



SJÄLVSTÄNDIGT ARBETE VID LTJ-FAKULTETEN

Trädgårdsingenjörsprogrammet – Marknad
10 hp



Fosforläckage från växtodling – Orsaker och åtgärder

Lotta Huselius
2009

SLU, Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för Landskapsplanering, trädgårds- och jordbruksvetenskap, LTJ

Författare:

Lotta Huselius

Titel:

Fosforläckage från växtodling – Orsaker och åtgärder

Phosphorus losses from crop production – causes of losses and methods to reduce losses

Program:

Trädgårdsingenjör

Huvudområde:

Marknad

Nyckelord:

Fosfor, fosforläckage, fånggröda, kantzonen, gödsling, riskjordar

Handledare:

Håkan Asp, SLU, LTJ-fakulteten

Examinator:

Siri Caspersen, SLU, LTJ-fakulteten

Kurskod:

EX0364

Kurstitel:

Examensarbete för trädgårdsingenjörer

Omfattning:

10 hp

Nivå och fördjupning:

Grund AB

Utgivningsort:

Alnarp

Månad, År:

Mars, 2009

Serie:

Självständigt arbete vid LTJ-fakulteten

Omslagsfoto:

Lotta Huselius

Innehållsförteckning

Sammanfattning	4
Summary	4
Inledning	5
<i>Bakgrund</i>	5
<i>Syfte</i>	5
Fosfors betydelse för växter	5
Växttillgängligheten av fosfor	6
Fosfors kretslopp	8
Förekomstformer	8
Fosforförluster	10
Analyser	10
Gödselmedel	12
Åtgärder för att begränsa fosforförluster på fältnivå	13
<i>Svenska förhållanden</i>	15
<i>Effekter av olika åtgärder</i>	17
Lagstiftning	17
Gödselrekommendationer	18
Sammanfattande diskussion	22
Källförteckning	24

Sammanfattning

Fosfor är nödvändigt för alla växter och tas upp från marken i jonformen H_2PO_4^- (och i viss mån även som HPO_4^{2-}). Växttillgängligheten beror bland annat på pH-värdet i marken. För att tillgodose växternas behov av fosfor tillförs detta genom gödning med handelsgödsel och stallgödsel. Detta leder dock till att fosfor läcker ut från odlingsmarken till intilliggande sjöar och vattendrag och bidrar till eutrofieringen av dessa. I Sverige finns tre typer av högriskjordar som står för de största bidragen till fosforläckaget. Det är lerjordar med stort makroporflöde, siltjordar med erosionsförluster samt sandjordar med dålig sorptionskapacitet. Olika åtgärder används för att begränsa fosforläckaget från jordarna. Hur mycket fosforgödsel som får användas regleras av Jordbruksverket, med rekommendationer att inte gödsla upp högre än till P-AL-klass III. För att begränsa fosforförlusterna via flödet i marken används olika odlingsåtgärder. Gödsel bör inte spridas på vattensjuk eller frusen mark då det leder till stora ytavrinningsförluster. Odling av fånggrödor samt anläggande av kantzoner är metoder som i vissa fall är effektiva, men som under andra omständigheter, till exempel vid upprepad frysning och töande av marken, kan ge motsatt effekt. Det har visat sig att jordtypen är mer avgörande än åtgärderna för hur stora fosforförlusterna blir. Flertalet åtgärder är effektiva på kort sikt men behöver utvecklas för att även fungera långsiktigt.

Summary

Phosphorus is essential to all plants and is taken up from the soil as the ion H_2PO_4^- (and to some extent HPO_4^{2-}). Plant availability depends on, among other factors, the soil pH. In order to provide for plant available phosphorus, it is applied as mineral fertilizers and farmyard manure. However, that causes phosphorus leaching from arable land to surrounding surface waters and lakes and contributes to the eutrofication. There are three types of soils in Sweden that are at higher risk of contributing to phosphorus leakage. There are clay soils with an extended macropore flow, silty soils that are prone to erosion and sandy soils with a low sorption capacity. Different measures are taken to limit the phosphorus leaking from soils. The amount of phosphorus fertilization allowed is restricted by The Swedish Board of Agriculture, with recommendations not to apply P above a soil P status III according to the P-AL scale.

Phosphorus losses through the soil may be limited by different cultivation practices. Fertilizers should not be applied on wet or frozen land since that leads to large losses through surface runoff. Using catch crops and buffer zones around the field are useful in some cases, but can during some circumstances, for instance repeated freezing and thawing. It has been shown that the soil type is more crucial than cultivating measures in determining phosphorus losses. Several of the measures are effective on a short-term basis, but need to be developed to be effective on longer terms.

Inledning

Bakgrund

Det är nödvändigt att effektivisera användningen av fosfor i växtodlingen av flera anledningar. Fosfor är ett makronäringsämne som alla växter behöver och vid brist på växttillgängligt fosfor i marken blir skörden försämrad och reducerad. Fosfor som utvinns ur berggrunden är en ändlig resurs. Dessutom skapar fosforförlusterna från marken ett miljöproblem, då de bidrar till eutrofieringen av våra sjöar och vattendrag, och måste därför begränsas.

