosphorhaltigen Recyclingprodukte liegen überwiegend in Form von Ca-Phosphaten sowie als Mg- oder Al-Phosphate und als Magnesium-ammoniumphosphate (MAP) unterschiedlicher Struktur vor. Die Phosphor-Rückgewinnung erfolgte entweder nasschemisch oder thermochemisch unter Anwendung unterschiedlicher Herstellungsverfahren, wobei die Produkte Ash Dec 2008 und 2009, BAM und Ulophos thermochemisch produziert wurden und die restlichen Prüfsubstrate nasschemisch entstanden sind.

## 2.2 Analytik der Dünger- und Bodenmaterialien

Die Bestimmung der Element-Gesamtgehalte in den Düngersubstraten und den Bodenproben erfolgte anhand von Königswasserauflösungen nach DIN ISO 11466 [3]. Die Messung der Gesamtgehalte erfolgte massenspektrometrisch mittels ICP-MS (7500ce/Agilent).

Der pflanzenverfügbare Phosphat-Gehalt wurde mittels Calcium-Acetat-Lactat-Methode (CAL) in Anlehnung an die VDLUFA-Methodik [4] bestimmt. Die P-Gehalte

wurden im Durchflussphotometer (Unicam UV/VIS-Spektrometer UV2) bei 882 nm gemessen.

Die Bestimmung der organisch sorbierten Schwermetall-Gehalte im Ethyldiamintetraessigsäure-Extrakt (EDTA) erfolgte geändert nach ZEIEN [5] in 0,025 molarer  $\text{Na}_2\text{-EDTA}$  bei einem Proben-zu-Lösungsverhältnis von 1:10 ohne Ansäuerung des Extraktes, um Fällungsreaktionen zu vermeiden. Die EDTA-Extrakte wurden massenspektrometrisch mittels ICP-MS (7500ce/Agilent) gemessen.

Die leichtlöslichen Schwermetall-Fractionen wurden in Anlehnung an die Calciumnitrat-Extraktion ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) nach ZEIEN [5] in 0,01 molarer  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ -Lösung bei einem Proben-zu-Lösungsverhältnis von 1:10 und einer Ansäuerung des Extraktes mit 1 %-iger Natronlauge ermittelt. Die Messung der Extrakte erfolgte massenspektrometrisch mittels ICP-MS (7500ce/Agilent).

### 2.3 Pflanzenversuche

Der Aufbau der Gefäßversuche erfolgte unter Absprache mit der Abteilung für Agrikulturchemie des Departments für Nutzpflanzenwissenschaften (DNPW) der Georg-August-Universität Göttingen. Die Versuche wurden im Gewächshaus des Interdisziplinären Forschungszentrums (IFZ) der Justus-Liebig-Universität Gießen durchgeführt. Bei einem künstlichen Tag-Nachtrhythmus von 16 h zu 8 h wurde mittels spezieller Natrium-Wasserdampf-Lampen (400 W Philips SON-T Agro) eine Mindest-Lichtintensität von 10 Kilolux (klx) gewährleistet. Die Temperatur lag tagsüber bei mindestens  $25^\circ\text{C}$ , nachts wurde sie auf  $20^\circ\text{C}$  reduziert. Die Versuche erfolgten in Mitscherlichgefäßen mit einem Fassungsvermögen von 6 kg Bodenmaterial, welches zu Versuchsbeginn einmalig mit genau 360 mg Phosphor der zu testenden Düngersubstanz versehen wurde. Neben den Testsubstraten wurden zusätzlich 0,25 g/kg Kalium in Form von KCl, 0,25 g/kg Stickstoff in Form von  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  und 0,2 g/kg Magnesium in Form von  $\text{MgSO}_4$  in die Gefäße mit eingemischt. In die Varianten, die aufgrund ihres Herstellungsverfahrens bereits Magnesium enthalten, erfolgte keine zusätzliche Mg-Düngung. Als Kontrolle zu den eingesetzten Sekundärphosphat-Düngern dienten eine schlecht pflanzenverfügbare Rohphosphat-Variante, eine sehr gut verfügbare Triple-Superphosphat-Variante sowie eine ungedüngte Kontroll-Variante. Alle Versuchsvarianten wurden in vierfacher Wiederholung angesetzt. Die Böden wurden gravimetrisch konstant auf 50 % - 70 % ihrer maximalen Wasserhaltekapazität eingestellt. Die Standorte der einzelnen Gefäße wurden darüber hinaus wöchentlich gewechselt.

Die eingesetzte Maissorte „KX-5011“ entstammt der KWS SAAT AG und ist durch eine spezielle Beize besonders unempfindlich gegen Schädlingsbefall. Da dem Wachstum der Pflanzen durch die Höhe des Gewächshausdaches Grenzen gesetzt waren, kam für die Versuche eine kleinwüchsige Maissorte von maximal 200 cm Wuchshöhe zum Einsatz. Insgesamt wurden drei verschiedene Versuchsreihen durchgeführt. Im ersten Versuch wurden der Sandboden und der Lösslehm I in den Gefäßversuchen eingesetzt. Da sich während des Versuches herausstellte, dass dieser Lehmboden mit einem Phosphat-Gehalt der P-Versorgungsstufe C [6] scheinbar überversorgt war und sich in den Pflanzen somit nicht die gewünschten Effekte zeigten, wurde er in den Versuchsreihen zwei und drei durch Lösslehm II

ersetzt, der einen niedrigeren Phosphat-Gehalt aufweist und somit der P-Gehaltsklasse B zugeordnet ist.

Ein Versuchsdurchlauf entsprach jeweils einer gesamten Wachstumsperiode und umfasste somit etwa zwei Monate von der Aussaat bis zur Ernte. Die Ernte der adulten Maispflanzen erfolgte kurz vor dem Fahnenschieben bei einer Wuchshöhe von etwa 200 cm (s. Abb. 1). Hierbei wurde das Pflanzenmaterial grob zerkleinert und über drei Tage bei 105°C im Trockenschrank getrocknet [7]. Anschließend wurde die Trockenmasse der Maispflanzen bestimmt und das getrocknete Pflanzenmaterial mit Hilfe einer Retsch-Mühle für die weiteren Laboranalysen fein gemahlen.



**Abb. 1: Adultmaispflanzen im Gewächshaus kurz vor dem Erntezeitpunkt**

Zur Untersuchung der nachhaltigen Wirkung der eingesetzten Sekundärphosphate wurde dem Boden nach der Ernte jeweils eine Ruhephase von drei Monaten eingeräumt. Innerhalb dieser Zeit wurde die WHK weiterhin konstant auf 50 % - 70 % der Maximalkapazität gehalten. Nach diesem Ruhezeitraum erfolgte eine erneute Maisaussaat in die Versuchsgefäße. Zusätzlich wurden zusammen mit der Aussaat die Nährstoffe K, N und Mg in den bereits oben angeführten Mengen nachgedüngt. Der Nachfruchtversuch verlief analog dem oben beschriebenen Versuchsaufbau.

## **2.4 Analytik des Pflanzenmaterials**

Das Pflanzenmaterial wurde nasschemisch in der Mikrowelle (MLS 1200 Mega) nach der empfohlenen Methode der Herstellerfirma aufgeschlossen. Dazu wurden je 200 mg des Pflanzenmaterials mit 5 ml konzentrierte HNO<sub>3</sub> und 2 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> versetzt. Im Mikrowellengerät erfolgte schließlich in einem mehrstufigen Programm der nasschemische Aufschluss des Pflanzenmaterials (0 W - 600 W, 200°C - 600°C). Die Mikrowellen-Aufschlüsse wurden anschließend quantitativ mit deionisiertem Wasser in 25 ml Messkölbchen überspült. Die Analyse der Schwermetalle und der Makro-

und Mikronährstoffe (Gesamtgehalte) in den Aufschlüssen erfolgte massenspektrometrisch mittels ICP-MS (7500ce/Agilent).

