Phosphordüngewirkung eisenhaltiger Klärschlämme

Wilhelm Römer[1*] und **Ihab F. Samie**[1]

Institut für Agrikulturchemie, Universität Göttingen, Von-Siebold-Str. 6, D-37075 Göttingen

Herrn Prof. Dr. *Eberhard Przemeck* zum 70. Geburtstag gewidmet

Angenommen: 20. November 2001

Zusammenfassung – Summary

Die P-Düngewirkung von zwei Klärschlämmen (KS) mit einem engen molaren Fe:P-Verhältnis von 1:1,2 (KS Salzhausen = KS Sh, als Suspension) bzw. einem weiten Verhältnis von 1:0,3 (KS Göttingen = KS Gö, mit $FeCl_3$ + $Ca(OH)_2$ konditioniert) wurde im Vergleich zu $CaHPO_4$ bei Mais (1. Kultur) und Rotklee (2. Kultur) in 4 Ackerböden (2 Schluffböden mit pH 6,3 bzw. 7,2; 2 Sandböden mit pH 4,3 bzw. 4,9), in Löß (13 % $CaCO_3$) und in Quarzsand (Mitscherlich-Gefäße) geprüft. Die Böden bzw. Substrate besaßen unterschiedliche Ausgangsgehalte an Lactat-P.

Im Vergleich zu $CaHPO_4$ konnten beide Kulturpflanzen nach Anwendung von KS Sh auf allen Ackerböden die gleichen P-Mengen aufnehmen. Der KS Gö wirkte anders: Aus den schluffreichen Ackerböden nahm Mais nur 64–82 % und Rotklee 77–82 % P im Vergleich zur $CaHPO_4$-Variante auf. Dieses aus Sicht der P-Ausnutzbarkeit ungünstige Resultat für den KS Gö ist auf eine erhöhte P-Sorption im Boden und eine verringerte Orthophosphatkonzentration in der Bodenlösung zurückzuführen. Auf den sauren Sandböden hingegen erreichte Mais 96–106 %, der Rotklee 83–87 % der P-Aufnahme im Vergleich zur $CaHPO_4$-Anwendung. Diese relativ günstige Wirkung des KS Gö (kalkkonditioniert) auf die P-Aufnahme und die TM-Bildung des Maises auf den Sandböden resultierte sowohl aus der Anhebung des Boden-pH von 4,3 auf 4,9 bzw. 4,9 auf 5,6 als auch aus der P-Aufnahme.

Aus Sicht der Pflanzenproduktion wird empfohlen, bei der P-Eliminierung aus Abwässern und bei der Konditionierung der Klärschlämme auf den Einsatz von Fe-Salzen zu verzichten, zumindest bei der Konditionierung.

Phosphorus fertilization effect of sewage sludges treated with iron compounds

The result of waste water treatment with iron salts are sewage sludges with higher P but also Fe contents. The effect of such sludges on P availability in soils is not clear and was, therefore, compared with $CaHPO_4$ as a P mineral fertilizer. In experiments (Mitscherlich pots, 6 kg soil) two sandy soils (pH 4.3 and 4.9), two luvisols (pH 6.3 and 7.2), a loess (13 % $CaCO_3$), and quartz sand all differing in their P status were treated with two sewage sludges which differed in their molar Fe:P ratios (sludge Gö: 1:0.3, sludge Sh: 1:1.2). For sludge Gö the P elimination had been carried out with $FeSO_4$ and the sludge was stabilized with $FeCl_3$ + $Ca(OH)_2$ (filter press). For sludge Sh P was eliminated by $FeCl_3$ in the aerobic basin.

The first crop was maize (total shoot dry matter), the second red clover. In case of sludge Sh both crops took up in comparison to $CaHPO_4$ the same amount of P from all substrates with the exception of quartz sand. The effect of sludge Gö was quite different: from the neutral luvisol soils maize was able to take up only 64–82 % P and red clover 77–82 % P only as compared to $CaHPO_4$. On the sandy soils maize and red clover grew after sludge Gö as good or better than after $CaHPO_4$ application and P uptake was quite similar (83–106 %). This result was concomitant to an increase of pH values (from 4.3 to 4.9, 4.9 to 5.6, respectively). The negative efficiency of P uptake in heavy soils after application of sludge Gö resulted from an increase of P sorption and decrease of orthophosphate concentration in soil solution. This sludge contains a high proportion of iron hydroxides/oxides with free sorption sites for P. In future P elimination from waste water should be done without iron salts. At least during the process of conditioning no Fe salts should be used.

Key words: iron salts / maize / phosphate elimination / phosphate fertilization / phosphate uptake / red clover / sewage sludge

1 Einleitung

Gegenwärtig wird eine intensive Diskussion über die weitere Verwertung von Klärschlamm (KS) in der Landwirtschaft geführt (*Bannick*, 2001; *Hahn*, 2001). Auch wird ein totales Ausbringungsverbot in der Landwirtschaft diskutiert. Letzterem wird vom Verband der landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) auf Grund „zahlreicher Forschungsprojekte und langjähriger praktischer Erfahrungen" widersprochen, denn „die Verwertung geeigneter Bioabfälle und Klärschlämme könne in der Landwirtschaft nachweisliche Nutzwirkungen und Einsparpotenziale erbringen" (*Kluge*, 2001; *VDLUFA*, 2001). Bereits auf der Jahrestagung des VDLUFA im Jahr 2000 fand ein Diskussionsforum zur Klärschlammentsorgung statt, auf dem vom Umweltbundesamt (vgl. *Hahn*, 2000) ein Verbot der weiteren Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft aus Vorsorgegründen angemahnt wurde. In welche Richtung der politische Wille jetzt tendiert, geht aus *Hahn* (2001) hervor. Danach ist aber ein Verbot jeglicher Klärschlammverwertung in Landwirtschaft und Landschaftsbau nicht beabsichtigt. Auf das Problem gesundheitsgefährdender organischer Inhaltsstoffe kann hier nicht eingegangen werden. An hiesiger Stelle geht es um die Nährstoffmengen, die mit den Klärschlämmen ausgebracht werden können. Sie sind keineswegs marginal. Bei P-Ge-

* Correspondence: Prof. Dr. W. Römer; E-mail: uaac@gwdg.de

 © WILEY-VCH Verlag GmbH, D-69451 Weinheim, 2002 1436-8730/02/0102-083 $17.50+.50/0