Syfte

Syftet med denna uppsats är att utifrån en faktabakgrund om fosfors kretslopp, förekomst av fosfor i marken samt gödselrekommendationer, beskriva hur fosforläckage från odlingsmark till sjöar och vattendrag i huvudsak uppstår, vilka motåtgärder som finns idag och effektiviteten hos dessa.

Fosfors betydelse för växter

Fosfor är ett essentiellt makronäringsämne för alla växter (Ingram et al, 2006). Fosfor ingår som byggsten i energibärarna ATP och ADP, i nukleinsyror, koenzymmer och fosfolipider (Raven et al, 2005). Fosfor har flera viktiga roller i växten och ingår i flertalet organiska föreningar som behövs för flera olika enzymreaktioner (Ingram et al, 2006). Vid för lite upptagbart fosfor i marklösningen uppstår bristsymtom hos växterna. Symtomen kan se olika

ut för olika växtslag. Fosforbrist visar sig främst genom minskad tillväxt hos plantorna, men kan i vissa fall även ge lilafärgning av äldre blad (Ingram et al, 2006). De ovanjordiska delarna av växten växer dåligt i förhållande till rotsystemet. Allvarlig fosforbrist kan leda till att hela plantan får en mörkgrön färg. Eftersom fosfor har hög rörlighet i växten blir bristsymtom först synliga i de äldre bladen, då fosfor omlokaliseras i växten till yngre skott (Raven et al, 2005). Adekvat koncentration i torrsubstans för en frisk planta är 2000 mg/kg, dvs 0,2 % (Raven et al, 2005). Ofta är koncentrationen i plantan högre än nödvändigt.

Växttillgängligheten av fosfor

Växterna tar upp fosfor från marken som negativt laddade fosfatjoner, H_2PO_4^- och HPO_4^{2-} . HPO_4^{2-} tas upp i mycket liten omfattning. Fosfor tas upp ur marklösningen i oorganisk form. Fosforkoncentrationen kan vara hög inne i växtcellerna även om koncentrationen i marklösningen är låg. Detta beror på att cellmembranen i rotcellerna är selektiva på så sätt att växten kan styra vilka näringsämnen som ska släppas in, vilket gör att fosforkoncentrationen kan vara betydligt högre inne i cellerna än vad som skulle kunna antas med hänseende till koncentrationen i marken (Ingram et al, 2006). Fosfors låga löslighet, på grund av att de negativa jonerna kan bindas hårt till järn och aluminium, eller vid höga pH-värden till kalcium, gör dock att den växttillgängliga fosfor ändå är begränsad.

Flera faktorer avgör fosfors växttillgänglighet (Syers et al, 2008). Förutom koncentrationen av fosfor i marken och hastigheten med vilken den frigörs från berggrunden eller från den organiska poolen, är viktiga faktorer storleken och effektiviteten hos växternas rotsystem. Även hur väl fosfor fördelas i marken vid tillförsel genom gödning samt hur fuktig marken är spelar roll. Koncentrationen i marken kan variera kraftigt, men växterna kan ta upp fosfor även vid mycket låg koncentration. Om fosfor frigörs med tillräcklig hastighet från berggrunden kan växterna tillgodose sitt behov genom detta. Vid otillräcklig mängd fosfor i marken påverkar bland annat vädret hur väl växterna kan tillgodogöra sig det fosfor som finns. Torka gör att rotaktiviteten minskar, vilket försvårar upptaget (Syers et al, 2008).

Utbredningen av växternas rotsystem varierar kraftigt mellan olika växter och även beroende på yttre betingelser (Syers et al, 2008). Rötterna får endast kontakt med en mindre del av matjordslagret under en växtsäsong. Växternas möjlighet till upptag av näring är därför beroende av att näringsämnena kommer inom räckhåll för rötterna vilket sker dels genom

massflöde av vatten, dels genom diffusion. Fosforupptaget genom massflöde påverkas av hur mycket vatten som rör sig i marken, hur mycket fosfor som finns i marken och hur mycket vatten växten tar upp. Då fosforinnehållet generellt sett är ganska lågt i marken står massflödet endast för några få procent av näringstillförseln till rötterna. Diffusion, det vill säga att fosfatjonerna rör sig med en koncentrationsgradient från en högre mot en lägre koncentration, är den viktigaste processen för att fosfor ska nå rötterna (Raven et al, 2005). När rötterna tar upp fosfor från jorden närmast omkring, rhizosfären, sjunker koncentrationen där och blir lägre än i omgivande jord, vilket innebär att fosfatjonerna i marken rör sig mot rötterna. Fosfor har dock en mycket begränsad rörlighet i marken bland annat på grund av att fosfor lätt binds till mineraler i jorden. Vid gödsling ger det därför goda resultat att tillsätta fosfor nära växternas rotsystem (SJV, 2008).

