



Sveriges lantbruksuniversitet

Fosforkoncentrationer i yt- mark- och
dräneringsvatten i relation till gödsling
och fosforstatus hos en mjälajord i Västerbotten

*Phosphorus concentrations in surface- soil- and
subsurface water in relation to fertilization
and phosphorus status in a silty soil in Västerbotten*

Lennart Mattsson, Barbro Ulén, Lars Ericson och Göran Johansson



Institutionen för mark och miljö
Department of Soil and Environment

Rapport 8
Report

Växtnäring *Plant nutrition*
Swedish University of Agricultural Sciences

Uppsala 2010
ISBN 978-91-576-9014-2



Sveriges lantbruksuniversitet

Fosforkoncentrationer i yt- mark- och
dräneringsvatten i relation till gödsling
och fosforstatus hos en mjälajord i Västerbotten

*Phosphorus concentrations in surface- soil- and
subsurface water in relation to fertilization
and phosphorus status in a silty soil in Västerbotten*

Lennart Mattsson, Barbro Ulén, Lars Ericson och Göran Johansson



Institutionen för mark och miljö
Department of Soil and Environment

Rapport 8
Report

Växtnäring, *Plant nutrition*
Swedish University of Agricultural Sciences

Uppsala 2010
ISBN 978-91-576-9014-2

Omslagsfoto: Bördighetsförsöket på Röbbäcksdalen, Västerbotten där man förbereder gödsling av småparceller och installerar ytvattentråg och sugsondrar.
Foto: B. Ulén

Innehållsförteckning

Abstract.....	5
Inledning.....	7
Material och metoder.....	8
Bördighetsförsöket.....	8
P-gödslingsförsöket.....	9
<i>Försöksgödsling</i>	9
<i>Provtagning av jord och gröda</i>	10
<i>Provtagning av yt- och markvatten</i>	10
Observationsfältet.....	12
Statistisk bearbetning.....	14
Resultat.....	14
Fosforhalter i olika typer av vatten under olika säsonger.....	14
Fosfor i matjord.....	17
Skörd, fosforbortförsel och gödslingsrespons.....	18
Fosforhalter i vatten relation till gödsling och fosforstatus.....	19
Diskussion.....	23
Fosforhalter i ytvatten.....	23
Fosforhalter i fritt markvatten.....	23
P-AL och P-Olsen i matjord.....	24
Sammanfattning.....	26
Ekonomiskt stöd.....	27
Referenser.....	27
Bilagor.....	30

Abstract

A long-term field trial in which varied fertilizer rates produced a range of soil phosphorus (P) status was used to further evaluate the effect of yearly P fertilization. Based on a split-plot design P in crop, P in soil, P in surface runoff water and P in free soil water was followed for two years.

The measurements were carried out in a long-term field experiment where the applications of P were replacement, replacement + 20 kg P ha⁻¹ and replacement + 40 kg ha⁻¹ annually. This experiment was started in 1969. By dividing a number of plots in four sub-plots and apply phosphorous in four different levels ranging from 0 to 60 kg ha⁻¹ a combination of yearly applications and phosphorous levels in the soil was created, in all 12 combination in two replicates.

Concentrations of dissolved reactive phosphorus (DRP) varied between 0.05-1.56 and the concentrations of non-reactive phosphorus (NRP) between 0.06-3.60 mg L⁻¹ in surface water collected from near-soil surface troughs installed in the experimental plots. The first summer, 2007, the crop was 2nd year ley and the next summer it was potatoes. The troughs were removed in spring 2009.

The main part of phosphorus applied as mineral fertilizers could not be detected neither in the crop nor as a significant increase in the topsoil. Average concentration of DRP increased along with increased mineral P addition to the potato crop as well as with the original P fertilizer applications of the soil. These applications had built up different levels of soil P status.

Concentrations of DRP in surface water from a nearby field that had been observed for more than 30 years, on average 0.05 mg L⁻¹, were generally lower than from the experimental plots. From this observation field, with an average P-AL value of 10 mg 100 g⁻¹ topsoil, the surface water concentrations of NRP (average 0.14 mg L⁻¹) was also lower than the average NRP concentration in surface water from experimental plots (0.6 mg L⁻¹) with P-AL values between 6 and 12 mg 100 g⁻¹ soil.

Concentrations of surface water from unfertilized experimental plots were higher, on average 0.13 mg L⁻¹ DRP and 0.18 mg L⁻¹ NRP, compared to surface water collected from the observation field, on average 0.04 mg L⁻¹ DRP and 0.14 mg L⁻¹ NRP. In free soil water from suction probes in the small unferti-

lized experimental plots concentrations were higher on average 0.052 mg L^{-1} DRP and 0.041 mg L^{-1} NRP, compared to drainage water from the observation field (0.006 mg L^{-1} DRP and 0.021 mg L^{-1} NRP). Soil water derived from the suction probes, probably reflects quite stationary water from larger soil pores. No significant seasonality was observed in P concentrations from the free soil water in contrast to the P concentrations from surface water from both sites.

The subsoil of the site is very acid, which probably is the reason for the observed high concentrations of sulfur and low concentrations of phosphorus in the drainage water from the observation field. Phosphorus concentrations, on average 0.007 mg L^{-1} DRP and 0.025 mg L^{-1} NRP, were even lower than in the soil water from the upper horizon of the plot experiment, based on extraction with suction lysimeters probes.

It was not evidenced that applied P could be measured as increased P-test values using the AL-extraction method. This was also the case for Olsen P yet rates of 60 kg P ha^{-1} were applied. A minor increase in P uptake in the ley and in the potatoes, respectively was observed with increased P applications. However, the difference between 60 kg P applied and nil was only a few kg. Most of the added P was not accounted for in the harvested crop.

Inledning

Den antropogena, dvs. den av människan orsakade eutrofieringen av vatten, är ett miljöproblem som har fått stor uppmärksamhet på senare år, inte minst när det gäller Östersjön. Fosfor är ofta nyckelfaktorn som tillsammans med andra parametrar styr tillväxten av oönskade blågröna bakterier och toxiska alger. Med koncentrationer i ytvatten på $0,01 \text{ mg L}^{-1}$ löst reaktiv fosfor (DRP) eller vid $0,02 \text{ mg L}^{-1}$ totalfosfor sker det ofta eutrofiering (Hesketh & Brookes, 2000).

Jordbruksmarken står för den större delen av fosfortransporten till sjöar och hav i samtliga EU-länder, åtminstone i de fall där man förbättrat reningen av avloppsvatten. Ytavrinning tillsammans med avrinning via dräneringssystemen har också beräknats vara den huvudsakliga vägen för fosfortransport från jordbruksmarken runt Östersjön (Helsinki Commission, 2009). Många faktorer som styr denna transport, till exempel klimat och typ av jord, är svåra eller omöjliga att kontrollera. Däremot är fosforgödslingen en kontrollerbar faktor som på både kort och lång sikt kan påverka fosforförlusterna. En hög koncentration av växttillgänglig fosfor i jorden kan leda till ökad risk för fosforläckage genom markprofilen och via dräneringssystem, speciellt av DRP. Fosfor kan dessutom på sikt transporteras ner i markprofilen till djupare lager (Börling et al., 2004).

Från och med mitten av 1900-talet till 1970-talets slut tillfördes ofta betydligt mer mineralfosfor än vad som fördes bort med skörden. I djurtäta områden är detta förhållande fortfarande vanligt. Detta har lett till att fosfor ackumulerats i matjorden (Andersson et al. 1998). Hälften av den svenska åkerarealen har ett P-AL-värde över $6 \text{ mg } 100^{-1} \text{ g jord}$ (Eriksson et al. 2010). Detta värde ligger inom P-klass III (4-8 mg), som är den centrala av de fem klasserna. Då marken uppnått en hög fosfornivå kvarstår denna ofta under lång tid trots en minskad fosforgödsling (Mattsson, 2002).

Baserat på studier av bl. a. de svenska observationsfälten har inte heller fosforförlusterna via vatten visat någon tendens att minska (Ulén et al., 2001; Djodjic & Bergström, 2004).

De höga fosfornivåerna i den odlingsbara jorden har gjort det nödvändigt att studera förhållandet mellan koncentrationerna av fosfor i ytvatten, markvatten

och dräneringsvatten från jordbruksmark i relation både till jordens fosforinnehåll och till fosforgödslingen.

I föreliggande rapport studeras fosforupptaget hos grödan och hur träffsäkra gödslingsrekommendationer för fosfor är för en jord med olika fosforstatus. I detta sammanhang är jämförelser mellan olika metoder för att bestämma fosforstatus i matjorden också relevant.

Rapporten ska också ge en bild av säsongsvariationerna av fosforkoncentrationerna i ytvatten, fritt markvatten och dräneringsvatten och av förlusten av fosfor via ytvatten och dräneringssystem.

