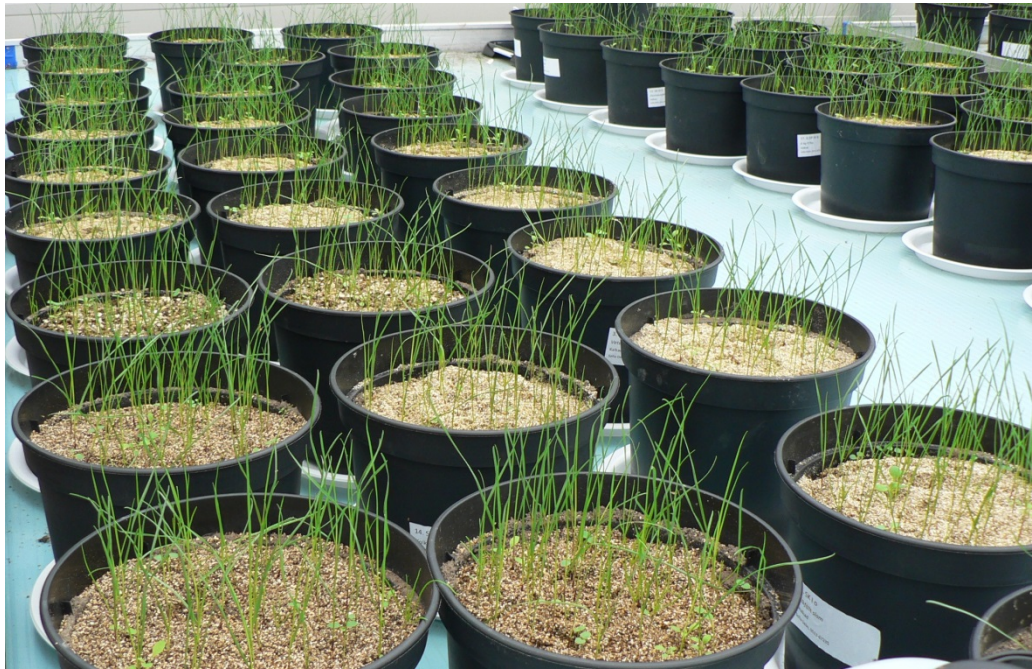




Fosforgödslingsseffekt av olika restprodukter

Phosphorus fertilization effect of different residues



Sofia Delin, Anna Nyberg och Jarmohammad Sarajodin

Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för mark och miljö

Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Soil and Environment

Rapport 13.
Uppsala 2014
ISBN

978-91-576-9205-4

Innehåll

Sammanfattning	1
Summary	1
Bakgrund och syfte	2
Material och metoder	2
Restprodukter	2
Jord.....	3
Krukförsök	4
Gödslingseffekter.....	6
Inkubering med P-AL analys	6
Extraktioner.....	7
Resultat	7
Effekt på fosfor- och ts-skörd beroende på kalkning och pH	7
Skörd från första och andra klippningen.....	8
Fosforextraktioner på gödsel och samband med fosforeffekt.....	10
Diskussion.....	11
Fosforeffekt av stallgödsel.....	11
Fosforeffekt av aska.....	11
Fosforeffekt av avloppsslam.....	12
Extraktioner för att bedöma fosfortillgänglighet hos gödsel	12
Fosfor- och kalkningseffekt	12
Slutsatser	12
Referenser	13

Sammanfattning

Fosforgödslingseffekten av femton potentiella gödselmedel baserade på restprodukter testades dels i krukförsök och dels i inkuberingsförsök. Möjligheten att relatera fosforeffekten till extraherbart fosfor med olika extraktionsmedel testades också. I studien ingick bl.a. tre avloppsslam, tre sorters stallgödsel, två rötrestes, tre askor samt kött- och benmjöl. I krukförsöket odlades rajgräs som klipptes efter 5 och 11 veckor för att mäta skörd och fosforupptag. Tre kontrollen med olika nivåer av mineralgödsel fosfor fanns också med. Då fosfortillgängligheten är starkt beroende av pH, testades effekten i krukförsöken i både kalkad och okalkad jord för att särskilja effekter av tillförd fosfor från eventuella kalkningseffekter av restprodukten. Resultaten visade att skörd och fosforupptag hämmades av kalkning i denna studie. Kalkverkande restprodukter hade därför en sämre effekt. Produkter med litet organiskt innehåll, t.ex. askor och rötrestes, hade en snabbare effekt än många av de andra produkterna med större organiskt innehåll såsom stallgödsel och slam. Dessa skillnader jämnade ut sig med tiden. Sammanlagd skörd och fosforupptag över 11 veckor var ganska lika för alla produkter och var i nivå med det led som fått halv dos med mineralgödsel fosfor. P-AL talet i inkubationsförsöket ökade också ungefär hälften så mycket som med mineralgödsel. Men det fanns inget samband mellan vilka produkter som gav högst effekt på fosforskörd och högst P-AL. Det fanns däremot ett visst samband mellan extraherbart fosfor från gödseln och gödselns effekt på fosforskörd, framför allt vid den första klippningen. Bäst fungerade P-AL-extraktion. Citratextraktion gav missvisande värden på avloppsslam, men fungerade annars bra. Vattenextraktion innebar för låg extraktionsgrad i förhållande till vad som var växttillgängligt för flera produkter.

Summary

Phosphorus fertilizer effect of fifteen potential fertilizers based on residues was tested in a pot experiment and in an incubation. The possibility to relate phosphorus effect to extractable phosphorus with different extracting agents was also tested. Fertilizers included in the study were e.g. three types of sewage sludge, three kinds of livestock manure, two biogas residues, three ashes and meat and bone meal. In a pot experiment, ryegrass was grown which was cut after 5 and 11 weeks to measure the dry matter yield and the uptake of phosphorus. As phosphorus availability is strongly dependent on pH, the effect was tested in both limed and unlimed soil in order to distinguish the effects of added phosphorus and any liming effects of the residues. Results showed that yield and phosphorus uptake was reduced because of liming in this study. Residues with liming effect did therefore not perform well. Products with a low organic content, e.g. ash and biogas residues, had a faster impact than many of the other products with higher organic content such as manure and slurry. These differences leveled off over time. The total harvest and phosphorus uptake over two months were similar for all products and similar to a treatment receiving half as much phosphorus with mineral fertilizer. In the incubation, the P-AL value in soil increased about half as much as with mineral fertilizers. There was no connection between which products gave a maximum phosphorus effect on yield and a high P-AL value. When extracting phosphorus from the fertilizers, we found that there was a relationship between the extracted phosphorus and phosphorus effect in the first cut. P-AL extraction gave the best correlation. Citrate extraction gave misleading values for sewage sludge, but worked well if those were excluded. Water extraction gave to low extraction levels in comparison to the plant available phosphorus for several of the products.