Hur utbrett plantornas rotsystem är påverkar effektiviteten av fosforupptaget ur marken (Syers et al, 2008). Utbredda rotsystem med mycket rothår ger en större kontaktyta med marken runt om och därför hög upptagningsförmåga. Det har visat sig att växter med långa rothår tar upp mer näring. Förändringar i rhizosfären som ändrat pH eller utsöndrande av rotexudat (i detta fall organiska syror) kan också förbättra en växts upptagningsförmåga av fosfor (Eriksson et al, 2005).

En mycket stor del av alla landväxter lever i symbios med mykorrhizasvampar som hjälper till vid upptaget av näring (Raven et al, 2005). Svamparnas hyfer växer in i rötterna och bildar en förlängning av dessa, vilket medför en ökning av upptagskapacitet av fosfor på grund av den utökade upptagningsytan (Syers et al 2008). Mykorrhiza återfinns i många olika typer av jordar, men oftast i ganska låg utsträckning i de jordar där fosfortillgången är hög, vilket tyder på att behovet av mykorrhiza i dessa jordar inte är så stort. En växts förmåga att ta upp fosfor via rötterna, transportera och använda detta i plantan, avgörs främst av genotypen. Genotyper som har god fosforeffektivitet kräver alltså lägre koncentrationer av fosfor i marken för maximal skörd. Utbredningen av rotsystemet beror däremot till stor del på den aktuella jordtypen, samt av eventuell förekomst av rotsjukdomar eller nematoder. Förutom rötternas utbredning och djup spelar även diametern på rötterna roll. Växter med grövre rötter kan inte tränga in i porerna i för hårt packade jordar eller jordar med mycket små porer.

Organiskt material i jorden, framför allt närmast rötterna, förbättrar upptaget av fosfor dels genom att kontakten mellan jord och rötter blir tätare, dels genom att det organiska materialet innehåller mikroorganismer som förbättrar fosfortillgängligheten genom att sänka pH-värdet och frigöra fosfor bundet till järn och aluminium (Syers et al, 2008). Fosfor frigörs även från det organiska materialet i marken.

Fosforns kretslopp

Mineralerna apatit och fosforit i berggrunden utgör de främsta fosforkällorna (Eriksson et al, 2005). Genom vittring av berggrunden frigörs fosfor. Det mesta av fosfor bindes dock direkt och koncentrationen i marklösningen är därför låg. Även fosfor tillförd genom gödsling fixeras på motsvarande sätt och effekten av gödslingen kan därför utebli eller bli mindre än önskat, främst vid sura jordar (Eriksson et al, 2005). I nygödslade jordar kan fosforhalten i marklösningen som högst uppgå till 6-8 mg/l (Ulén, 2005). Fosfor som tagits upp av växter återvänder till marken, eventuellt via djur, i organisk form. Mikroorganismerna i marken omvandlar denna organiska fosfor till oorganiska former som återigen kan tas upp av växterna (Raven et al, 2005)

Fosfors naturliga kretslopp störs av odling och gödsling. Dels uppstår fosforförluster när skörden avlägsnas från marken istället för att återbördas till jorden, dels uppstår övergödning av sjöar och vattendrag när överskottsfosfor läcker ut med vattensystemen från odlingsmarken (Raven et al, 2005).

Förekomstformer

Fosfor förekommer i olika bindningsformer i marken. Mineralsammansättning, humushalt och pH-värde påverkar de oorganiska förekomstformerna. Löst i marklösningen finns fosfor i jonformerna H_2PO_4^- och HPO_4^{2-} . Fördelningen av respektive joner styrs av pH-värdet, vilket visas i tabell 1. Vid pH 7,2 är förhållandet 1/1. Vid lägre pH är andelen H_2PO_4^- högre och vid högre pH är andelen HPO_4^{2-} högre (Eriksson et al, 2005).

Tabell 1. Andelar av divätefosfat och vätefosfat i marklösningen vid olika pH (% av total koncentration)

Form av fosfatjon	pH			
	5,0	6,0	7,2	8,0
H_2PO_4^-	99,3	94,1	50,0	13,7
HPO_4^{2-}	0,6	5,9	50,0	86,3

(Eriksson et al, 2005)

Fosfat förekommer adsorberad av oorganiska markpartiklar samt till humus (Eriksson et al, 2005). Av all fosfor i jorden är bara en liten del växttillgänglig. Störst växttillgänglighet har fosfor vid ett pH mellan ca 5,0 och 7,2 då andelen divätefosfat (H_2PO_4^-) är störst inom det spannet (Havlin et al, 2007). Vid lägre pH bildas en stor andel svårslösliga föreningar med järn och aluminium, medan det vid pH 5,5-8,0, där halten av Fe^{3+} och Al^{3+} är låg, bildas lättlösligare föreningar med Ca^{2+} (Eriksson et al, 2005). Vid alltför högt pH bildas svårslösliga föreningar med Ca^{2+} som oktakalciumfosfat $\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ och hydroxylapatit $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$. Vid pH 6,5 är andelen fosfor som är bundet i svårslösliga järn- aluminium- och kalciumföreningar som minst (Havlin et al, 2007). Fosfor förekommer även i svårslösliga organiska föreningar. Genom mineraliseringsprocesserna blir denna fosfor växttillgänglig då den övergår till oorganisk form som H_2PO_4^- (Eriksson et al, 2005).