halten von 1,5 % in der Trockenmasse (*Schaaf* und *Janßen*, 2000) und einem Aufkommen in Deutschland von 2,4 Mio. t Klärschlamm pro Jahr (*ATV*, 1996; *Bergs*, 1998) entspricht das einer P-Menge von 36.000 t $Jahr^{-1}$. Bei einer mittleren P-Abfuhr mit dem Erntegut von 25 kg ha^{-1} könnte somit der P-Bedarf von ca. 1,5 Mio. ha über Klärschlamm gedeckt werden. Das sind ca. 10 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche bzw. ca. 14 % des Ackerlandes. Bundesrepublikweit werden ca. 38 % (*Bergs*, 1998), in Niedersachsen ca. 70 % der Klärschlämme in der Landwirtschaft ausgebracht. Das sind ökonomisch relevante Größen, die von Seiten des Nährstoffrecyclings und des Ressourcenschutzes zu begrüßen sind. Die Landwirtschaft muss sich aber darauf verlassen können, dass sie Klärschlämme erhält, die auch den zukünftig höheren Anforderungen des Verbraucher-, Grundwasser- und Bodenschutzes genügen. Darüber hinaus sollten die Nährstoffe, und hier geht es um den Phosphor, in einer gut pflanzenverfügbaren Form in den Klärschlämmen vorliegen, denn letztlich geht es darum, wie viel P in den Schlämmen angerechnet und z. B. als Mineraldünger-P ersetzt werden kann. Die Einführung der P-Elimination in vielen Kläranlagen hat die P-Konzentration in den Fließgewässern wie gewünscht drastisch reduziert, allerdings die P-Gehalte der Klärschlämme erhöht (*Hamm*, 1991; *Umweltbundesamt*, 1997). Über die P-Düngewirkung der Schlämme aber, insbesondere jene mit einer P-Eliminierung durch Fe-Salze, gibt es kontroverse Diskussionen (*Baran*, 1985; *Fritsch* und *Werner*, 1988; *Suntheim* und *Dittrich*, 1996; *Frossard* et al., 1996). Über 1 Mio. t Abwasserbehandlungschemikalien (*Hahn*, 2000), davon ca. 500.000 t Eisensalze (*Scheffer*, 2000), werden zur P-Elimination eingesetzt. Die dabei entstehenden P-Verbindungen sollten von den Pflanzen als P-Quelle genutzt werden, wenn die Schlämme zur Düngung dienen sollen. Die hohe Affinität der Fe-Oxid/-Hydroxid-Hydrate für Phosphationen ist bekannt (*Parfitt*, 1978; *Burnham* und *Lopez-Hernandez*, 1982). Letztlich sind es gerade diese Verbindungen im Boden, die die oft sehr niedrigen P-Konzentrationen bestimmen (*Soltan* et al., 1993). Für die P-Aufnahme der Pflanzen stellt sich deshalb die Frage, wie fest das Phosphat an den Fe-Verbindungen adsorbiert wird bzw. wieder desorbiert werden kann. Eine frühere Arbeit (*Römer* und *Samie*, 2001) hat gezeigt, dass durch Ausbringung von Klärschlamm mit einem sehr weiten molaren Fe:P-Verhältnis von 1:0,3 in mehreren Böden bei Schlammapplikationsmengen von 5 t TM ha^{-1} (60 kg P, 326 kg Fe) das P-Sorptionsvermögen erhöht und die Orthophosphatkonzentration der Bodenlösung gesenkt wurde. Daraus erwächst die Frage, ob die Pflanzen aus einem Boden, der mit solch einem Schlamm gedüngt wurde, weniger P aufnehmen können als aus einem ausschließlich mit Mineraldünger-P gedüngten Boden. Deshalb sollte in den folgenden Experimenten geprüft werden, inwieweit der Phosphor eines solchen Klärschlammes (Fe:P = 1:0,3) im Vergleich zu einem Klärschlamm mit engem molarem Fe:P-Verhältnis (1:1,2) bzw. zu sekundärem Calciumphosphat, als eine Art P-Mineraldünger, von den Pflanzen genutzt werden kann. Dazu wurden Gefäßversuche (Mitscherlichgefäße) mit Sand- und Lehmböden unterschiedlichen Lactat-P-Gehaltes über 2 Jahre durchgeführt. Aus der Trockenmassebildung und den P-Entzügen sollen Schlüsse über den P-Düngewert der Klärschlämme gezogen werden.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsanlage und Durchführung

Wichtige Kenndaten der zwei verwendeten Klärschlämme (KS) sind in Tab. 1 wiedergegeben. Der KS Salzhausen (KS Sh) erhielt zur P-Fällung im Belebungsbecken $FeCl_3$ und der KS Göttingen (KS Gö) $FeSO_4$. Der Rohschlamm Gö erhielt bei der Konditionierung zusätzlich $FeCl_3$ und $Ca(OH)_2$.

Der KS Gö (ca. 32 % TS-Gehalt) wurde zum Zwecke der Homogenisierung vor der Applikation gefriergetrocknet und gemahlen. Die KS-Suspension Sh (3 % TS-Gehalt) war homogen und konnte im Originalzustand in die Böden eingearbeitet werden. Für die Bemessung der KS-Gaben wurden als Bezugsbasis 5 t TM des KS Gö ha^{-1}, also 60 kg P ha^{-1} bzw. umgerechnet auf Basis der Oberfläche eines Mitscherlichgefäßes 187 mg P je Gefäß, d. h. ca. 30 mg P (kg Boden)$^{-1}$ gewählt. Vom KS Sh wurde Schlamm mit der gleichen P-Menge eingesetzt. Damit ergaben sich folgende Fe-Mengen (mg (kg Boden)$^{-1}$): KS Gö: 157, KS Sh: 44 (oder umgerechnet 326 kg bzw. 91 kg Fe ha^{-1}). Im KS Gö betrug das molare Fe:P-Verhältnis 1:0,3 und im KS Sh 1:1,2. Infolge der Zufuhr von $Ca(OH)_2$ bei der Konditionierung des KS Gö werden bei dessen Anwendung mit 30 mg P gleichzeitig 493 mg Ca pro kg Boden appliziert. Bei KS Sh sind es nur 25 mg Ca. Als mineralische Vergleichssubstanz wurde bewusst $CaHPO_4$ und nicht das wasserlösliche Triplephosphat benutzt, da die Schlämme kaum wasserlösliches Phosphat enthalten.

Die Kenndaten der eingesetzten Böden gibt Tab. 2 wieder. Die beiden Böden Börry P-0 und P-80 stammen aus einem längerfristigen statischen P-Düngungsversuch aus dem Gebiet um Hameln (Parabraunerde aus Löß). Der Boden Elliehausen ist P-armes und humusarmes Material aus dem C-Horizont einer Parabraunerde aus Löß (westlich von Göttingen). Die Böden aus Rehburg (Kreis Nienburg) und Düshorn (Kreis Soltau – Fallingbostel) sind anlehmige Sand- bzw. Sandböden diluvialen Ursprungs mit niedrigen P-Gehalten. Außerdem kam Quarzsand (Sandgrube Weferlingen, Kreis Haldensleben) als Substrat zur Anwendung. Tab. 3 zeigt das P-Düngungsregime bei den einzelnen Böden bzw. Substraten.

In die jeweils 6 kg Boden wurden vor dem Befüllen der Mitscherlichgefäße folgende Nährstoffmengen eingearbeitet: 44, 87 bzw. 187 mg P als $CaHPO_4$ oder als Klärschlamm Gö bzw. Sh; 0,6 g N als Ca-Nitrat; 1,0 g K als Kaliumsulfat; 0,2 g Mg als Magnesiumsulfat; Mikronährstoffe nach Hoagland 1:10 verdünnt, 10 ml Gefäß$^{-1}$ (Lösung A + B (vgl. *Schilling*, 2000)); Fe als Fe-Sequestren, 6 %ige Lösung, 1:20 Verdünnung, 10 ml Gefäß$^{-1}$.

Alle Gefäße wurden dreimal mit 0,3 g N als Ca-Nitrat nachgedüngt. Die Wasserversorgung erfolgte täglich mit entmineralisiertem Wasser. Der Mais wurde am 18. 05. 1999 gesät und am 18. 08. 1999 geerntet (Teigreife). Es wuchsen 4 Pflanzen je Gefäß. Jede Düngungsvariante war 4-fach

Tabelle 1: Charakteristika der verwendeten Klärschlämme.
Table 1: Characteristics of the sewage sludges.

