

Fosforläckage efter stallgödsling beroende på fosforstatus

Barbro Ulén och Annika Svanbäck

BAKGRUND

Jordbruksmarken svarar för ungefär hälften av all belastning av fosfor på Östersjön (Naturvårdsverket, 2008). Markerna är för det mesta belägna i ett flackt landskap som är dränerat med öppna diken eller dräneringssystem. Därför är vattenflödena under markytan av största vikt för fosfortransporten och nedströms vattenkvalité (Turtola och Jaakkola, 1995; Ulén, 1995). En nyckel till att utvärdera strategier för att minska de diffusa fosforförlusterna från svensk jordbruksmark är att förstå och kontrollera det vertikala läckaget av fosfor genom marken genom vilken fosfor från markytan förs till dräneringsledningarna (Ulén m.fl., 2007). Snabba förbiflöden (preferentialflöden) via markens porer och mer eller mindre vertikala kanalsystem är en mycket viktig mekanism för detta läckage (Jensen m.fl. 1998; Stamm m.fl., 1998; Simard m.fl., 2000). Från finkorniga lerjordar med utbrett makropor-system har man också påvisat en stor fosforförlust (Djodjic m.fl., 1999; van Es m.fl., 2004). Tidigare ansåg man att stora fosforläckage var begränsade till grovkorniga och organogena jordar.

I Sverige rapporterade Börling m.fl. (2004) tydliga samband mellan fosfor extraherad i sur ammoniumlaktat (P-AL), dvs. det vanliga jordtestet i Skandinavien, och fosfor extraherad i 0,01 M CaCl₂. Den senare metoden föreslogs som en alternativ indikator på fosforläckage. I en annan studie från ett avrinningsområde med god fosforbalans fann Ulén m.fl. (2011) att P-AL var en trovärdig riskindikator för jordprofiler med högt lerinnehåll. En utvärdering med ostörda jordprofiler från en serie svenska jordar med varierande jordtyp visade dock inte på något samband mellan P-AL och detekterad fosfor i läckaget (Djodjic m.fl., 2004).

När man gödslar med stallgödsel kan fosfor från vatten som infiltrerat i marken följas av kortvariga men kraftigt förhöjda fosforkoncentrationer i det avrinnande vattnet. Sådan snabb mobilisering och överföring av fosfor till läckagevattnet är väl dokumenterad (Geohring m.fl., 2001; Kleinman m.fl., 2005; 2009), och det mesta av fosforläckaget från stallgödseln sker under det första läckagetillfället efter spridningen (t.ex. Chardon m.fl., 2007). I allmänhet kommer den mesta fosfor från stallgödselns lösta fosfor. Kang m.fl. (2011) fann att halten vattenextraherad fosfor i den stallgödsel och mineralgödsel som applicerades till jordkolonner var väl korrelerade till löst reaktiv fosfor i läckaget. De sammantagna effekterna av tillförd stallgödsel, mineralgödsel och fosforegenskaperna som beror av den gamla "historiska" uppgödslingen är emellertid okända.

Tabell 1. Fosforgödsling i relation till bortförd med skörden och medelvärdet för fosforgödsling i absoluta tal som medelvärde för de båda odlingssystemen

Fosfornivå	Fosforgödsling		Fosforgödsling	
	Fjärdingslöv, Ekebo	Bjertorp, Klostergården, Högåsa	System med stallgödsel	System utan stallgödsel
	kg ha år ⁻¹		kg ha år ⁻¹	
Låg*	0	0	10	0
Medium	Ersättning	Ersättning	18	12
Hög	Ersättning + 15	Ersättning + 15	39	33
Mycket hög	Ersättning + 30	Ersättning + 30	53	46

*Fem ton stallgödsel varje år i det stallgödslande systemet

Tabell 2. Fosforkoncentrationen i laktatextrakt (P-AL) vid olika fosfornivåer, inklusive medium (Med) och mycket (Mkt) hög, i bördighetsförsöken. Resultat från matjordsprov (0-20 cm djup) tagna under hösten 2007