I sura jordar kan kalkning ha positiv effekt på växttillgängligheten då en del av järn- och aluminiumfosfaterna övergår till kalciumfosfat (Eriksson et al, 2005). Studier har dock visat på motstridiga resultat vad gäller påverkan av fosfortillgänglighet vid kalkning (Magnusson, 2000). Organiskt tillförd fosfor förblir tillgängligt vid lågt pH i högre grad än oorganisk fosfor tillförd som handelsgödsel.

I jordbruksmark varierar det totala fosforinnehållet mellan 900 och 3 600 kg per hektar matjord och är högre i lerjord samt jordar med hög halt organiskt material (Bergström et al, 2007). Den organiskt bundna fosfor i marken utgör 25-65% av det totala fosforinnehållet. Mikroorganismerna i jorden innehåller snabbomsatta fosforformer och är därför en viktig växtnäringskälla (Bergström et al, 2007). Trots omfattande studier är flera organiska fosforformer fortfarande okända (Börling, 2003).

Både den fosfor som frigjorts genom naturlig vittring och den fosfor som tillförs via gödsling binds till största delen, vilket gör att andelen löst fosfor i markvätskan alltid är låg (Eriksson et al, 2005). Detta gör att urlakningen är relativt liten i förhållande till tillförseln, men trots detta kan den vara så pass stor att den leder till eutrofiering av sjöar och vattendrag.

Fosforförluster

Avrinnande vatten från åkermarker för med sig fosfor i olika former, både organiska och oorganiska, som fasta partiklar eller helt lösta former, till sjöar och vattendrag (Bergström et al, 2007). Skillnader i jordar, markhydrologi och odlingssystem mellan olika regioner avgör både mängden förlorat fosfor och formen av förlusterna. I Sverige står jordbruket för så mycket som 40 % av fosforavrinningen till Östersjön. Den totala långtidstransporten uppgår till 0,1- 4 kg ha/år, av vilket 9-90% utgörs av ytavrinningsförluster, 12-60% är dräneringsförluster och 40-90% erosionsförluster. Skillnaderna kan alltså vara mycket stora. Ofta står en relativt liten del av jordbruksmarken för en stor del av förlusterna och detta under en begränsad tid av odlings säsongen. Insatser och åtgärder bör anpassas enligt detta.

Det finns flera vägar för att kontrollera och minska förlusterna (Bergström et al, 2007). Först och främst kan källan kontrolleras, vilket ofta sker i kombination med kontroll av transporten. Anläggning av kantzoner, det vill säga bevuxen men obrukad mark, som en barriär mellan åkermark och vattendrag är ett sätt att försöka kontrollera transporten. Åtgärder för att minska erosionen är ytterligare en metod. Kontroll av källan kan göras genom att gödslingen styrs så att tillförd fosfor motsvarar skörde förlusten och att appliceringen av gödsel görs på rätt sätt och vid rätt tidpunkt.

Analyser

För att kunna planera och beräkna gödslingen är det nödvändigt att känna till det aktuella fosfat innehåll i jorden, vilket kräver jordanalyser. Halten av växttillgängligt fosfor i jorden kan mätas med hjälp av olika extraktionsmetoder (Bergström et al, 2007). I Sverige används ofta de så kallade P-AL och P-HCl analyserna, utvecklade av Egnér et al (1960). P-AL analysen (extraktion med en ammoniumlaktatlösning) används för att bestämma den

lättlösliga fosfor i marken medan P-HCl analysen visar på mängden förrådsfosfor i marken mätt i mg/100 g torkad finjord (Eriksson et al, 2005). I första hand är det tillgången på lättlösligt fosfor som är grunden vid beräkning av gödslingsbehov och i andra hand tillgången på förrådsfosfor. Jordarna delas in i klasser efter fosforinnehåll, vilket visas i tabell 2 (Eriksson et al, 2005).

Tabell 2. Lättlöslig fosfor (P-AL) respektive förrådsfosfor (P-HCl) i marken indelad i klasser

Lättlöslig fosfor, P-AL		Förrådsfosfor, P-HCl	
Klass	mg/100 g jord	Klass	mg/100 g jord
I	<2,0	1	<20
II	2,0-4,0	2	20-40
III	4,1-8,0	3	41-60
IV	8,1-16	4	61-80
V	>16	5	>80

(Eriksson et al, 2005)

Tester av dessa typer är utvecklade med hänseende på odling och växtupptag och inte med tanke på läckage. Då fosfor reagerar olika i olika jordar vore det intressant med olika referensvärden för olika jordtyper (Börling, 2003). Förändringar av P-AL kan inte enbart beräknas utifrån odling och ”uttag” genom skördeförkluster, utan samverkan med övrigt fosfor i matjorden och även alven gör förändringarna trögare och mer oförutsägbara (Bertilsson et al, 2005). Effekterna av organiskt fosfor och mykorrhiza kan också bidra till oväntade resultat (Bertilsson et al, 2005). Det är därför viktigt med regelbundna och täta analyser av marken (minst vart 4:e till 5:e år) och att tillförd stallgödsel inte glöms bort vid gödslingsberäkningar (Syers et al, 2008).