Die Bestimmung des Phosphatgehaltes in den Pflanzenproben erfolgte in leicht abgewandelter Form in Anlehnung an die Methode von SCHEFFER und PAJENKAMP [8]. Der Phosphat-Gehalt in den Proben wurde bei 436 nm im Durchflussphotometer (Unicam UV/VIS-Spektrometer UV2) gegen definierte Eichstandards gemessen.

## 2.5 Das Schadeinheitenmodell

Infolge der stark variierenden Gehalte der Schadelemente ist ein direkter Vergleich der einzelnen Düngerprodukte anhand der Gesamt-Konzentrationen allein nur schwer möglich. Das Schadeinheitenmodell nach BRANS [9] liefert einen Ansatz zur objektiven Bewertung der untersuchten Sekundärrohstoffe, indem die jeweilige Schwermetallbelastung anhand von sogenannten Schadeinheiten dargestellt wird.

**Gleichung:**

$$C_{SE} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_i^{Referenz}}}{1}$$

mit den Parametern:

$C_{SE}$	Konzentration an Schadeinheiten	[SE/kg TS]
$C_i$	Konzentration des Stoffes i	[mg/kg]
$C_i^{Referenz}$	Referenzkonzentration des Stoffes i	[mg/kg]

Die Schwermetall-Gesamtgehalte der einzelnen Düngersubstrate wurden hierbei den Grenzwerten der Bioabfallverordnung (BIOABFV) Kategorie II [10] gegenüber gestellt. Berechnet wurde ferner die summierte Schadeinheiten-Konzentration  $C_{SE}$  je kg Gesamt-Phosphor der Elemente Chrom, Kupfer, Zink, Nickel, Cadmium und Blei, um zu verdeutlichen, wie hoch der Schadstoffeintrag durch die untersuchten Produkten im Zuge einer Phosphordüngung ausfallen würde.

## 2.6 Transferfaktoren

Zur Bewertung der Schwermetall-Aufnahme aus den einzelnen Sekundärrohstoff-Düngern in die Versuchspflanzen wurde analog dem Schadeinheitenmodell ein relativierender Faktor gewählt, mit dessen Hilfe die unterschiedlichen Aufnahmearten an Schadelementen in die Pflanzen vergleichbar werden. Die Schwermetallaufnahme von Pflanzen aus dem Boden wird durch den Transferfaktor TF charakterisiert. Nach LÜBBEN und SAUERBECK [11] ist dieser definiert als

$$TF_{SM} = \frac{C_{Pflanze}}{C_{Boden+Düngemittel}}$$

**Gleichung 1**

mit den Parametern:

$TF_{SM}$	Transferfaktor des Schwermetalls [dimensionslos]
$C_{Pflanze}$	Schwermetall-Konzentration des Stoffes in der Pflanze [mg/kg]
$C_{Boden+Düngemittel}$	Schwermetall-Konzentration des Stoffes im Boden-Düngergemisch [mg/kg]

Berechnet wird der Quotient aus der Schwermetall-Konzentration in der Pflanze und der Schwermetall-Konzentration des gedüngten Bodens. Entsprechend der Berechnung der Schadeinheiten wurden zur Berechnung der Transferfaktoren erneut die Konzentrationen der Schadelemente Chrom, Kupfer, Zink, Nickel, Cadmium und Blei herangezogen. Die Transferfaktoren dieser Schadelemente wurden für die einzelnen Düngersubstrate aufsummiert und als Summen-Transferfaktor ( $TF_{\Sigma}$ ), bestehend aus sechs Schadstoffen, dargestellt.

$$TF_{\Sigma} = TF_{Cr} + TF_{Cu} + TF_{Zn} + TF_{Ni} + TF_{Cd} + TF_{Pb}$$

**Gleichung 2**

mit den Parametern:

$TF_{\Sigma}$	Summen-Transferfaktor
$TF_{Cr, Cu, Zn, Ni, Cd, Pb}$	Transferfaktoren der Elemente Chrom, Kupfer, Zink, Nickel, Cadmium und Blei

Hierbei gilt, je höher der Summen-Transferfaktor ( $TF_{\Sigma}$ ) ist, desto höher ist die Schadstoffaufnahme in die Pflanze.

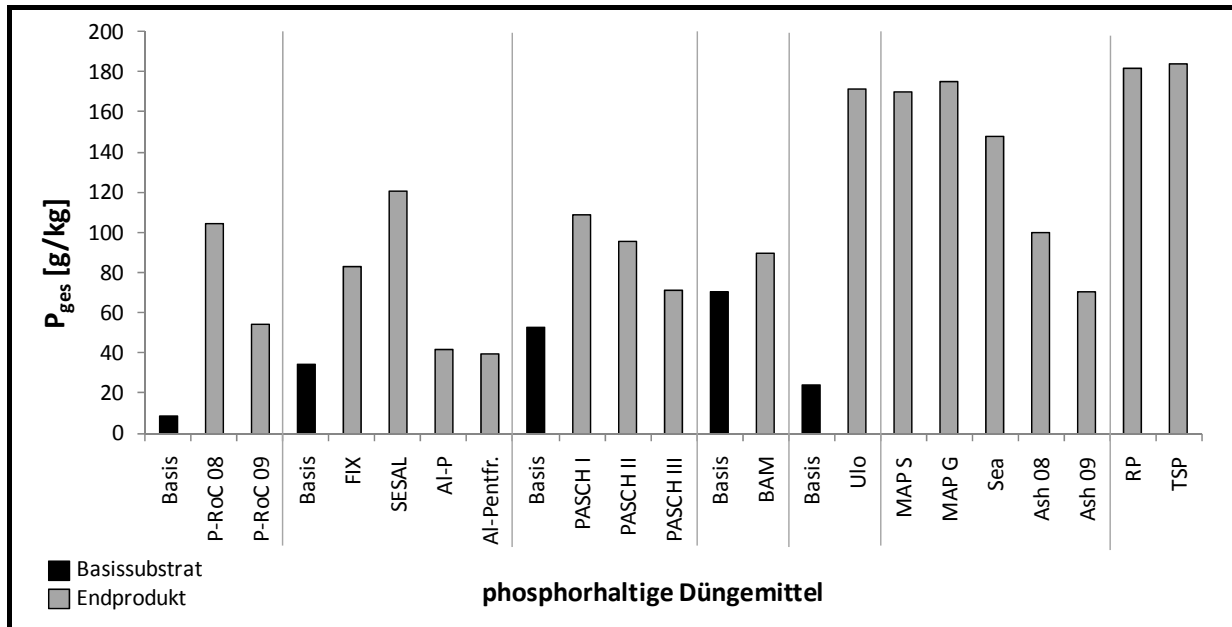
## 2.7 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Messdaten erfolgte mit Hilfe des Statistik-Programms SPSS 18.0 sowie mit dem Software-Programm Excel der Firma Microsoft. Zum Mittelwertvergleich zweier unabhängiger Stichproben wurden t-Tests durchgeführt, zur Untersuchung mehrerer Mittelwerte aus unabhängigen Stichproben erfolgte eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA). Signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Testvarianten wurden mit einem Sternchen versehen ( $p = 5\%$ ). In der grafischen Darstellung der Ergebnisse wurde zusätzlich jeweils der Standardfehler angegeben.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Phosphor-Gehalte und-Verfügbarkeiten

Durch die verschiedenen Behandlungsmethoden konnten der P-Gesamtgehalt sowie der pflanzenverfügbare Phosphat-Gehalt der einzelnen Düngersubstrate z.T. erheblich gesteigert werden (s. Abb. 2).



