

Stahlwerksschlacken als Düngemittel in der Landwirtschaft: Thomasphosphat der zweiten Generation

Peter Drissen

1.	Phosphat-Rohstoffe.....	167
2.	Aufschluss von Klärschlammasche mit LD-Schlacke	170
3.	Einsatz P_2O_5 -angereicherter LD-Schlacke als Düngemittel	173
4.	Schlussfolgerungen	175
5.	Literatur.....	176

Ziel eines kürzlich abgeschlossenen Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines Phosphatdüngemittels durch Behandlung flüssiger LD-Schlacke mit phosphathaltigen Aschen. In Laborversuchen wurden sowohl Klärschlammaschen als auch Tiermehlaschen in flüssiger LD-Schlacke gelöst. Die behandelten phosphorreichen LD-Schlackenproben wurden hinsichtlich ihrer chemischen und mineralischen Eigenschaften untersucht. Der Phosphatgehalt der Proben war im Vergleich zu unbehandelter LD-Schlacke deutlich erhöht und nahezu hundert Prozent pflanzenverfügbar. Die im Labor erzielten Ergebnisse konnten erfolgreich in die betriebliche Praxis der Stahlerzeugung übertragen werden. Eine Entkopplung von Stahlerzeugung und Phosphatanreicherung der Schlacke konnte durch pneumatisches Einblasen in die flüssige LD-Schlacke in der Schlackentransportpfanne erzielt werden. Durch die Nutzung des thermischen und chemischen Energieinhalts der LD-Schlacke erfolgt der Prozess quasi energieautark. Vegetationsversuche im Gefäß und im Freiland bestätigten eine ausgezeichnete Wirkung dieser aus im P_2O_5 -Gehalt angereicherten LD-Schlacken, die mit der kommerziell verfügbaren Phosphatdüngemittel vergleichbar ist. Das neue Phosphatdüngemittel weist die gleichen positiven Eigenschaften auf wie die heute nicht mehr verfügbare Thomasschlacke. Eine Vermarktung als Thomasphosphat oder Thomaskalk der zweiten Generation erscheint daher möglich.

1. Phosphat-Rohstoffe

Phosphor ist für das Pflanzenwachstum und den Pflanzenertrag von essentieller Bedeutung und nicht ersetzbar. Die Verfügbarkeit natürlichen Phosphatvorkommen gilt als begrenzt, ähnlich wie beispielsweise fossile Brennstoffe. In 2005 wurden die abbaubaren

Phosphatvorkommen auf etwa 19,6 Milliarden Tonne abgeschätzt, wobei Explorationskosten von vierzig USD als Maximum unterstellt wurden [11]. Die strategische Reichweite wurde auf 120 Jahre geschätzt [4]. In jüngster Zeit wurden allerdings neue Vorkommen entdeckt, so beispielsweise in Brasilien, Kanada, Finnland und Russland, so dass der US Geologic Survey die Vorkommen auf etwa 71 Milliarden Tonnen schätzt und von einer entsprechend längeren strategischen Reichweite ausgeht [7]. Dem steht jedoch eine steigende Weltbevölkerung gegenüber, deren Bedürfnis an Agrarprodukten zu einer steigenden Nachfrage nach Phosphatdüngemitteln führen wird.

Unabhängig von der Verfügbarkeit natürlicher Phosphatvorkommen sind zumindest in Europa weitere Einschränkungen für ihre Nutzung als Düngemittel durch die Anforderungen zum Schutz der Umwelt, des Grundwassers und der Konsumenten zu erwarten. Im Rahmen der Harmonisierung des europäischen Düngemittelrechts wird unter dem Stichwort *New approach* beispielsweise ein Grenzwert von sechzig mg Cadmium je Kilogramm Düngemittel mit mehr als fünf Ma.-% P_2O_5 diskutiert. Die meisten Phosphatvorkommen sind jedoch sedimentäre Lagerstätten, die einen vergleichbaren oder höheren Cadmiumgehalt aufweisen.

Grundsätzlich ist also künftig mit einer Verknappung des Rohstoffs Phosphor zu rechnen, die sich in entsprechenden Preissteigerungen für Phosphatdüngemittel widerspiegeln wird. Wie ernst dieses Problem inzwischen auch in Regierungskreisen genommen wird, ist daran zu erkennen, dass die USA und China kürzlich ein Exportverbot für heimische Rohphosphate ausgesprochen haben [12].