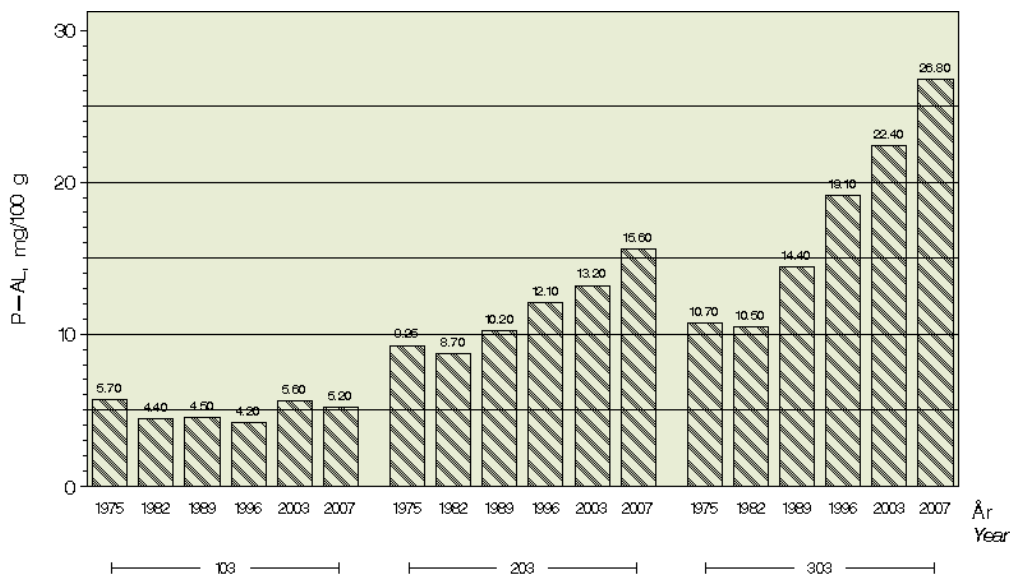
Studierna genomfördes i ett långliggande bördighetsförsök vid Röbbäcksdalen (Carlgren & Mattsson, 2001). Dessutom görs jämförelser med en 30-årig mätserie av fosforkoncentrationerna i avrinnande vatten från ett intilliggande observationsfält. Detta fält (14 AC) ingår i Naturvårdsverkets stationsnät för långsiktig övervakning av hur förändrade odlingsåtgärder påverkar kvaliteten på det avrinnande vattnet. Yt- och dräneringsvattnet är uppdelat i separata system varifrån växtnäringstransporten beräknas var för sig.

Material och metoder

Bördighetsförsöket

Bördighetsförsöket anlades 1969. Jordarten är måttligt mullhaltig lerig mo (Mattsson, 1979). Enligt internationell klassificering en ”silt loam”. Växtföljden domineras av korn och vall (bilaga 1). Fältet är ytplanerat enligt ett tegsystem med ryggar och svackor för effektiv ytvattenavledning. Tegryggarna lutar omkring 8% ner mot svackorna.

Försöket består av 30 försöksled med N-, P- och K-gödsling arrangerade i 2 fullständiga block. Bruttorutornas storlek är 90 m². Fosfor har alltsedan starten tillförts enligt principen: Årlig ersättning som motsvarar bortförsl av P med skörden (kod 103); ersättning + 20 kg P ha⁻¹ år⁻¹ (203) samt ersättning + 40 kg P ha⁻¹ år⁻¹ (303). Detta har skapat rutor med låg, medel respektive hög fosforstatus med P-AL-värden våren 2007 på 5, 16 respektive 27 mg 100g⁻¹ jord (figur 1).



Figur 1. Utvecklingen i P-AL i matjorden i bördighetsförsöket. 103, 203 och 303 avser respektive ersättning P, ersättning + 20 P och ersättning + 40 kg P ha⁻¹ år⁻¹, N-givan är i medeltal 73 kg ha⁻¹.

Figure 1. Development in AL-extractable P, mg 100 g⁻¹ soil in the soil fertility experiment. Groups 103, 203, 303 denotes replacement with P, replacement + 20 and replacement + 40 kg P ha⁻¹ yr⁻¹, respectively, average N-rate 73 kg ha⁻¹.

P-gödslingsförsöket

Försöksgödsling

Rutorna med de tre aktuella nivåerna i fosforstatus i båda blocken delades i 4 småparceller om 22,5 m². Försökstekniken innebar att ett P-gödslingsförsök med stigande mängder P kunde anläggas på jordar med starkt varierande P-status. Sålunda skapades tolv kombinationer i en split-plot design av fosforstatus och fosforgödsling, alla med två upprepningar, dvs. 24 smårutor.

Fosfor i P20 tillfördes i givor motsvarande 0, 10, 35 eller 60 kg P ha⁻¹. Gödseln spreds som övergödsling på våren till vallen den 10/5. Till potatis år 2 brukades gödseln ner den 13/6 före sättnig, som skedde den 16/6.

Övrig gödsling, lika för alla smårutor var 80 kg ha⁻¹ kväve till vallen i en giva och med 116, 161 respektive 140 kg ha⁻¹ kalium i respektive låg, medel och hög P-statusledet. År 2 när potatis odlades var N-gödslingen 60 kg ha⁻¹ och K-

gödslingen 104, 145 och 126 kg ha⁻¹. Växtföljd och skördar i de aktuella försöksleden från starten 1969 till 2006 har listats i bilaga 1.

Provtagning av jord och gröda

Matjorden (0-20 cm) provtogs före gödslingen våren 2007, samt vår och höst efter skörd 2008. Samtliga prover analyserades med avseende på pH_{H2O}, P-AL (Egnér et al. 1960) och Olsen-P (Olsen et al. 1954).

Vallen 2007 skördades vid två tillfällen och P-halten i grönmassan bestämdes i båda delskördarna. Knölskörden och P-halt i knölnarna bestämdes och för både vallen och potatisen beräknades P-bortförseln.

Provtagning av yt- och markvatten

Ytvatten från de 24 småparcellerna samlades upp med hjälp av s.k. Gerlachtråg (Ulén 1997, Ulén & Kalisky, 2005). Dessa var nedgrävda med en så ostörd anslutning mot markytan som möjligt så att de samlade upp ytvatten från drygt 0,5 m² med ungefär 1,5 m sluttning. Innan vallen bröts hösten 2007 togs ytvatentrågen upp för att sedan åter grävas ned efter sättningen av potatis våren 2008. Potatisfårorna löpte vinkelrätt sluttningen mot uppsamlingsstrågen. Potatisfårorna gjorde att ytvavrinningen till trägen blev mindre effektiv än då marken var vallbevuxen. Trågen var installerade under hela den efterföljande vintern tills snösmältningen var över våren 2009.

Provtagning av vattnet i trägen skedde så snart som möjligt efter det att ytvavrinning förekommit. Tre av provtillfällena kom då att representera snösmältnings- och tjällossningsperioder, tre provtillfällen ytvavrinning på senhösten medan resterande fem provtillfällen representerade kraftig nederbörd under de båda växtsäsongerna 20 maj-31 augusti.

Fritt markvatten provtogs genom vakuumextraktion från stationära sugsondrar av glas (Eijkelkamp, Nederländerna). De installerades till ett djup av 28 cm med 45° vinkel mot markytan med hjälp av jordborr. En sugsond bestod i den nedre delen av en sugkopp med 2 cm diameter och längden 7 cm inbyggda i den 37 cm långa sonden, som upptill var försedd med slangar för provtagning, ventilation och vakuumkontroll. Runt sugkopparna fanns ett skyddsskal med filter (porstorlek 0,5 mm) av polyamid. Före installationen hade filtret jämviktas med en suspension av vatten och jordmaterial från borrhålet. Detta gjordes för att porerna i skyddsskalet skulle fyllas med jordpartiklar och åstadkomma en god förbindelse mellan sugkoppen och jorden.

Vid provtagningen evakuerades vattnet i sugcellen med hjälp av handpump, som anslöts till en 250 ml stor provtagningsflaska. En första provtagning gjordes omedelbart efter installationen varvid vatten motsvarade minst halva provtagningsflaskan (ungefär fem gånger volymen av sugkoppen) förkastades. Detta gjordes eftersom installationen kan ha inneburit att jordstrukturen ändrats runt sugkoppen och att jorden då också tillförts vatten och syre. I försöket användes 6 sugsondrar som tillsammans representerade fyra olika kombinationer av gödsling och fosforstatus, nämligen låg och hög fosforstatus och gödsling med 0 respektive 60 kg ha⁻¹ P. Provtagning av markvatten gjordes sam-

Tabell 1. pH och koncentrationer av fosfor (P-AL), kalium (K-AL), magnesium (Mg-AL), kalcium (Ca-AL), natrium (Na-AL), aluminium (Al-AL) och järn (Fe-AL) i extrakt med surt ammoniumlaktat (AL), totalfosfor efter uppslutning med salpetersyra (P- HNO₃), totalkväve (Tot-N) och totalt organiskt kol (TOC) samt beräknad grad av fosformättnad i AL-extraktet (DPS-AL) som medelvärden och standardavvikelse på tre nivåer av observationsfältet 14AC

Table 1. pH and concentrations of phosphorus (P-AL), potassium (K-AL), magnesium (Mg-AL), calcium (Ca-AL), sodium (Na-AL), aluminium (Al-AL) and iron (Fe-AL) in extract with acid ammonium lactate (AL), total phosphorus after boiling with nitric acid (P- HNO₃), total nitrogen (Tot-N) and total organic carbon (TOC) together with estimated degree of phosphorus saturation in the AL extract (DPS-AL) as average and standard deviation in three layers of the observation field 14AC