På grund av regelbunden tillförsel av fosfor genom gödsling under de senare decennierna har alltmer fosfor ackumulerats i marken, vilket gör att stora delar av åkermarken i Sverige tillhör de högre P-AL-klasserna (50% av åkermarkerna tillhör P-AL-klass IV eller V) (Eriksson et al, 2005). Detta har lett till en minskning av gödselgivorna under senare tid, då det inte lönar sig att gödsla upp högre än en viss nivå (8-10 mg/100 g jord) (Bergström et al, 2007). Detta gäller även för en fosforkrävande gröda som potatis (Bertilsson et al, 2005).

Jordbruksverkets rekommendationer (SJV, 2008) syftar till att uppnå ett jämviktsförhållande mellan tillförd och bortförd fosfor. I ett längre perspektiv eftersträvas ett

klass III-förhållande i jorden. Gödslingsberäkningen bör göras långsiktigt över ett par år med högst tillskott av fosfor till de grödor i växtföljden som är mest fosforkrävande (Bertilsson et al, 2005).

Gödselmedel

Mineralgödsel fosfor, även kallat handelsgödsel, tillverkas av fosfor utvunnet ur berggrunden (Yara, 2009 b). För att göra fosfor lös och växttillgänglig behandlas den med svavelsyra (H_2SO_4) eller salpetersyra (HNO_3). Vanligast förekommande i gödselmedel är superfosfat (kalciumdivätefosfat $Ca(H_2PO_4)_2$) som innehåller 16-20 % fosfat beräknat på formen P_2O_5 och trippelfosfat som innehåller ca 46 % fosfat (P_2O_5) (Bergström et al, 2007, Yara, 2009 b). Kalciumfosfater från superfosfater och trippelfosfater löses lätt i marken. I området närmast gödselkornet (upp till 10 mm) kan koncentrationen överstiga sorptionskapaciteten, vilket innebär att fastläggningen blir begränsad inom denna zon (Bergström et al, 2007). I området utanför, upp till 40 mm från gödselkornet adsorberas mera fosfor, beroende på marksammansättningen. Växttillgängligheten är högst inom denna zon. Superfosfat $Ca(H_2PO_4)_2$ kan reagera genom att övergå till svårslösligare Ca-fosfat, vilket även innebär en sänkning av pH då H^+ frigörs (Eriksson et al, 2005) eller så adsorberas divätefosfatet till järn- och aluminiumoxider eller hydroxider.

I stallgödsel finns huvudsakligen oorganiskt bunden fosfor, men även organiskt bunden (Bergström et al, 2007). Den oorganiskt bundna fosfor kan i flytgödsel utgöra så mycket som 90 % av fosfor. Detta beror på att den organiskt bundna fosfor lätt övergår till oorganiska former under lagringen. I fastgödsel kan andelen organiskt bunden fosfor vara något högre än i flytgödsel. Den organiskt bundna fosfor i stallgödsel utgörs främst av olika kalcium- och magnesiumfosfater. Kalcium- och magnesiumfosfaterna i stallgödsel löses upp olika lätt beroende främst på pH-värdet i marken. Lösligheten ökar vid sänkt pH. De lösta fosfatjonerna tas antingen upp av växterna eller binds i olika former, till exempel i svårslösliga järn- och aluminiumföreningar (Bergström et al, 2007). Fosfor från stallgödsel anses i allmänhet vara lika växttillgänglig som fosfor från handelsgödsel, men studier har visat att organisk fosfor är mer lätttrörlig i marken än oorganisk, och därför snabbare rör sig ner till större djup (Ulén, 2005).

Mineralgödselmedel med mer långsamt frigörande fosfor är under utveckling. Dessa innehåller ammoniumfosfater och ska vara mer långtidsverkande. Speciellt på jordar med hög risk för fosforläckage på grund av mycket nederbörd skulle dessa gödselmedel vara lämpliga (Syers et al, 2008).

Åtgärder för att begränsa fosforförluster på fältnivå

För att framgångsrikt kunna minska fosforanvändandet och därmed också fosforförlusterna på gårdsnivå måste man ta hänsyn till ett flertal faktorer. Hur marken ser ut, vilken jordtyp som föreligger och hur avrinningssystemen ser ut är viktiga uppgifter (Bergström et al, 2007).

Målet bör vara att genom gödslingsåtgärder uppnå en balans, där tillräckligt med fosfor finns tillgängligt för att få optimalt skördeutbyte, samtidigt som så lite fosfor som möjligt läcker ut i närliggande sjöar och vattendrag. Åtgärder mot fosforförluster kan delas in dels i sådana som syftar till att minska frigörelse av fosfor, dels i sådana som påverkar fosfortransporten (Bergström et al, 2007).