	Odlingssystem med stallgödsel				Odlingssystem utan stallgödsel			
	Låg	Med	Hög	Mkt hög	Låg	Med	Hög	Mkt hög
	mg 100 g ⁻¹							
Bjertorp	1,9	2,4	7,0	10,1	1,8	2,8	8,7	12,3
Ekebo	3,6	7,0	16,4	23,6	2,4	4,6	10,9	17,3
Fjärdingslöv	2,6	5,8	13,2	20,8	1,5	2,3	11,1	18,3
Högåsa	2,9	4,2	8,0	13,3	1,8	2,6	8,4	11,6
Klostergården	2,3	2,9	10,0	12,1	3,4	4,7	11,7	15,2
Medeltal	2,7	4,4	10,9	16,0	2,1	3,4	10,1	14,9

Avsikten med den här studien var att undersöka vilken roll fosfor i jorden (analyserad som P-AL) och gödselspridning har på fosforläckaget från dominerande svenska jordbruksjordar. Specifika samband vi studerade var; i) relationen mellan P-AL och fosforläckage; ii) förändringar i fosforläckaget efter applicering av stallgödsel till jordar med varierande P-AL tal och iii) interaktionen mellan jord, växtodlingssystem och fosforläckage.

MATERIAL OCH METODER

Jordar De svenska bördighetsförsöken startade mellan 1957 och 1969, och består av 12 försök belägna över hela landet som representerar vanliga jordar och växtodlingssystem. Jordkolonner togs ut från 5 av de 12 experimentplatserna: Fjärdingslöv - lerig jord (*Oxyaquic. Hapludoll*); Ekebo - lättlera (*Oxyaquic. Hapludoll*); Bjertorp - mellanlera (ej klassificerad); Klostergården - styv lera (*Oxyaquic Haplocryoll*); och Högåsa - lerig jord (*Humic Dystrocryept*). Alla fosforgödselas lika på så sätt att man gödslar i relation till vad man tar bort med skörden (Tabell 1). Det sker på rutor (6.25 m x 20 m) med 2 upprepningar. Skillnaderna i gödsling över tiden har resulterat i tydliga skillnader i fosforstatus inom varje jord (Tabell 2).

Tabell 3. Halter totalfosfor uppsluten i salpetersyra TP-HNO₃, lösta ortofosfater (PO₄-P) samt monostrar (Monoester P) i OH/EDTA-extrakt vid olika fosfornivåer i tre av bördighetsförsöken. Resultat från matjordsprov (0-20 cm djup) tagna under våren 2009 och från led som fått något mera kväve är de som utnyttjades här (data från Ahlgren m.fl.)

	Odlingssystem med stallgödsel				Odlingssystem utan stallgödsel			
	Låg	Med	Hög	Mkt hög	Låg	Med	Hög	Mkt hög
	mg 100 g ⁻¹							
<i>TotP-HNO₃</i>								
Fjärdingslöv	31	39	47	64	30	36	51	62
Högåsa	47	50	68	79	43	50	58	69
Klostergården	53	59	83	87	50	56	77	82
<i>PO₄-P- OH/EDTA</i>								
Fjärdingslöv	7	13	21	32	7	10	20	29
Högåsa	22	26	50	58	18	27	40	46
Klostergården	5	15	36	39	6	10	31	41
<i>Monoester P- OH/EDTA</i>								
Fjärdingslöv	10	12	10	10	10	11	11	11
Högåsa	18	17	17	17	17	17	16	16
Klostergården	21	19	16	13	20	19	16	16

Odlingssystem Odlingen är representerad med två system på varje plats med fyra eller sex års omlopp. I odlingssystemet utan stallgödsel odlas korn, höstvetete, havre och raps, samt vid Ekebo och Fjärdingslöv även sockerbeter. I dessa rena växtodlingssystem kultiveras skörde-resterna in i jorden. I de stallgödselade systemen däremot ingår fleråriga vallar, skörderester tas bort och nötgödsel (30 ton ha^{-1}) tillförs. Detta sker vart 6:e år utom de båda jordarna från södra Sverige (Ekebo lättlera och Fjärdingslöv lerig jord) fått stallgödsel ges vart 4:e år (20 ton ha^{-1}). När man har applicerat stallgödseln har mängden mineralgödsel justerats i förhållande till stallgödselns fosforinnehåll. Skillnaderna i skörd mellan system med stallgödsel och system utan stallgödsel har resulterat i mera fosforgödsling i det stallgödselade systemet (Tabell 1). I det stallgödselade systemet har även 0-ledet fått lite stallgödsel och detta varje år vilket motsvarat 5 ton. Framför allt har skörden blivit olika mellan de båda odlingssystemen. Detta har resulterat i mer fosforgödsling i stallgödselsystemet vilket syns tydligt exempelvis i ersättningsleden med årgivan 18 resp. 12 kg P/ha (Tabell 1). Detta har dock inte alltid medfört en lägre fosforstatus vid växtodling (Bjertorp, och Klostergården; Tabell 2). I genomsnitt har dock det stallgödselade systemen både högre P-AL tal (Tabell 2) och högre totalfosforhalt i jorden (tabell 3), medan halten monoesterar var ungefär lika (tabell 3). Denna organiska form av fosfor som är relativt svårlöslig, var också ganska konstant för alla gödslingsnivåer.