Bakgrund och syfte

Det finns många potentiella gödselmedel baserade på restprodukter med högt fosforinnehåll, exempelvis köttmjöl, minkgödsel, avloppsslam m.m. Att ta vara på fosfor i dessa restprodukter i växtodlingen är ett sätt att hushålla med fosfor, som är en begränsad resurs. Mineralgödsel fosfor är dyr, vilket ökar intresset för gödsling med alternativa gödselmedel. Fosforgödslingseffekten av dessa medel är dock dåligt undersökt. För lantbrukarna är det viktigt att känna till vilken gödslingseffekt man kan räkna med från olika produkter, så att grödan får sitt behov tillgodosett och så att inte lantbrukaren betalar för fosfor som inte har något gödselvärde. Fosfor i restprodukter förekommer i olika former, både organiska och oorganiska med olika löslighetsgrad. Dessutom har olika gödselmedel olika pH-effekt, vilket påverkar fosfors tillgänglighet. Även om de flesta restprodukter någon gång har testats i odlingsförsök i fält, är det svårt att dra några slutsatser om hur lämpliga dessa produkter är betraktade som fosforgödselmedel, eftersom fosfor sällan är det mest begränsande växtnäringsämnet. Fokus i fältförsök hamnar istället oftast på gödselmedlens kväveeffekt.

Fosfortillgängligheten i stallgödsel likställs ofta med mineralgödsel på längre sikt, men har visat sig ha lägre tillgänglighet på kort sikt (Materchera och Morutse, 2009). Aska, som kan betraktas som ett oorganiskt gödselmedel, kan ha ganska varierande fosfortillgänglighet beroende på ursprung (Yusiharni et al., 2007; Kuligowski et al., 2010). Avloppsslam kan ha olika fosfortillgänglighet beroende på vilken fällningskemikalie som använts och i vilken omfattning vid fällning av fosfor (Maguire, 2001). Fosfor som fällt med magnesiumoxid till struvit har haft god fosfortillgänglighet, jämförbar med kalciumfosfat (Johnston och Richards, 2003). För att karaktärisera fosfors tillgänglighet i mineralgödsel används citratextraktioner. Någon standardanalys för karaktärisering av fosfors tillgänglighet från olika restprodukter finns inte. Citratanalys skulle kunna vara användbar, vilket den visat sig vara på aska (Yusiharni et al., 2007). Men AL-analys som används som standardanalys på jord i Sverige, skulle vara billigare eftersom

Syftet med den här undersökningen var att med hjälp av kontrollerade krukförsök uppskatta ettårseffekten av fosfor från ett stort antal restprodukter av olika karaktär. Syftet var också att jämföra dessa effekter med analysvärden på extraherbar fosfor från gödselmedlen med olika extraktionsmedel, för att se hur bra dessa värden är på att beskriva fosforgödslingvärdet i olika produkter. Parallellt med krukförsöken skedde också inkubationer för att även undersöka effekten på markens P-AL-värde och om detta avspeglar fosforgödslingseffekten i krukförsöken. Fosforgödslingseffekt av restprodukterna på längre sikt beaktas inte i den här studien, men är naturligtvis också viktig för bedömningen av restproduktens totala fosforgödslingvärde.

Material och metoder

Restprodukter

Fosforgödslingseffekten av femton potentiella gödselmedel baserade på restprodukter (tabell 1) testades dels i krukförsök och dels i inkuberingsförsök. Gödselmedlen valdes ut för att representera ett brett spektrum av olika restprodukter med högt fosforinnehåll (tabell 1). Ett par varianter inom några typer av restprodukt togs med, där man kan ha misstanke att fosfortillgängligheten kan skilja sig åt. Restprodukterna inkluderade tre bottenaskor från värmepannor, drank från etanoltillverkning, tre sorters stallgödsel, två mjöl baserade på slakteriprodukter, två olika biogödsel från biogasanläggningar med olika substrat, tre olika

avloppsslam med olika fällningskemikalier för fosfor och en form av struvit. Den senare utgör en fast fraktion från separerad nötflytgödsel bestående av MgO-fälld fosfor (struvit) samt en del organiskt material.

Tabell 1. Undersökta restprodukter och deras innehåll av fosfor (HNO₃-uppsluten) och kväve (Kjeldahl).

Table 1. Residues and their phosphorus (HNO₃ digested) and nitrogen (Kjeldahl) contents.

Restprodukt	Ts-halt %	Fosfor (kg/ton)	Kväve (kg/ton)
Struvit (fälld från nötgödsel)	49	4,9	13
Kalkfällt slam	30	1,8	2,8
Järnfällt slam	20	8,0	10
Aluminiumfällt slam	21	7,4	11
Rötrest (växt)	4,5	1,2	7,6
Rötrest (slakt)	6,2	1,4	9,7
Köttmjöl	95	26	96
Benmjöl	97	93	72
Nötflytgödsel	9,3	0,9	4,1
Minkgödsel	29	18	8
Kycklinggödsel	31	9,2	18
Drank	31	4,9	18
Vetehalmsaska	100	6,3	0,9
Rapshalmsaska	100	10	0,9
Havreaska	62	50	7,5

Jord

I både krukförsök och inkubering användes en sandig jord med låg fosforstatus och normalt pH (tabell 2). Jorden hämtades från ett jordbruksfält utanför Mariestad som låg i gröntträda (ogödslad vall) sedan ett par år. Jorden siktades med 4 mm såll. Den låga lerhalten (5 %) innebar en låg katjonbyteskapacitet (tabell 3) och en vattenhållande förmåga på 35 % av ts (enligt Jansson, 1958). Då markens aluminium- och järninnehåll kan ha betydelse för fosforbindningsförmågan bestämdes oxalatlösligt järn (Fe) och aluminium (Al). Denna var ca 850 mg Al kg⁻¹ respektive 1770 mg Fe kg⁻¹, som innebar en måttlig sorberande förmåga av fosfor (Ulén, 2006). En del av jorden kalkades med kalkstensmjöl med en dos på 0,44 g CaCO₃ till 300 g jord, vilket skulle motsvara 5,2 ton CaCO₃ per ha. Dosen skulle höja pH till ca 7,2 enligt beräkningar utifrån lerhalt och mullhalt (Jordbruksverket, 2010).