		Göttingen (Gö)	Salzhausen (Sh)
TM	[%]	32,4	3,6
P	[kg (t TM)$^{-1}$]	12,0	25,0
Ca	[kg (t TM)$^{-1}$]	197,0	21,0
Fe	[kg (t TM)$^{-1}$]	65,0	39,0
mol Fe : mol P		1 : 0,3	1 : 1,2
pH ($CaCl_2$)		11,5	7,0

Tabelle 2: Kenndaten der verwendeten Böden.
Table 2: Characteristics of the soils used.

Ort	Ton %	Schluff %	Sand %	$CaCO_3$ %	pH ($CaCl_2$)	Humus %	CAL[1)]/DL[2)] mg P kg^{-1}	Gk[4)]
Börry P-0	20	75	5	1,3	7,2	2,22	46	B/C
Börry P-80[3)]	20	75	5	0,9	6,3	2,22	110	C/D
Elliehausen	16	75	9	13,3	7,7	0,50	6	A
Rehburg	8	13	79	n.b.	4,3	7,20	17	A
Düshorn	3	13	84	n.b.	4,9	4,00	34	B

[1)] bei Lehmböden, [2)] bei Sandböden, n.b. = nicht bestimmt, [3)] Jährliche P-Düngung der Parzellen: 80 kg ha^{-1}, [4)] Gehaltsklassen des VDLUFA (*Kerschberger* et al., 1997).

Tabelle 3: Versuchsschema Maisversuch 1. Jahr: P-Düngergaben in mg P Gefäß$^{-1}$ jeweils als $CaHPO_4$ oder als Klärschlamm Göttingen (KS Gö) bzw. Salzhausen (KS Sh).
Table 3: Experimental design of maize, 1st year: P application (mg P Mitscherlich pot^{-1}) as $CaHPO_4$, sewage sludge from Göttingen (KS Gö), Salzhausen (KS Sh), respectively.

Substrat / Boden	mg P Gefäß$^{-1}$ (6 kg Boden) 0	44	87	187
Quarzsand		X	X	X
Börry P-0	X			X
Börry P-80	X			X
Elliehausen	X	X	X	X
Rehburg	X	X	X	X
Düshorn	X			X

wiederholt. Die Gefäße standen in der Drahthalle unter Freiluftbedingungen. Zu Versuchende wurde die gesamte Sprosstrockenmasse sowie der P-Entzug bestimmt. Anschließend blieben die Gefäße in der Drahthalle stehen und der Witterung ausgesetzt.

Im zweiten Jahr wurde die Nachwirkung der P-Düngung zu Mais auf den P-Entzug von Rotklee geprüft. Hierzu erfolgte am 13. März 2000 das Einmischen folgender Nährstoffmengen in die Gefäße, die 1999 keine P-Düngung bzw. 187 mg P erhalten hatten: 600 mg N (NH_4NO_3); 600 mg K (K_2SO_4); 100 mg Mg ($MgSO_4 \cdot 7\ H_2O$).

Die N-Düngung erfolgte in allen Gefäßen, da unklar war, inwieweit eine Rhizobieninokulation der Böden (Elliehausen, Quarzsand) erfolgreich sein würde oder nicht. Der Rotklee (Sorte Titus) wurde am 24.04. gesät (0.28 g Topf^{-1}), am 13. 07., am 23. 08 und am 24. 10. 2000 geschnitten, die Trockenmassen bestimmt und die P-Entzüge ermittelt.

2.2 P-Analysen

Die P-Analysen erfolgten in der nass veraschten Pflanzensubstanz. Dabei wurden 200 mg Trockenmasse mit 5 ml eines Säuregemisches aus HNO_3, $HClO_4$ und H_2SO_4 (V/V/V = 7:2:1) auf dem Heizbad aufgeschlossen und das Phosphat photometrisch nach *Scheffer* und *Pajenkamp* (1952) bestimmt.

3 Resultate

3.1 Gefäßversuche mit Mais

3.1.1 Maisanbau auf Boden mit hohem P-Gehalt

Abb. 1 zeigt, dass zwar durch die Zufuhr von $CaHPO_4$ bzw. durch Klärschlamm der Ertrag auf dem hoch mit P versorgten Boden Börry P-80 um 7 bis 12 % gegenüber der ungedüngten Kontrolle anstieg, dass diese Anstiege aber statistisch nicht signifikant waren.

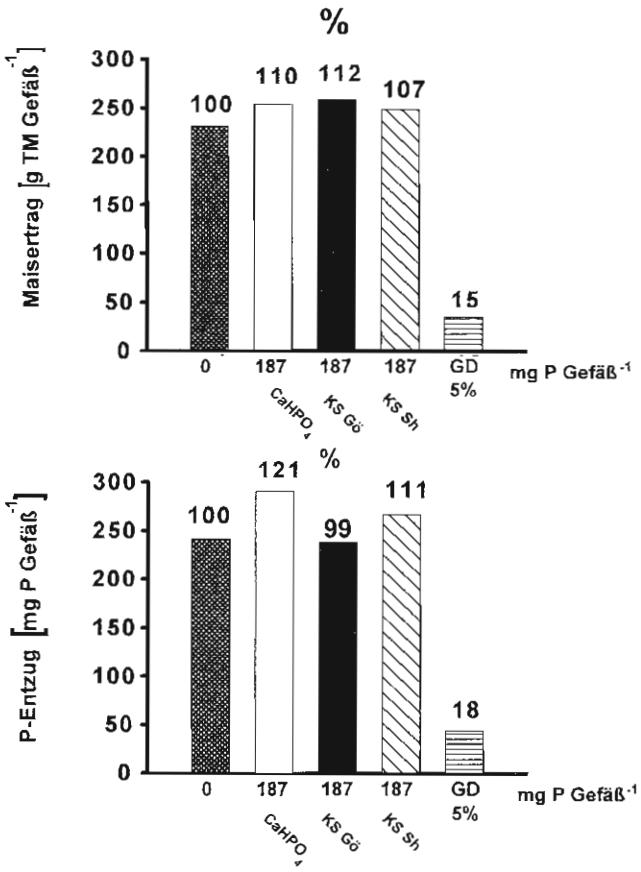

Abbildung 1: Abhängigkeit des Maisertrages und des P-Entzuges von der P-Applikation zum Boden Börry P-80.
Figure 1: Dry matter yield and P uptake of maize as affected by P supply to soil Börry P-80.

Die statistische Analyse der P-Entzüge zeigt ein interessantes Ergebnis, denn die P-Aufnahme aus der Variante KS Gö war identisch mit der der Kontrolle und gleichzeitig signifikant geringer als die der Ca-P-Variante. Das heißt, der Mais hatte offenbar aus dem KS Gö zumindest rechnerisch kein P aufgenommen. Seine P-Verfügbarkeit für die Maispflanzen war also offenbar die gleiche wie die des Bodenphosphates und sie war deutlich geringer als die von $CaHPO_4$. Die Verfügbarkeit des P aus KS Sh lag zwischen den beiden anderen P-Düngern. Die P-Verfügbarkeit der 3 P-Quellen zeigte also folgende Reihenfolge: $CaHPO_4$ > KS Sh > KS Gö.