Lysimeterprovtagning och regnsimulering Matjordproven (0-20 cm) är tagna från det icke-stallgödselade växtodlingssystemet och från den låga fosfornivån, men bikarbonatfosfor (Olsen-P) också är kompletterad med prov från det högsta gödslingsledet. Värdet på Olsen-P för Fjärdingslöv är lägre än för Ekebo. Den största förmågan att binda fosfor (dvs. höga värden för X_m och PCB; Tabell 4) finns i jorden från Ekebo. Järn och aluminium analyserad efter oxalat-extraktion var som lägst i Fjärdingslöv och Högåsa. Kolinnehållet i matjorden (0-20 cm) var i medeltal 2,0 % i det stallgödselade systemet och 1,9 % i det icke-stallgödselade systemet beräknat under perioden 2005-2007 (Börjesson, 2012).

Den sista stallgödselgivan i fält gjordes som minst ett halvår innan provtagningen av jordkolonnerna. Fyra intakta jordkolonner togs i båda odlingssystemen och i alla fyra fosfornivåerna från de fem jordarna (totalt 160 st.). Det gjordes efter skörd men före höstens jordbearbetning genom att PVC-rör (20 cm i diameter och 20 cm långa) försiktigt pressades

Tabell 4. Matjordens innehåll av sand, mjåla och lera, pH, kalcium (Ca), maximal sorptionskapacitet (X_m) för fosfor, buffertkapacitet (PBC), järn- och aluminium extraherade i ammoniumoxalat ($Fe_{ox} + Al_{ox}$) och Olsen P.

	Sand	Mjåla	Lera	pH [†]	Ca
	————— (%) —————				(mol _c kg ⁻¹)
Bjertorp	nd	nd	30 [†]	6,6	nd
Ekebo	47 [§]	36 [§]	18 [§]	6,5	7,9 [§]
Fjärdingslöv	62 [§]	24 [§]	14 [§]	7,5	11,3 [§]
Högåsa	77 [‡]	15 [‡]	7 [‡]	5,8	3,8 [‡]
Klostergården	9 [‡]	44 [‡]	48 [‡]	6,9	21,3 [‡]
	X_m [†]	PBC [†]	$Fe_{ox} + Al_{ox}$ [†]	Olsen P ^{††}	Olsen P ^{††}
	(mmol kg ⁻¹)	(kg ⁻¹)	(mmol kg ⁻¹)	(låg)	(Mycket hög)
	————— (mg kg ⁻¹) —————				
Bjertorp	8,8	4,7	111	nd	nd
Ekebo	10,2	5,3	108	11	71
Fjärdingslöv	6,0	3,2	70	3	58
Högåsa	10,0	4,7	116	17	49
Klostergården	6,9	3,9	89	5	90

[†] Börjesson m.fl. (2001), [‡]Kirchmann m fl. (2005), [§] Kirchmann m fl. (1999), # Börjesson (2012), ^{††} Djodjic m fl. (2004), nd = inte bestämd.

ner i jorden med hjälp av ett jordankare och hydrauliskt pumpsystem, alternativt med traktor med frontlastare. Jordkolonnerna lagrades vid 2°C under ungefär sex månader innan de preparerades. Regnsimuleringen utfördes inomhus före och efter tillförseln av stallgödseln. Det konstgjorda regnet bestod av 2/3 avjonat vatten och 1/3 kranvatten med konduktiviteten 15 mS m⁻¹ och kloridkoncentration 13 mg L⁻¹. Bevattningen skedde från sprutmunstycken 1,2 m över mitten av varje kolonn. Intensiteten var 10 ± 3 (mm tim⁻¹) och regnsimuleringen upprepades 3 ggr under 2,5 timmar under tvådagars intervaller (totalt 76 mm). Mängderna är större än vad som kan förväntas under naturliga förhållanden men var nödvändiga för att försäkra sig om tillräckligt mycket läckagevatten. Detta samlades och förvarades vid 6°C före analys. Volymen läckagevatten varierade något mellan jordarna, antagligen beroende på olika hydrauliska egenskaper, men var relativt stabila mellan de olika jordarna. Ekebo lättlera, hade i allmänhet något mindre volym som läckte.