Tabell 2. Lerhalt, mullhalt och växtnäringsinnehåll i jorden.

Table 2. Clay, organic matter and plant nutrient contents in soil

Egenskap	Värde	Egenskap	Värde
Lerhalt	5 %	Mg-AL	4,6 mg 100g ⁻¹
Mullhalt	2,2 %	Ca-AL	69 mg 100g ⁻¹
pH	6,2	Cu-HCl	2,8 mg 100g ⁻¹
P-AL	3,0 mg 100g ⁻¹	P-HCl	38 mg 100g ⁻¹
K-AL	4,7 mg 100g ⁻¹	K-HCl	59 mg 100g ⁻¹

Både inkubering och krukförsök utfördes sedan i både kalkad och okalkad jord. Detta för att kunna särskilja effekter av tillförd fosfor och eventuella kalkningseffekter av restprodukten,

eftersom pH i hög grad påverkar fosfortillgängligheten i marken. Vid tolkningen av resultaten antas då att en kalkverkande produkt får en relativt bättre effekt i det lägre pH-värdet, om fosfortillgängligheten gynnas av kalkning, medan den blir relativt sämre om den inte gynnas av kalkning.

Tabell 3. Total aciditet och total utbytbara katjoner (mmol 100 g⁻¹ TS)

Table 3. Total acidity and exchangeable cations (mmol 100 g⁻¹ DM)

Egenskap	Värde
Total aciditet	2,06
Ca	4,14
K	0,14
Mg	0,47
Mn	0,00
Na	0,00
CEC	6,81

Krukförsök

Fosforgödslingseffekten av restprodukterna testades i krukförsök med engelskt rajgräs (*Lolium perenne*) vid två olika pH, med tre upprepningar per gödselmedel och pH-värde. För en del restprodukter kan fosfor behöva lite tid på sig att frigöras innan den blir växttillgänglig. Alla gödselmedel blandades därför med jord ca två månader innan sådd, undantaget struvitblandningen i led 15, som levererades sent och därför blandades med jorden först en vecka före sådd. I vart och ett av leden 1-15 tillsattes restprodukt i förhållande till sitt innehåll av totalfosfor (tabell 4) så att fosforgivan motsvarade 12 kg P per ha med hänsyn till jordytans area i krukorna.

Tabell 4. Mängd restprodukt per kruka och motsvarande mängd per ha.

Table 4. Residues and their phosphorus (HNO₃ digested) and nitrogen (Kjeldahl) contents and added amount of residue per pot.

Restprodukt	(g/kruka)	(kg/ha)
Struvit (fälld från nötgödsel)	6,2	2 449
Kalkfällt slam	17	6 667
Järnfällt slam	3,8	1 500
Aluminiumfällt slam	4,1	1 622
Rötrest (växt)	25	10 000
Rötrest (slakt)	22	8 571
Köttmjöl	1,2	462
Benmjöl	0,3	129
Nötflytgödsel	36	14 118
Minkgödsel	1,7	667
Kycklinggödsel	3,3	1 304
Drank	6,2	2 449
Vetehalmsaska	4,8	1 905
Rapshalmsaska	3,1	1 200
Havreaska	0,6	240

Restprodukterna blandades först med en mindre mängd jord (300g) i 500 ml kärl. Dessa fick stå i klimatskåp med temperaturen 15°C under två månader innan sådd. För att inte torka ut

vattnades jorden varje vecka med avjoniserat vatten till vattenhalt på ca 60 % av vattenhållande förmåga. Inför sådd preparerades treliterskrukor med totalt 3,3 kg jord per kruka, där jord/gödselblandningarna som stått i klimatskåpet blandats in i den övre halvan av krukorna. Förutom de 15 leden med restprodukter preparerades tre kontroller med 0, 6 respektive 12 kg P per ha tillsatt med handelsgödsel P (P20) vid sådd. Rajgräset såddes med 40 frön per kruka som täcktes med ett lager av vermekulit för att hindra fröna från uttorkning under groningen. Krukorna vattnades till 70 % av vattenhållande förmåga två gånger i veckan. Kväve, kalium, svavel, magnesium och mikronäring tillfördes med mineralgödsel i sådan mängd att de inte ansågs kunna begränsa tillväxten. Makronäring tillfördes med det sammansatta mineralgödselmedlet Yara Mila 20-0-15 (20 % N, 15 % K, 1 % Mg, 3 % S, 1,5 % S). Denna doserades med hänsyn till respektive restprodukts innehåll av lättillgängligt kväve så att den sammanlagda mängden lättillgängligt kväve skulle bli densamma i alla led (tabell 5). Hälften av makrogödseln (120 kg N ha⁻¹) tillsattes vid sådd och andra hälften efter första klippningen. Mikronäring tillfördes i samband med vattning en gång i veckan. Gräset klipptes efter 5 och 11 veckor. Vid första klippningen lämnades ca 1 cm hög stubb, medan andra klippningen skedde så nära markytan som möjligt. Skördemängden och dess fosforinnehåll analyserades.

Tabell 5. Tillförd mängd kväve med restprodukt respektive mineralgödsel (ammoniumnitrat) i de 18 leden i krukförsöket.

Table 5. Added amounts of nitrogen with residues and mineral fertilizer (ammonium nitrate) in the 18 treatments of the pot experiment.