3.1.2 Maisanbau bei niedrigem und mäßigem P-Gehalt der Böden bzw. Substrate

Während, wie zu erwarten, auf einem Boden der Gehaltsklasse C/D durch P-Düngung trotz eventuell erhöhter P-Aufnahmen keine signifikanten Ertragswirkungen zu erwarten sind, sollten diese aber auf Böden bzw. Substraten mit niedriger bzw. mäßiger P-Versorgung auftreten. Das trifft für alle $CaHPO_4$-Varianten tatsächlich sowohl auf den sehr P-armen Substraten Quarzsand und dem Lößboden (Abb. 2, 3) als auch auf den Böden Rehburg, Düshorn und Börry P-0 (Abb. 4, 5, 6) im Vergleich zur ungedüngten Variante (bei Quarzsand die P-44 Variante) zu. Dabei verhalten sich die Anstiege der Erträge meist sehr ähnlich wie die P-Entzüge. Damit kann die P-Düngewirkung der Klärschlämme (TM-Bildung und P-Entzug) mit der der $CaHPO_4$-Variante verglichen und beurteilt werden. Lässt man den Quarzsand zunächst aus der Betrachtung der Vergleiche heraus – bei beiden Klärschlämmen war dort die relative P-Aufnahme (20–37 %) und die relative TM-Bildung (15–37 %) sehr niedrig – und betrachtet zunächst die Wirkung des KS Sh mit seinem engen Fe:P-Verhältnis von 1:1,2, so zeigt sich folgendes:

Mit KS Sh wurden sowohl bei gestaffelter P-Zufuhr (Elliehausen und Rehburg, Abb. 3, 4, als auch bei dem besser mit P versorgten Boden Düshorn, Abb. 5) stets sehr

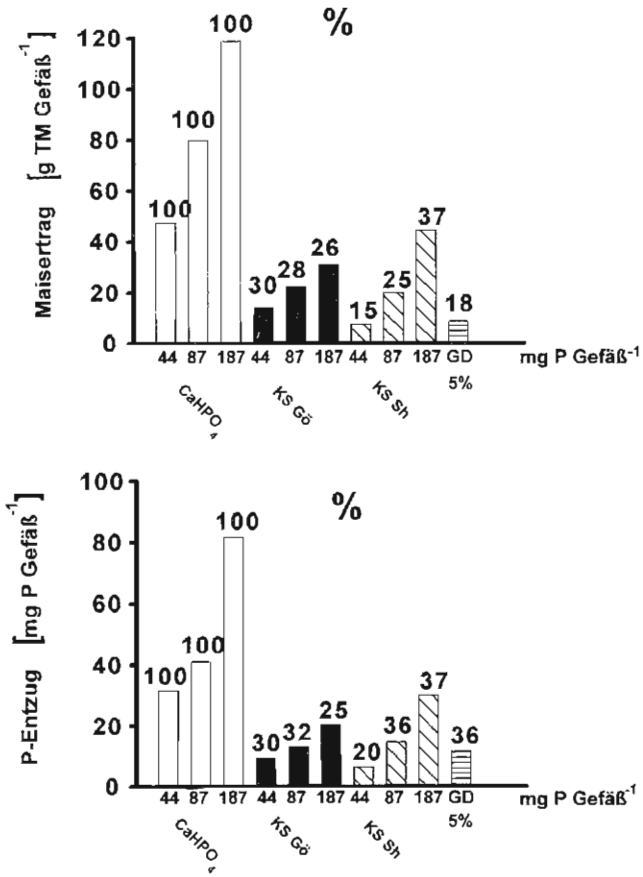

Abbildung 2: Abhängigkeit des Maisertrages und des P-Entzuges von der P-Applikation zum Quarzsand.
Figure 2: Dry matter yield and P uptake of maize as affected by P supply to quartz sand.

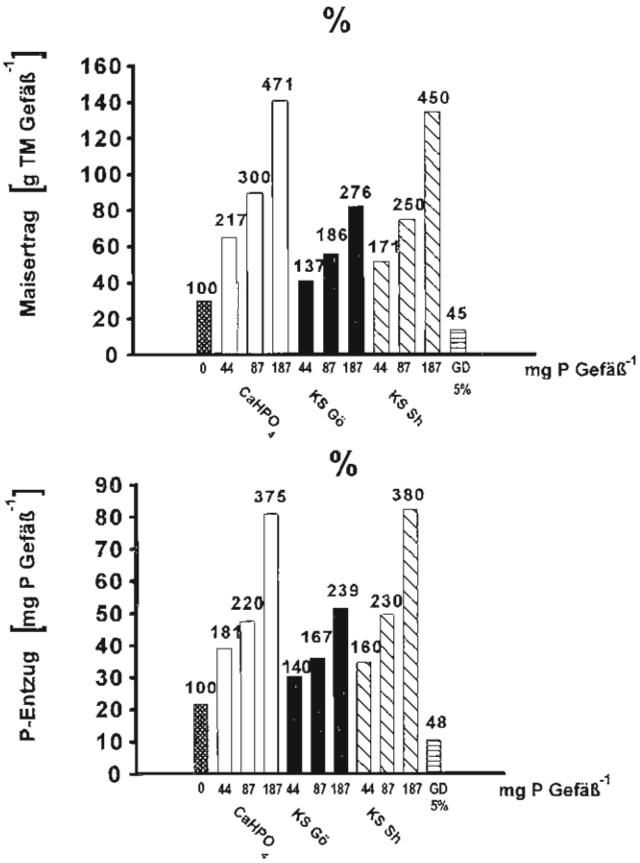

Abbildung 3: Abhängigkeit des Maisertrages und des P-Entzuges von der P-Applikation zum Boden Elliehausen.
Figure 3: Dry matter yield and P uptake of maize as affected by P supply to soil Elliehausen.

ähnliche TM-Erträge erzielt wie mit $CaHPO_4$-Zufuhr. Nur auf dem Boden Börry P-0 (Abb. 6) reichten die Erträge nicht an die der $CaHPO_4$-Variante heran, obwohl sie auch hier signifikant über denen der Kontrolle lagen. Die prinzipiell gleiche Aussage gilt auch für die P-Entzüge. Bei vergleichbaren Düngungsvarianten wurden auch vergleichbare P-Entzüge erreicht – auch im Boden Börry P-0.

Der Vergleich der P-Düngungsvarianten zwischen $CaHPO_4$ und KS Gö fällt viel differenzierter aus. Bezüglich des TM-Ertrages bleibt die KS Gö-Variante nicht nur auf dem Quarzsand, sondern auch auf dem Löß von Elliehausen (Abb. 3) und Börry P-0 (Abb. 6) signifikant hinter der $CaHPO_4$-Variante zurück. Sie übertrifft diese aber auf dem Boden Rehburg (P-187 mg-Variante, Abb. 4) tendenziell und auf dem Boden Düshorn (Abb. 5) signifikant um 21 %. Auch die P-Entzüge zeigen ein differenziertes Bild. Während auf dem Quarzsand, dem Löß und dem Boden Börry P-0 (Abb. 2, 3, 6) die P-Aufnahme stets hinter der aus $CaHPO_4$ zurück bleibt (wie die Erträge), ist sie auf den Böden Rehburg und Düshorn (Abb. 4, 5) der der $CaHPO_4$-Variante sehr ähnlich.