Engångsgiva av stallgödsel Efter en inledande läckageperiod tillfördes nötflytgödsel till det stallgödselade systemet med en mängd som motsvarade 30 ton ha⁻¹. Stallgödsel hämtades vid två tillfällen och jorden från Fjärdingslöv (lerig jord), Ekebo (lättlera) och Bjertorp (mellanlera) fick 30 kg P ha⁻¹ och jorden från Klostergården (styv lera) och Högåsa (lerig jord) fick 21 kg P ha⁻¹. När stallgödseln applicerades togs den översta centimetern av matjorden bort och gödseln spreds över hela ytan (förutom en yttre ring som motsvarande 2 cm närmast kanterna) och jorden lades tillbaka på toppen av kolonnerna. För att stallgödseln skulle jämvikta sig med jorden tillfördes ung. 1,3 mm regnvatten vid två tillfällen under en vecka innan ny regnsimulering tog vid.

Analys Halterna totalfosfor (TP) mättes på ofiltrerat läckagevatten efter sur uppslutning med persulfat och löst reaktiv fosfor (DRP) mättes på filtrerat vatten (0,2 µm Whatman membran filter). Båda analyserna gjordes med molybdenblåmetoden enligt internationell standard (ISO, 2003). Fosfor i jordextrakten (P-AL och Olsen-P bestämdes spektrofotometriskt med induktivt kopplad plasma (ICP).

Ökningen av läckaget i förhållande till ökande P-AL beräknades med hjälp av medelkoncentrationen mellan de tre regnsimuleringarna och kvantifierades genom lutningen för regressionslinjen för varje jord. Statistisk analys gjordes med SAS, version 9.2 (SAS Institut, 2003) med en modellmetod enligt Littell m.fl. (2006) och med signifikansen $\alpha = 0,05$ som standard. Analys av antalet frihetsgrader bestämdes enligt Kenward-Roger med en fast standard för felberäkning. Figurer på residualerna visade på approximativ normalfördelning då beroendevariablerna (koncentrationerna av löst fosfor och totalfosfor) transformerades med den naturliga logaritmen (ln). Modellprogrammet beräknade lutningen och medelvärdet (least square mean) samt gjorde parvisa jämförelser mellan jordarna. För att få en linjär korrelation logaritmerades även värdet på fosforstatus (P-AL-värden). Enligt Akaikes informationskriterier (AIC) förbättrade dessutom logaritmeringen den relativa anpassningen till den statistiska modellen.

Ökningen i fosforläckage efter stallgödsling beräknades genom att subtrahera medelkoncentrationen i läckaget av tre regnsimuleringar före stallgödslingen från medelkoncentrationen av de tre regnsimuleringarna efter gödslingen. Ökningen i fosforkoncentration användes som beroende variabler, och figuren med residualer var tillfredsställande utan logaritmering. De slumpmässiga effekterna var interaktionen mellan jorden och fosfornivån i modellen. Effekterna av gödslingen kan inte separeras från effekterna av jord och beräknas inte i analysen utan är en del av effekten från jordparametern i modellen.

Tabell 5. Medelvärdet av halt (mg L⁻¹) av löst reaktiv fosfor (DRP) och totalfosfor (TP) i läckagevattnet vid olika fosforstatus i jorden före stallgödning och för system med och utan stallgödsel.