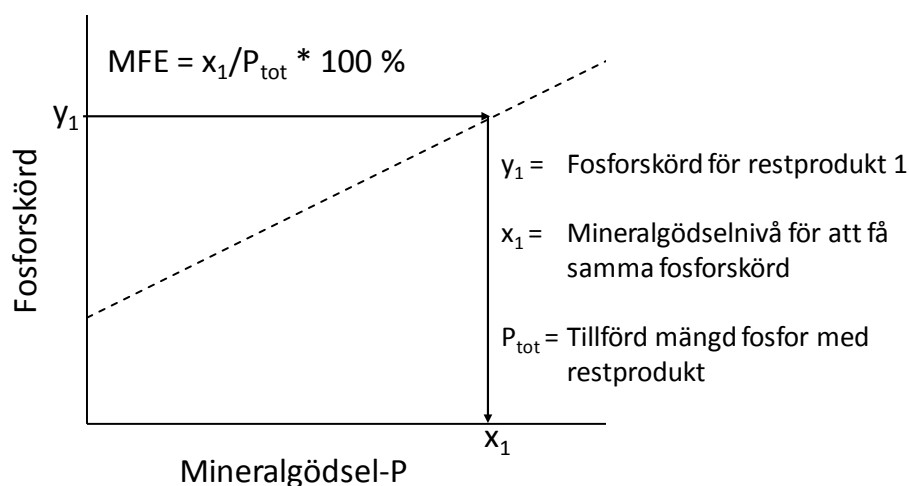
Led	Med restprodukt			Med mineralgödsel
	Total (kg N/ha)	Ammonium (kg N/ha)	Tillgängligt* (kg N/ha)	Vid sådd + efter klippn. (kg/ha)
P20 ^{**} , 12 kg P/ha				120 + 120
P20 ^{**} , 6 kg P/ha				120 + 120
Inget P				120 + 120
Struvit (nötgödsel)	32	0	13	107 + 120
Kalkfällt slam	19	0	0	120 + 120
Järnfällt slam	16	5,4	5,4	115 + 120
Aluminiumfällt slam	18	6,6	6,6	113 + 120
Rötrest (växt)	76	50	50	70 + 120
Rötrest (slakt)	83	49	49	71 + 120
Köttmjöl	44	3	26	94 + 120
Benmjöl	9,3	0,5	5,6	114 + 120
Nötflytgödsel	58	24	24	96 + 120
Minkgödsel	5,3	0,8	0,8	119 + 120
Kycklinggödsel	23	12	14	106 + 120
Drank	45	8	27	93 + 120
Vetehalmsaska	1,7	0	0,7	119 + 120
Rapshalmsaska	1,1	0	0,4	120 + 120
Havreaska	1,8	0	0,7	119 + 120

*Tillgängligt N beräknades utifrån antagandet att det motsvaras av 40 % av total N i aska och struvit, 60 % av total N i drank, kycklinggödsel, kött- och benmjöl, samt ammoniuminnehållet i övriga restprodukter.

** Med P20 avses superfosfat (mineralgödsel fosfor)

Gödslingseffekter

För samtliga krukor beräknades fosfor- och torrsubstansskörd från uppmätt skördemängd och fosforinnehåll och ts-halt. För att beskriva gödslingseffekten av de olika produkterna i relation till effekten av mineralgödsel räknades mineralgödselvärdet (MFE - mineral fertilizer equivalent) ut. För att beräkna MFE plottades först fosforskörden mot fosforgödslingsnivån från de mineralgödslande kontrollleden med 0, 6 och 12 kg P ha⁻¹ varpå en linjär alternativt en andragsgradsfunktion anpassades. Från denna funktion bestämdes vilken mineralfosforgödslingsnivå fosforskörden i de olika leden gödslande med restprodukter motsvarade (figur 1). Denna gödslingsnivå dividerat med den totala mängden tillförd fosfor med restprodukt ger den procentsats som anger hur stor andel av fosfor i restprodukten som ersatte mineralfosfor, även kallad MFE. Om mineralgödsel fosfor anses som 100% tillgänglig anger alltså MFE hur många procent av fosfor som kan beräknas bli växttillgänglig. Beroende på olika omständigheter på växtplatsen kommer dock även mineralgödsel fosfor, liksom all fosfor, att vara tillgänglig till varierande grad. För att få ett värde som är applicerbart i de flesta situationer används därför MFE, som anger tillgängligheten relaterat till mineralgödselns tillgänglighet.



Figur 1. Beräkning av mineralgödselvärdet (MFE), där man utgår från vilken mineralgödselgiva (x_1) grödans fosforinnehåll (y_1) motsvarar enligt funktionen fosforskörd vid olika mineralgödsningsnivå (streckad linje) uttryckt i procent av tillförd fosformängd med restprodukt (P_{tot}).

Figure 1. Calculation of mineral fertilizer equivalents (MFE), where the corresponding mineral phosphorus fertilization rate (x_1) to the plant phosphorus uptake (y_1) is determined using the function describing phosphorus uptake at different mineral phosphorus fertilization rates (dashed line) expressed as percentage of applied total phosphorus with residue.

Inkubering med P-AL analys

Till vardera 300 g jord i 500 ml plastbägare tillsattes restprodukter (tabell 1) motsvarande 62 mg totalfosfor (eller 23,5 mg P per 100 g torr jord). Detta är en mycket hög gödslingsnivå jämfört med en normal engångsdos i fält, vilket valdes för att tydligare se eventuella skillnader i effekt på P-AL mellan restprodukter. Jorden inkuberades i 15°C i 4 eller 12 månader för att sedan analyseras på P-AL, P-HCl och pH. Vid samtliga inkuberingar fanns ett led för vardera restprodukt samt ett kontrollled med ogödslad jord. Vid 12-månadersinkuberingen fanns också ett led med mineralgödsel fosfor. Inkuberingen som varade 4 månader hade tre upprepningar i okalkad jord och tre upprepningar i kalkad jord. Inkuberingen i 12 månader skedde enbart med tre upprepningar i okalkad jord. Jorden stod i

öppna plastbägare för att tillåta avgång av koldioxid som annars kan verka försurande. För att jorden i bägarna inte skulle torka ut vattnades de en gång per vecka med avjoniserat vatten till ca 60 % av vattenhållande förmåga.