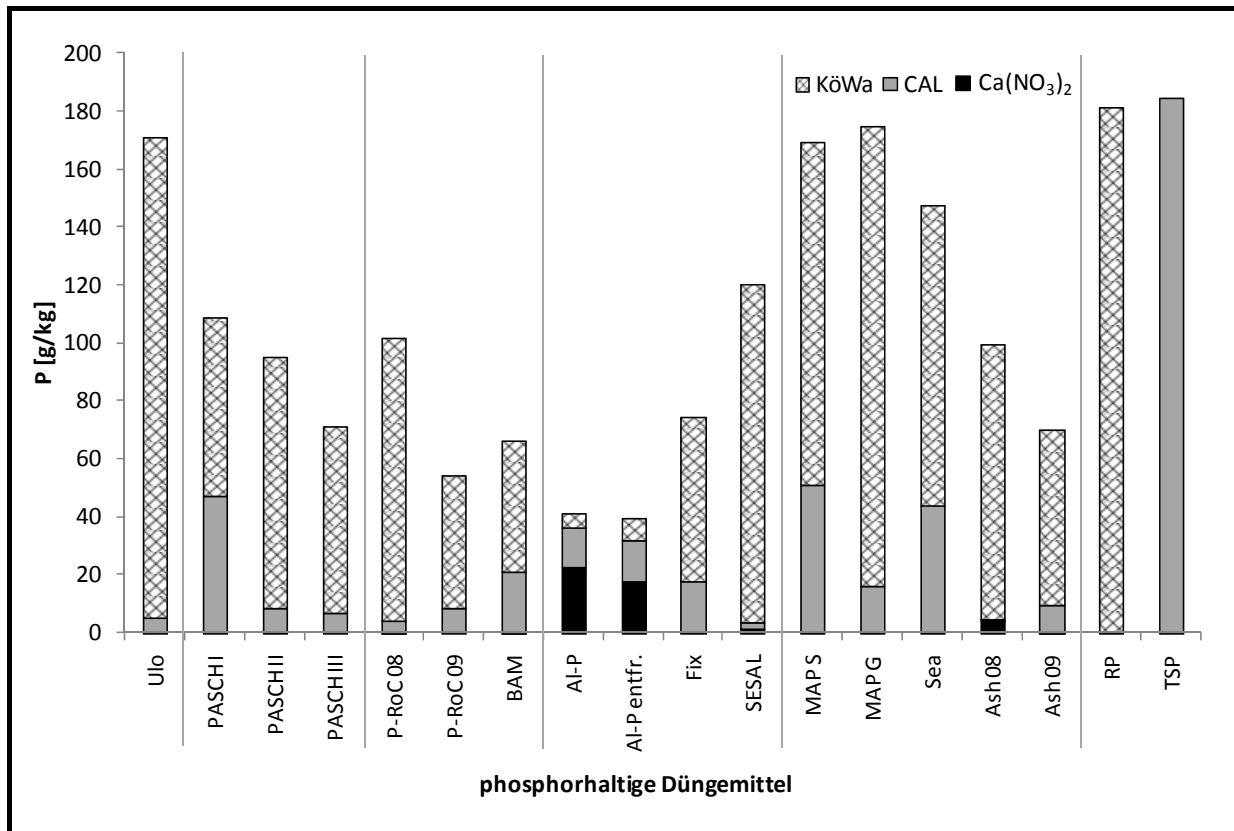
**Abb. 2: P-Gesamtgehalte (Königswasser-Extrakt) der Ausgangs- und Endsubstrate [g/kg] im Vergleich**

Für die Produkte MAP Stuttgart, MAP Gifhorn, Seaborne und Ash Dec 2008/2009 lagen leider keine Basissubstrate zum Vergleich vor. Für die beiden Abwasser-Recyclate P-RoC 2008/2009 sowie das Produkt Ulophos konnte der P-Gesamtgehalt durch die Herstellungsverfahren um ein Vielfaches erhöht werden. Die P-Aufkonzentrierung für die untersuchten Düngersubstrate Al-P, Al-P<sub>entfrachtet</sub> und BAM fiel hingegen sehr gering aus.

Insgesamt reichen die P-Gesamtgehalte der Produkte von 39 g P/kg im entfrachteten Al-P bis hin zu 184 g P/kg im TSP-Dünger. Die Produkte Ulophos, MAP Gifhorn, MAP Stuttgart und Seaborne verfügen über sehr hohe P-Gesamtgehalte und liegen im Bereich der Gehalte des Triple-Superphosphates und des Rohphosphates. Die Düngerprodukte SESAL-Phos, PASCH I, P-RoC 2008, Ash Dec 2008 und PASCH II zeigen im Vergleich zu den Handelsdüngern mittlere Phosphorgesamtgehalte im Bereich zwischen 95 g P/kg und 120 g P/kg. Die geringsten P-Gehalte finden sich in den beiden Aluminium-Phosphaten. Sie liegen bei knapp 39 g P/kg und 41 g P/kg.

Die Pflanzenverfügbarkeit, gemessen im CAL-Extrakt fällt für die einzelnen P-Recyclingprodukte sehr unterschiedlich aus, konnte durch die Behandlungsverfahren jedoch allgemein erhöht werden. Bezogen auf den Phosphor-Gesamtgehalt ergeben

sich für die geprüften Düngerprodukte herstellungsbedingt sehr variable CAL-Löslichkeiten zwischen 3,2 % und 87,5 % (s. Abb. 3).



**Abb. 3:** Phosphorgehalte und -verfügbarkeiten der untersuchten Sekundärrohstoffe: KöWa - Königswasser extrahierbarer Gesamtgehalt, CAL - pflanzenverfügbare Gehalt, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - leichtlöslicher Gehalt

Die Spannweite der Gesamtgehalte und der verfügbaren Gehalte resultiert einerseits aus der sehr unterschiedlichen Zusammensetzung und Konzentration der Ausgangsmaterialien, andererseits hängt die P-Ausbeute unmittelbar von dem angewandten Aufschlussverfahren ab. Die einzelnen Verfahren befinden sich derzeit noch in der Testphase und sind somit bezüglich des P-Rückgewinnungspotentials und der Schwermetall-Entfrachtung noch nicht optimiert. Nach derzeitigem Stand der Technik ist es ferner nur schwer möglich die P-Ausbeute und gleichzeitig auch die Verfügbarkeiten in den jeweiligen Verfahren zu erhöhen.