Jord	DRP				TotP			
	Låg	Med	Hög	Mkt hög	Låg	Med	Hög	Mkt hög
<i>Odlingssystem med stallgödsel</i>								
Bjertorp	0,01	0,06	0,37	0,77	0,10	0,16	0,47	1,05
Ekebo	0,01	0,02	0,06	0,05	0,05	0,05	0,09	0,09
Fjärdingslöv	0,02	0,06	0,48	0,73	0,05	0,11	0,51	0,90
Högåsa	0,02	0,03	0,19	0,45	0,09	0,12	0,39	1,02
Klgården	0,01	0,06	1,02	1,21	0,05	0,15	1,78	2,14
<i>Odlingssystem utan stallgödsel</i>								
Bjertorp	0,01	0,10	0,85	1,13	0,15	0,23	1,00	1,39
Ekebo	0,01	0,02	0,08	0,16	0,04	0,06	0,12	0,17
Fjärdingslöv	0,05	0,06	0,62	0,84	0,12	0,14	0,73	1,00
Högåsa	0,02	0,03	0,33	1,04	0,06	0,10	0,50	1,41
Klgården	0,01	0,06	0,98	1,32	0,09	0,17	1,38	1,82

RESULTAT OCH DISKUSSION

Fosforläckage beroende på gammal uppgödning Resultaten bekräftar att P-AL talet i jorden har stor inverkan på fosforläckage från matjorden men visade också på skillnader mellan jordarna. Sambanden var olika mellan jordarna men med ett statistisk säkert samspel mellan jord och P-AL. Dessa skillnader kan inte förklaras av texturen och inte heller enbart av de olika jordarnas sorptionskapacitet för fosfor. I en annan studie visade Börling m.fl. (2004) däremot ett tydligt samband mellan P-AL och fosfor extraherad med CaCl₂ för matjordsprov (0-20 cm) från flera av bördighetsförsöken, inklusive de fem jordar som utnyttjats här. De fann att från jordar med hög sorptionskapacitet för fosfor extraherades mindre mängd fosfor med utspädd CaCl₂-lösning än från jordar med låg sorptionskapacitet vid samma P-AL nivå. Andelen löst reaktiv fosfor i förhållande till totalfosfor i läckagevattnet ökade med P-AL-talet (tabell 5). Även Rubæk m.fl. (2010) fick en skillnad i potentiellt fosforläckage mellan jordar från långliggande försök utan någon fosforgödning och med gödning av 30 kg P årligen. I motsats till våra resultat visade däremot en studie med djupa (1,18 m) lysimetrar från bördighetsförsöken (Djodjic m.fl., 2004), att det inte fann något samband mellan P-AL och fosforläckage. Skillnaderna i detta fall antogs bero på alvens egenskaper och att denna kan modifiera vattentransporten och modifiera fosforläckaget i djupare skikt.

Det organiska kolet har i allmänhet varit högre i det stallgödslande odlingssystemet men vi fann inga signifikanta skillnader i fosforläckage mellan de två odlingssystemen. Däremot visade (Eriksson A.K., pers. meddelande) att jordarna med högt potentiellt fosforläckage hade en högre andel expanderbara lermineraller där fosfor kan lagras mellan aluminiumskikten.

Tabell 6. De viktigaste effekterna och samspelet (p-värden) från den statistiska analysen av läckagen av löst reaktiv fosfor (DRP) och totalfosfor (TP) efter stallgödningsspridning vid olika fosforstatus (P-AL) för de fem jordarna

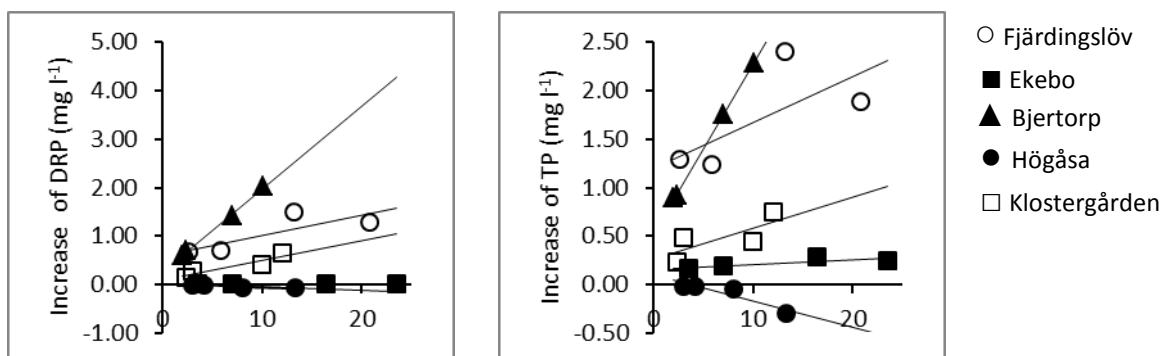
	Ökad DRP	Ökad TP
Jord	0,05	0,03
P-AL	<0,0001	0,003
P-AL*Jord	0,0003	0,009

Inte heller det faktum att det stallgödslade systemet under lång tid fått mera fosforgödsel för att motsvara balans medförde mera fosforläckage. Börlling m.fl. (2001) visade på en positiv korrelation mellan organiskt kol och fosforsorption för några av jordarna i den här studien. Vid stallgödsling menade Boland m.fl., (1994) att fosforsorptionen borde minska som ett resultat av lågmolekylära syror som är nedbrytningsprodukter av det organiska materialet i stallgödseln. Guppy m.fl. (2005) föreslog å andra sidan att ett ökat läckage efter stallgödsling skulle bero på fosfor som kommer direkt från stallgödseln.