3.2 Gefäßversuche mit Rotklee

Tab. 4 zeigt die Erträge von Rotklee im zweiten Versuchsjahr. Auf dem Boden in Gehaltsklasse C/D (Börry P-80) trat

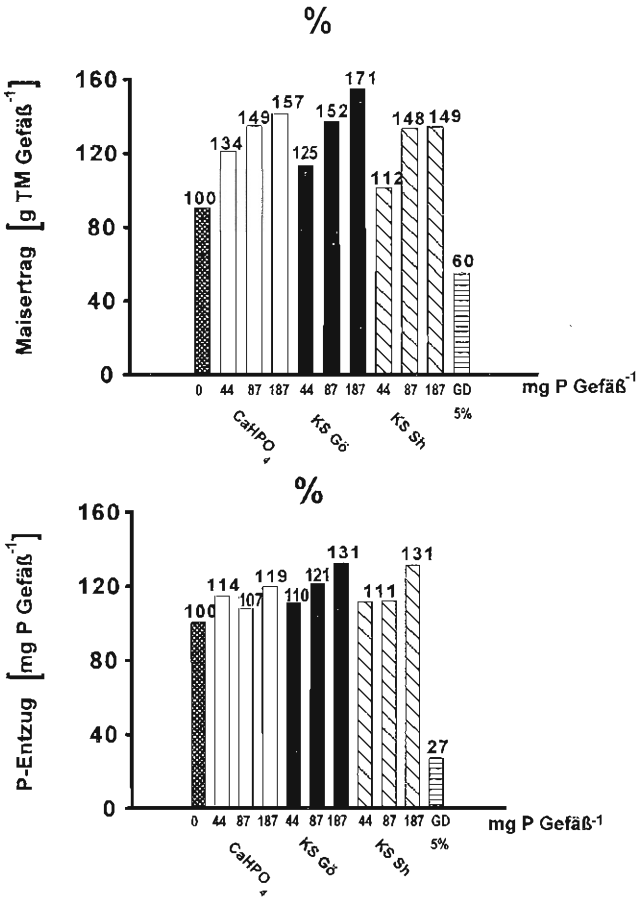

Abbildung 4: Abhängigkeit des Maisertrages und des P-Entzuges von der P-Applikation zum Boden Rehburg.
Figure 4: Dry matter yield and P uptake of maize as affected by P supply to soil Rehburg.

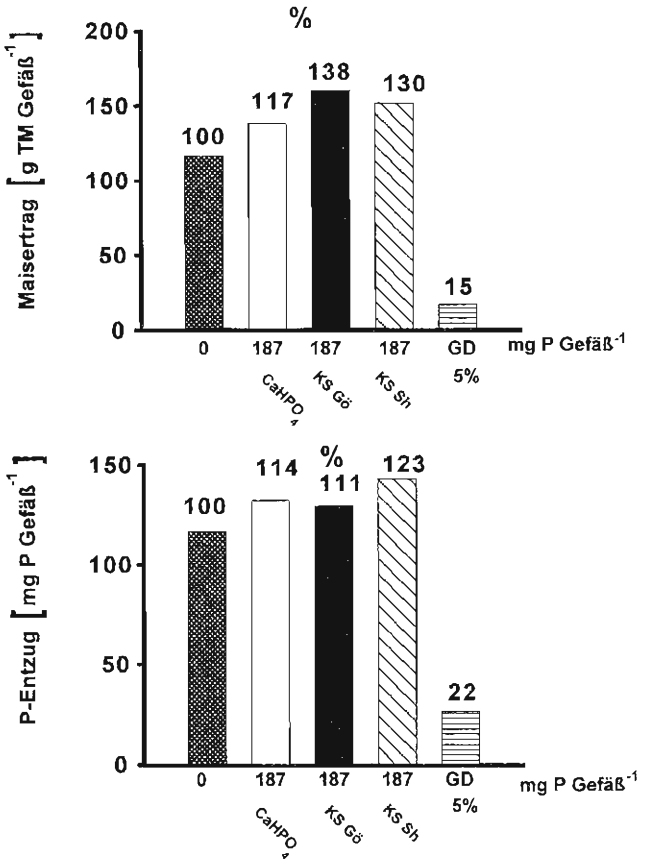

Abbildung 5: Abhängigkeit des Maisertrages und des P-Entzuges von der P-Applikation zum Boden Düshorn.
Figure 5: Dry matter yield and P uptake of maize as affected by P supply to soil Düshorn.

wie beim Mais keine Ertragssteigerung ein. Die Erträge in der KS Sh-Variante und in der Ca-P-Variante waren genauso hoch wie die der Kontrolle (95 bzw. 96 %). Dagegen fiel die KS Gö-Variante deutlich ab (87 %).

Prinzipiell ähnlich ist das Ergebnis mit den Böden in Gehaltsklasse A und B. In allen Fällen lagen die Erträge der KS Gö-Variante niedriger als die der Ca-P-Variante und signifikant niedriger als die der KS Sh-Variante. Die Erträge sind ein Spiegelbild der vorliegenden P-Entzüge (Tab. 5). Auf allen Böden, außer Elliehausen, hatte der Rotklee deutlich weniger P aufgenommen als aus $CaHPO_4$ bzw. aus KS Sh. Der Boden Elliehausen machte eine Ausnahme. Hier gab es im Vergleich zu $CaHPO_4$ signifikante Differenzen weder beim Ertrag noch bei den P-Entzügen.

4 Diskussion

Die zentrale Frage der Untersuchungen war, ob der hohe Fe-Gehalt des KS Gö bzw. dessen weites molares Fe:P-Verhältnis von 1:0,3 negative Auswirkungen auf die P-Aufnahme und damit das Wachstum der Pflanzen hat. Als zweites ergab sich die Frage, ob sich die P-Aufnahme aus den mit den verschiedenen P-Quellen gedüngten Böden

Tabelle 4: Relativerträge an Rotkleetrockenmasse (Summe von 3 Schnitten) nach der P-Düngung in Höhe von 187 mg P je Gefäß zum Mais (Vorfrucht).
Table 4: Dry matter yield in g per pot (sum of 3 cuttings) and relative yield of red clover, the second crop after the P application of 187 mg P per pot.

Bodenart/ Substrat	Standort	GK[1)]	Ohne P g	Ohne P relativ	$CaHPO_4$ relativ	KS Gö relativ	KS Sh relativ	GD[2)] 5 %
Ton.Schluff	Börry P-80	C/D	78	100	96	87	95	7
Ton.Schluff	Börry P-0	B/C	50	100	130	121	136	14
Ton.Schluff	Elliehausen	A	20	100	126	123	167	32
Lehm.Sand	Rehburg	A	50	100	113	98	106	8
Sand	Düshorn	B	54	100	109	106	113	5
Quarzsand	Weferlingen	A	–		100[3)]	45	72	25