Das Triple-Superphosphat ist erwartungsgemäß zu 100 % pflanzenverfügbar, das unaufgeschlossene Rohphosphat ist dagegen unlöslich im CAL-Extrakt. Die Produkte PASCH I, MAP Stuttgart und Seaborne zeigen mit CAL-Gehalten zwischen 44 g P/kg bis 51 g P/kg im Vergleich dazu Pflanzenverfügbarkeiten zwischen 30 % und 40 % des Gesamtgehaltes. Die übrigen Dünger weisen Verfügbarkeiten auf, die sich z.T. weit darunter befinden. Die CAL-Löslichkeiten der Düngerprodukte Ulophos, PASCH II und III, P-RoC 2008 und 2009 sowie die der Produkte SESAL-Phos und Ash Dec 2008 und 2009 liegen im Bereich zwischen knapp 4 g P/kg und 9 g P/kg. Bezogen auf den P-Gesamtgehalt liegt somit nur ein sehr geringer Anteil des Phosphors in pflanzenverfügbare Form vor. Die Aluminium-Phosphate haben



bezüglich des Gesamtgehaltes mit etwa 80 % die höchste Phosphat-Verfügbarkeit. Außerdem zeigen sie im Vergleich zu den anderen Düngersubstraten sehr hohe  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ -Löslichkeiten. Diese liegen bei etwa 50 % des P-Gesamtgehaltes. Bei allen übrigen untersuchten Düngemitteln wurden hingegen leicht lösliche Anteile von unter 5 % festgestellt. Im Vergleich zu den übrigen nasschemisch behandelten Produkten wurde die Ausgangsasche hier ausschließlich mit 75 %iger Schwefelsäure behandelt, so dass der Phosphor in einer sehr löslichen Form vorliegt. Trotz hoher Löslichkeiten ist der Gesamtphosphorgehalt der beiden Aluminium-Produkte im Vergleich zu den anderen Substraten sehr gering. Es ist jedoch zu bedenken, dass es im Labor oft nur in geringem Maß möglich ist, die komplexen Prozesse abzubilden, die bei realer Bodenreaktion vorherrschen, so dass die ermittelten Phosphor-Verfügbarkeiten und -Löslichkeiten nur zur Feststellung der momentanen Löslichkeit herangezogen werden können [12, 13].

### **3.2 Schwermetall-Entfrachtung**

Sowohl die untersuchten Basissubstrate, als auch die phosphorhaltigen Sekundärrohstoffdünger zeigen sehr unterschiedliche Schwermetall-Gesamtgehalte, die auf die ungleiche Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien und die verschiedenen P-Rückgewinnungsverfahren zurückzuführen sind. Insgesamt konnten die Schwermetall-Gehalte der Ausgangssubstrate durch die Behandlungsmethoden größtenteils deutlich reduziert werden (vgl. Tabelle 2). Dies gilt jedoch nicht für die Produkte Al-P, Ulophos und BAM.

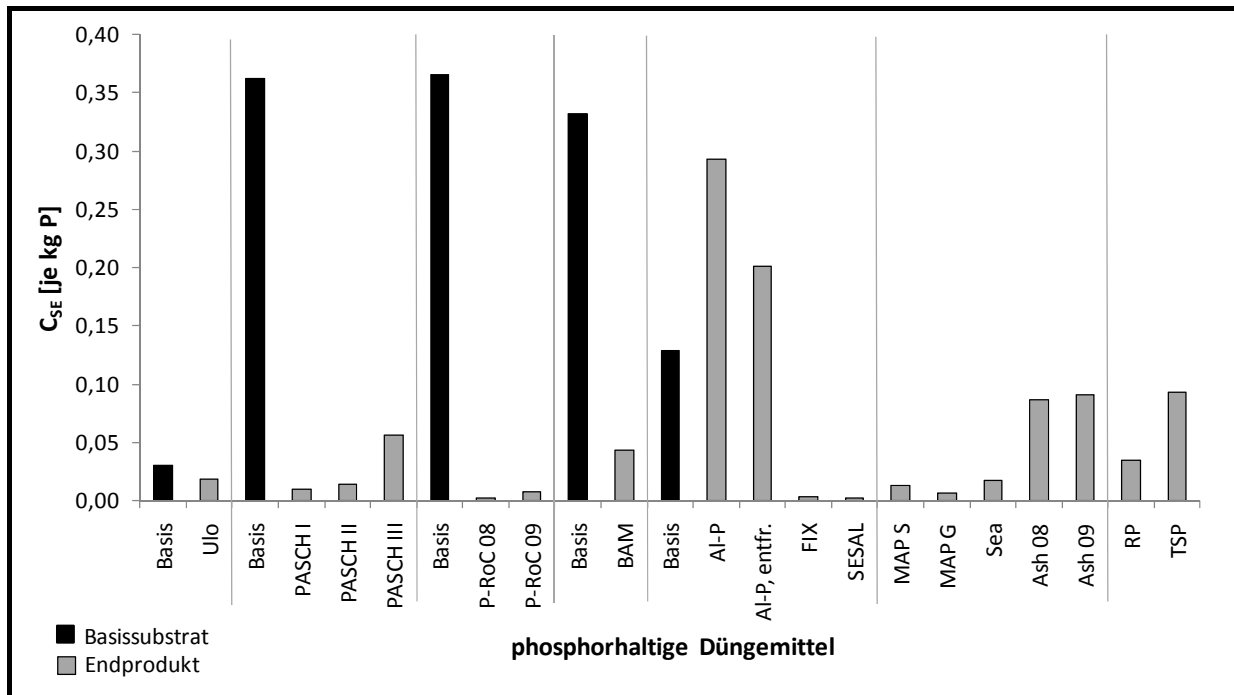
Für die Herstellung des Al-Phosphates wurde der verwendete ÜSS zu Asche verbrannt und mit Schwefelsäure aufgeschlossen. Hierbei wurden die Schwermetalle stark aufkonzentriert, jedoch nicht aus dem Substrat entfernt, so dass dieses nach Düngemittelverordnung (DüMV) [14] für die Elemente Kupfer und Zink die vorgegebenen Grenzwerte überschreitet und für Cadmium (bezogen auf den  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Gehalt) kennzeichnungspflichtig wird. Da nach aktueller DüMV keine Grenzwerte für Sekundärrohstoffe aus dem Abwasserbereich festgelegt sind, wurden zur Bewertung der Elemente Kupfer und Zink jeweils die Angaben für Wirtschaftsdünger herangezogen.

**Tabelle 2: Gesamtgehalte (Königswasser-Extrakt) ausgewählter Schadelemente der Basissubstrate (Basis) und phosphorhaltigen Düngerprodukte sowie Einordnung der P-Dünger nach Düngemittelverordnung (DüMV) [14]: kennzeichnungspflichtige Gehalte fett markiert, Grenzwertüberschreitungen fett und unterstrichen**

Basissubstrat/ Düngerprodukt	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd/P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *	Pb
	alle in [mg/kg]						
Basis	69,15	8,44	133,53	282,86	1,20	-	18,70
P-RoC 2008	4,74	5,23	2,80	21,42	2,46	-	2,40
Basis	24,81	16,88	145,74	650,10	2,87	16,13	37,88
FIX	2,29	2,12	2,93	1,66	< 0,83	0,23	5,03
SESAL	< 0,33	0,20	4,50	20,73	<b>27,93</b>	0,21	3,37
Al-P	42,13	32,50	<b><u>610,38</u></b>	<b><u>1196,96</u></b>	13,56	<b>30,31</b>	81,35
Basis	65,90	60,68	678,18	2793,81	11,33	2,81	228,24
PASCH I	14,78	17,17	39,38	< 20,00	6,64	-	29,31
Basis	97,90	61,26	1106,22	2412,81	21,77	1,96	291,50
BAM	104,40	<b>44,61</b>	90,19	90,88	<b>21,72</b>	0,19	1,38
Basis	7,65	3,13	15,03	125,39	< 0,50	-	17,57
Ulophos	59,53	34,73	174,02	48,31	3,33	-	3,54
TSP	116,80	<b>47,22</b>	28,69	510,80	12,65	<b>48,55</b>	1,57
RP	150,80	22,27	14,49	207,26	5,26	12,94	4,95
<b><u>DüMV Kennz.pflicht</u></b>	-	40	-	-	20	20	100
<b><u>DüMV Grenzwert</u></b>	-	80	500	1000	40	50	150