Nivå Layer (cm)		0-20		20-60		60-90	
Parameter		Medel	SD	Medel	SD	Medel	SD
Parameter		Mean		Mean		Mean	
pH		6,1	0,4	5,8	0,5	5,1	0,7
P-AL	mg 100g ⁻¹	10,3	2,7	4,3	1,2	4,0	2,6
K-AL	mg 100g ⁻¹	8,7	3,3	6,6	2,7	7,4	3,1
Mg-AL	mg 100g ⁻¹	4,9	2,1	5,2	3,2	8,3	4,7
Ca-AL	mg 100g ⁻¹	113	59,2	78	35	58	24,5
Na-AL	mg 100g ⁻¹	4,7	1,7	4,6	1,3	6,5	3,9
Al-AL	mg 100g ⁻¹	30,8	13,2	25,4	15,8	26,3	18,9
Fe-AL	mg 100g ⁻¹	78,7	22,9	58,9	16,6	55,9	20,8
P-HNO ₃	mg kg ⁻¹	1000	128	850	78	790	66
Tot-N (%)		0,21	0,07	0,13	0,03	0,11	0,03
TOC (%)		2,2	0,8	1,1	0,57	0,6	0,3
DPS-AL (%)		14	5,4	7,5	3,0	10,7	4,0

tidigt som ytvattentrågen provtogs. Trots en hög halt markvatten vid dessa tillfällen var det ofta problem att erhålla tillräcklig provvolym. Bristande kontakt mellan sugkoppen och jord var en svårighet, en annan var att få en tät anslutning mellan vakuumflaskan och sugsonden. Totalt erhöles 3-6 prover från 5 provtagningsstillfällen under de två åren, sammanlagt 22 markvattenprover. Dessa kom därmed främst att representera växtsäsongen 2007 med vall.

Observationsfältet

Observationsfältet är beläget i nära anslutning till det ovan beskrivna bördighetsförsöket. Fältet, som är 8,36 ha, täckdikades 1952 men är dessutom fortfarande försett med dubbelsidiga konvexa tvärfall s.k. bombering, som samlar upp ytvattnet. Detta förs via ett öppet dike utmed nedre kortsidan av fältet och via en ytvattenbrunn till en mätstation dit också dräneringsvattnet leds (Gustafsson et al., 1984). Flödesregistrering av yt- och dräneringsvattnet sker sedan 1977 med hjälp av två skrivande peglar. Under avrinningsperioderna provtas ytvatten och dräneringsvattnet manuellt var fjortonde dag, men i samband med högflöden varje vecka. Sedan 2010 sker även flödesproportionell vattenprovtagning.

Jordarten är även här en mjälajord med ett inslag av lera, speciellt i den övre delen av fältet. Fältet markkaraktiserades 2005 genom jordprovtagning i såväl matjord som alv på 10 ställen. Matjorden har en måttlig fosforstatus med ett genomsnittligt P-AL-värde på 10,3 (tabell 1) och en koncentration av totalfosfor (P-HNO₃) som motsvarar 0,010% av jordens torrsvikt. Den AL-extraherade fosfor motsvarar därmed omkring 10% av totalfosforinnehållet, vilket är en typisk andel för observationsfält med visst lerinslag i matjorden (Ulén & Eriksson, 2009).

Matjorden hade ett lågt pH-värde vilket är normalt för den här typen av jord i denna del av Sverige. Den nedre delen av alven var mycket sur (pH 5,1). Graden av fosformättnad (DPS) i AL-extraktet, beräknad från molförhållandet av P i förhållande till järn och aluminium (Ulén, 2006), var i genomsnitt relativt lågt eller 14% men låg över 25% i en provpunkt.

Tabell 2 Huvudsaklig gröda på observationsfältet 14 AC, årlig fosforgödsling, ytvattenavrinning från tegdiken (Ytvatten) och dräneringssystem (Dräner.) samt flödesvägda medelkoncentrationer av löst reaktiv fosfor (DRP) och icke-reaktiv fosfor (NRP) i yt- och dräneringsvattnet som medelvärden under perioden 1977/2000 och för varje enskilt år därefter

Table 2. Main crop on the observation field 14AC, mineral phosphorus fertilization ($P \text{ kg ha}^{-1}$), yearly surface runoff from the open ditches and the drainage system (Subsurf.) and flow-weighted average concentrations of dissolved reactive phosphorus (DRP) and non-reactive phosphorus (NRP) in surface and subsurface runoff water in the period 1977/2000 and every individual season thereafter

Period Period	Gröda Crop	Gödsling Fertiliza- tion P kg ha ⁻¹	Avrinning		DRP		NRP	
			Ytvatten Surface runoff mm	Dräner. Subsurf runoff	Ytvatten Surface water mg L ⁻¹	Dräner. Subsurf. water	Ytvatten Surface water mg L ⁻¹	Dräner. Subsurf. Water
77/00	Korn/vall <i>Barley/ley</i>	18	202	122	0,034 ^a	0,014 ^a	0,172	0,014
00/01	Korn <i>Barley</i>	9	381	350	0,024	0,002	0,073	0,012
01/02	Korn/vall <i>Barley/ley</i>	18	200	120	0,077	0,007	0,114	0,038
02/03	Korn/vall <i>Barley/ley</i>	9	73	24	0,063	0,010	0,047	0,037
03/04	Korn/vall <i>Barley/ley</i>	14	91	68	0,133	0,006	0,146	0,081
04/05	Korn/vall <i>Barley/ley</i>	18	169	99	0,013	0,007	0,195	0,019
05/06	Korn <i>Barley</i>	11	110	69	0,019	0,010	0,046	0,018
06/07	Korn <i>Barley</i>	15	264	98	0,038	0,011	0,083	0,023
07/08	Korn <i>Barley</i>	14	351	125	0,023	0,014	0,048	0,017
08/09	Korn <i>Barley</i>							

^{a)} Beräknat från analyser av reaktiv fosfor efter centrifugering (RP_(C)) enligt det för detta vatten funna sambandet:
 $DRP = -0,001 + 0,794 * RP_{(C)}$ (Johansson & Ulén, 2002)

Fältet har bestått av tre skiften och under större delen av observationsperioden har tre mindre långliggande försök legat insprängda i fältet. En större del av fältet har ingått i en växtföljd med treåriga vallar omväxlat med 6 år spannmål, i de flesta fall korn. I två av de långliggande försöken har grödan utgjort monokultur av vall respektive spannmål, medan det tredje försöket haft en växtföljd som i stort sett följer de övriga skiftena. Några år har också mindre delar av fältet odlats med rörlin och hampa. Ett försök med olika blandningar av vallväxter har också funnits på ett av skiftena. Dessa arealer har som regel utgjort mindre än 12% av fältets totala areal. De ingick inte i markkaraktariseringen 2005.

Alla vattenprover har analyserats på vattenlaboratoriet vid institutionen för Mark och Miljö enligt svensk standard (SS-EN). Före analys av löst reaktiv fosfor (DRP) har vattenproverna filtrerats genom membranfilter (Schleicher och Schnell) med en porstorlek av 0,45 µm. Skillnaden mellan totalfosfor och DRP benämns här som icke-reaktiv fosfor (NRP).

Statistisk bearbetning

Fosforförsökets skördedata och jordanalysdata underkastades regelmässigt variansanalys varvid en split-plot modell användes med P-status som huvudfaktor och P-gödsling som bifaktor. Felvariansen skattades med hjälp av de två samrutorna. Då variansanalysen indikerade signifikanta effekter gjordes en medelvärdesjämförelse och signifikanta skillnader ($P < 0,05$) markerades med bokstäver.

Resultat

Fosforhalter i olika typer av vatten under olika säsonger

Fosforhalterna i ytvattentrågen i bördighetsförsöket var mycket höga den första sommaren efter gödningen. 18 dagar efter gödningen uppmättes mellan 0,9 - 712 mg L⁻¹ DRP, 58 dagar efter gödningen 0,3 - 160 mg L⁻¹ och 99 dagar efter gödningen 0,2 - 0,8 mg L⁻¹ DRP. Fortfarande den 15 oktober uppmättes upp till 2 mg L⁻¹ DRP. Efterföljande vår och sommar, efter sättningen av potatis, observerades höga halter (upp till 1,6 mg L⁻¹). I samband med sommarregn (18 augusti 2007 och 11 juli 2008) var halterna också höga från de helt ogödslade

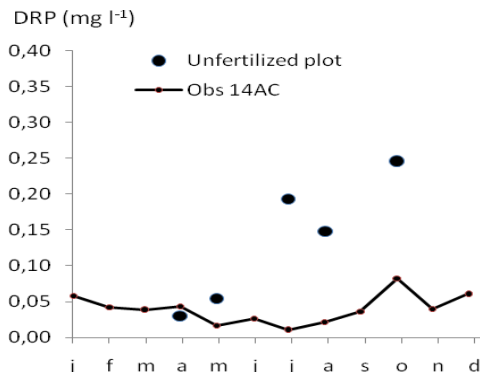
rutorna som hade marktäckning av vall resp. potatisblast (figur 2a) med enstaka värden på upp till 3,5 respektive 0,8 mg L⁻¹ DRP.