So kritisch die absehbare Entwicklung von Preis und Verfügbarkeit natürlicher Phosphate auch ist, stellt dies auch eine Chance dar wenig oder schlecht genutzte alternative Phosphatträger mit neuen Technologien besser nutzbar zu machen. Ziel eines kürzlich abgeschlossenen Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines Phosphatdüngemittels durch Behandlung flüssiger LD-Schlacke mit phosphathaltigen Aschen [8]. Das neue Phosphatdüngemittel weist die gleichen positiven Eigenschaften auf wie die heute nicht mehr verfügbare Thomasschlacke. Aufgrund ihres P_2O_5 -Gehalts und ihrer Wirksamkeit ist eine Vermarktung als Thomasphosphat oder Thomaskalk der zweiten Generation denkbar. Ein hohes Marktpotential für ein derartiges Düngemittel ist auch insofern zu erwarten, als damit wieder ein für den ökologischen Landbau anerkannter mineralischer Phosphatdünger zur Verfügung stünde.

Für viele Jahrzehnte war Thomasschlacke ein in der Landwirtschaft hoch geschätztes Phosphatdüngemittel (Bild 1). In den 1960er Jahren wurden jährlich bis zu drei Millionen Tonnen Thomasschlacke als Thomasphosphat (> 10 Ma.-% P_2O_5) oder als Thomaskalk (> 5 Ma.-% P_2O_5) vermarktet. Mit steigenden Anforderungen an den Fe-Gehalt der Eisenerze und strengeren Phosphorvorschriften für die Stahlqualitäten erfolgte ein Wechsel weg von einheimischen Erzen hin zu Erzen aus Übersee mit hohem Fe- und niedrigen P_2O_5 -Gehalten. Infolge dieses Wechsels standen alsbald immer geringere Mengen phosphathaltiger Stahlwerksschlacken zur Verfügung bis schließlich Mitte der 1990er Jahre keine Thomasschlacke mehr zur Verfügung stand. Im Gegenzug entwickelte die Stahlindustrie einen Kalkdünger aus gemahlener bzw. gesiebter Stahlwerksschlacke, den

sogenannten Konverterkalk, der in Deutschland einen zunehmend größeren Anteil des Marktes für Kalkdünger ab deckt. Gemäß der Deutschen Düngemittelverordnung muss Konverterkalk aufgrund seines geringen P_2O_5 -Gehalts von etwa 1 bis 1,5 Ma.-% P_2O_5 als Kalkdünger vermarktet werden, da für einen Phosphatdünger mehr als fünf Prozent Ma.-% P_2O_5 vorgeschrieben ist.

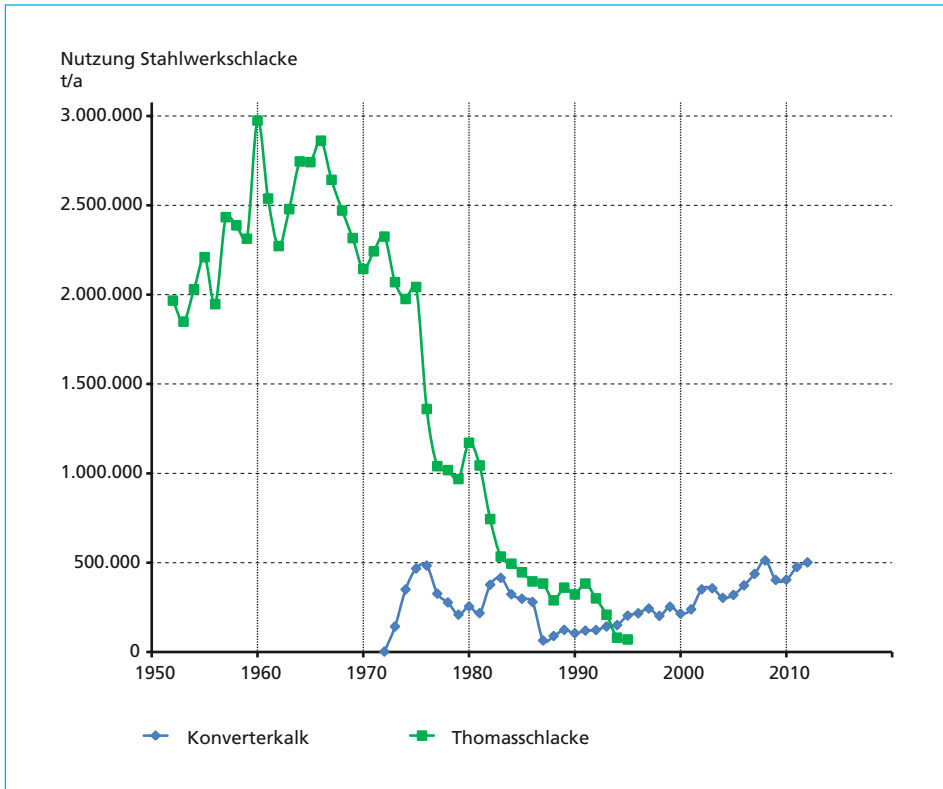


Bild 1: Nutzung von Stahlwerksschlacke als Düngemittel in der Landwirtschaft, Deutschland