Auch in den thermochemisch behandelten Produkten Ulophos und BAM kam es durch den Recyclingprozess für einige Elemente zu einer Aufkonzentrierung. Unter Zugabe geeigneter Chloride in den Thermoreaktor reagieren die Schadelemente zwar mit den Chloriden, aufgrund der Anwesenheit von Eisenoxiden im Aschesubstrat wird die Reaktion jedoch behindert, so dass die Elemente Chrom, Nickel und Arsen nicht wie beabsichtigt in eine Chloridform übergehen und verdampfen, sondern im gewonnenen Produkt verbleiben [15]. Das getestete Mg-Phosphat BAM unterliegt somit für die Elemente Nickel und Arsen der Kennzeichnungspflicht nach DüMV. Das Ca-Phosphat SESAL-Phos ist ebenfalls kennzeichnungspflichtig für Arsen. In den übrigen Produkten kam es unter Anwendung der Herstellungsverfahren demgegenüber zu einer sichtbaren Schwermetall-Entfrachtung. Interessanterweise zeigt jedoch auch der bereits im Handel zugelassene TSP-Mineraldünger nach den DüMV-Kriterien für Sekundärrohstoffe kennzeichnungspflichtige Gehalte für Nickel und Cadmium. Die meisten Produkte schneiden hier somit also besser bzw. gleichwertig zu den in der Landwirtschaft verwendeten Handelsdüngern ab.

### 3.3 Schadeinheiten



**Abb. 4: Konzentration an Schadeinheiten  $C_{SE}$  [je kg P] der Basissubstrate und Endprodukte verschiedener P-Rückgewinnungsverfahren**

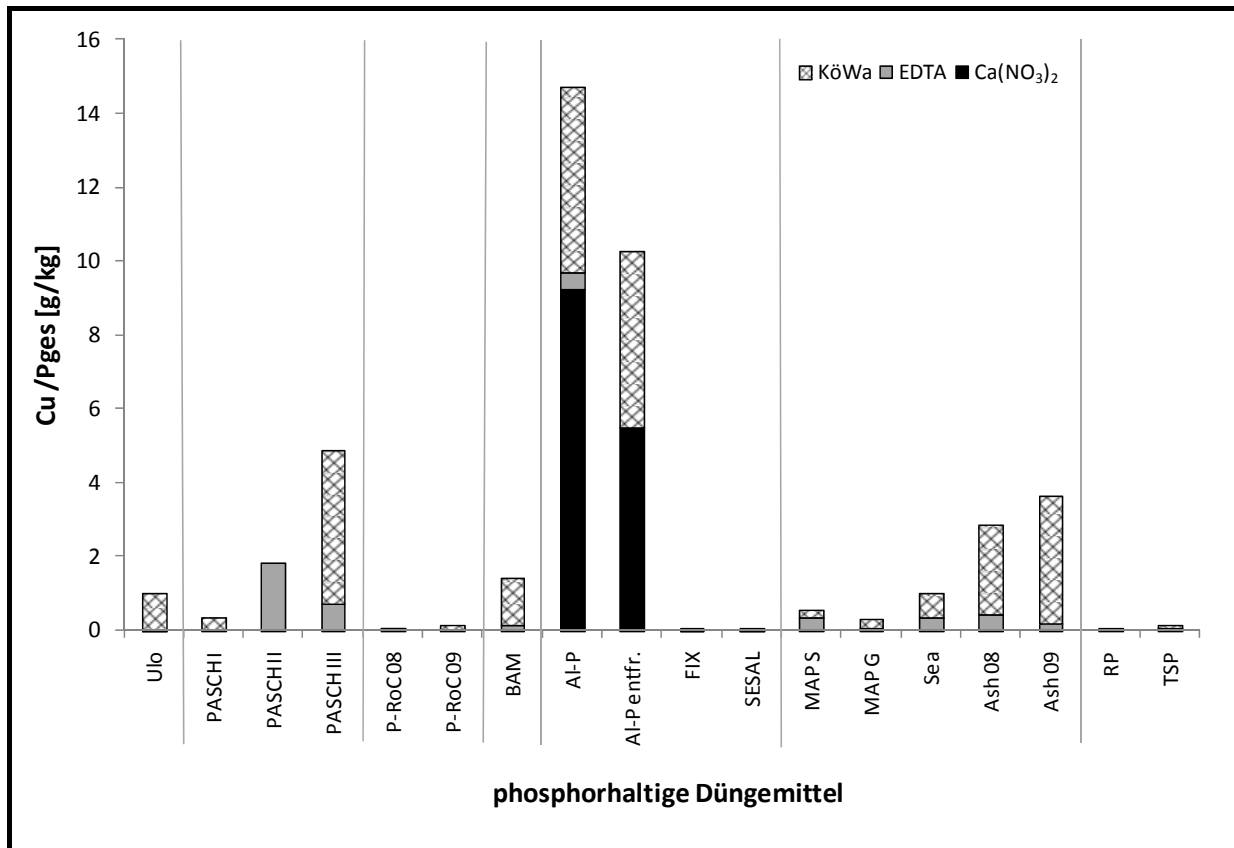
Mit Ausnahme des Al-Phosphates konnten die Schadeinheiten vom Ausgangssubstrat zum phosphorhaltigen Düngerprodukt unter Anwendung der Herstellungsverfahren um ein Vielfaches reduziert werden (Abb. 4). Die Schadeinheitenbelastungen der Produkte Ulophos, PASCH I und II, P-RoC 2008/2009, FIX-Phos, SESAL-Phos, Seaborne und die der MAP-Produkte aus Gifhorn und Stuttgart liegen alle in einem ähnlichen Konzentrationsbereich. Diese Produkte zeigen insgesamt eine nur geringfügige Schwermetallbelastung, die unterhalb derer der untersuchten Referenzprodukte (RP, TSP) liegt. Die Produkte PASCH III, BAM und Ash Dec 2008 und 2009 zeigen Schadeinheiten, die im Bereich zwischen denen des Rohphosphates und des Triple-Superphosphates liegen. Die Schadeinheiten der beiden Aluminium-Phosphate liegen um das Zwei- bis Dreifache darüber. Es zeigte sich jedoch, dass eine Schadstoffentfrachtung im Herstellungsprozess der Al-P-Produkte (Al-P zu Al-P<sub>entfrachtet</sub>) zu einer Reduktion der Schadeinheiten führen kann.

Generell lässt sich sagen, dass die thermochemisch gewonnenen Substrate gegenüber den nasschemisch produzierten insgesamt eine geringere Schwermetall-Entfrachtung zeigen, so dass zum jetzigen Stand der Technik nasschemisch recycelte Phosphor-Düngemittel hinsichtlich der Schwermetall-Belastung zunächst solchen aus der thermochemischen Produktion vorzuziehen sind.

### 3.3 Schwermetall-Verfügbarkeiten

Der potentielle Eintrag der Stoffe durch eine Phosphor-Düngung sowie das Löslichkeitsverhalten der untersuchten Schwermetalle ist nachfolgend repräsentativ für die Elemente Kupfer und Cadmium aufgeführt. Dargestellt ist jeweils der Element-

Gehalt je kg Gesamtphosphor. Es wurden drei verschiedene Löslichkeitsfraktionen erfasst: der Gesamtgehalt im Königswasser-Extrakt, der organisch sorbierte Gehalt im EDTA-Extrakt und die leichtlösliche Fraktion im Calciumnitrat-Extrakt ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ). Die Verfügbarkeiten der Elemente Nickel, Chrom, Blei und Arsen sind im Folgenden nicht weiter dargestellt, da sich für diese ein ähnliches Bild ergibt, wie für das Element Kupfer.