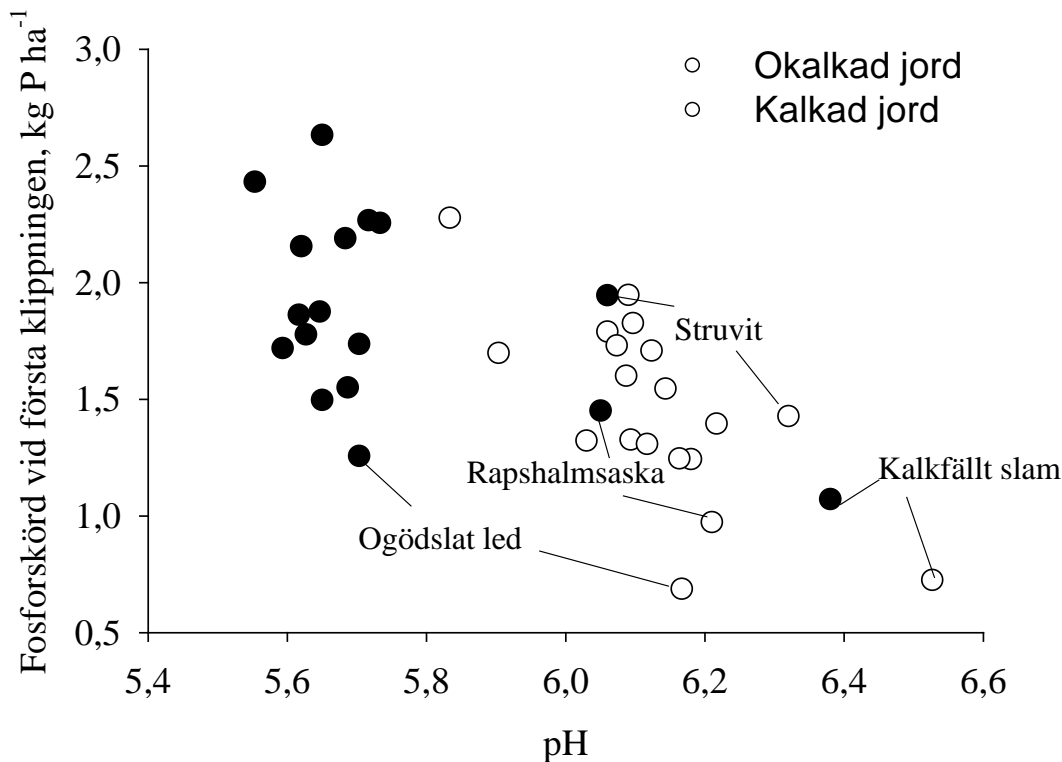
Extraktioner

I syfte att se om någon extraktionsmetod avspeglar fosfortillgängligheten hos de olika restprodukterna analyserades de med avseende på vattenlöslig fosfor (EES 2003/2003), citratlöslig fosfor (EES 2003/2003) och ammoniumlaktatlöslig fosfor (P-AL; SS028310 + T1).

Resultat

Effekt på fosfor- och ts-skörd beroende på kalkning och pH

Kalkningen av krukorna ledde till en höjning av pH med ca 0,4 enheter. Under krukförsöket och inkubationen sjönk pH i samtliga krukor och efter försökets slut låg pH på ca 5,8 i okalkat och 6,2 i kalkad jord (figur 2). Några gödselbehandlingar i okalkad jord (kalkfällt slam, rapshalmsaska och struvitblandning) hade pH på liknande nivå som de kalkade krukorna. För två av dessa (kalkfällt slam och rapshalmsaska) var fosforskörden låg och skiljde sig inte statistiskt från ogödslad led (figur 2).



Figur 2. Fosforskörd i första klippningen i de 18 leden som en funktion av pH i krukorna vid försökets slut.

Figure 2. Phosphorus off-take from the first cut in the 18 treatments as a function of pH in the pots at the end of the experiment.

Fosfor- och ts-skörd var lägre i kalkade krukor än i okalkade ($p < 0,001$). I den okalkade jorden hade kalkfällt slam och rapshalmsaska inte någon signifikant effekt på skörd jämfört med ogödslad led, vilket de däremot hade i den kalkade jorden där skillnaden mot det sämre avkastande ogödslade ledet var större (tabell 6 och 7).

Skörd från första och andra klippningen

Om man studerar skörden från den första klippningen från både kalkade och okalkade krukor, hade rötrest, vetehalms- och havreaska, kycklinggödsel och drank den bästa effekten på fosforskörd (tabell 6). De hade alla en fosforskörd som var statistiskt signifikant högre än alla de övriga restprodukterna. De hade ett MFE på i genomsnitt ca 80 % (tabell 6), vilket innebär 80 % så stor effekt per kg fosfor som för mineralgödsel. Nötgödsel och dess fällningsprodukt struvit hade 55-57% effekt jämför med mineralgödsel, medan motsvarande siffror (MFE) för järn- och aluminiumfällt slam, kött- och benmjöl samt minkgödsel låg runt 40 % (tabell 6). Kalkfällt slam och rapshalmsaska hade sämst effekt, i synnerhet det kalkfällda slammet vars fosforskörd inte var signifikant skild från ogödslad led.

Tabell 6. Resultat från krukförsökets första klippning med skörd (ton ts ha⁻¹), fosforkoncentration (P-halt; g kg⁻¹), fosforskörd (P-skörd; kg P ha⁻¹) och mineralgödselvärdet (MFE, % av gödselns totala fosforinnehåll). Samma bokstav anger vilka led som inte skiljer sig signifikant åt i fosforskörd (p>0,05). Längst till vänster presenteras även fosforskörd (P-skörd; kg P ha⁻¹) för kalkade och okalkade upprepningar separat.

Table 6. Results from the first cut in the pot experiment with yield (tonnes DM ha⁻¹), phosphorus concentration (P-halt; g kg⁻¹), phosphorus off-take (P-skörd; kg P ha⁻¹) and mineral fertilizer equivalent (MFE, % of total phosphorus in residue). The same letter indicates which treatments that don't differ significantly in phosphorus off-take (p>0.05). To the left phosphorus off-take (P-skörd; kg P ha⁻¹) is presented for limed and unlimed pots separately.

Led	Medel kalkat och okalkat			MFE	Kalkat	Okalkat
	Skörd	P-halt	P-skörd		P-skörd	P-skörd
Mineral P 100%	1,3	1,8	2,3	A	1,9	2,6
Rötrest (växt)	1,1	1,9	2,1	B	85%	2,4
Rötrest (slakt)	1,3	1,6	2,0	B	80%	2,2
Vetehalmsaska	1,2	1,7	2,0	B	78%	2,3
Havreaska	1,1	1,9	2,0	B	78%	2,3
Kycklinggödsel	1,2	1,7	2,0	B	77%	2,2
Drank	1,1	1,8	1,9	B	74%	2,3
Nötflytgödsel	1,1	1,5	1,7	C	57%	1,9
Struvit mix	0,9	1,8	1,7	C	55%	1,9
Mineral P 50%	1,0	1,6	1,6	D C		1,3
Köttmjöl	1,0	1,5	1,5	D C	44%	1,7
Minkgödsel	1,0	1,6	1,5	D C	43%	1,7
Benmjöl	1,1	1,4	1,5	D C	42%	1,8
Järnfällt slam	1,0	1,4	1,4	D	37%	1,5
Aluminiumfällt slam	0,9	1,6	1,4	D E	33%	1,6
Rapshalmsaska	0,9	1,4	1,2	E	19%	1,5
Inget P	0,7	1,5	1,0	F		0,7
Kalkfällt slam	0,6	1,5	0,9	F	-4%	1,3
Medel	1,0	1,6	1,7			1,4
LSD	0,1	0,2	0,2			0,2