Deutschland verfügt, wie die meisten anderen europäischen Länder, über keine eigenen natürlichen Phosphatvorkommen und ist zur Deckung seines Bedarfs zu hundert Prozent auf Importe angewiesen. Im Wirtschaftsjahr 2012/2013 wurden in Deutschland 284.000 Tonnen P_2O_5 , entsprechend 124.000 Tonnen P, als Phosphatdünger verkauft [2].

Vor diesem Hintergrund und angesichts einer weltweit steigenden Nachfrage bekommt die Nutzung alternativer sekundärer Phosphatquellen eine zunehmende Bedeutung. Derartige Phosphatquellen sind unter anderem:

- Klärschlamm bzw. Klärschlammaschen aus der Abwasserbehandlung,
- Tiermehle bzw. Tiermehlaschen.

Eine nachhaltige Nutzung der Ressource Phosphor aus sekundären Quellen, wie Abwässer, Klärschlämmen und anderen Materialien wird zunehmend auch von politischer Seite gefordert [3, 10]. Eine direkte Nutzung nicht aufbereiteter Materialien in der Landwirtschaft, wie etwa Klärschlamm, trifft jedoch auf zunehmende Skepsis aufgrund unerwünschter Schwermetallgehalte und insbesondere organischer Inhaltsstoffe, wie z.B. Pharmazeutika. Die Beseitigung kritischer organischer Verunreinigungen ist, neben einer Verminderung der zu handhabenden Mengen, ein Grund, dass zunehmend eine Verbrennung dieser Materialien angestrebt wird [5]. Mit der Verbrennung erfolgt gleichzeitig eine Anreicherung des Phosphors in den verbleibenden Aschen. Klärschlammaschen weisen, je nach Herkunft, P_2O_5 -Gehalte von etwa 10 bis 25 Ma.-%, Tiermehlaschen sogar bis zu 35 Ma.-% auf. Klärschlammaschen sind in größeren Mengen, insbesondere in Deutschland verfügbar. Tiermehlaschen aus der Mono-verbrennung von Tierkörpern, die besonders hohe P_2O_5 -Gehalte aufweisen, sind in Europa kaum verfügbar.

Die Verbrennung von Klärschlämmen oder Tiermehlaschen hat jedoch einen gravierenden Nachteil hinsichtlich ihrer landwirtschaftlichen Nutzung als Düngemittel. Durch die Verbrennung wird der Phosphor in schwer lösliche mineralische Verbindungen, wie beispielsweise Apatit, überführt und ist damit nur bedingt pflanzenverfügbar [6, 13]. Der Phosphor dieser Aschen ist somit nur bedingt für den biologischen Kreislauf verfügbar. Das Recyclingpotential von Phosphor aus Klärschlammaschen wird für Deutschland auf etwa 140.000 t P_2O_5 pro Jahr geschätzt [9]. Dieses Potential ist jedoch nur vollständig nutzbar, wenn das in den Aschen enthaltene Phosphat chemisch aufgeschlossen und pflanzenverfügbar gemacht wird.

2. Aufschluss von Klärschlammasche mit LD-Schlacke

LD-Schlacken enthalten etwa 1,5 Ma.-% P_2O_5 , das nahezu vollständig pflanzenverfügbar ist. Das P_2O_5 in Klärschlamm- oder Tiermehlaschen ist lediglich zu etwa vierzig bis fünfzig Prozent pflanzenverfügbar. Ein höherer Anteil an pflanzenverfügbarem P_2O_5 erfordert eine geeignete thermo-chemische Reaktion, welche das P_2O_5 in eine andere mineralische Bindungsform mit höherer Pflanzenverfügbarkeit überführt. Flüssige LD-Schlacke stellt hierfür insofern einen geeigneten Reaktionspartner dar, als es eine sehr hohe Temperatur aufweist und einen hohen CaO-Gehalt für die mineralische Neubildung von Phosphaten zur Verfügung stellt

Ziel eines kürzlich abgeschlossenen Forschungsvorhabens war die Herstellung eines neuen Phosphatdüngemittels durch den Aufschluss von Klärschlammasche in flüssiger LD-Schlacke. Das neue Phosphatdüngemittel sollte hinsichtlich seines Phosphatgehalts und seiner Wirkung auf Pflanzen dem heute nicht mehr verfügbaren Thomasphosphat vergleichbar sein.