I ytvattentrågen från ogödslade rutor var därmed de lösta fosforhalterna höga under sommar och höst (figur 2a) medan den icke reaktiva fosfor (NRP) var som högst i samband med avrinning på våren (figur 2c). I genomsnitt var ungefär hälften av fosfor i löst reaktiv form, men variationen var stor.

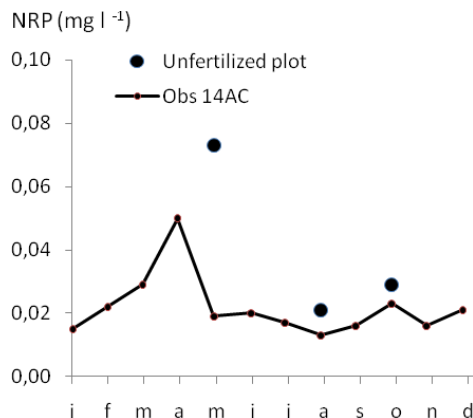
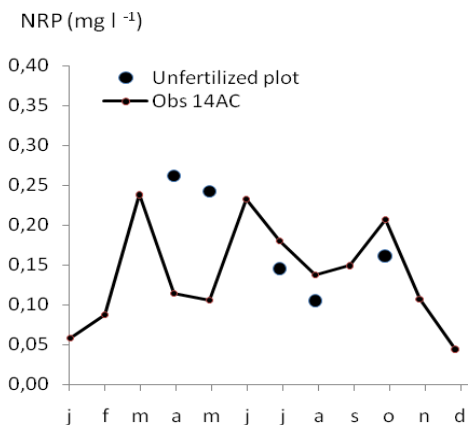
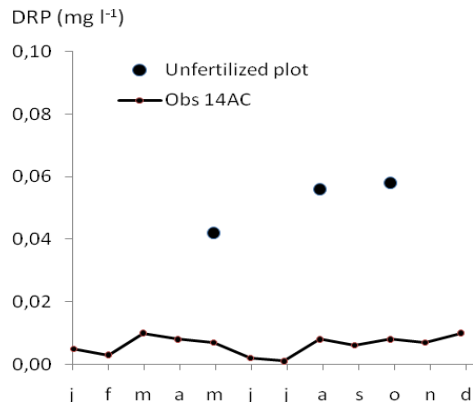
De lösta halterna i ytvatten från observationsfältet har sällan överstigit 0,03 mg L⁻¹ DRP under vegetationsperioden. Vintertid (oktober-april) var däremot halterna tillfälligt förhållandevis höga och i genomsnitt var de högst efter höstregnen i oktober (figur 2a). Halterna fosfor i annan form än DRP var ofta förhållandevis låga i samband med snösmältningen april-maj (figur 2c). Under sommaren och hösten var däremot koncentrationen NRP i ytvattnet från ytvattentrågen av samma storleksordning (ca 0,15 mg L⁻¹) som de som uppmättes i ytvattentråg från bördighetsförsökets parceller.

I genomsnitt var en tredjedel av fosfor i ytvattnet från observationsfältet i löst reaktiv form dvs. en mindre del än från ytvattentrågen. Fosforhalterna i fritt markvatten från sugsondrar var med något undantag ganska måttliga. I genomsnitt var halterna DRP och NRP ungefär lika stora nämligen 0,04 mg L⁻¹. Någon säsongsvariation eller skillnad beroende på markens gödsling eller fosforstatus kunde inte beräknas. Halterna DRP i dräneringsvattnet från observationsfältet var lägre än i markvattnet från bördighetsförsöket (figur 2b), medan halten NRP var nästan lika hög (figur 2d). Andelen DRP i förhållande till totalfosfor var bara omkring en fjärdedel i dräneringsvattnet från observationsfältet.

a) Ytvatten
Surface water



b) Markvatten/dräneringsvatten
Soil water/drainwater



Figur 2. Månadsmedelhalter av löst reaktiv fosfor (DRP) i a) ytvatten från tråg från ogödslade rutor (2007-2009) och från bomberingsdiken från observationsfältet (Obs 14AC) (1976-2009); b) i fritt markvatten från sugsondrar i ogödslade rutor (2007-2009) och i dräneringsvatten från Obs 14AC (1976-2009). Månadsmedelhalter av icke-reaktiv fosfor (NRP) i ytvatten c) från tråg från ogödslade rutor (2007-2008) och från bomberingsdiken från Obs 14AC (1976-2009); d) i fritt markvatten från sugsondrar (2007-2009) och i dräneringsvatten från Obs 14AC (1976-2009). Observera olika skalor.

Figure 2. Monthly average concentrations of dissolved reactive phosphorus (DRP) in surface water from a) surface water troughs from unfertilized plots (2007-2009) and from the patch ditches from the observation field Obs 14AC (1976-2009); b) in soil water from suction probes (2007-2009) and in drainwater from Obs 14AC (1976-2009). Monthly average concentrations of non-reactive phosphorus (NRP) in surface water c) from surface water troughs from unfertilized plots (2007-2008) and from path ditches from Obs 14AC (1976-2009); d) in soil water from 3-6 suction probes (2007-2009) and in drainwater from Obs 14AC (1976-2009).

Tabell 3. P-AL (Egnér et al. 1960) och P-Olsen (Olsen et al. 1954), mg 100⁻¹ g, i matjorden före gödsling startåret samt under våren före gödsling respektive hösten efter skörd år 2. Parvis jämförelse mellan medeltal för P-status. Medeltal följda av samma bokstav inom en kolumn är inte signifikant skilda från varandra
 Table 3. P-AL and Olsen P, mg 100⁻¹ g, in the top-soil before fertilizer application year 1 and in spring and autumn samples, respectively, year 2. Means followed by the same letter in a column are not significantly different

P-status	P-gödsl. P-fert.	P-AL, mg 100 ⁻¹ g			P-Olsen, mg 100 ⁻¹ g		
		Vår 1 Spring 1	Vår 2 Spring 2	Höst 2 Autumn 2	Vår 1 Spring 1	Vår 2 Spring 2	Höst 2 Autumn 2
Låg <i>Low</i>	0	5,2 ^a	4,0	5,0	1,9 ^a	3,4	3,0
	10		4,6	6,3		4,1	5,0
	35		5,3	6,7		3,8	6,8
	60		6,1	5,5		3,9	5,1
	Medel <i>Mean</i>		5,0 ^a	5,9 ^a		3,8 ^a	5,0 ^a
Måttlig <i>Medium</i>	0	15,6 ^b	14,2	12,9	4,4 ^b	9,9	5,8
	10		14,6	13,1		9,9	8,4
	35		15,7	12,0		9,9	6,0
	60		14,8	10,7		9,9	7,3
	Medel <i>Mean</i>		14,8 ^b	12,2 ^b		9,9 ^b	6,9 ^{ab}
Hög <i>High</i>	0	26,8 ^c	26,6	21,2	7,2 ^c	7,8	7,4
	10		28,2	25,0		9,1	8,7
	35		30,0	19,0		9,1	8,5
	60		28,3	20,6		8,9	5,8
	Medel <i>Mean</i>		28,3 ^c	21,4 ^c		8,7 ^c	7,6 ^b
LSD _{0,05}		2,9	2,2	2,2	0,4	1,3	2,2
N		2	8	8	2	8	8

Fosfor i matjord

Tidigare P-gödsling har haft ett klart och tydligt inflytande på P-status (tabell 3). Vårvärdena år 1 både för P-AL och för P-Olsen ökade 3 till 5 gånger i rutor med stark tidigare P-gödsling jämfört med rutor som erhållit ersättningsgödsling. Den nytillförda fosfor i givor från 0 till 60 kg ha⁻¹ påverkade däremot

inte analysvärdena nämnvärt. De aktuella P-givorna tillfördes både våren år 1 (2007) och våren år 2 (2008).

Skörd, fosforbortförsel och gödslingsrespons

Vi antog att effekten av P-gödsling på skörd och fosforupptag skulle minska med stigande P-status och att ett samspel med tidigare P-gödsling skulle kunna visa sig. Detta analyserades, men inga samspel på signifikanta nivåer kunde påvisas.

Vallskörden, uttryckt som torrsubstans reagerade oregelbundet för både P-status och P-gödsling (tabell 4). En positiv effekt i skörd 1 mellan måttlig och hög P-status observerades i medelskördarna. En låg P-giva ledde ofta till en skördedepression, vilket var tydligast i skörd 1 vid måttlig respektive hög P-status. Den totala ts-skörden blev störst vid hög P-status och 35 kg ha⁻¹.

Läget var något annorlunda i potatis. Där erhöles en viss effekt på skördens storlek både för P-status och för P-gödsling. Men inga säkra samspelseffekter erhöles. Vid låg P-status låg knölskörden i medeltal på 18,6 ton ha⁻¹ och ökade statistiskt säkert till 19,3 ton vid måttlig och ytterligare till 21,8 ton vid hög P-status. Det senare värdet var dock inte säkert skilt från de två första (tabell 4). Effekten av P-gödsling var motsägelsefull. Genomgående medförde en låg giva på 10 kg P en skördesänkning jämfört med kontrollen. Någon rimlig förklaring kan inte ges. En giva på 35 kg P gav en skördeökning jämfört med kontrollen, också det genomgående. Störst skörd erhöles som regel när P-givan var 60 kg ha⁻¹.