När båda klippningarna studerades var däremot de signifikanta skillnaderna få (tabell 7). Inte ens de två mineralgödselade kontrollleden skilde sig signifikant från varandra. Baserat på två

skördar hade de flesta restprodukterna ett MFE på 40-70% (tabell 7) eller ungefär lika stora fosforskördar som ledet med halv fosfordos. Bara i ledet med kalkfällt slam var fosforskörden signifikant lägre än i andra led med restprodukter och struvitblandningen gav högre fosforskörd, dock ej högre ts-skörd än övriga restprodukter.

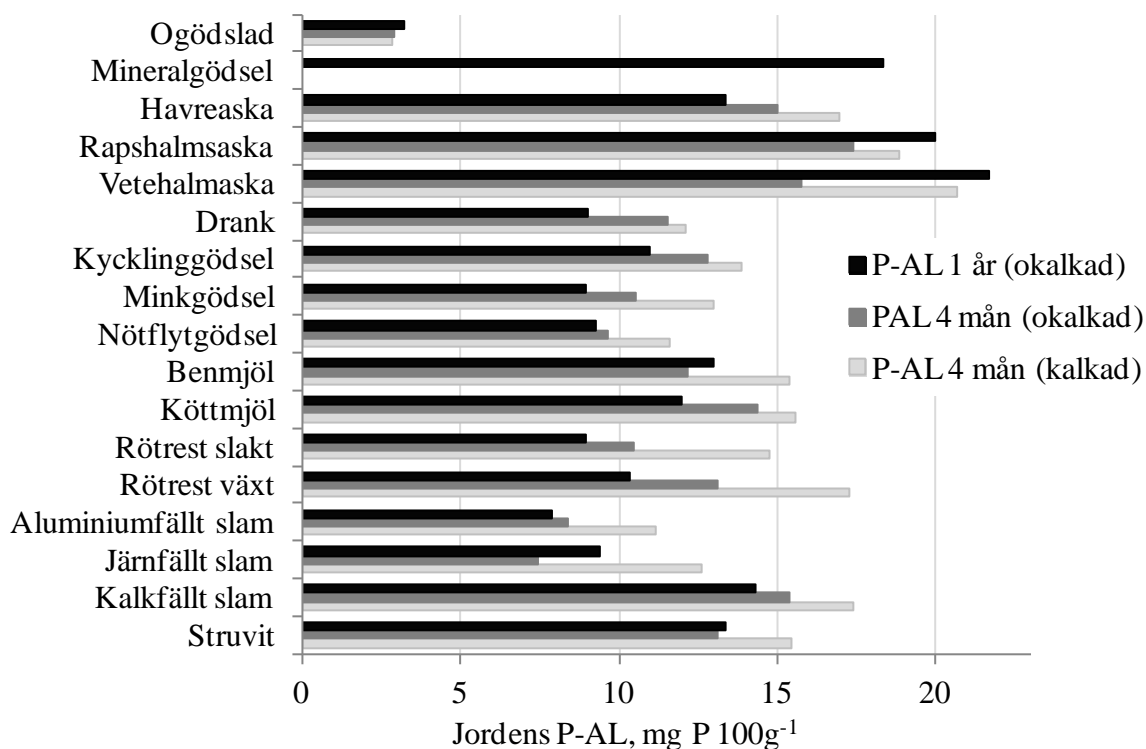
Tabell 7. Resultat från krukförsökets båda klippningar med skörd (ton ts ha⁻¹), fosforkoncentration (P-halt; g kg⁻¹), fosforskörd (P-skörd; kg P ha⁻¹) och mineralgödselvärdet (MFE, % av gödselns totala fosforinnehåll). Samma bokstav anger vilka led som inte skiljer sig signifikant åt i fosforskörd (p>0,05). Längst till vänster presenteras även fosforskörd (P-skörd; kg P ha⁻¹) för kalkade och okalkade upprepningar separat.

Table 7. Results from two cuts in the pot experiment with yield (tonnes DM ha⁻¹), phosphorus concentration (P-halt; g kg⁻¹), phosphorus offtake (P-skörd; kg P ha⁻¹) and mineral fertilizer equivalent (MFE, % of total phosphorus in residue). The same letter indicates which treatments that don't differ significantly in phosphorus offtake (p>0.05). To the left phosphorus offtake (P-skörd; kg P ha⁻¹) is presented for limed and unlimed pots separately.

Led	Medel kalkat och okalkat				MFE	Kalkat	Okalkat
	Skörd	P-halt	P-skörd			P-skörd	P-skörd
Struvitmix	5,1	1,7	8,5	A	103%	8,0	9,0
Mineral P 100%	5,5	1,5	8,3	B A		7,5	9,1
Vetehalmsaska	4,9	1,6	8,1	B A C	86%	7,3	8,9
Minkgödsel	5,3	1,5	7,7	B D C	69%	7,2	8,2
Rötrest (växt)	5,0	1,6	7,7	B D C	67%	7,2	8,2
Drank	5,2	1,5	7,7	B D C	65%	7,7	7,7
Mineral P 50%	5,2	1,5	7,7	B D C		7,5	7,8
Rötrest (slakt)	5,0	1,5	7,7	D C	64%	7,6	7,7
Kycklinggödsel	5,6	1,4	7,7	D C	64%	7,1	8,2
Järnfällt slam	5,3	1,4	7,6	D C	63%	6,7	8,5
Köttmjöl	4,5	1,7	7,6	D C	60%	7,9	7,3
Nötflytgödsel	5,2	1,5	7,5	D C	59%	7,4	7,7
Havreaska	5,3	1,4	7,4	D	55%	7,3	7,5
Rapshalmsaska	5,1	1,4	7,4	D	52%	7,0	7,7
Benmjöl	5,1	1,4	7,2	D	44%	6,8	7,6
Aluminiumfällt slam	5,1	1,4	7,1	E D	40%	6,7	7,6
Kalkfällt slam	4,7	1,4	6,5	E F	13%	6,5	6,5
Inget P	4,7	1,3	6,1	F		4,8	7,3
Medel	5,1	1,5	7,5			7,1	7,9
LSD	0,5	0,2	0,6			0,8	1,0

Effekt på jordens P-AL

P-AL talet i den inkuberade jorden höjdes i storleksordningen 40-100% jämfört med det led som fått mineralgödsel (figur 3), vilket stämmer ganska bra med fosforeffekten i krukförsöken. Det finns dock inget samband mellan vilka restprodukter som har höjt P-AL-talet i jorden mest och vilka som haft bäst effekt i krukförsöket.