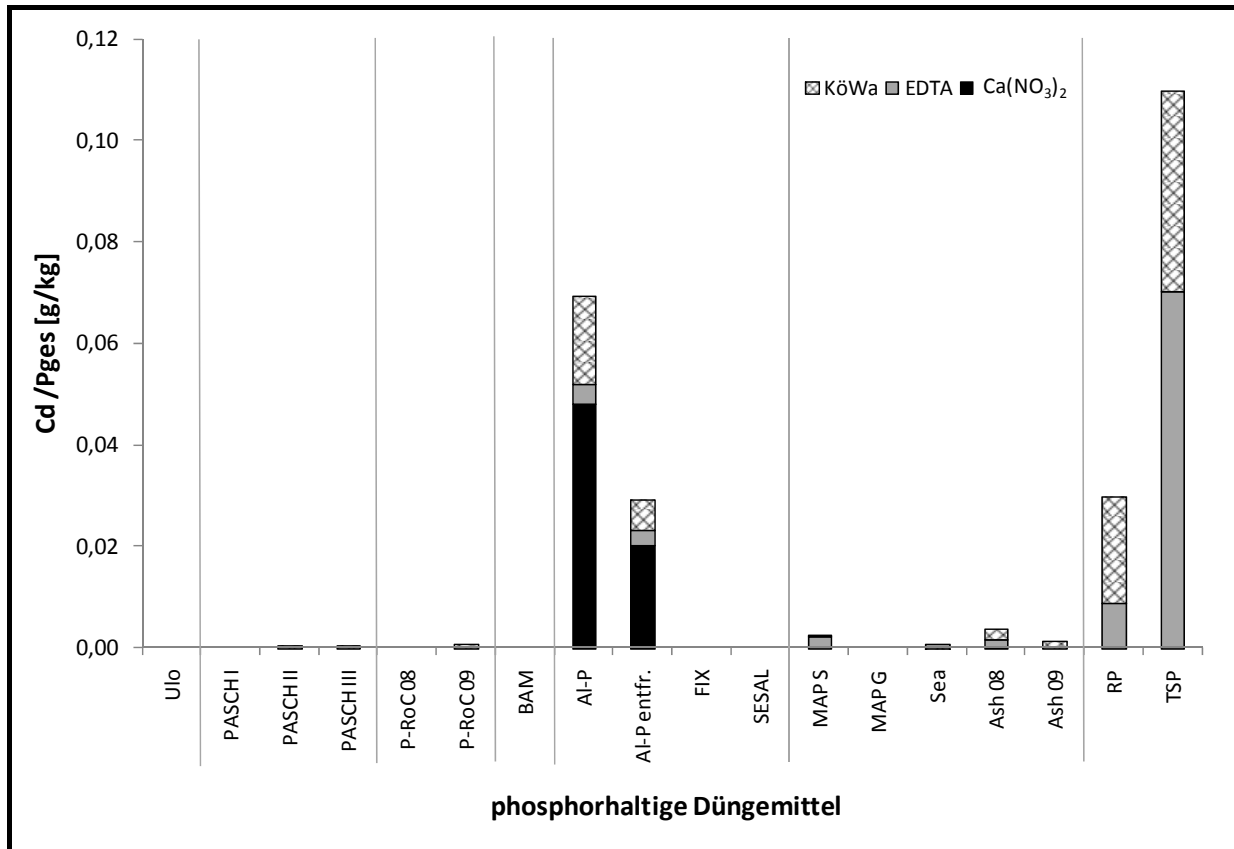


**Abb. 5: Kupfergehalte sowie -verfügbarkeiten der untersuchten Düngemittel je kg Gesamtphosphor: KöWa - Königswasser extrahierbarer Gesamtgehalt, EDTA - organisch sorbierter Gehalt,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  - leichtlöslicher Gehalt**

Die Gesamtgehalte (KöWa-Extrakt) reichen von Gehalten kleiner 0,05 g Cu/kg P bis hin zu knapp 15 g Cu/kg P (s. Abb. 5). Wie bereits oben dargestellt, konnten die Kupfer-Gehalte der Düngemittel im Rahmen des Herstellungsprozesses vom Basis-substrat zum Endprodukt bei den meisten Verfahren drastisch reduziert werden (s. Tabelle 2). Die Gehalte der organisch sorbierten Fraktion (EDTA-Extrakte) und die der leicht löslichen Fraktion ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ -Extrakte) sind im Vergleich zu den Gesamtgehalten größtenteils äußerst gering. Eine Ausnahme bilden hierbei die Aluminium-Phosphate. Diese zeigen durch die reine Schwefelsäure-Behandlung im Vergleich zu den übrigen Testsubstraten sehr hohe Gesamtgehalte sowie vielfach höhere Kupfer-Verfügbarkeiten der organisch und leicht verfügbaren Fraktionen. Auch das Produkt PASCH II zeigt hohe Cu-Löslichkeiten im EDTA-Extrakt.

Die Cadmium-Gehalte und Verfügbarkeiten der getesteten P-haltigen Sekundärrohstoffe liegen bei nahe Null (Abb. 6), das heißt, ausgehend von den Gehalten der

Basissubstrate (Tabelle 2) erfolgte durch die Herstellungsverfahren für die meisten Produkte eine fast vollständige Cadmiumentfrachtung. Eine Ausnahme bilden hierbei erneut die beiden Aluminium-Phosphate. Die Cadmiumgehalte und -löslichkeiten der Al-Ps sind infolge der Säurebehandlung und der fehlenden Entfrachtung im Verfahrensprozess um ein Vielfaches höher als in den übrigen Testsubstraten. Jedoch erfolgte auch hier eine deutliche Reduktion der Gesamtgehalte und verfügbaren Fraktionen vom Al-P zum entfrachteten Al-P-Substrat.



**Abb. 6:** Cadmiumgehalte sowie -verfügbarkeiten der untersuchten Düngemittel je kg Gesamtphosphor: KöWa - Königswasser extrahierbarer Gesamtgehalt, EDTA - organisch sorbierter Gehalt, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - leichtlöslicher Gehalt

Insbesondere der untersuchte Triple-Superphosphat-Dünger ist hierbei jedoch auffällig. Er zeigt nicht nur die höchsten Gesamtgehalte, sondern seine EDTA-lösliche Fraktion liegt darüber hinaus über den Gehalten und Verfügbarkeiten aller untersuchten Sekundärrohstoffe.

### 3.4 Transferfaktoren

Die folgenden Ergebnisse zeigen den Schwermetall-Transfer aus dem Dünger-Boden-Gemisch in die Versuchspflanzen innerhalb der Gefäßversuche. Hierbei wird anhand von Summen-Transferfaktoren (TF<sub>Σ</sub>), die aus den Transferfaktoren der Schadelemente Chrom, Kupfer, Zink, Nickel, Cadmium und Blei ermittelt wurden, die Aufnahme der Schadelemente aus den getesteten Düngemitteln in die

Versuchspflanzen dargestellt. Dabei gilt: je höher der Transferfaktor  $TF_{\Sigma}$  ist, desto höher ist der Transfer von Schadelementen aus dem Boden in die Pflanze. Tabelle 3 liefert eine Übersicht über die berechneten Transferfaktoren der untersuchten Düngemittel in Erst- und Nachfrucht der drei unterschiedlichen Versuchsreihen auf Sand- und Lehmboden.