P-bortförslin i vall ökade påtagligt för stigande P-status eller från 20 till 25 kg P ha⁻¹ i medeltal (tabell 4). Effekten beror framför allt på att halterna ökade både med stigande P-status och med stigande P-gödsling. Antydning till samspel i P-bortförsel mellan P-status och P-gödsling fanns, dock ej på signifikant nivå.

I potatis ökade P-bortförslin med stigande P-status (tabell 4). Störst var ökningen mellan låg och måttlig P-status. Skördedepressionen för en liten P-giva slår igenom i P-bortförslin. Samspel P-status*P-gödsling kunde inte identifieras.

Tabell 4. Ts-skörd vall, kg ha⁻¹ (2 skördar) med P-halt, %, och bortförel av P, kg ha⁻¹, samt knölskörd, t ha⁻¹ friskvikt, P-halt i knölar, %, och bortförel av P, kg ha⁻¹ i knölar. Medeltal följda av samma bokstav inom en kolumn är inte signifikant skilda från varandra

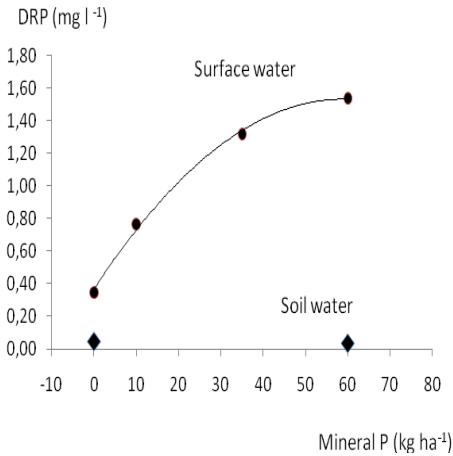
Table 4. Herbage yields of ley, kg ha⁻¹ D.M. 2 cuts, with P concentrations and tuber yield, tonnes ha⁻¹ fresh weight, P concentrations and P off-take, kg ha⁻¹ in herbage and tubers. Means followed by the same letter in a column are not significantly different

P-status	P-gödsl P-fert.l kg ha ⁻¹ .	Vall II Ley II					Potatis Potatoes		
		Sk 1 Hvst 1	Sk 2 Hvst 2	P% 1 % 1	P% 2 % 2	Bortf. Off-take	Skörd Yield	P% %	Bortf. Off-take
Låg <i>Low</i>	0	4900	4080	0,21	0,21	18,9	19,2	0,21	4,8
	10	4910	2660	0,23	0,26	18,1	18,6	0,23	6,4
	35	5430	3190	0,27	0,26	22,9	20,0	0,27	7,5
	60	4770	3290	0,26	0,27	21,3	16,6	0,24	5,6
Medel <i>Mean</i>		5000 ^{ab}	3300	0,24 ^a	0,25	20,3 ^a	18,6 ^a	0,24 ^a	6,2 ^a
Måttlig <i>Medium</i>	0	4780	3350	0,26	0,24	20,1	24,1	0,28	9,9
	10	4500	3990	0,27	0,25	22,1	20,8	0,28	8,4
	35	4830	3570	0,28	0,25	22,3	25,2	0,29	10,4
	60	4460	2770	0,28	0,30	20,7	30,0	0,27	12,0
Medel <i>Mean</i>		4640 ^a	3420	0,27 ^b	0,26	21,3 ^a	25,0 ^b	0,28 ^b	10,2 ^b
Hög <i>High</i>	0	5260	3140	0,28	0,24	22,7	21,8	0,34	11,1
	10	4970	2780	0,29	0,26	21,6	18,4	0,36	10,5
	35	5290	4030	0,32	0,28	28,3	22,4	0,35	11,4
	60	5020	3590	0,33	0,28	26,6	24,5	0,34	12,1
Medel <i>Mean</i>		5130 ^b	3380	0,31 ^c	0,27	24,8 ^b	21,8 ^a	0,35 ^c	11,4 ^b
LSD _{0,05} N		415	n.s.	0,02	0,02	2,2	3,8	0,03	2,1
		8	8	8	8	8	8	7	7

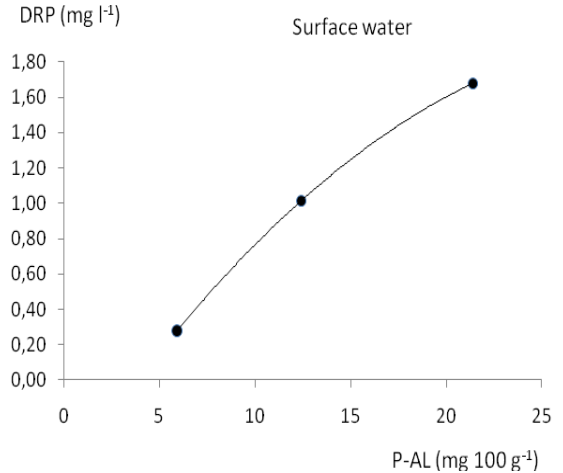
Fosforhalter i vatten i relation till gödsling och fosforstatus

I genomsnitt ökade halten DRP i ytvattnet i relation till gödslingen med mineralgödsel (figur 3a). Koncentrationerna DRP utan någon fosforgödsling var

a) Olika gödslingsgivor
Differing fertilization



b) Olika fosfornivåer i marken
Differing soil P status



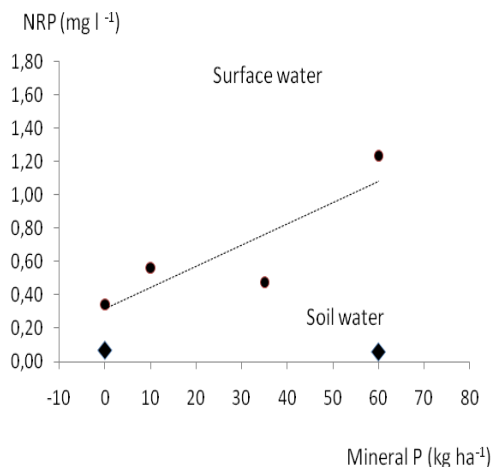
Figur 3. Medelkoncentrationer av löst reaktiv fosfor (DRP) i a) ytvatten (surface water) från parceller vid fyra olika givor med mineralgödsel av fosfor och i markvatten (soil water) från sugsondrar (juli 2007-maj 2009) vid två olika gödslingsgivor samt b) parceller som representerar tre olika historiska gödslingsstrategier och därmed olika fosfornivåer i matjorden.

Figure 3. Average concentrations of dissolved reactive phosphorus (DRP) in a) surface water from plots with four different applications of mineral fertilizers of phosphorus and soil water from suction probes (July 2007-May 2009) and b) plots representing three historic different fertilization strategies, and hence P levels in the topsoil.

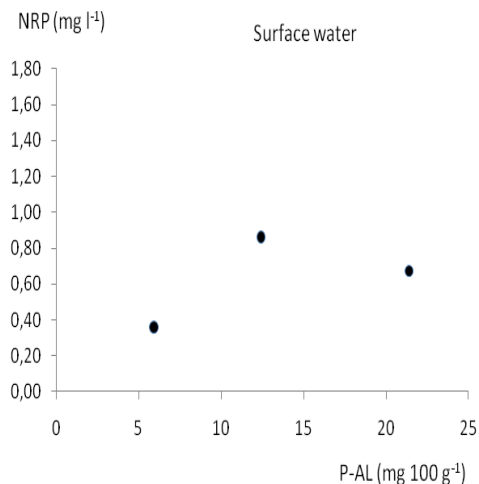
signifikant lägre ($p < 0,05$) än vid mineralgödsling med 60 kg ha^{-1} med T-test. Observationsfältet har gödslats med mellan $9\text{--}18 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ och motsvarande ytvattenkoncentration har nästan alltid legat lägre än i ytvattentrågen, vanligen mellan $0,02$ och $0,06 \text{ mg L}^{-1}$ (tabell 2).

Koncentrationerna DRP ökade också i ytvattnet i relation till fosforstatus i jorden (figur 3b). T-test visade att vid låg fosforstatus (P-AL $6 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$) var halterna signifikant lägre ($p < 0,05$) jämfört med motsvarande halter vid högre fosforstatus (P-AL 12 respektive $21 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$). Observationsfältet hade ett genomsnittligt fosfortal på $10 \text{ mg P } 100 \text{ g jord}^{-1}$. Vid motsvarande P-AL-tal och med en gödsling med 10 kg P ha^{-1} i bördighetsförsöket var fosforhalten i ytvattnet $0,8 \text{ mg L}^{-1}$. Halterna i ytvattnet från observationsfältet, med ett P-AL tal omkring 10 , var däremot betydligt lägre (tabell 2) och motsvarade de uppmätta DRP-nivåerna i det fria markvattnet i gödslingsförsöket.

a) Olika gödslingsgivor
Differing fertilization



b) Olika fosfornivåer i marken
Differing soil P status



Figur 4. Medelkoncentrationer av icke-reaktiv fosfor (NRP) i a) ytvatten (surface water) och i markvatten (soil water) från sugsondrar (juli 2007-maj 2009) med fyra olika givror med mineralgödsel av fosfor och b) i ytvatten som representerar tre olika historiska gödslingsstrategier och därmed olika fosfornivåer i matjorden.