Minskad frigörelse av fosfor kan uppnås genom tre huvudåtgärder: reducerat fosforinnehåll i marken genom nedjustering av gödsling med hänsyn till behov, rätt tidpunkt för gödsling samt rätt metod för applicering av gödsel (Syers et al, 2008). Jordbruksverket har regler och riktlinjer för när gödsling bör göras (SJV, 2008). Det är olämpligt att sprida gödsel på frusen mark då detta leder till stora ytavrinningsförluster (Bergström et al, 2007). Klimatet har betydelse för hur stor ytavrinningen av fosfor blir. I norra Sverige är ytavrinningsförlusterna högre än i södra Sverige på grund av att snösmältningen där i större utsträckning sker på frusen mark (Ulén, 2005). Vid hög vattenhalt i marken blir denna så kompakt att regn- och smältvatten inte kan komma ner (Bergström et al, 2007). Stora förluster kan också uppstå om marken innehåller mycket makroporer som alltför snabbt transporterar ner vatten med gödsel i marken. Det är dock tillåtet att gödsla på tjäle om gödseln samtidigt brukas ner.

Genom rätt placering av gödseln kan förlusterna minskas (SJV, 2008). Det är lämpligt att sprida gödseln i band istället för att bredgödsla. Dels är det en fördel att gödseln hamnar nära växterna, dels minskar kontaktytan med jorden, vilket gör att mindre andel av fosfor i gödslet binds i svårslösliga föreningar (järn- och aluminiumföreningar vid lågt pH och kalcium- och magnesiumföreningar vid högt pH).

Danska forskare har visat att fosforförlusterna via makroporer och sprickor i lerjordar efter regn, minskar kraftigt om stallgödsel myllas ner direkt istället för att spridas på ytan (Glaesner et al, 2008).

Åtgärder för att begränsa fosforförluster genom borttransport innefattar bland annat bearbetning av jorden för att förändra strukturen, kontroll av flödet genom marken, samt kontroll av ytavrinningen (Bergström et al, 2007). Förluster av både löst och partikelbunden fosfor genom ytavrinning står i många fall för en mycket stor del av de totala fosforförlusterna. Åtgärder för att minska och förebygga erosion och att förbättra markens infiltrationskapacitet kan minska förlusterna, men olika metoder ger olika resultat beroende på markens egenskaper, topografi, nederbörd med mera. Jordbearbetning, kantzoner, plantering av fånggrödor samt anläggning av våtmarker är olika åtgärder som används (Bergström et al, 2007).

Kantzoner, eller skyddszoner, är ett effektivt sätt att minska fosforförluster genom erosion till närliggande vattendrag (Greppa Näringen, 2008, Sheppard et al, 2006). En kantzon är ett bevuxet, obearbetat område som fungerar som ett vegetationsfilter mellan den brukade marken och vattendraget. Dess syfte är att fånga upp fosfor som följer med jordpartiklar i avrinningsvatten från den brukade marken. Ett tätt gräsvegetationstäckte bromsar upp vattenflödet så att partiklarna hinner infiltreras av marken, vilket gör att en stor del av fosfor ackumuleras i skyddszonen istället för att fortsätta ut i vattendraget (Greppa Näringen, 2008).

I en kanadensisk fältstudie (Sheppard et al, 2006) undersöktes hur effektivt etablerade kantzoner bidrog till minskning av fosforförluster via filtrationsvatten. Prover togs på 22 platser, och i hälften av dessa minskade fosforkoncentrationen med i genomsnitt 30 % i filtrationsvattnet efter att detta passerat kantzonerna. 32 % av proverna visade ingen skillnad i fosforkoncentration och i 18 % av fallen ökade istället koncentrationen. Förklaringen till ökningen i dessa fall ansågs vara att så mycket fosfor ackumulerats i kantzonen att inte mer kunde adsorberas. Detta betyder att även om mycket fosfor stannar i kantzonen istället för att läcka ut i intilliggande vattendrag så kan effektiviteten av denna åtgärd minska på lång sikt (Sheppard et al, 2006).

Hur bred skyddszonen behöver vara har studerats i många försök utan att något entydigt resultat framkommit på grund av de varierande omständigheterna. Till exempel påverkar lutningen på marken. Ju brantare lutning desto snabbare vattenflöde, vilket kräver bredare kantzoner. Det anses dock att en bredd på minst sex meter är lämpligt. Det skulle räcka för att fånga upp cirka 40-70 % av fosfor i ytvattnet (Greppa Näringen, 2008).

Användande av fånggrödor kan bidra till en reducering av fosforförluster genom minskad erosion samt att fosfor tas upp i fånggrödan. En fånggröda som får växa under en längre tid kan binda avsevärda mängder fosfor (Bergström et al, 2007).

Svenska förhållanden

Under 1930- och 1940-talen konstaterades genom fältförsök att de svenska, sura jordarna i allmänhet innehåller en låg halt av fosfor (Ulén & Jakobsson, 2005). Detta ledde till ett omfattande användande av fosforgödselmedel, vilket har gjort att stora mängder fosfor sedan dess har ackumulerats i marken. Högst halter finns i de sydligaste delarna av landet och det är också i dessa områden som störst förluster sker. Vissa jordtyper innebär större risk för fosforförluster än andra.