**Tabelle 3: Summen-Transferfaktoren  $TF_{\Sigma}$  ausgewählter Schwermetalle für Erst- und Nachfrucht (EF, NF) in den drei Versuchsreihen (VR) auf Sand- und Lehmboden: \* EF und NF signifikant verschieden, \*\* Düngerprodukte signifikant verschieden zu TSP**

Produktname	$TF_{\Sigma}$ - Sandboden		$TF_{\Sigma}$ - Lehmboden		
	EF	NF	EF	NF	
1. VR	TSP I	11,16 ± 2,13 **	6,95 ± 1,50	1,99 ± 0,25 *	1,06 ± 0,34
	RP I	10,73 ± 1,29 **	6,98 ± 0,44	1,92 ± 0,15 *	0,85 ± 0,16 **
	MAP Gifhorn	15,12 ± 1,02 **	6,88 ± 1,05	2,36 ± 0,08 *	0,70 ± 0,19
	MAP Stuttgart	16,72 ± 2,65	12,06 ± 5,79	2,22 ± 0,15 *	1,60 ± 0,00
	Seaborne	11,84 ± 2,16	8,43 ± 1,07	1,74 ± 0,13 *	0,82 ± 0,08
	PASCH I	11,85 ± 1,25 *	7,00 ± 1,21	2,01 ± 0,33 *	0,93 ± 0,11
	P-RoC 08	16,12 ± 1,35 *	7,59 ± 1,13	1,89 ± 0,23 *	0,96 ± 0,00
	Ulophos	12,78 ± 2,62 *	8,18 ± 0,75	2,04 ± 0,47 *	0,90 ± 0,03
	Ash Dec 08	10,04 ± 1,18	7,47 ± 1,88	2,15 ± 0,17 *	0,95 ± 0,24
2. VR	TSP II	12,87 ± 2,31 *	3,68 ± 0,58	2,94 ± 0,12 *	2,03 ± 0,23
	RP II	12,67 ± 1,66 *	10,34 ± 3,91 **	3,76 ± 1,07 *	2,30 ± 0,04
	P-RoC 09	13,30 ± 3,90 *	4,15 ± 0,92	2,42 ± 0,67	2,23 ± 0,20
	FIX-Phos	9,48 ± 0,72 *	4,19 ± 0,25	2,59 ± 0,34	2,25 ± 0,36
	SESAL-Phos	11,86 ± 1,85 *	3,64 ± 1,18	4,10 ± 1,71	2,72 ± 0,24 **
	AI-P <sub>entfrachtet</sub>	12,48 ± 2,03 *	6,80 ± 2,42	6,79 ± 2,42 *	2,79 ± 0,31
	AI-P	15,06 ± 3,54 *	3,95 ± 1,06	5,80 ± 0,69 **	1,83 ± 0,23
	Ash Dec 09	14,93 ± 4,14 *	4,37 ± 0,69	4,30 ± 0,62 **	1,78 ± 0,24
3. VR	TSP III	14,55 ± 1,12 *	8,57 ± 1,48	4,32 ± 0,55 *	1,21 ± 0,34
	RP III	16,51 ± 1,03 **	4,99 ± 1,10 **	4,32 ± 0,51 *	1,38 ± 0,20
	PASCH II	16,72 ± 1,96 *	6,92 ± 1,57	5,20 ± 0,43 *	1,31 ± 0,10
	PASCH III	18,10 ± 1,39 **	6,83 ± 2,46	6,59 ± 0,44 *	1,27 ± 0,26
	BAM	14,95 ± 2,08 *	7,09 ± 2,97	4,10 ± 0,34 *	1,30 ± 0,32

Signifikante Unterschiede zwischen Erst- und Nachfrucht sind durch einen Stern gekennzeichnet, signifikante Verschiedenheiten der Produkte zur TSP-Variante sind durch zwei Sterne markiert.

Bereits die zur Kontrolle eingesetzten Referenzdünger RP und TSP, die den Böden jeweils in identischer Menge beigemischt wurden und somit erwartungsgemäß konstante Transferfaktoren zeigen sollten, weichen in den drei Versuchsreihen untereinander stark ab. Sowohl auf dem Sandboden, als auch auf den Lehmböden nehmen sie in der Erstfrucht von der ersten bis zur dritten Versuchsreihe zu. Auf den

Sandvarianten steigen die Transferfaktoren des TSPs somit von 11,16 in der 1. Versuchsreihe bis auf 14,55 in der 3. Versuchsreihe an, die Transferfaktoren des RPs von 10,73 bis auf 16,51.

Zur Betrachtung der Summen-Transferfaktoren der Lehmvarianten ist zu beachten, dass der Lösslehm I nach der ersten Versuchsreihe durch Lösslehm II ersetzt wurde und somit nur die Transferfaktoren der zweiten und dritten Versuchsreihe vollständig miteinander vergleichbar sind. Der Schwermetall-Transfer vom Boden in die Pflanzen nimmt hier in der Erstfrucht zwar ebenfalls zu, allerdings sind die Transferfaktoren viel geringer, als auf Sand. In der Nachfrucht zeigt sich auf beiden Bodentypen keine kontinuierliche Zunahme der Summen-Transferfaktoren von der 1. bis zur 3. Versuchsreihe.

Die Höhe der Summen-Transferfaktoren der einzelnen Produkte variiert analog der Elementgehalte und Konzentrationen, die zur Berechnung herangezogen wurden.

Die Summen-Transferfaktoren der Erstfrucht auf Sand liegen im Bereich zwischen 9,48 (FIX-Phos) und 18,10 (PASCH III). Der Schwermetall-Transfer vom Boden in die Pflanze ist für das Produkt PASCH III folglich doppelt so hoch wie der Transfer für das Düngerprodukt FIX-Phos. Die Summen-Transferfaktoren der Nachfrucht auf Sand liegen im Wertebereich zwischen 3,64 und 12,06. Sie sind somit erheblich geringer als die der Erstfrucht.

Auf Lehm Boden zeigen sich für die untersuchten Düngemittel in der Erstfrucht Summen-Transferfaktoren im Bereich von 1,74 (Seaborne) bis 6,79 (Al-P<sub>entfrachtet</sub>). Die Transferfaktoren der Nachfrucht auf Lehm bewegen sich im Bereich zwischen 0,70 und 2,79 und sind ebenfalls deutlich geringer als die der Erstfrucht.

In allen drei Versuchsreihen zeigt sich, dass der Schwermetall-Transfer aus dem Boden-Dünger-Gemisch in die Versuchspflanzen in der Erstfrucht höher ist, als der Schwermetall-Transfer in der Nachfrucht. Dieses Ergebnis konnte für alle Düngersubstrate mit Ausnahme der Produkte MAP Stuttgart und Ash Dec 2008 auf Sand und den Produkten P-RoC 2009, Fix-Phos und SESAL-Phos auf Lehm statistisch mittels Signifikanztest abgesichert werden. Aufgrund starker Abweichungen der Versuchswiederholungen untereinander oder gleichen Wertebereichen der Testvariablen waren die Summen-Transferfaktoren der Erst- und Nachfrucht für diese Produkte nicht signifikant verschieden.

Zwischen den Transferfaktoren der TSP-Varianten und denen der phosphorhaltigen Düngemittel bestehen kaum signifikante Unterschiede, wobei die Signifikanzen immer nur zum entsprechenden TSP-Summen-Transferfaktor der einzelnen Versuchsreihen getestet wurden. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die untersuchten Sekundärrohstoffdünger bezüglich des Schwermetall-Transfers in die Pflanze gegenüber dem handelsüblichen Triple-Superphosphat-Dünger durchaus gleichwertig sind.