Schmelzversuche im Labor bestätigten, dass größere Mengen Klärschlamm- und Tiermehlaschen in flüssiger LD-Schlacke gelöst werden können. Die Zugabe der Aschen

erfolgt vorzugsweise bei hohen Temperaturen um 1.600 °C, da die hohe Temperatur und eine entsprechend niedrige Viskosität das Durchmischen und die Auflösung der Aschen begünstigt. Der P_2O_5 -Gehalt der Schmelzprodukte wurde auf bis zu zehn Ma.-% P_2O_5 angehoben, wovon über 95 Prozent zitronensäurelöslich und somit nahezu vollständig pflanzenverfügbar sind. Mineralisch ist dies durch die Überführung der schwer löslichen Calcium-Phosphate der Aschen, wie Whitelockit oder Apatit, in Calcium-Silikat-Phosphate begründet. Eine geringe Zugabe von P_2O_5 mittels Aschen führt zunächst zu einer Einbindung des Phosphors in Dicalciumsilikate der LD-Schlacke. Erst bei höheren P_2O_5 -Zugaben bilden sich eigenständige Calcium-Silikat-Phosphate, unter anderem auch das für Thomasschlacke charakteristische Silicocarnotit. Formal lässt sich somit von einer Reaktion



und der Bildung einer Thomasschlacke der zweiten Generation sprechen.

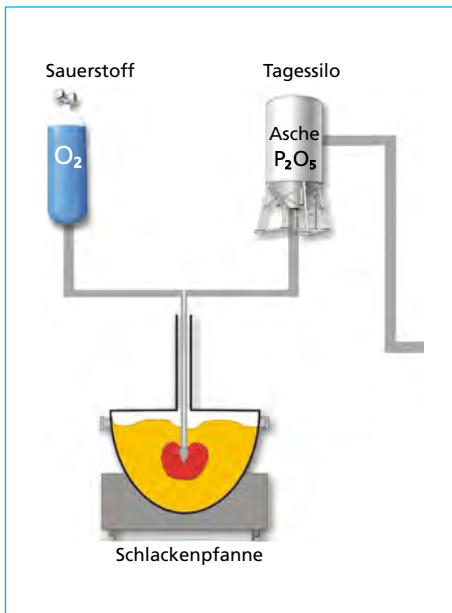


Bild 2: Externe Behandlung von LD-Schlacke mit Aschen im Schlackentransportkübel, schematische Darstellung

Basierend auf den Ergebnissen der Laborversuche erfolgten weitere Versuche im Stahlwerk. Die Betriebsversuche stellten in technischer und logistischer Hinsicht eine Herausforderung dar. Pro Abstich standen etwa zwanzig Tonnen flüssiger LD-Schlacke zur Verfügung, der jeweils mehrere Tonnen Asche zugesetzt werden mussten, um die angestrebten P_2O_5 -Gehalte von 5 oder 10 Ma.-% P_2O_5 einzustellen. Um eine erfolgreiche Umsetzung der Aschen zu erzielen, muss die Zugabe zur flüssigen LD-Schlacke bei möglichst niedriger Viskosität und möglichst hohen Temperaturen erfolgen. Die Zugabe der kalten Asche bewirkt aber gleichzeitig einen deutlichen Temperaturabfall der LD-Schlacke. Darüber hinaus werden die Zugabe und das Durchmischen aufgrund der extremen Feinheit der Aschen mit Partikeldurchmessern $< 100 \mu\text{m}$ und Schüttdichten um $0,8 \text{ t/m}^3$ erschwert.