Figure 4. Average concentrations of non-reactive phosphorus (DRP) i a) surface water and soil water from suction probes (July 2007-May 2009) from plots with a) four different applications of mineral fertilizers of phosphorus and b) plots representing three historic different fertilization strategies, and hence P levels in the topsoil.

Koncentrationerna DRP ökade också i ytvattnet i relation till fosforstatusen i jorden (figur 3b). Vid låg fosforstatus (P-AL 6 mg 100 g⁻¹) var halterna signifikant lägre ($p < 0,05$) jämfört med motsvarande halter vid högre fosforstatus (P-AL 12 respektive 21 mg 100 g⁻¹). DRP-halterna i ytvattentrågen där P-AL låg omkring 10 var ungefär 0,7 mg L⁻¹.

Även halten NRP i ytvattnet tenderade att öka med ökad gödsling (figur 4a) men utan signifikanta skillnader. Halterna NRP var i genomsnitt lägst vid låg fosforstatus (figur 4a) men varierade oregelbundet från parceller med högre fosforstatus (figur 4b). Samtliga värden i trägen var högre än de från observationsfältet (tabell 2) men de senare var något högre än motsvarande halter i det fria markvattnet.

Baserat på medelhalterna under tvåårsperioden från ytvattentrågen har skillnaden i fosforstatus haft ett något större inflytande på halten DRP än olika P-

Tabell 5. pH och flödesvägda medelkoncentrationer av de positiva jonerna kalium (K^+), magnesium (Mg^{2+}), kalcium (Ca^{2+}) och natrium (Na^+) och de negativa jonerna vätekarbonat (HCO_3^-) sulfat (SO_4^{2-}) klorid (Cl^-) och nitrat (NO_3^-) ($mmol_c L^{-1}$) samt summan av positiva och negativa joner (Σ^+ och Σ^-) i ytvatten och dräneringsvatten från observationsfältet 14AC under perioden 1977-2008. Löst fosfor har på grund av lågt pH antagits föreligga som PO_4^{2-}

Table 5. pH and flow weight average concentrations of the positive ions potassium (K^+), magnesium (Mg^{2+}), calcium (Ca^{2+}) and sodium (Na^+) and the negative ions hydrogen carbonate (HCO_3^-) sulphate (SO_4^{2-}) chloride (Cl^-) and nitrate (NO_3^-) ($mmol_c L^{-1}$) together with the sum of positive and negative ions (Σ^+ and Σ^-) in surface and drain-water from the observation field 14AC in the period 1977-2008. Dissolved phosphorus was assumed to be in ionic form PO_4^{2-} based on low pH

Parameter		Ytvatten	Dräneringsvatten
<i>Parameter</i>		<i>Surface runoff</i>	<i>Subsurface runoff</i>
pH		6,3	4,9
K^+	($mmol_c L^{-1}$)	0,19	0,26
Mg^{2+}	($mmol_c L^{-1}$)	0,05	0,29
Ca^{2+}	($mmol_c L^{-1}$)	0,16	0,66
Na^+	($mmol_c L^{-1}$)	0,19	1,17
HCO_3^-	($mmol_c L^{-1}$)	0,34	0,08
SO_4^{2-}	($mmol_c L^{-1}$)	0,10	1,22
Cl^-	($mmol_c L^{-1}$)	0,17	0,86
NO_3^-	($mmol_c L^{-1}$)	0,01	0,06
PO_4^{2-}	($mmol_c L^{-1}$)	0,001	0,0002
Σ^+	($mmol_c L^{-1}$)	0,59	2,38
Σ^-	($mmol_c L^{-1}$)	0,62	2,21

gödsling under de senaste två åren. För NRP som uppvisade ett otydligare mönster kan inte motsvarande slutsats dras.

I förhållande till ytvattnet är fosfortransporten via dräneringsvattnet ringa eftersom både vattenvolymer och koncentrationerna är lägre (tabell 2). Speciellt alven är också rik på sulfater och natrium (tabell 5) och på samma sätt är det sura dräneringsvattnet rikt på sulfater och natrium. Vid låga pH-värden (<5,1) kan fosfor, som föreligger som tvåvärt fosfat bindas kemiskt till metaller järn, aluminium och mangan (Brady, 1999).

Diskussion

Fosforhalter i ytvatten

Höga halter av DRP uppmättes i ytvatten från helt ogödslade parceller under växtsäsongen och skulle kunna bero på läckage från vallgrödan respektive potatisblasten. Sådant läckage har t.ex. observerats från gräsbevuxna kantzoner i samband med regn (Uusi-Kämppe, 2005; Stutter et al. 2009). De mycket höga halterna som uppmättes under försommaren 2007 efter det att mineralgödseln ytsprits på vallen skulle kunna bero på att gödselkornen inte lösts upp ordentligt förrän efter mycket lång tid. Uppsamlingsstrågen var installerade i direkt anslutning till markytan och halterna speglar därför inte vad som lämnar fältet och förs ut i vattendrag. Ytvatten kunde också samlas upp i trägen under sommaren utan att det förekom någon större ytavrinning från observationsfältet. I ytvattnet från observationsfältet har man istället uppmätt höga halter DRP (omkring $0,4 \text{ mg L}^{-1}$) samtidigt med höga halter NRP och med en förhöjning av halten suspenderat material ($> 40 \text{ mg L}^{-1}$) framför allt under höstar.

Fosforhalter i fritt markvatten

De ofta ganska låga koncentrationer av DRP, som uppmättes från sugsondrarna, i genomsnitt $0,044 \text{ mg L}^{-1}$ var inte helt oväntad. Med använd teknik mäts koncentrationen av fosfor i ett relativt stationärt porvatten, medan snabba förändringar beroende på kraftigt regn eller preferentialflöden sällan registreras. På samma sätt är det framför allt fosforinnehållet i de större porerna som mäts på bekostnad av de mindre porerna. Metoden är därmed mindre lämplig att använda för att beräkna dynamiska flöden då istället sugplattor och andra tekniker som provtar större ytor är att föredra (Weihermüller et al., 2007).

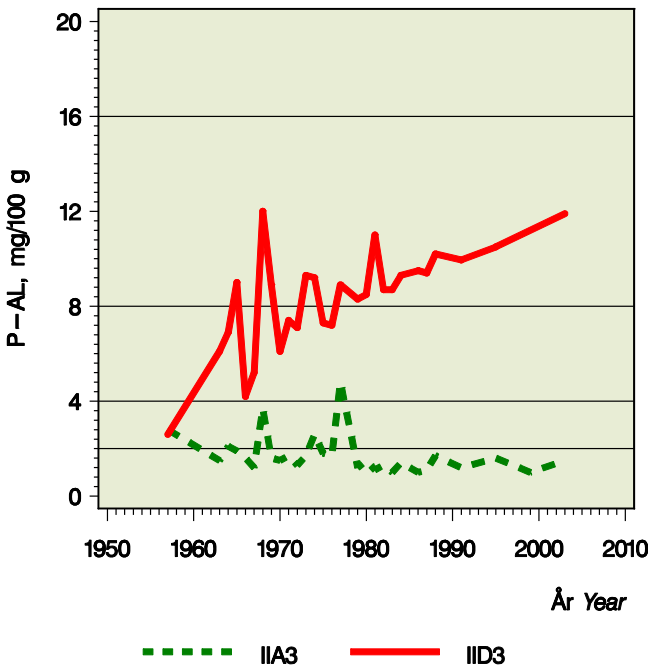
I en studie med årligt upprepade och mycket höga givor med flytgödsel under 27 år och som motsvarade nästan $100 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ observerades däremot koncentrationer på omkring $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ DRP i markvatten ifrån en lerjord (34 % ler) på Irland (Anderson & Xia, 2001). Samtidigt uppmättes låga koncentrationer $0,010 - 0,015 \text{ mg L}^{-1}$ DRP i markvatten som fått flytgödsel med en lägre giva motsvarande $20-60 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$.

I föreliggande studie med mineralgödsel fosfor uppmättes koncentrationer av DRP som låg ungefär mitt mellan de irländska halterna. De skulle därför kunna antyda en viss förhöjd risk för förluster av DRP som både gäller ogödslad och

gödslad vall. Hur en vallgröda anrikas organiskt bunden fosfor på markytan och hur detta påverkar läckagerisken är något som skulle behöva studeras mera ingående.

P-AL och P-Olsen i matjord

När försöket startades beskrev både extraktion med P-AL och med P-Olsen, fosforstatus på ett tillfredsställande sätt. Den nytillförda fosfor var dock inte lika spårbar i analyserna. Detta är troligen en tillfällighet. Tillförd fosfor spåras vanligtvis väl med P-AL (figur 5). Heldragen linje visar P-AL när 30 kg P utöver ersättningsnivån tillförs årligen, medan streckad linje visar hur P-AL utvecklas när P inte tillförs. Men figuren visar också att årsvariationerna kan vara stora.