En studie (Börling, 2003) gjord på sydsvenska och mellansvenska jordar med olika P-nivåer fokuserade på utlakning av fosfor i jordarna och tog hänsyn till flera faktorer, som fosforinnehållet i jorden, sorptionskapacitet och mätnadsgrad. Förlusterna från försöksjordarna uppmättes till mellan 0,03 och 1,09 kg/ha/år. Det fanns inget givet samband mellan storleken på förlusterna och fosforinnehåll respektive sorptionsmättnad, utan det största läckaget uppmättes från jordar med dominans av makroporflöde för vattentransport, oavsett fosforinnehåll i jorden. I jordar med låg sorptionskapacitet avgjorde mängden tillfört gödsel hur stort läckaget blev (Börling, 2003).

I Sverige finns det tre typer av högriskjordar: lerjordar som förlorar fosfor via dräneringen, siltjordar i backiga landskap som är utsatta för erosion samt sandjordar som har en dålig sorptionskapacitet och därför kräver mer gödsling, vilket också leder till större förluster (Ulén & Jakobsson, 2002). Fosforförlusterna från dessa jordar kan uppgå till 0,5-1,0 kg P/ha per år, ibland mer. Problemet med lerjordar är strukturen. Sprickbildning och makroporer ger alltför snabbt genomflöde av vatten. På lerjordar och siltjordar anses jordbearbetning, för att förbättra markstrukturen, vara de mest verkningsfulla åtgärderna för att minska förlusterna av fosfor. Försök har även gjorts med att inte plöja jorden alls, i syfte att minska erosionsförluster (Muukkonen et al, 2007). Det har dock visat sig att det kan leda till ökade fosforförluster via ytavrinning. Vid studier utförda på lerjordar i Finland (Muukkonen et al, 2007) har det ansetts bero på att ökningen av organiskt kol (C) i det översta matjordslagret (0-5 cm) gör att konkurrens mellan organiska anjoner och fosfatjoner leder till att mindre fosfor kan adsorberas. Samtidigt är det så att tillförsel av organiskt material i en lerjord hjälper till att behålla aggregaten hela (Ulén & Jakobsson, 2005). Bearbetning av

lerjordar bör ske under torra förhållanden för att inte förstöra strukturen genom markpackning. Siltjordar bör med fördel ha ett tätt vegetationstäck under vintern för att minska erosionen. Dessutom bör dräneringsdiken återfyllas med kalkblandad jord, så kallade kalkfilterdiken. Tillsatsen av bränd kalk (CaO) gör att återfyllnaden blir porös och hållbar och fosfor som annars snabbt hade runnit genom makroporerna som uppstår vid omgrävning binds till större grad (Bergström et al, 2007). Precis som vid lerjordar bör bearbetning av siltjordar ske under torra förhållanden för att bevara aggregatstabiliteten och undvika packning av jorden vilket försämrar infiltrationen (Ulén & Jakobsson, 2005). I tabell 5 och 6 framgår kort- respektive långtidseffekter av åtgärder mot fosforförluster på ler- och siltjordar. För att minska läckaget av lösligt fosfor på sandjordar handlar det främst om att, om möjligt, minska gödselgivorna genom att applicera gödslet på rätt plats och på ett sådant sätt att kontakten mellan jord och gödsel optimeras (Ulén & Jakobsson, 2005). Sandjordar med hög koncentration av järn och aluminium som binder fosfatjoner har mindre läckage av fosfor. En annan metod för att minska fosforförlusterna i sandig jord är att odla olika typer av vallgrödor som tar upp stora mängder av den befintliga fosfor i marken. Denna bortförs sedan vid skörd av grödan (Bergström et al, 2007 och Ulén & Jakobsson, 2005). (Se tabell 7.) Detta ger dock varierande resultat med hänsyn till hur väl grödan etableras. Fånggrödor som får växa länge kan binda så mycket som 10-30 kg P/ha i växtmassan, men vid frysning av växtceller finns risk för att fosfor förloras igen (Bergström et al, 2007).

I ett fyraårigt norskt försök (Sturite et al, 2007) studerades hur mycket fosfor som kunde tas upp och bevaras i växtmassan hos tre olika fånggrödor från en växtsäsong till nästa i tempererat klimat. Försöket utfördes i fält under fyra på varandra följande vintrar. För att kunna beräkna vinterförlusterna av näringsinnehållet i plantorna mättes detta på hösten och sedan igen på våren. Resultatet visade på stor variation av fosforförlusterna beroende på vädret under vintern. Förlusterna uppmättes till 11, 36, 60 respektive 22 % under de fyra försöksåren. I genomsnitt återfanns 34 % av det fosfor som förlorats från växtmassan i dräneringsvattnet, främst vid snösmältningen.