Die betrieblichen Untersuchungen erfolgten daher in zwei Schritten. Zunächst wurde unter energetischen Aspekten die Asche der flüssigen LD-Schlacke im Konverter nach Stahlabstich zugegeben. Mit diesen Versuchen wurden erste Erfahrungen zum Handling größerer Aschemengen und deren Auflösung in der LD-Schlacke gesammelt, da dies in den Laborversuchen nicht simuliert werden konnte. In Hinblick auf die mit diesen Versuchen erfolgte Beeinträchtigung des normalen Betriebsablaufs im Stahlwerk wurde in einem zweiten Schritt eine separate Behandlung der LD-Schlacke außerhalb des Konver-

ters erprobt. Hierfür wurden die Aschen pneumatisch mit Luft direkt nach Schlackenabstich in den Schlackentransportkübel in die flüssige LD-Schlacke eingeblasen (Bild 2). Obwohl bei dieser Vorgehensweise ungünstigere energetische Verhältnisse vorliegen, konnten Temperaturverluste durch die Oxidation metallischer Eisengranalien und zweiwertigem Eisen der LD-Schlacke kompensiert und eine gute Vermischung und Auflösung der Aschen in der LD-Schlacke realisiert werden. Im Gegensatz zu anderen Prozessen der Aufbereitung von Aschen zu Düngemitteln ist diese Vorgehensweise quasi energieautark, das sie den thermischen und chemischen Wärmeinhalt der LD-Schlacke nutzen kann.

Aufgrund der für die Einblasversuche verfügbaren Anlagentechnik konnten nur kleinere Mengen an Aschen eingeblasen werden als ursprünglich geplant. Dennoch wurden Anreicherungen des P_2O_5 -Gehalts von bis zu fünf Ma.-% in der behandelten LD-Schlacke erzielt. Die analytischen Untersuchungen aller in den Betriebsversuchen erzeugten Proben bestätigen, dass die Auflösung und die chemische als auch die mineralische Umsetzung des Phosphors in gleicher Weise wie in den Laborversuchen erfolgten. Insbesondere der Anteil des zitronensäurelöslichen Phosphors lag stets über 95 % und weist damit auf eine hohe Pflanzenverfügbarkeit hin. Beispielhaft sind in Tabelle 1 einige analytische Daten aus einem Betriebsversuch dargestellt.

Tabelle 1: Analytische Daten eines Betriebsversuchs

Betriebsversuche 2011		Klärschlammasche (KSA)	LD-Schlacke Zugabe von KSA	
			vor	nach
CaO	Ma.-%	15,4	52,0	42,8
CaO _{frei}	Ma.-%	0,20		0,50
SiO ₂	Ma.-%	29,5	14,2	14,4
CaO/SiO ₂	-	0,52	3,70	3,00
MgO	Ma.-%	3,13	3,40	3,71
MnO	Ma.-%	0,51	2,80	2,15
Al ₂ O ₃	Ma.-%	16,4	1,80	3,47
Fe _{ges.}	Ma.-%	8,40	15,9	18,7
FeO	Ma.-%	0,72	-	11,64
Fe ₂ O ₃	Ma.-%	10,95	-	12,96
K ₂ O	Ma.-%	1,68	-	0,22
Na ₂ O	Ma.-%	0,99	-	0,10
S	Ma.-%	0,60	0,10	0,10
P ₂ O ₅ ges.	Ma.-%	20,8	2,10	5,12
P ₂ O ₅ zitronensäurelös.	Ma.-%	11,10	-	4,88
% P ₂ O ₅ zitronensäurelös.	Ma.-%	53	-	95

3. Einsatz P_2O_5 -angereicherter LD-Schlacke als Düngemittel

Die Bewertung des Einsatzes P_2O_5 -angereicherter LD-Schlacke durch Zugabe von phosphathaltiger Asche muss zwei Aspekte berücksichtigen. Dies betrifft zunächst die Wirksamkeit des neu entwickelten Düngemittels. In zweiter Linie betrifft dies auch die effiziente und nachhaltige Nutzung der beschränkt verfügbaren Ressource Phosphor im Vergleich zu anderen Aufbereitungsmethoden.

Zunächst ist festzustellen, dass alle verfügbaren analytischen Daten bestätigen, dass das neu Entwickelte Düngemittel *Thomasphosphat der zweiten Generation* den Anforderungen an Schwermetallgehalten der Düngemittelverordnung entspricht. Die in Tabelle 2 aufgeführten Daten zeigen, dass die in einigen Versuchen eingesetzte Klärschlammasche zumindest bezüglich der Gehalte an Cadmium und Blei nicht den Anforderungen der Düngemittelverordnung entspricht. Die mit der Klärschlammasche behandelte LD-Schlacke entspricht diesbezüglich den Anforderungen der Düngemittelverordnung im vollen Umfang, auch wenn der Chromgehalt eine Kennzeichnung erforderlich macht.