[1)] Gehaltsklasse, [2)] Tukey test, [3)] absolut = 14 g Gefäß$^{-1}$

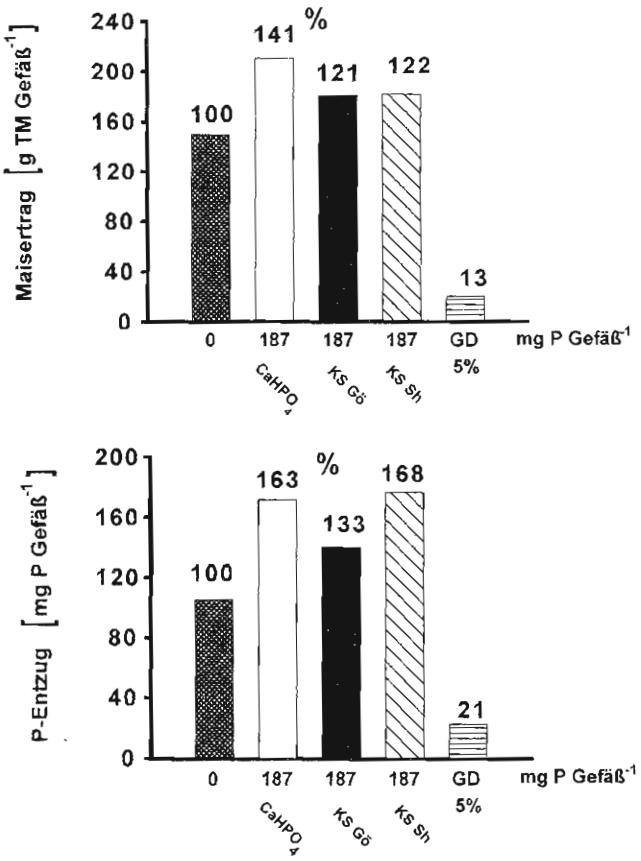

Abbildung 6: Abhängigkeit des Maisertrages und des P-Entzuges von der P-Applikation zum Boden Börry P-0.
Figure 6: Dry matter yield and P uptake of maize as affected by P supply to soil Börry P-0.

längerfristig, hier im Laufe von 2 Jahren, zwischen den 3 P-Düngungsvarianten veränderte.

Berechnet man zur Beantwortung der ersten Frage die Mittelwerte der P-Aufnahmen des Maises für alle 18 Varianten, so konnte der Mais im Vergleich zur $CaHPO_4$-Variante aus den 5 Böden sowie dem Quarzsand, die mit KS Gö gedüngt waren, nur 74 % P aufnehmen, während aus den Böden mit KS Sh 83 % P aufgenommen werden konnten (Tab. 6). Pauschal betrachtet lagen also beide Klärschlämme in ihrer P-Bereitstellung für die Pflanzen klar unter derjenigen der Orthophosphat-Variante, wobei der KS Gö durch die niedrigsten Werte besonders auffällt. Eine detailliertere Betrachtung der Resultate ergibt ein differenzierteres Bild von der Wirkung der zwei Schlämme. Die Resultate mit dem Substrat Quarzsand sind in erster Linie für die niedrigen Mittelwerte der P-Entzüge der Pflanzen verantwortlich (29–31 %). Einerseits ist der P-freie Quarzsand ein ideales Substrat, um die Aufnehmbarkeit gelösten Phosphates zu prüfen, da er keine P-Sorptionsplätze besitzt und damit die P-Verfügbarkeit nicht negativ beeinflussen kann. Andererseits ist er ein inertes Material und kein Boden mit all seinen biologischen und biochemischen Eigenschaften. Die Ausklammerung der Quarzsandvarianten aus der Betrachtung erhöht die Werte der P-Aufnahmen gegenüber $CaHPO_4$ bei KS Gö auf 88 % bzw. 101 % bei KS Sh (Tab. 6). Das heißt, bei Anwendung von KS Sh wurde im Mittel aller Ackerböden, bei geringen Unterschieden zwischen ihnen, die gleiche P-Aufnahme erreicht wie aus $CaHPO_4$.

Tabelle 6: Übersicht über die relativen P-Entzüge nach Klärschlammdüngung mit gestaffelten P-Mengen durch Mais auf verschiedenen Böden (P-Entzug nach $CaHPO_4$-Düngung = 100 %).
Table 6: The relative values of P uptake of maize after sewage sludge application (different P amounts per vessel) to different soils (P uptake after $CaHPO_4$ application = 100 %).

Boden/ Substrat	GK	KS Göttingen — mg P Gefäß⁻¹ — 44	88	187	$\bar{x}$	KS Salzhausen — mg P Gefäß⁻¹ — 44	88	187	$\bar{x}$
		Relativer P-Entzug				Relativer P-Entzug			
Börry P-80	C/D			82				90	
Börry P-0	B/C			82				103	
Elliehausen	A	77	76	64	72	88	105	101	98
Schluffböden					**76**				**97**
Rehburg	A	96	113	110	106	97	104	110	104
Düshorn	B			97				108	
Sandböden					**104**				**105**
Quarzsand	A	30	32	25	29	20	36	37	31
Alle Varianten					**74**				**83**
Alle Varianten ohne Quarzs.					**88**				**101**

Tabelle 5: Relative P-Entzüge der Rotkleepflanzen (Summe von 3 Schnitten) als 2. Kultur nach einer P-Düngung von 187 mg P Gefäß⁻¹.
Table 5: P uptake in mg per pot (sum of 3 cuttings) and relative P uptake of red clover, the second crop after the P application of 187 mg P per vessel.

Boden/ Substrat	Standort	Ohne P mg	Ohne P relativ	$CaHPO_4$ relativ	KS Gö relativ	KS Sh relativ	GD[1] 5 %
Ton.Schluff	Börry P-80	204	100	100	77	98	10
Ton.Schluff	Börry P-0	61	100	159	131	158	17
Ton.Schluff	Elliehausen	15	100	167	181	213	21
Lehm.Sand	Rehburg	63	100	126	104	133	13
Sand	Düshorn	70	100	132	115	129	11
Quarzsand	Weferlingen	–	–	100[2]	49	90	34
Mittelwert der relativen P-Entzüge:							
5 Böden und Quarzsand			–	100	81	101	
5 Böden ohne Quarzsand			–	100	87	103	

[1] Tukey test, [2] absolut = 8,5 mg P Gefäß⁻¹

Bemerkenswert ist, dass sich die 88 %ige P-Aufnahme aus den KS Gö-Varianten bei Trennung der Schluff- von den Sandböden weiter stark differenziert. Auf den Schluffböden wurde nur eine P-Aufnahme von 76 % erreicht, bei den Sandböden aber im Mittel 104 %, also Gleichheit mit den $CaHPO_4$-Varianten erzielt.

Aus diesen Resultaten leitet sich der Schluss ab, dass die P-Aufnahme aus dem KS Sh mit seinem engen Fe:P-Verhältnis unabhängig von Bodenart und P-Gehalt der aus $CaHPO_4$ nahezu gleich war. Für Klärschlamm Gö galt dies bei Mais nur bei Sandböden (Rehburg, Düshorn), nicht aber für Schluffböden – unabhängig von deren P-Gehalten.