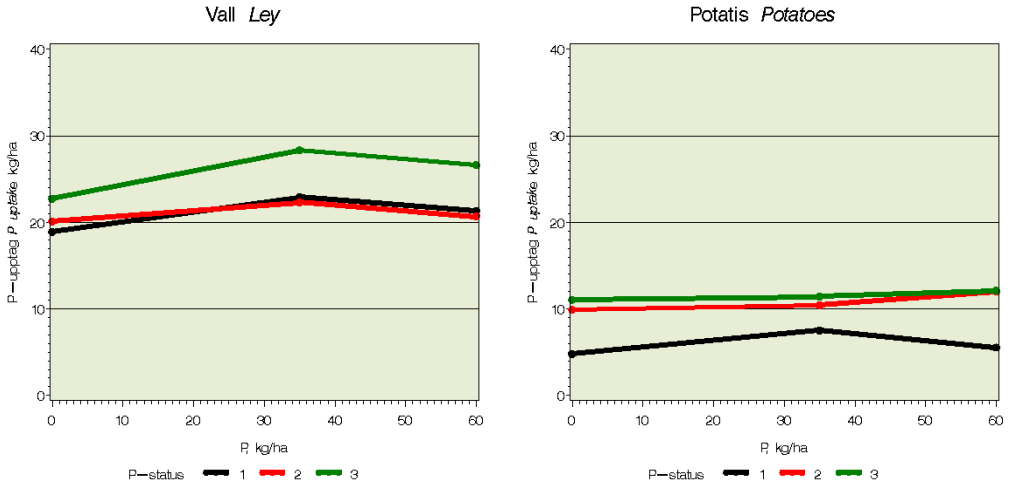
Figur 5. Utvecklingen i P-AL då 30 kg P tillförs årligen (heldragen) utöver ersättningsnivån jämfört med behandling utan P-tillförsel. Normal N-nivå. Provtagning höst efter skörd. (Mattsson opubl. Serie R3-9001, Orup M-län).
Figure 5. Development in P-AL for 30 P kg ha⁻¹ yr⁻¹ (solid) on top of replacement of P compared with the treatments without P. Average N-level. Soils sampled after harvest (Mattsson unpubl. Series R3-9001, Orup M-county).

Det kunde inte entydigt visas att effekten av nytillförd fosfor var beroende av markens P-status. En möjlig orsak kan vara att den lägsta nivån motsvarade ett relativt högt P-AL (6 mg 100⁻¹ g jord) och tydlig brist på P var kanske därför inte att vänta. Hypotesen var annars den att effekten skulle avta med stigande P-status. All gödslingsrådgivning angående P bygger på detta vilket stöds av både äldre (Mattsson et al. 2001) och nyare undersökningar (Sardi et al. 2009). Den förra studien summerar P-gödslingseffekten i äldre svenska fältförsök med fosforgödsling medan den senare utfördes i kärlförsök med pH i jorden mellan 6,5 och 7. En tydlig korrelation mellan P-koncentration i marken och tillväxt erhöles. Korrelationen var starkast för extraktion med P-Olsen (Sardi et al. 2009). Alla mätningar genomfördes på unga, 6 veckor gamla kornplantor.

En skördedepression erhöles genomgående för en låg P-giva på 10 kg. Den var likartad på alla P-statusnivåer. Uttryckt på annat sätt: Oberoende om tillgången på fosfor är måttlig eller mycket god medförde en liten fosforgiva en skördesänkning. Om detta vore ett uttryck för obalans i näringsstatus skulle effekten rimligen förstärkas när P-givan höjdes ytterligare. Men detta observerades inte. Tvärtom erhöles då en positiv effekt på skörden och även på skördens innehåll av P. En rimlig förklaring till skördedepressionen är med andra ord svår att finna. Liknande effekter har dock observerats i andra sammanhang och i andra grödor men under likartade förhållanden (Carlgren & Mattsson, 2001). En teori kan vara att en liten P-giva gynnar tidig utveckling, men att P-tillgången sedan inte är tillräcklig för optimal produktion.

Om den låga givan, som medförde en skördedepression, utesluts och P-upptaget i vallskörd, respektive knölskörd av potatis, plottas mot P-gödsling för varje P-statusnivå, erhöles figur 6.

Vid 0 kg P är värdena rimliga och en spegling av P-status. När P-tillförseln ökar erhöles som väntat den tydligaste P-gödslingseffekten vid låg P-status i potatis upp till 35 kg nivån. Men både i vallen och i potatisen minskade P-upptaget när givan ökades från 35 till 60 kg P. Denna senare nivå var uppenbarligen överoptimal och upptaget stagnerade.



Figur 6. Upptag av P vid stigande P-gödning i jordar med varierande P-status. 1=låg P-status, 2=måttlig och 3=hög P-status
 Figure 6. P-uptake at increasing P rates in soils with varying P status. 1=low, 2=average and 3=high P-status.

Sammanfattning

I ett tvåårigt fältförsök studerades fosforkoncentrationer i yt-, mark- och dräneringsvatten i jord med olika fosforstatus. Effekter av stigande mängder fosfor jämfördes med avseende på skördar och fosforhalt i skörd. Växttillgänglig fosfor i marken bestämdes med P-AL respektive P-Olsen.

Försöket anlades med småparceller med stigande mängder P i ett markbördighetsförsök på Röbbäcksdalen utanför Umeå. Småparcellerna placerades fyra och fyra i rutor som representerade låg, måttlig och hög P-status i två block. Sammanlagt erhöles 24 rutor. Första året odlades vall och året därpå potatis.

I mätningarna varierade koncentrationerna av löst reaktiv fosfor (DRP) mellan 0,05 och 1,56 och koncentrationen icke-reaktiv fosfor (NRP) mellan 0,06 och 3,60 mg L⁻¹ i ytvatten som samlats i tråg nära markytan.

Medelkoncentrationer av DRP ökade med ökad gödning med mineralisk fosfor till potatisgrödan och också med ökad fosforstatus i marken. Beroende på P-status tog potatis upp mellan 5 och 10 kg P ha⁻¹ i knölnarna medan effekten av nytillförd fosfor endast påverkade upptaget med något enstaka kg.

Koncentrationen DRP i ytvattnet från ett intilliggande fält som observerats under mer än 30 år var i allmänhet lägre än från försöksparcellerna, i medeltal 0,05 mg L⁻¹. Från detta fält med ett genomsnittligt P-AL-tal på 10 mg 100⁻¹ g jord var ytvattnets koncentration av NRP (medel 0,14 mg L⁻¹) också lägre än medelkoncentrationen NRP i ytvatten från försöksparcellerna (medel 0,6 mg L⁻¹) med P-AL-tal mellan 6 och 12 mg 100⁻¹ g jord.

I ett begränsat antal parceller var sugsondrar installerade för att fånga upp fritt markvatten. Jämfört med ytvattnet var fosforkoncentrationerna i detta vatten måttligt höga. I genomsnitt var koncentrationerna 0,039 mg L⁻¹ DRP och 0,062 mg L⁻¹ NRP. Det observerades inte någon årsvariation i detta vatten, som antagligen representerar relativt stationärt vatten i större markporer.

I observationsfältet är alven mycket sur vilket återspeglas i höga koncentrationer av svavel och låga koncentrationer fosfor i dräneringsvattnet. Fosforkoncentrationerna var i medeltal 0,007 mg L⁻¹ DRP och 0,025 mg L⁻¹ NRP.

Det kunde inte med säkerhet påvisas att tillförd fosfor ökade P-AL-koncentrationen. Inte heller Olsen-P reagerade särskilt tydligt på att så stora givor som 60 kg ha⁻¹ hade tillförts. En viss ökning i P-upptaget i vall respektive i potatis kunde noteras, men skillnaden i P-upptag om noll eller 60 kg P tillförts var endast några få kg P i både vallgrödan och i potatisen. Den allra största delen av tillförd P kunde alltså inte återfinnas.

Ekonomiskt stöd

Undersökningen har finansierats genom anslag från Stiftelsen Lantbruksforskning.

Referenser

- Andersson, A, Eriksson, J & Mattsson, L. 1998. Fosforupplagringen i svensk jordbruksmark. SNV rapport 4919.
- Anderson, R. & Xia, L. 2001. Agronomic measures of P, Q/I parameters and lysimeter-collectable P in subsurface soil horizons of a long-term slurry experiment. *Chemosphere* **42**, 171-178.
- Brady, N.C. & Well, R.R. 1999. The nature and properties of soils 12th edition. Prentice Hall, New Jersey, 881 pp.