Tabelle 2: Schwermetallgehalte in Klärschlammasche und LD-Schlacke im Vergleich zur Düngemittelverordnung

Betriebsversuche 2011		Klärschlammasche (KSA)	LD-Schlacke Zugabe von KSA		Düngemittel- verordnung
			vor	nach	
As	ppm	< 5	-	< 5	40
Cd	ppm	3	-	< 0,5	2
Co	ppm	28	-	34	40*
Cr	ppm	123	2.400	1.556	300*
Cr ⁶⁺	ppm	< 1	-	< 1,0	2,0
Cu	ppm	764	33	104	200*
Hg	ppm	< 0,2	-	< 0,2	1,0
Ni	ppm	73	27	21	80
Pb	ppm	241	-	28	150
Se	ppm	< 5	-	< 5	5*
Tl	ppm	< 0,5	-	< 0,5	1
Zn	ppm	4.534	-	701	200*

* Kennzeichnungspflicht

Auch wenn bereits der hohe Anteil an zitronensäurelöslichem P_2O_5 der behandelten LD-Schlacke (siehe Tabelle 1) auf eine hohe Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors hinweist, wurde die Düngewirksamkeit hinsichtlich Wuchs, Phosphataufnahme und Ertrag einer Pflanze in Vegetationsversuchen überprüft. Schlackenproben aus Labor- und Betriebsversuchen wurden dazu auf die für Thomasphosphat vorgeschriebene Körnung aufgemahlen und in Gefäß- und Feldversuchen hinsichtlich ihrer Düngewirksamkeit untersucht. Die Ergebnisse wurden mit denen aus Kontrollversuchen verglichen, in denen Calciummonophosphat *TSP*, Dicalciumphosphat und Thomasphosphat

eingesetzt wurde. In den Gefäßversuchen kam der phosphatarmer Lehm Boden der Feldversuche zum Einsatz. Die Einwaagen der jeweiligen Versuchsdünger erfolgten in zwei unterschiedlichen P-Stufen. Die unterschiedlichen CaO-Gehalte der Versuchsdünger, die sich in unterschiedlichen pH-Werten der Böden ausgewirkt hätten, wurden durch entsprechende Zugaben von Kalkstein ausgeglichen.

Grundsätzlich ist anhand der Ergebnisse der Vegetationsversuche festzustellen, dass die im P_2O_5 -Gehalt durch Klärschlammasche angereicherten LD-Schlacken ähnlich positive Effekte zeigten wie kommerziell erhältliche, voll aufgeschlossene Phosphatdünger. Beispielhaft zeigt Bild 3 die Entwicklung von Mais nach Zugabe verschiedener Materialien sowie eines Referenzversuchs ohne Phosphatzugabe.

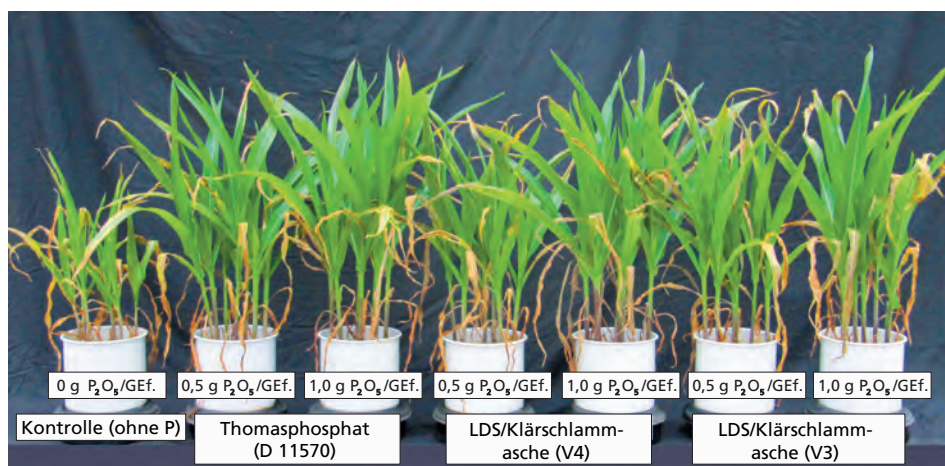


Bild 3: Maisentwicklung im P-Düngungs-Gefäßversuch, Vergleich zwischen Kontrollversuch, Thomasphosphat und mit Klärschlammasche angereicherter LD-Schlacke

Optisch war die Entwicklung der Versuchskultur Mais bei Düngung mit diesen Versuchsprodukten nicht von der der aufgeschlossenen P-Dünger (hier im Vergleich zu Thomasphosphat) zu unterscheiden. Auch Klärschlammasche und selbst Rohphosphat zeigten in diesen Versuchen nur minimale Effekte im Vergleich mit der Variante ohne Phosphatzugabe.