Eine wesentliche Ursache für die geringe P-Aufnahme auf den Schluffböden ist auf die veränderte P-Dynamik in den Böden nach der Düngung mit den drei P-Quellen zurückzuführen. Während nach *Römer* und *Samie* (2001) durch eine $CaHPO_4$-Düngung auf allen Böden die P-Sorption erwartungsgemäß sank, war bereits 4 Wochen nach der P-Applikation die P-Sorption z. B. der Böden Börry P-0 und P-80 nach KS Gö-Düngung auf 120 bzw. 160 % der Kontrolle signifikant angestiegen und blieb 6 Monate lang auf dieser Höhe. Bei den Sandböden stieg die P-Sorption nach 4 Wochen nur maximal um 8 % und war nach 6 Monaten gar nicht mehr nachweisbar. Dagegen trat auf den Sandböden infolge KS Sh-Anwendung kaum eine Anhebung der P-Sorption ein. Der Anstieg der P-Sorption auf den Schluffböden – insbesondere durch KS Gö – verursachte im Vergleich zur $CaHPO_4$-Variante deutlich verminderte Konzentrationen an Orthophosphat (P_i) in der Bodenlösung (*Römer* und *Samie*, 2001). Diese war in den meisten Fällen signifikant niedriger als in den KS Sh-Varianten. Die auf den Schluffböden gemessene geringere P-Aufnahme der Maispflanzen nach KS Gö-Düngung ist also offenbar auf die gesunkene P-Verfügbarkeit durch den eisenreichen KS Gö zurückzuführen. Interessanterweise fanden *Zorn* et al. (2001) auf einem Lößlehmboden, dass vier aufeinander folgende Kulturpflanzen nach Düngung mit Klärschlämmen, die bis 7 % Fe aus der P-Elimination enthielten, ebenfalls um bis zu 20 % geringere P-Aufnahmen zeigten, als Pflanzen nach $Ca(H_2PO_4)_2$-Düngung. Ferner konnten sie mit mehreren Methoden nachweisen, dass das Inlösunggehen von Phosphat in Böden, die mit solchen Fe-reichen Schlämmen gedüngt waren, deutlich geringer war als nach Zufuhr von Schlämmen mit P-Fällung durch Kalk oder biologischer P-Elimination. Auf diese als negativ zu wertenden Effekte von KS mit P-Elimination durch Eisensalze haben *Fritsch* und *Werner* (1988) bereits hingewiesen.

Während also auf den P-armen Schluffböden Börry P-0 und Elliehausen die Maispflanzen aus KS Gö weniger P als aus $CaHPO_4$ aufnehmen konnten und auch weniger Trockenmasse bildeten (Abb. 5 und 6), bildeten die Pflanzen trotz ähnlich hoher P-Aufnahme aus KS Gö auf den Sandböden Rehburg und Düshorn teilweise sogar mehr Trockenmasse als Pflanzen mit $CaHPO_4$-Düngung. Hier muss es neben der P-Versorgung noch andere Wirkungen des KS Gö geben, die für das Wachstum wichtig waren. Tab. 7 zeigt eine mögliche Erklärung. Der KS Gö erhöhte auf Grund seines hohen Kalkgehaltes in allen Böden den pH-Wert. Dieser pH-Anstieg war für das Pflanzenwachstum aber nur auf den Sandböden bedeutsam, da deren pH-Werte in den Kontrollgefäßen bzw. den Gefäßen der $CaHPO_4$- und KS Sh-Varianten nicht im Optimum lagen. Bei pH-Werten < 5 ist mit Al-Toxizität und erhöhter Mn-Löslichkeit zu rechnen. Das heißt, dass für das bessere Wachstum des Maises auf den Sandböden nach KS Gö-Anwendung neben der P-Zufuhr vor allem die reduzierte Bodenacidität verantwortlich war. Ähnliches traf für den Rotklee zu (Tab. 4), der bei pH-Werten < 5 ebenfalls weniger gut wächst (*Schilling*, 2000, S. 165). Insgesamt gesehen ist also das vergleichsweise gute Wachstum des Maises und dessen relativ hohe P-Aufnahme auf den Sandböden Rehburg und Düshorn nach KS Gö-Applikation sowohl auf die Kalkwirkung als auch auf die P-Zufuhr zurückzuführen. Der Anteil der Kalkwirkung bleibt aber unklar, da es keine Vergleichsvariante mit einer entsprechenden Kalkdüngung gab. Eine Nutzung von KS mit hohen Kalkgehalten ist für die Landwirtschaft dann interessant, wenn die Kosten für den KS sehr gering sind, da ansonsten Kalke zur Regulierung der Bodenreaktion eingesetzt werden müssten.

Tabelle 7: pH-Werte der Böden 4 Wochen nach der Düngung mit 187 mg P pro Gefäß (Mittelwerte aus 4 Wiederholungen).
Table 7: Soil pH 4 weeks after P application of 187 mg P per vessel (average of 4 replicates).

Boden	Ohne P	$CaHPO_4$	KS Gö	KS Sh
Börry P-80	6,2	6,2	7,3	6,2
Börry P-0	7,2	7,3	7,6	7,2
Elliehausen	7,7	7,7	7,9	7,7
Rehburg	4,3	4,3	4,9	4,4
Düshorn	4,9	4,9	5,6	4,9

Ein besonderes Phänomen trat auf dem Boden Börry P-0 auf (Abb. 6). Während der geringere Ertrag in der Variante KS Gö mit der geringen P-Aufnahme korrespondierte, traf das bei KS Sh nicht zu. Dort war der P-Entzug ebenso groß wie bei $CaHPO_4$-Düngung, aber der Ertrag war signifikant um 19 % niedriger. Eine mögliche Erklärung lässt sich aus der Kornbildung des Maises ablesen. Zur Ernte waren folgende Kornerträge bei den einzelnen Varianten gefunden worden: Kontrolle: 9 g; $CaHPO_4$: 25 g; KS Gö: 17 g; KS Sh: 17 g. Aus früheren Arbeiten (*Römer* und *Schilling*, 1986) ist bekannt, dass der P-Ernährungszustand der Jungpflanzen über die Anlage der generativen Organe entscheidet. Man erkennt, dass zwar mit der KS-Düngung doppelt so viel Kornmasse gebildet wurde wie in der P-0-Variante, aber wesentlich weniger als bei $CaHPO_4$-Ernährung. Das heißt, das Phosphat, welches man in den Pflanzen zur Ernte in der Variante KS Sh gefunden hat, ist vermutlich erst in späten Abschnitten des Wachstums aufgenommen worden und kam deshalb zur Anlage der generativen Organe zu spät. Wenn diese Zusammenhänge tatsächlich zutreffen, dann liegt die Vermutung nahe, dass ein zeitlich begrenzter hoher P-Bedarf in frühen Entwicklungsstadien mancher Kulturpflanzen mit diesem Klärschlamm (KS Sh) nicht gedeckt werden kann, da sein Phosphat erst mit der Zeit verfügbar wird.

Es bleibt die Frage nach der längerfristigen P-Düngewirkung der Klärschlämme. Was die P-Aufnahme der Rotkleepflanzen betrifft, so zeigen sie im Mittel für die 5 Ackerböden, bezogen auf die Ca-P-Variante, nahezu die gleichen relativen P-Erträge wie der Mais (KS Gö 87 %, KS Sh 103 %, Tab. 5). Lässt man den extrem P-armen und carbonathaltigen Unterboden (= Löß) aus Elliehausen aus der Betrachtung heraus, so liegt die P-Aufnahme an KS Gö in Bezug auf die Ca-P-Variante nur bei 82 %, die des KS Sh aber bei 100 %. Das heißt, der nachgebaute Rotklee war bis auf das Substrat Löß (Elliehausen) nicht in der Lage, den P im KS Gö im 2. Nutzungsjahr gleich oder besser zu nutzen als der Mais. Das überrascht, denn vom Rotklee ist bekannt, dass er bei P-Unterversorgung verstärkt organische Säureanionen (Citrat, Oxalacetat) exsudiert (*Gerke*, 1995). Für Mais trifft das viel weniger zu (*Beißner*, 1997). Solche Anionen erhöhen die P-Löslichkeit (*Gerke*, 1992; *Keller*, 2000) vermutlich im wesentlichen über einen Ligandenaustausch des sorbierten Phosphates (*Gerke*, 1992). Offenbar ist aber das Phosphat im KS Gö wesentlich fester gebunden als im KS Sh bzw. als das Phosphat, das mit $CaHPO_4$ (= Mineraldünger) in den Boden gelangte.