Fosforläckage beroende på nyligen tillförd stallgödsel Efter att stallgödsel tillförts ökade läckaget av fosfor proportionsvis mera vid högre P-AL nivåer för Bjertorp (mellanlera), Fjärdingslöv (lerig jord) och Klostergården (styv lera) (Figur 1). I den statistiska utvärderingen visade sig detta genom en signifikant interaktion mellan P-AL och jord (Tabell 6) samt att lutningarna var signifikant högre än noll (Tabell 7). Det fanns även statistiskt säkra skillnader i lutningar och medelvärden mellan jordarna. Vid experimenten med ny stallgödsling fick kolonner från Ekebo (lättilera), Fjärdingslöv (lerig jord) och Bjertorp (mellanlera) mera fosfor än kolonner från Högåsa (lerig jord) och Klostergården (styv lera).

I fyra av de här undersökta fem jordarna ökade stallgödseltillförseln väsentligen risken för höga fosforläckage, speciellt på höga fosfornivåer i jorden. Mekanismen för detta behöver mer studier. Ekebo (lättilera) hade liten ökning och det högsta värdet på sorptionskapaciteten (X_m) medan Bjertorp (mellanlera) hade större ökning i läckage av löst fosfor än man kan förvänta från sorptionsförmågan. Ökningen i fosforläckage från Klostergården (styv lera) var lägre än väntat från det låga värdet för X_m . Jordens kapacitet för fosforsorption kan alltså bara förklara en del av skillnaderna. Eftersom både fosformängd och tillgänglighet för läckaget ökar med ökat P-AL-tal är det mycket viktigt att ha en gödsling som motsvarar bortförseln med skördeprodukterna. Vid den måttliga nivån på fosforstatus var fosforhalterna i läckagevattnet vanligen under $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ (Tabell 5). I genomsnitt innebar tillförseln av flytgödsel en nästan fördubblad läckagerisk. Denna risk var dock i genomsnitt mindre än läckagerisken som följde av att man under 40-50 års tid tillfört 30 kg mer fosfor än vad man fört bort med skörden. En sådan kraftig historisk gödsling tredubblade läckagerisken. Resultaten är därmed liknande den som Liu m.fl. (2013) fann från läckageförsök med jord från SV Halland.

I den statistiska utvärderingen visade sig den tydliga ökningen av läckagrisker efter ny stallgödsel genom att lutningen var högre än noll (Tabell 7). För de flesta jordarna syntes statistiskt säkra skillnader i lutningar och medelvärden för minsta kvadraten (LS).



Figur 1. Relationerna mellan P-AL och ökningen i koncentrationerna löst reaktiv fosfor (DRP) och total fosfor i läckagvattnet (TP) efter tillförsel av stallgödsel.

Tabell 7. Medelvärde (LS-medel) av ökat läckage av löst reaktiv fosfor (DRP) och totalfosfor (TP) med p-värdet och lutningen. Förkortningar av jordarna se föregående tabeller. Värderna med samma bokstav i samma kolumn är inte statistiskt skilda

Jord	Ökning DRP				Ökning TP			
	LS medel	p-value	Lutning	p-value	LS medel	p-value	Lutning	p-value
Bj.	1,7 ^a	<0,0001	0,17 ^a	<0,0001	2,0 ^a	<0,0001	0,17 ^a	0,0006
Ek	0,0098 ^b	0,9	0,00054 ^b	0,9	0,2 ^{b,c}	0,2	0,0047 ^b	0,8
Fj	0,95 ^c	<0,0001	0,042 ^c	0,002	1,6 ^a	<0,0001	0,047 ^b	0,02
Hö	-0,042 ^b	0,6	-0,0076 ^b	0,68	-0,13 ^b	0,3	-0,026 ^b	0,4
Kl	0,44 ^d	0,0002	0,040 ^{b,c}	0,04	0,54 ^c	0,002	0,030 ^b	0,3

SLUTSATSER

Vår studie understryker vikten av att gödsla med precision när man tillför flytgödsel. Vår studie stärker också teorin att man inte bör tillföra mer fosfor vare sig som mineralfosfor eller stallgödsel fosfor än man för bort med skörden. Fosforskorven har i medeltal legat lägre (13-20 kg ha⁻¹) i de här undersökta långliggande försöken än de 22 kg ha⁻¹ som i praktiken tillåts genom reglerna för djurtäthet.