- Börling, K., Barberis, E., Otabbong, E. 2004. Impact of long-term inorganic phosphorus fertilization on accumulation, sorption and release of phosphorus in five Swedish soil profiles. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **69**, 11-21.
- Carlgren, K. & Mattsson, L. 2001. Swedish soil fertility experiments. *Acta Agricultura Scandinavica* **51**, 49-78.
- Djordjic, F. & Bergström, L. 2004. Phosphorus losses from arable fields in Sweden – effects of field-specific factors and long-term trends. *Environmental Monitoring and Assessment* **102**, 103-117.
- Egnér, H., Riehm, H. & Domingo, W.R. 1960. Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Böden. *Kungliga Lantbrukshögskolans Annaler*, **26**, 199-215.
- Eriksson, J., Mattsson, L. & Söderström, M. 2010. Tillståndet i svensk åkermark. Data från 2001-2007. Rapport 6349, Naturvårdsverket/Swedish Environmental Protection Agency (SEPA) 129 pp.
- Hesketh, N., Brookes, P.C. 2000. Development of indicator for risk of phosphorus leaching. *Journal of Environmental Quality*, **29**, 105-110.
- Helsinki Commission (2009) Baltic Sea Environment Proceedings No. 115A, Eutrophication in the Baltic Sea, An integrated thematic assessment of the effect of nutrient enrichment in the Baltic Sea regions. Executive Summary, Baltic Marine Environment Protection Commission, Helsinki, Finland.
- Gustafson, A., Gustavsson, A. & Torstensson, G. 1984. Intensitet och varaktighet hos avrinning från åkermark. *Ekohydrologi* 16, Avdelningen för Vattenvård, Swedish University of Agricultural Sciences, Division of Water Quality, Uppsala ISBN 91-576-1901-8.
- Johansson, G. & Ulén, B. 2002. Observationsfält på åkermark – Avrinning och växtnäringsförluster för de agrohydrologiska åren 1999/00 och 2000/01 samt en långtidsöversikt. Teknisk rapport 68, Avdelningen för vattenvårdslära, SLU.
- Mattsson, L. 1979. Kväveintensitet vid olika markbördighet. Jordanalydata vid försöksstarten. SLU, Inst. för markvetenskap, avd. för växtnäringslära, Rapport 121 (In Swedish, English summary).
- Mattsson, L. 2002. Exploiting P in heavily P dressed fields in Sweden. *Archiv für Acker-, Pflanzenbau und Bodenkunde*. **48**, 577-583.
- Mattsson, L, Börjesson, T, Ivarsson, K & Gustafsson, K. 2001. Utvidgad tolkning av P-AL för mark- och skördeanpassad fosforgödsling. Extended interpretation of labile P for soil and yield related P fertilization SLU, Institutionen för markvetenskap, Rapport 202.

- Olsen, R., Cole, C.V., Watanabe, F.S. & Dean L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circ. 939 USDA, Government printing office: Washington, DC.
- Sárdi, K., Osztoics, E., Csatho, P. & Balázsy, A. 2009. Correlation between soil P test results and P contents of young spring barley studied in long-term experiments. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **40**, 526-537.
- Stutter, M.I., Langan, S.J., & Lumsdon, D.G., 2009. Vegetated buffer strips can lead to increased release of phosphorus to waters: a biogeochemical assessment of the mechanism. *Environmental Science & Technology* **43**, 1858-1863.
- Ulén, B. 1997. Nutrient losses by surface run-off from soils with winter cover crops and spring ploughed soils in the south of Sweden. *Soil & Tillage Research* **44**, 165-177.
- Ulén, B., Johansson, G. & Kyllmar, K. 2001. Model prediction and a long-term trend of phosphorus transport from arable lands in Sweden. *Agricultural Water Management*. **49**, 197-210.
- Ulén, B. & Kalisky, T. 2005. Water erosion and phosphorus problems in an agricultural catchment – Need for natural research for implementation of the EU Water Framework Directive. *Environmental Science & Policy* **8**, 477-488.
- Ulén, B. 2006. A simplified risk assessment for losses of dissolved reactive phosphorus through drainage pipes from agriculture soils. *Acta Agriculturae Scandinavica B Plant and Soil* **56**, 307-314.
- Ulén, B. & Eriksson, A.K. 2009. Observationsfält med lerjord- karakterisering av fosforns löslighet och sorption. Observation fields with clay soils – characterization of soil phosphorus solubility and sorption. *Ekohydrologi, Institutionen för Mark och Miljö rapport 2*, Uppsala ISBN 978-91-86197-59-9.
- Uusi-Kämpä, J. 2005. Phosphorus purification in buffer zones in cold climates. *Ecological. Engineering* **24**, 491-502.
- Weihermüller, L., Siemens, J., Deurer, M., Knoblauch, S., Rupp, H., Göttlein, A. & Pütz, T. 2007. In situ soil water extraction: A review. *Journal of Environmental Quality* **36**, 1735-1748.

Bilaga 1. Växtföljd och skördar i bördighetsförsöket, 1969-2006. Led 103, 203 och 303 innebär ersättning, ersättning+20 respektive ersättning+40 kg P ha⁻¹ år⁻¹, N-giva i medeltal 73 kg ha⁻¹

Appendix 1. Rotation and yields in the soil fertility experiment, 1969-2006. Treatments 103, 203 and 303 denote replacement, replacement+20, and replacement+40 kg P ha⁻¹ yr⁻¹, respectively, average N-rate 73 kg ha⁻¹ yr⁻¹

År Year	Växtföljd Crop rotation Gröda Crop	Skörd Yield, kg ha ⁻¹ Led Treatment		
		103	203	303
1969	VÅRKORN	4310	3810	4220
1970	VALL I	6300	6370	7320
1971	VALL II	6420	5620	6980
1972	VALL III	5830	6420	6420
1973	FODERRAPS	3620	3810	3670
1975	POTATIS BINTJE	18420	20460	21330
1976	VÅRKORN	3560	4390	5420
1977	VALL I	7830	7410	6410
1978	VALL II	7470	7320	7780
1979	VALL III	9330	8920	9960
1980	FODERRAPS	6100	7340	6570
1981	VÅRKORN	3410	3660	3600
1982	MATPOTATIS	17090	19070	20900
1983	VÅRKORN	3750	4380	4730
1984	VALLINSÅDD	3740	3690	3780
1985	VALL I	8470	8600	9230
1986	VALL II	7320	7050	7380
1987	VALL III	8890	8870	9440
1988	FODERRAPS	7730	7060	8270
1989	POTATIS	20980	25280	26230
1990	VÅRKORN	3980	4770	4350
1991	VALLINSÅDD	4500	4440	4440
1992	VALL I	8350	9710	9490

Bilaga 1. (forts.)
 Appendix 1 (contd.)

År Year	Växtföljd Crop rotation Gröda Crop	Skörd Yield, kg ha ⁻¹		
		Led Treatment		
		103	203	303
1993	GRÖNFODER	6050	6230	7050
1994	FODERRAPS	3460	4970	5600
1995	VÅRKORN	4960	5430	5100
1996	POTATIS	28180	33050	33970
1997	VÅRKORN	3040	3370	3900
1998	VALLINSÅDD	3170	3720	3150
1999	VALL I	7610	8650	9080
2000	VALL II	5720	6360	5400
2001	FODERRAPS	6770	7970	8240
2002	KORN	2720	3790	4230
2003	POTATIS	21550	28270	28360
2004	KORN	3240	2550	2440
2005	VALLINSÅDD	2660	2920	2850
2006	VALL I	13100	12850	15900

Rapporter från institutionen för mark och miljö

- 1 2009 Wiklander, G. & Aronsson, H. (Red.) Mark- och miljödagen 2009. Marken och klimatet. *Soil and Climate*.
- 2 2009 Ulén, B. & Eriksson, A. K. Observationsfält med lerjord – karakterisering av fosfors löslighet och sorption. *Observation fields with clay soils – characterisation of soil phosphorus solubility and sorption*.
- 3 2009 Bjäresten, I, Rosén, K & Jönsson, B. Erfarenheter och motåtgärder inom jordbruket i Jämtlands län efter Tjernobylnedfallet, 1986-1992. *Experiences and countermeasures in Jämtland county after Chernobyl fallout, 1986-1992*
- 4 2010 Wetterlind, J. Mätningar med Yara N-sensor för att skatta markens kvävelevererande förmåga. *Using Yara N-sensor to estimate soil nitrogen mineralisation*
- 5 2010 Mattsson, L. Geologiskt ursprung och kornstorlek avgör kalkeffekten. *Origin and size fractions of lime products determine the liming effect*.
- 6 2010 Delin, S., Stenberg, B., Nyberg, A. & Brohede, L. Potentiella mätmetoder för att uppskatta kvävegödslingsvärdet hos organiska gödselmedel. *Potential methods for estimating the nitrogen fertilization value of organic fertilizers*
- 7 2010 Börjesson, G., Menichetti, L. & Kätterer, T. Markbiologisk uppföljning i åkermark. En undersökning av fosfolipidfettsyror (PLFA) som möjlig mikrobiologisk indikator. *Monitoring and assessment of agricultural soils using phospholipid fatty acid (PLFA) analysis*.
- 8 2010 Mattsson, L., Ulén, B., Ericson, L. & Johansson, G. Fosforkoncentrationer i yt- mark- och dräneringsvatten i relation till gödsling och fosforstatus hos en mjäljord i Västerbotten. *Phosphorus concentrations in surface- soil- and subsurface water in relation to fertilization and phosphorus status in a silty soil in Västerbotten*.

I denna serie publiceras forsknings- och försöksresultat från institutionen för mark och miljö vid Sveriges lantbruksuniversitet. Serien spänner över ämnesområdena markkemi, markfysik, markbiologi och vattenvård.

In this series research results from the department of Soil and Environment at the Swedish University of Agricultural Sciences are reported. The reports are issued within the areas biogeochemistry, biogeophysics, soil biology and water quality.