5 Schlussfolgerungen

Während die P-Menge im KS mit einem molaren Fe:P-Verhältnis von 1:1,2 in Ackerböden voll düngewirksam wie ein P-Mineraldünger bewertet werden kann, ist ein KS mit dem weiten Fe:P-Verhältnis von 1:0,3 nur zu 70–80 % anrechenbar.

Aus Sicht der Pflanzenernährung dürfte ein wiederholtes Ausbringen von KS mit weitem Fe:P-Verhältnis die P-Dynamik im Boden in unerwünschter Richtung (zunehmende P-Sorption) beeinflussen – ein Phänomen (vgl. *Römer* und *Samie*, 2001; *Werner*, 2001), das längerfristig verfolgt werden muss.

Aus Rücksicht auf die mögliche Erhöhung der P-Sorption in den Böden wäre eine P-Eliminierung im Abwasser ohne Fällungsmittel wie Eisensalze zu empfehlen (*Klaus* und *Schönborn*, 1999). Auf alle Fälle sollte bei der Schlammkonditionierung auf eine weitere Eisensalzzugabe verzichtet werden.

Danksagung

Die Arbeiten wurden durch die *Niedersächsische Umweltstiftung* und durch das *Niedersächsische Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten* finanziell gefördert.

Wir danken den Klärwerken für die Bereitstellung der Schlämme, Herrn Dr. *Eisener* (Stadtwerke Göttingen) für die Diskussionsbereitschaft sowie den technischen Assistentinnen *Birgit Eichenberg, Susanne Koch* und *Marlies Niebuhr* für die Hilfe bei den Experimenten und Analysen.

Literatur

ATV (Abwassertechnische Vereinigung, Hrsg.) (1996): Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung. ATV-Information, 1–30.

Bannick, C. G. (2001): Grundsätze und Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landwirtschaftlich genutzte Böden. Bodenschutz 3, 101–103.

Baran, E. (1985): Zusammensetzung und Düngewirkung von Phosphat-Fällungsprodukten aus der dritten Abwasserreinigungsstufe. Dissertation, Fachbereich Agrarwissenschaften, Universität Göttingen.

Beißner, L. (1997): Mobilisierung von Phosphor aus organischen und anorganischen P-Verbindungen durch Zuckerrübenwurzeln. Cuvillier Verlag, Göttingen.

Bergs, C. G. (1998): Rechtliche Regelungen für die Verwertung von Klärschlämmen und sonstigen Sekundärrohstoffdüngern. Vortrag zur 9. Klärschlammberatertagung der LK Hannover am 1.12.1998 in Nienburg.

Burnham, C. P., and *D. Lopez-Hernandez* (1982): Phosphate retention in different soil taxonomic classes. Soil Sci. 134, 376–380.

Fritsch, F., und *W. Werner* (1988): Einfluss langjähriger Klärschlammdüngung auf Löslichkeitskriterien der Bodenphosphate. Landwirtschaftliche Forschung 41, 305–311.

Frossard, E., S. Sinaj, L.-M. Zhang, and *J. L. Morel* (1996): The fate of phosphorus in soil – plant systems. Soil Sci. Soc. Am. J. 60, 1248–1253.

Gerke, J. (1992): Phosphate, aluminum and iron in the soil solution of three different soils in relation to varying concentrations of citric acid. Z. Pflanzenern. Bodenkd. 155, 339–343.

Gerke, J. (1995): Chemische Prozesse der Nährstoffmobilisierung in der Rhizosphäre und ihre Bedeutung für den Übergang vom Boden in die Pflanze. Cuvillier Verlag, Göttingen.

Hahn, J. (2000): Ausstieg aus der „landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung" – eine notwendige Harmonisierung im vorsorgenden Umweltschutz. Bodenschutz 3, 72–73.

Hahn, J. (2001): Vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in Böden am Beispiel der Klärschlammverwertung. Wasser, Luft und Boden 9, 60–67.

Hamm, A. (Hrsg.) (1991): Studie über Wirkungen und Qualitätsziele von Nährstoffen in Fließgewässern. Academia Verlag, Sankt Augustin.

Keller, H. (2000): Einfluss wurzelbürtiger organischer Säuren auf das Cu-, Zn- und Cd-Aneignungsvermögen von Spinatgenotypen. Dissertation, Fachbereich Chemie, Universität Kaiserslautern.

Kerschberger, M., U. Hege, und *A. Jungk* (1997): Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. VDLUFA-Standpunkt, Darmstadt.

Klaus, I., und *Ch. Schönborn* (1999): Phosphatelimination – Mechanismen und Einflussfaktoren. Wasserwirtschaft Wassertechnik 4, 22–26.

Kluge, R. (2001): VDLUFA fordert differenzierende Strategie der zwei Wege. http://www.@grar-aktuell.de – Nachrichten aus Landwirtschaft, Umwelt- und Naturschutz, 16.05.2001.

Parfitt, R. L. (1978): Anionenadsorption. Adv. Agron. 30, 1–50.

Römer, W., und *I. F. Samie* (2001): Einfluss eisenhaltiger Klärschlämme auf Kenngrößen der P-Verfügbarkeit in Ackerböden. J. Plant Nutr. Soil Sci. 164, 321–328.

Römer, W., und *G. Schilling* (1986): Phosphorus requirements of the wheat plant in various stages of its life cycle. Plant and Soil 91, 221–229.

Schaaf, H., und *E. Janßen* (2000): Schwermetallgehalte von Wirtschafts- und Sekundärrohstoffdüngern und Schwermetallfrachten bei Anwendung nach den anerkannten Regeln der guten fachlichen Praxis. 112. VDLUFA-Kongress, Stuttgart-Hohenheim, im Druck.

Scheffer, W. (2000): Abwasserbehandlung in der Kläranlage, Fällungs- und Flockungsmittel zur chemischen P-Elimination. Tagung der VDLUFA-Fachgruppen I, II und X in Dresden, 15.3.2000.

Scheffer, F., und *H. Pajenkamp* (1952): Phosphatbestimmung in Pflanzenaschen nach der Molybdän-Vanadin-Methode. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 56, 2–8.

Schilling, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

Soltan, S., W. Römer, E. Adgo, J. Gerke, und *G. Schilling* (1993): Phosphate sorption by Egyptian, Ethiopian and German soils and P uptake by rye. Z. Pflanzenern. Bodenkd. 156, 501–506.

Suntheim, L., und *B. Dittrich* (1996): Klärschlamm – (k)ein wertvoller P-Dünger. VDLUFA-Schriftenreihe 44, Kongressband 1996, 313–316.

Umweltbundesamt (Hrsg.) (1997): Daten zur Umwelt, Erich Schmidt-Verlag, Berlin.

VDLUFA (2001): VDLUFA-Mitteilungen 1/2001, p. 29–31.

Werner, W. (2001): Phosphatbewertung von Klärschlamm und Bioabfallkomposten – Stand der Kenntnisse. Vortrag auf der 86. Sitzung des DLG-Ausschusses für Pflanzenernährung, Münster, 8. 1. 2001.

Zorn, W., O. Krause, und *G. Kießling* (2001): Wirkung unterschiedlicher Abwasserbehandlungsverfahren auf die P-Verfügbarkeit von Klärschlamm im Gefäßversuch. 113. VDLUFA – Kongress am 20. 9. 2001 in Berlin (im Druck).

[P33/01B]