Hinsichtlich einer effizienten und nachhaltigen Nutzung der beschränkt verfügbaren Ressource Phosphor ist der pflanzenverfügbare Anteil an Phosphor wichtiger als der absolute Gehalt. Viele natürliche oder industriell hergestellte Materialien weisen höhere absolute Phosphorgehalte auf, als die in diesem Projekt hergestellten Materialien. Vergleicht man jedoch den pflanzenverfügbaren Anteil, bestimmt als zitronensäurelöslichen Anteil, ergibt sich ein deutlich anderes Bild. Bild 4 zeigt nach Literaturangaben [1] die relative Verfügbarkeit von vier natürlichen und industriellen Produkten (Bild 4, links), vier verschiedenen nasschemischen Abwasserbehandlungsverfahren (Bild 4, Mitte) sowie für drei thermische bzw. metallurgische Verfahren (Bild 4, rechts).

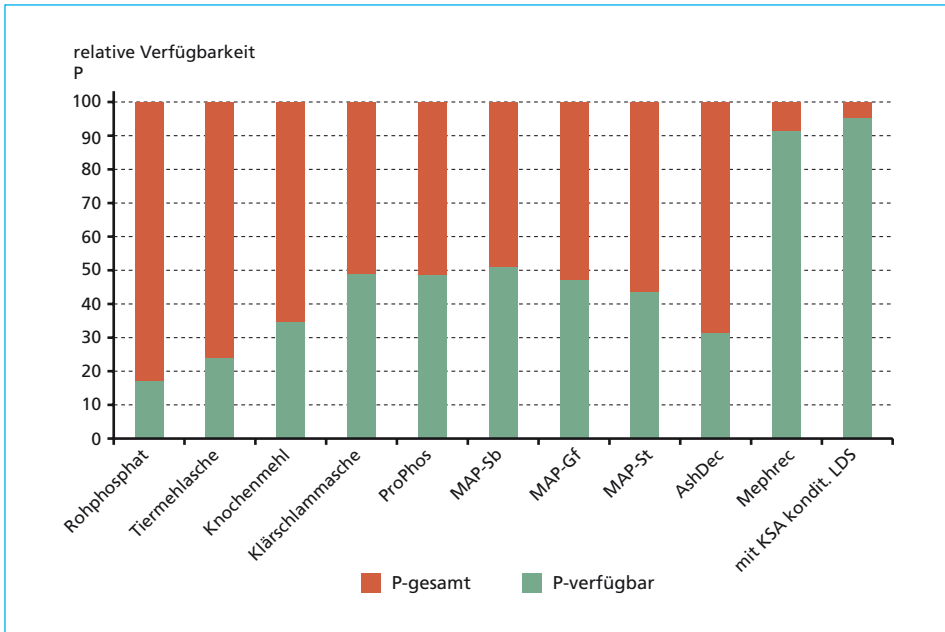


Bild 4: Relative Verfügbarkeit des Phosphors verschiedener Materialien, bestimmt als zitronensäurelöslicher Anteil

Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass die metallurgischen Verfahren, wie das Mephrec-Verfahren, und insbesondere die Behandlung von LD-Schlacke mit Klärschlammásche im schmelzflüssigen Prozess die effizienteste und ressourcenschonendste Nutzung des Phosphors darstellen.

Darüber hinaus stellt die behandelte LD-Schlacke gleichzeitig CaO zur Verfügung; als Düngemittel ist sie somit in doppelter Hinsicht wirksam; einerseits als Phosphat- und andererseits als Kalklieferant.

4. Schlussfolgerungen

Mit den Labor- und Betriebsversuchen wurde das grundlegende Wissen zu den chemischen und mineralischen Reaktionen bei der Behandlung flüssiger LD-Schlacke mit phosphorreichen Aschen erarbeitet. Mit den Betriebsversuchen wurden gleichzeitig grundlegende Fragen zu Gestaltung und Auslegung einer Anlage für die betriebliche Erzeugung eines *Thomasphosphats der zweiten Generation* geklärt. Die Untersuchungen zur Düngewirksamkeit bezüglich Wuchs, Phosphataufnahme und Ertrag einer Pflanze in Vegetationsversuchen lassen ein hohes Marktpotenzial erwarten. Für den deutschen Düngemittelmarkt wäre dieses Marktpotenzial sogar besonders hoch, als damit wieder ein für den ökologischen Landbau anerkannter mineralischer Phosphatdünger zur Verfügung stünde. Aufgrund der positiven Ergebnisse wurde beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) 2014 der Antrag auf Erweiterung des