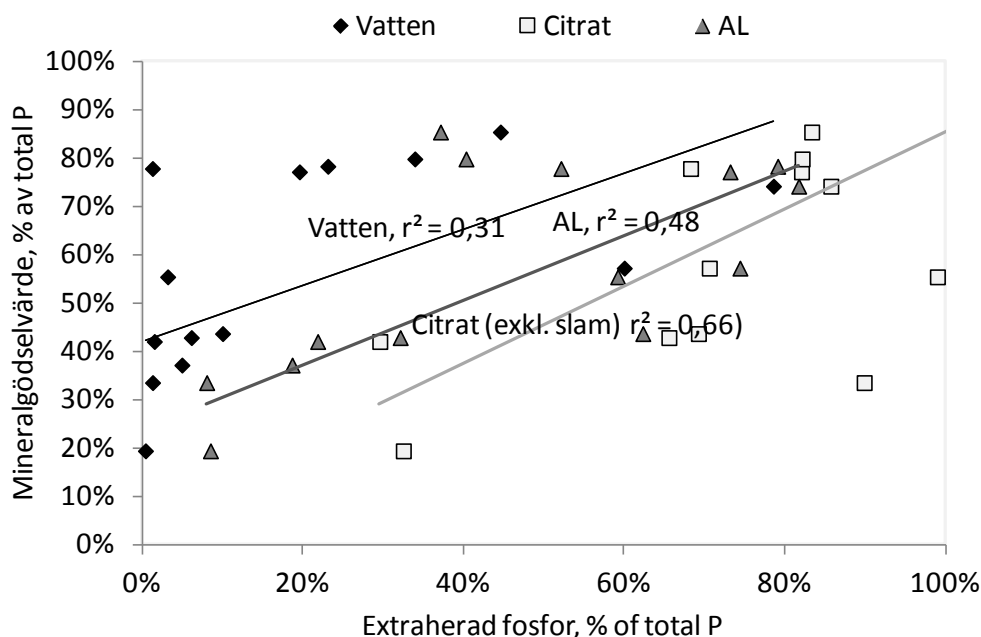


Figur 3. P-AL i inkuberad jord med och utan kalk efter 4 månader samt utan kalk efter 12 månader.

Figure 3. P-AL in incubated soil with and without lime after 4 months and without lime after 12 month respectively.

Fosforextraktioner på gödsel och samband med fosforeffekt

Det fanns ett positivt samband mellan fosforgödslingseffekt mätt från första klippningen (MFE, tabell 6) och andelen fosfor extraherat från restprodukterna (figur 4). Bäst samband blev det med ammoniumlaktat ($r^2=0,48$). Citratextraktion innebar framför allt att en mycket större andel av fosfor från slam extraherades än vad som var växttillgängligt. Togs leden med slam bort fungerade citrat väl så bra som ammoniumlaktat ($r^2=0,66$). Andelen extraherad fosfor var på ungefär samma nivå som mineralgödselvärdet på första klippningen både då man extraherade med ammoniumlaktat och med citrat. Vattenextraktion däremot innebar att allt för liten del extraherades i jämförelse med gödslingseffekten för flertalet produkter. Fosforeffekten från två klippningar (MFE, tabell 7) hade lägre variation och fosforeffekten var i regel högre än vad extraktionsgraden angav. Men det fanns ändå fortfarande en korrelation mellan fosfor extraherad med ammoniumlaktat och mineralgödselvärdet räknat från båda klippningarna. Den var bättre om gödselvärdena endast beräknades från kalkad jord ($r^2=0,49$) än när både kalkad och okalkad jord beaktades ($r^2=0,22$). Tog man bort slammen var ammoniumlaktat och citrat likvärdiga.



Figur 4. Mineralgödselvärde (MFE) från en klippning beroende på extraheringsgrad av fosfor med olika extraktionsmetoder för de femton olika restprodukterna.

Figure 4. Mineral fertilizer equivalents (MFE) (from one cut) depending on different extractions methods for phosphorus in the 15 different waste products.

Diskussion

Fosforeffekt av stallgödsel

Den allmänna rekommendationen i Sverige är att fosfor i stallgödsel har liknande gödselvärde som mineralgödsel (Jordbruksverket, 2013). Detta gäller dock förmodligen främst på lite längre sikt. Resultaten i denna undersökning visade ju att stallgödsel (kycklinggödsel, nötflytgödsel och minkgödsel) bara hade 60-70% så stor effekt som mineralgödsel på kort sikt (MFE, tabell 7), vilket också stämmer med liknande undersökningar i andra länder (Materechera et al., 2009; Petersen et al., 2013). Anledningen till att inte fosfor i stallgödsel kan utnyttjas lika snabbt som mineralgödsel beror sannolikt på att en del är organiskt bundet. Det kan också bero på pH-effekter från stallgödseln som kan verka både positivt och negativt för tillgängligheten, beroende på jordens egenskaper. Men tillgängligheten kan också öka med en bättre placering i förhållande till plantorna (Bittman et al., 2012) eller genom surgörning av gödseln (Petersen et al., 2013). I vår studie placerades mineralgödseln i form av granulerade korn jämt fördelade över ytan på några cm djup, medan stallgödseln blandades om väl med jorden i hela den övre halvan av jordvolymen, vilket kan ha varit en nackdel för växttillgängligheten innan rötterna hunnit penetrera en större del av jordvolymen. Det är också tänkbart att tillförseln av gödsel så långt som två månader före sådd minskade tillgängligheten istället för att öka den, eftersom fosfor som eventuellt var tillgänglig från början kan ha hunnit fastläggas i marken i större grad.