Referenser

- Ahlgren, J., F. Djodjic, G Börjesson & L. Mattsson. 2013. Identification and quantification of organic phosphorus forms in soils from fertility experiments. *Soil Use and Management* (accepted)
- Bolan, N.S., R. Naidu, S Mahimairaja & S. Baskaran, 1994. Influence of low-molecular-weight organic acids on the solubilization of phosphates. *Biol. Fert. Soils* 18: 311-319.
- Börjesson, G. 2012. R3-9001 The Swedish soil fertility experiments [Online]. (Information accessed 24 Aug. 2012).
- Börling, K., E. Otabbong, & E. Barberis. 2001. Phosphorus sorption in relation to soil properties in some cultivated Swedish soils. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 59:39-46.
- Börling, K., E. Otabbong, & E. Barberis. 2004. Soil variables for predicting potential phosphorus release in Swedish noncalcareous soils. *J. Environ. Qual.* 33:99-106.
- Chardon, W.J., G.H. Aalderink, & C. van der Salm. 2007. Phosphorus leaching from cow manure patches on soil columns. *J. Environ. Qual.* 36:17-22.
- Djodjic, F., L. Bergström, B. Ulén, & A. Shirmohammadi. 1999. Mode of transport of surface-applied phosphorus-33 through a clay and sandy soil. *J. Environ. Qual.* 28: 1273-1282.
- Djodjic, F., K. Börling, & L. Bergström. 2004. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content. *J. Environ. Qual.* 33: 678-684.
- Eriksson, A-K. Mark och Miljö, SLU. Muntligt meddelande.
- Geohring, L.D., O.V. McHugh, M.T. Walter, T.S. Steenhuis, M.S. Akhtar, & M.F. Walter. 2001. Phosphorus transport into subsurface drains by macropores after manure applications: Implications for best manure management practices. *Soil Sci.* 166: 896-909.
- Guppy, C. N., N. W. Menzies, P. W. Moody, & F. P. C. Blamey. 2005. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. *Aust. J. Soil Res.* 43: 189-202.
- ISO 15681-1. 2003. Water quality – Determination of phosphate and total phosphorus by flow injection analysis (CFA and FIA). Part 1: Method by flow injection analysis (FIA)