Düngemitteltyps Konverterkalk um eine entsprechende *Phosphatkomponente* gestellt. Der entsprechende Eintrag lautet *Vermahlen von Konverterschlacke nach Zugabe von phosphathaltigen Stoffen in die Schlackenschmelze*. Damit wird vermieden, dass unter diesem Düngemitteltyp rein mechanische Gemische aus LD-Schlacke und einem Phosphatträger, wie beispielsweise Klärschlammasche, vermarktet werden können

5. Literatur

- [1] Claasen, N., Steingrobe, B.: Charakterisierung der Düngewirksamkeit recycelter Phosphatdünger in Feld- und Gefäßversuchen, Schlussbericht Förderinitiative Phosphorrecycling, Förderkennzeichen 02WA0786, Univ. Göttingen, Fak. f. Agrarwissenschaften, Dep. F. Nutzpflanzenwissenschaften - Pflanzenernährung
- [2] DESTATIS Statistisches Bundesamt: Düngemittelversorgung - Fachserie 4 Reihe 8.2 - Wirtschaftsjahr 2012/2013
(see: www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Fachstatistik/DuengemittelversorgungJ.html;jsessionid=7E3A055DDB2562DD67D3C42B2AB1DBB4.cae1)
- [3] European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP), www.phosphorusplatform.org
- [4] Faulstich, M.: Ressourceneffizienz – Basis für eine nachhaltige Industriegesellschaft. Vortrag auf der Kick-off Konferenz *Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – rohstoffintensive Produktionsprozesse*, Collegium Leonium, Bonn, 23.06.09
- [5] Fehrenbach, H.: Ökobilanzielle Betrachtung der Klärschlammverwertung. MUNLV-NRW (Hrsg.): Berichte zur Umwelt, Bereich Abfall, Band 6: Abfälle aus Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen. Teil B Klärschlammverwertung in Europa, Düsseldorf 2001, 101-122
- [6] Kley, G., P. Köcher und R. Brenneis (2003): Möglichkeiten zur Gewinnung von Phosphordüngemitteln aus Klärschlamm-, Tiermehl- und ähnlichen Aschen durch thermochemische Behandlung. In: Umweltbundesamt und Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (Hrsg.): Tagungsband zum Symposium *Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall*, Berlin 2003, 7/1-16
- [7] Müller, H. W.: Wie lange reichen unsere Phosphat-Vorräte noch? DLG-Mitteilungen 1/2013, S. 77
- [8] Optimierte Ressourceneffizienz in der Konverterstahlerzeugung; Phosphor-Anreicherung und Aufschluss phosphorhaltiger mineralischer Reststoffe in flüssigen LD-Schlacken; BMBF - gefördertes Forschungsvorhaben Förderkennzeichen 033R004A - E
- [9] Pinnekamp, J., D. Montag, K. Gethke, S. Goebel und H. Herbst: Rückgewinnung eines schadstofffreien, mineralischen Kombinationsdüngers *Magnesiumammoniumphosphat – MAP* aus Abwasser und Klärschlamm. Umweltbundesamt (Hrsg.) Forschungsbericht 202 33 308, UBA-FB 001009. 2. erweiterte Auflage, Dessau-Roßlau, September 2007
- [10] Protokoll der 75. Umweltministerkonferenz am 12. November 2010 in Dresden
- [11] Röhring, S.: Wie lange reichen die Rohstoffe für die Mineraldüngerproduktion noch aus? Bundesarbeitskreis Düngung (Hrsg.): Rohstoffverfügbarkeit für Mineraldünger - Perspektiven unter hohen Energiekosten und begrenzten Ressourcen. Frankfurt 2007, 19-29
- [12] Römer, W.: Neue Dünger aus Abfällen. DLG-Mitteilungen 7/2012, S. 66-69]
- [13] Werner, W.: Nährstoffe, Nährstoffverfügbarkeit und Düngewirkung von Sekundär-rohstoffdüngern unter besonderer Berücksichtigung von Phosphat. KTBL-Schrift 404, 95-104

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Michael Heußén, Heribert Motz (Hrsg.): **Schlacken aus der Metallurgie, Band 3**
– Chancen für Wirtschaft und Umwelt –

ISBN 978-3-944310-17-6 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2014
Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,
Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky
Erfassung und Layout: Berenice Gellhorn, Ginette Teske, Cordula Müller

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.