Fosforeffekt av aska

Av askorna hade både havreaskan och vetehalmsaskan förhållandevis god effekt på fosforupptaget (tabell 5), vilket skulle kunna höras samman med att ingen fosfor varit organiskt bunden. Att rapshalmsaskan inte hade samma effekt kan ha berott på dess kalkverkan, som uppenbarligen inte var förmånlig på den här jorden. Aska har i andra studier

visat ganska varierande effekt beroende på ursprung. Yusiharni et al. (2007) fann ganska låg fosforeffekt (MFE) av aska från trä (8-16%) och kycklinggödsel (13-39%), medan Kuligowski et al. (2010) fann bättre effekter av aska från rötrest (76-99%).

Fosforeffekt av avloppsslam

Fosfor i avloppsslam sägs ha olika tillgänglighet beroende på fällningskemikalie (Maguire et al., 2001). I detta sammanhang bör även mängden fällningskemikalie vara relevant, d.v.s. om bara en del av fosfor fällts kemisk, om all fällts kemiskt och om det dessutom finns fällningskemikalie i överskott så att dessutom marken fosfor kan fällas ut efter gödsling. Slammen med järn- och aluminiumfällning i detta projekt hade först sedimentationssteg och biologiska reningsteg innan en behovsanpassad dos av fällningskemikalie tillsattes för att fälla återstående fosfor i vattnet. Det betyder att bara en del av fosfor bör ha varit bunden till järn eller aluminium i slammen. Det skulle kunna förklara den positiva fosforgödslingseffekten, som annars har uteblivit i en del andra studier där förmodligen större mängder fällningskemikalie tillsatts (Krogstad et al., 2005). Däremot är de negativa resultaten för kalkfällt slam tvärt emot andras resultat, som visat bättre effekt av kalkbehandlat slam än annat slam (Linderholm, 1997; Maguire et al., 2001; Krogstad, 2005). Kalkning var ju uppenbarligen inte positivt för fosfortillgängligheten på denna jord och det kalkfällda slammet innehöll mycket stora mängder kalk. På en annan jord hade resultatet kunnat bli annorlunda.

Extraktioner för att bedöma fosfortillgänglighet hos gödsel

Citratextraktion används på handelsgödsel för att ange tillgängligheten av fosfor. Det hade ett visst samband med tillgängligheten även hos restprodukterna, dock ej avloppsslammen. Även i andra studier har tillgängligheten av fosfor hos exempelvis aska visat sig ha ett samband med citratlöslig fosfor (Yusiharni et al., 2007).

Fosfor- och kalkningseffekt

Att det blev olika effekt av just kalkfällt slam och rapshalmsaska beroende på om jorden var kalkad eller inte, beror sannolikt på deras pH-effekt på okalkad jord. Just dessa två led hade en kalkningseffekt, som innebar att pH i de okalkade krukorna blev ungefär samma som i de kalkade (figur 2). Detta var fallet även för struvitblandningen, vilket däremot inte avspeglas i fosforskörden. Däremot hade struvitledet en låg ts-skörd. Man bör dock inte fästa allt för stor vikt vid resultaten av detta led, då dess sammansättning inte är särskilt väl definierad och den tillsattes till jorden mycket senare än övriga gödselmedel.

Slutsatser

- Restprodukter med hög andel av fosfor i mineralform (t.ex. askor och rötrest) gav ett signifikant högre fosforupptag och skörd än många andra produkter vid första klippningen.
- Det var ingen tydlig skillnad i fosforgödslingseffekt på det sammanlagda fosforupptaget och skörden från två klippningar mellan merparten av de olika produkterna.
- I jämförelse med mineralfosfor (P20) var effekten på fosforupptag i de flesta restprodukterna 40-70% sett över båda klippningarna.
- Produkter med kalkverkan, i synnerhet kalkfällt slam, gav sämre fosforgödslingseffekt på skörd med den aktuella jorden, särskilt på kort sikt.

- Extraktion av fosfor med ammoniumlaktat (P-AL) på den färska produkten avspeglade i viss mån fosforgödslingseffekten. Citratextraktion fungerade också, men inte på avloppsslam.

Referenser

- Jansson, S.L. 1958. Tracer studies on nitrogen transformations in soil with special attention to mineralisation-immobilization relationships. *Kungl. Lantbrukshögskolans Annaler*, 24, 101-361.
- Johnston, A.E., Richards, I.R. 2003. Effectiveness of different precipitated phosphates as phosphorus sources for plants. *Soil Use and Management* 19, 45-49.
- Jordbruksverket, 2010. Markkarteringsrådets rekommendationer för Markkartering av åkermark. Jordbruksinformation 19 – 2010.
- Krogstad, T., Sogn, T. A., Asdal, Å. & Sæbø, A. (2005). Influence of chemically and biologically stabilized sewage sludge on plant-available phosphorus in soil. *Ecological Engineering* 25, 51-60.
- Kuligowski, K., Poulsen, T.G., Rubæk, G.H., Sørensen, P., 2010. Plant-availability to barley of phosphorus in ash from thermally treated animal manure in comparison to other manure based materials and commercial fertilizer. *European Journal of Agronomy* 33, 293–303
- Linderholm, K. 1997 Fosfors växttillgänglighet i olika typer av slam, handelsgödsel samt aska. VA-FORSK rapport 1997-6. Stockholm: VAV AB
- Maguire, R.O., Sims, J.T., Dentel, S.K., Coale, F.J., & Mah, J.T. 2001. Relationships between biosolids treatment process and soil phosphorus availability. *J. Environ. Qual.*, 30, 1023-1033.
- Materechera, S.A., Morutse, H.M. 2009. Response of maize to phosphorus from fertilizer and chicken manure in a semiarid environment of South Africa. *Expl Agric.* 45, 261–273
- Petersen, J., Lemming, C., Rubæk, G., Sørensen, P. 2013. Side-band injection of acidified cattle slurry as starter P-fertilization for maize seedlings. Proceedings from 15th RAMIRAN International Conference, Versailles, France, 3-5 June 2013.
- Yusiharni, B.E., Ziadi, H., Gilkes, R.J., 2007. A laboratory and glasshouse evaluation of chicken litter ash, wood ash and iron smelting slag as liming agents and P fertilizers. *Australian Journal of Soil Research* 45, 374–389.

I denna serie publiceras forsknings- och försöksresultat från institutionen för mark och miljö vid Sveriges lantbruksuniversitet.

In this series research results from the department of Soil and Environment at the Swedish University of Agricultural Sciences are reported.

Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för mark och miljö

Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Soil and Environment

Box 7014
SE-750 07 Uppsala
<http://www.slu.se/mark>