- Jensen, M.B., P.R. Jorgensen, H.C.B. Hansen, & N.E. Nielsen. 1998. Biopore mediated subsurface transport of dissolved orthophosphate. *J. Environ. Qual.* 27: 1130-1137.
- Kang, J., A. Amoozegar, D. Hesterberg & D.L. Osmond. 2011. Phosphorus leaching in a sandy soil as affected by organic and inorganic fertilizer sources. *Geoderma* 161: 194-201.
- Kirchmann, H., J. Eriksson, & S. Snäll. 1999. Properties and classification of soils of the Swedish long-term fertility experiments - IV. Sites at Ekebo and Fjärdingslöv. *Acta Agric. Scand. Sect. B Soil Plant Sci.* 49: 25-38.
- Kirchmann, H., S. Snäll, J. Eriksson, & L. Mattsson. 2005. Properties and classification of soils of the Swedish long-term fertility experiments: V. Sites at Vreta Kloster and Högasa. *Acta Agric. Scand. Sect. B Soil Plant Sci.* 55: 98-110.
- Kleinman, P. J. A., M.S. Srinivasan, A.N. Sharpley, & W.J. Gburek. 2005. Phosphorus leaching through intact soil columns before and after poultry manure application. *Soil Sci.* 170: 153-166.
- Kleinman, P.J.A., A.N. Sharpley, L.S. Saporito, A.R. Buda & R.B. Bryant. 2009. Application of manure to no-till soils: Phosphorus losses by sub-surface and surface pathways. *Nutr. Cycl. Agroecos.* 84: 215-227
- Littell, R., G. Milliken, W. Stroup, R. Wolfinger, & O. Schabenberger. 2006. SAS for mixed models. 2nd ed. SAS Inst., Cary, NC.
- Liu, J., Aronsson, H., Ulén, B. & Bergström, L. 2012. Potential phosphorus leaching from sandy topsoils with different fertilization history before and after pig slurry application. *Soil Use and Manage.* (tillgänglig på nätet).
- Naturvårdsverket 2008. Ingen övergödning - Underlagsrapport till fördjupad utvärdering av miljömålsarbetet. Rapport. 5840, Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, Sweden.
- Rubæk, G. H., C. Kjaergaard, N. Glaesner, G. Heckrath, & J. Magid. 2010. Adapting agricultural practice to minimize P leaching. p. 176. *In International Phosphorus Workshop 6, 27 Sep.-1 Oct. 2010. Seville, Spain.*
- SAS Institute. 2003. SAS/Stat 9.2 User's Guide. SAS Inst., Cary, NC
- Simard, R.R., S. Beauchemin, & P.M. Haygarth. 2000. Potential for preferential pathways of phosphorus transport. *J. Environ. Qual.* 29:97-105.
- Stamm, C., H. Flüher, R. Gächter, J. Leuenberger, & H. Wunderli. 1998. Preferential transport of phosphorus in drained grassland soils. *J. Environ. Qual.* 27: 515-522.
- Turtola, E. & A. Jaakkola. 1995. Loss of Phosphorus by Surface Runoff and Leaching from a Heavy Clay Soil under Barley and Grass Lay in Finland. *Acta Agric. Scand. Sect. B Soil Plant Sci.* 45: 159-165.
- Ulén, B. 1995. Episodic precipitation and discharge events and their influence on losses of phosphorus and nitrogen from tiledrained arable fields. *Swed. J. Agr. Res.* 25: 25-31.
- Ulén, B., M., Bechmann, J., Fölster, H. Jarvie, & H. Tunney H. 2007. Agriculture as a phosphorus source for eutrophication in the north-west European countries, Norway, Sweden, United Kingdom and Ireland: A review. *Soil Use Manage.* 23, Suppl.1, 5-18.
- Ulén, B., F. Djodjic, A. Etana, G. Johansson & J. Lindström. 2011. The need for an improved risk index for phosphorus losses to water from tile-drained agricultural land. *J. Hydrol. (Amsterdam)* 400: 234-243.
- van Es, H. M., R. R. Schindelbeck, & W. E. Jokela. 2004. Effect of manure application timing, crop, and soil type on phosphorus leaching. *J. Environ. Qual.* 33:1070-1080.

PUBLIKATIONER OCH ANNAN RESULTATSFÖRMEDLING

Vetenskaplig artikel

Annika Svanbäck, A., Ulén, B., Etana, A., Bergström, L., Kleinman P J.A. and Mattsson, L., 2013. Influence of soil phosphorus and manure on phosphorus leaching in Swedish soils
Submitted to Journal of Environmental Quality.

Övrig internationell resultatförmedling

Svanbäck, A., Ulén, B., Etana, A., Bergström, L., Kleinman P J.A. and Mattsson, L., 2010. Influence of soil phosphorus and manure variables on phosphorus leaching from Swedish agricultural soils. Oral presentations at 6th International Phosphorus Workshop (IPW6) Sevilla 27 September – 1 October 2010.

Resultatförmedling till näringen och till myndigheter

Motåtgärder mot fosforläckage. Intern seminarium i Greppa Fosforområdet E23. 24/3 2010
(målgrupp: lantbrukare och rådgivare).

'Mitigation of diffuse phosphorus losses from agricultural land'. KSLA seminarium 16/11 2010 (målgrupp: myndigheter rådgivare och representanter för näringen).

Seminarium arrangerat av Markkarteringsrådet 1/2 2011 (målgrupp: Markkemiska laboratorier, Hushållningssällskap, Länsstyrelser, Odling i balans, m.fl.).

Föredrag och efterföljande posterutställning på "Fosfor i fokus – ökad kunskap ger en bra strategi för fosforhushållning" Greppa näringen kurs i Uppsala 20 november 2012.

Planeras: Föredrag Svea-försöken, Brunnby 2013. Notis på greppa näringens hemsida i samband med publicering.