#### **4 Schlussfolgerungen**

Die nasschemisch gewonnenen Ca-Phosphate zeigen eine gute Schwermetall-Entfrachtung mit geringen -Verfügbarkeiten bei gleichzeitig hohen P-Gesamtgehalten. Sie sind daher nach DÜMV zur Phosphor-Düngung geeignet, auch wenn die Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors verfahrensbedingt teils noch gering ist. Die thermochemisch gewonnenen Produkte Ash Dec 2008 und 2009, Ulophos und BAM zeigen gegenüber den nasschemisch hergestellten Substraten eine geringere Schwermetall-Reduktion und weisen prozessbedingt höhere Chrom-, Nickel- und Arsen-Gehalte auf, deren Verfügbarkeit jedoch ebenfalls niedrig ist. Eine P-Düngung mit diesen Substanzen ist demnach möglich, aufgrund der höheren Belastung sind nasschemisch produzierte P-Dünger gegenüber solchen aus thermischen Verfahren derzeit jedoch noch vorzuziehen. Die geprüften Al-Phosphate sind nach DÜMV ungeeignet zur P-Düngung, da sie trotz der hohen Phosphatverfügbarkeit sehr hohe Schwermetall-Verfügbarkeiten aufweisen und das Produkt Al-P die zulässigen Grenzwerte für Kupfer und Zink weit überschreitet sowie ferner kennzeichnungspflichtige Cadmium-Gehalte zeigt. Ein Säuredirektaufschluss ohne anschließende Schwermetall-Entfrachtung scheint als P-Recyclingmethode daher zunächst untauglich.

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse führen zu dem Schluss, dass die im Rahmen dieser Studie analysierten Phosphor-Recyclingprodukte in ihren chemischen Eigenschaften durchaus als Düngerprodukte erachtet werden können. Die Düngereigenschaften variieren je nach Art des Herstellungsprozesses. Thermochemisch gewonnene Substrate weisen gegenüber nasschemisch produzierten Stoffen eine geringere Schadstoff-Entfrachtung auf, generell führt die Schwermetall-Reduzierung jedoch dazu, dass die Element-Gehalte der Produkte größtenteils unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte und Kennzeichnungspflichten liegen. Ferner sind die Gehalte der Nähr- und Schadelemente in den Düngersubstraten eng verknüpft mit den Ausgangsgehalten der eingesetzten Basissubstrate und dem Herstellungsprozess. Zur Erhöhung der Produktqualität sollten die Behandlungsverfahren demnach eine Optimierung der Prozesse hinsichtlich eines vom Ausgangsmaterial unabhängigen, homogenen P-Recyclingproduktes anstreben.

Die Schwermetallaufnahme aus dem Boden in die Versuchspflanzen wurde durch die Berechnung von Summen-Transferfaktoren anhand von sechs ausgewählten Schwermetallen bewertet. Infolge der erhöhten Mobilität der Schwermetalle mit absinkendem Boden-pH, waren die Transferfaktoren auf dem sauren Sandboden höher als auf Lehmboden. Durch den Entzug der Erstfruchtpflanzen erfolgte in der Nachfrucht ein entsprechend geringer Transfer von Schwermetallen aus dem Boden in die Versuchspflanzen. Die Transferfaktoren der TSP-Varianten zeigten trotz gleicher Bedingungen Schwankungen innerhalb der drei Versuchsreihen. Die Gründe hierfür sind unklar. Die Abweichungen zwischen den Summen-Transferfaktoren der getesteten Düngersubstrate und denen des TSP-Düngers sind allgemein nicht signifikant verschieden, so dass die phosphorhaltigen Sekundärrohstoffe auch bezüglich des Transfers von Schadelementen aus dem Boden in die Versuchspflanzen als gleichwertig angesehen werden können.



## Literatur

- [1] Wagner, H. (1999): Stoffmengenflüsse und Energiebedarf bei der Gewinnung ausgewählter mineralischer Rohstoffe. Teilstudie Phosphat. Geologisches Jahrbuch 1999. Reihe H. Wirtschaftsgeologie, Berichte zur Rohstoffwirtschaft, Heft SH 5. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. 1999.
- [2] Scheidig, K. (2009): Wirtschaftliche und energetische Aspekte des Phosphor-Recyclings aus Klärschlamm. Korrespondenz Abwasser, Abfall. 2009 (56). Nr.11.
- [3] DIN ISO 11466 (1997): Bodenbeschaffenheit – Extraktion in Königswasser löslicher Spurenelemente. Beuth, Berlin.
- [4] VDLUFA (2002): Bestimmung von Phosphor und Kalium im Calcium-Acetat-Lactat-Auszug. Methodenbuch Band I. Die Untersuchung von Böden. 4. Auflage. 3. Teillieferung 2002. VDLUFA-Verlag. Darmstadt.
- [5] Zeien, H. (1995): Chemische Extraktion zur Bestimmung der Bindungsformen von Schwermetallen in Böden. Bonner Bodenkundliche Abhandlungen. Band 17. Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität Bonn.
- [6] VDLUFA, 1997: Standpunkt - Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. Darmstadt.
- [7] VDLUFA, 2004: Bestimmung von der Feldkapazität von Böden im Gelände. Methodenbuch Band I. Die Untersuchung von Böden. 4. Auflage. 4. Teillieferung 2004. VDLUFA-Verlag. Darmstadt.
- [8] Scheffer und Pajenkamp (1952): Phosphatbestimmung in Pflanzenaschen nach der Molybdat-Vanadat-Methode. Zeitschrift für Pflanzenernährung Düngung und Bodenkunde. Volume 56.
- [9] Brans, J. (2008): Das Schadeinheitenmodell zur Identifikation und Bewertung von Standorten mit schädlichen Bodenveränderungen am Beispiel Industriepark Höchst. Boden und Landschaft. Schriftenreihe zur Bodenkunde, Landeskultur und Landschaftsökologie. Band 50. Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen. 2008.
- [10] BioAbfV (1998): Bioabfallverordnung – Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden. BGBl. I 1998, S. 2955.
- [11] LÜBBEN und SAUERBECK (1991): Transferfaktoren und Transferkoeffizienten für den Schwermetallübergang Boden-Pflanze. In: Forschungszentrum Jülich GmbH (Hrsg.): Auswirkungen von Siedlungsabfällen auf Böden, Bodenorganismen und Pflanzen, Berichte aus der ökologischen Forschung Nr. 6.
- [12] Alloway, B.J. (1999): Schwermetalle in Böden. Analytik, Konzentrationen, Wechselwirkungen. Springer 1999.
- [13] Kratz, S., Schnug, E. (2009): Zur Frage der Löslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor in Düngemitteln. Journal für Kulturpflanzen. 61 (1) 2009, S. 2-8.
- [14] DüMV (2008): Düngemittelverordnung – Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemittel, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln. BGBl. I 2008, S. 2524. Novelle (2009): BGBl. I 2008, S. 3905.
- [15] Kley, G., Adam, C.; Brenneis, R.; Simon, F.G. (2005): Thermochemische Aufbereitung von Klärschlammmaschen zu Phosphordüngern – Das EU-Projekt SUSAN. 75. Darmstädter Seminar Abwassertechnik – Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm, S. 265-285. Darmstadt: TU Darmstadt UBA Berlin. 2005.

### Anschrift der Verfasserin:

Dipl. Biologin Christine Waida  
Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement  
Justus-Liebig-Universität Gießen  
Heinrich-Buff-Ring 26-32, 35392 Gießen  
E-Mail: christine.waida@umwelt.uni-gießen.de