I ett annat norskt försök (Bechmann et al, 2005) undersöktes det vilken effekt upprepad frysning och töande av marken hade på fosforläckaget från tre olika jordar: bar jord, jord med inblandning av stallgödsel samt jord bevuxen med fånggröda (ettårigt rajgräs). I inledningen av försöket var förlusterna från jorden med fånggröda mindre än från de andra jordarna på grund av mindre erosion, men ju fler frysning/tö-upprepningar som gjordes, desto större blev läckagen från fånggrödan, medan förhållande var i stort sett opåverkade i de andra jordarna. Förlusterna av vattenlöslig fosfor uppmättes efter frysning och töande till 9,7 mg/l från jorden

med fånggröda och 0,18 mg/l respektive 0,114 mg/l i jorden med stallgödsel och den bara jorden. Det tempererade svenska klimatet är alltså en viktig faktor att ta hänsyn till då effekterna av en åtgärd som användning av fånggröda alltså kan ge både positiva och negativa effekter på fosforförlusterna.

Effekter av olika åtgärder

Vilka åtgärder som bäst har bidragit till minskade fosforförluster på svenska jordar har beräknats i en rapport för åren 1995-2005 (Johnsson et al, manuskript). Beräkningarna har gjorts på olika typer av jordar över hela landet och tar hänsyn till vad som odlats och hur det odlats. Den åtgärd som bidrog mest till minskningen av fosforförluster visade sig vara grödfördelning, det vill säga vad som odlades, vilket stod för 50%. Därefter var minskad gödselgiva/minskning av gödslad areal mest betydelsefullt (36 %) och därefter skyddszoner som stod för 14 %. Däremot var det så att andra faktorer som jordart och klimat i högre grad avgjorde omfattningen av fosforförlusterna vid jämförelse mellan olika odlingsområden än vad odlingsåtgärderna gjorde.

Lagstiftning

Riksdagen antog 1999 en rad nationella miljömål (SJV, 2006). Ett av dessa miljömål kallas ”Ingen övergödning” och syftar till att minska utsläppen av näringsämnen i naturen. Ett av delmålen behandlar fosforutsläppen. Ett mål sattes att minska de vattenburna fosforutsläppen med minst 20 % från 1995 till 2010. Åtgärdsprogram för att minska växtnäringsförluster från jordbruket har tagits fram. Dessa behandlas dels i miljöbalken och även mer detaljerat i Jordbruksverkets föreskrifter (Åtgärdsprogrammet mot växtnäringsförluster från jordbruket, SJV, 2006). Föreskrifter som rör fosforgödsling är bland annat följande

- från och med 1 januari 2006 får maximalt 22 kg P/ha spridas per år (sett som ett genomsnitt över fem år)
- nedmyllning måste ske samma dag som gödsling under perioden 1 december till 28 februari (i Skåne, Halland och Blekinge som räknas som känsliga områden med flyktiga jordar måste nedmyllning ske inom fyra timmar på obevuxen mark)

(avser känsliga områden, Skåne, Halland och Blekinge):

- Ingen gödsling på vattenmättad eller översvämmad mark
- Ingen gödsling på snötäckt eller frusen mark
- Ingen gödsling med stallgödsel mellan 1 januari och 15 februari
- Gödsling med stallgödsel får enbart ske i växande gröda
- Minst 60% av åkermarken måste vara bevuxen under höst och vinter för att minska fosforförlusterna under denna period

Miljöstöd som delvis finansieras av EU kan erhållas för åtgärder som anläggning av skyddszoner för att minska förluster genom erosion, och anläggning av våtmarker.

Gödselrekommendationer

Jordbruksverket ger varje år ut riktlinjer för gödsling och kalkning (SJV, 2008).

Rekommendationerna grundar sig på ersättningsprincipen och tar hänsyn till den aktuella fosforsituationen i marken. Under senare år har större hänsyn även tagits till de ekonomiska och miljömässiga aspekterna med fosforgödsling. Studier av försök gjorda under lång tid visade att det vid låga P-AL-tal är ekonomiskt lönsamt att gödsla upp till en högre klass, medan det vid höga P-AL-tal kan rekommenderas att minska gödslingen, vilket även är bra av miljöskäl. Höjda priser på fosfor har sänkt gränsen där uppgödsling är lönsam. I förlängningen kommer dock troligtvis den minskade efterfrågan på fosfor att leda till att priserna åter kommer att sjunka. Detta kan göra det lönsamt att hålla igen på gödslingen under en tid. Rekommendationerna måste ses som generella. En avvägning måste i praktiken göras mellan växternas beräknade behov och miljöaspekten. Det är viktigt att uppföljande mätningar och markkarteringar görs kontinuerligt. I jordar med stor risk för fosforförluster genom erosion och makroporflöde bör gödsling inte ske upp till högre P-AL-klass än III av miljöskäl.

Djurhållande gårdar där stallgödsel sprids på markerna löper högst risk för överdosering av fosfor. Ofta sprids stallgödseln på en begränsad areal, där förlusterna följaktligen kan bli avsevärda. Trots transportkostnader är det lämpligt att sprida stallgödseln över större områden. Av praktiska skäl kan efterföljande gröda tas med i beräkningen vid spridning av stallgödsel. Hur mycket stallgödsel som får spridas är reglerat med hänsyn tagen till P-

innehållet i stallgödsel och hur mycket fosfor som beräknas tas upp av växterna (max 22 kg/ha). För att undvika att alltför mycket stallgödsel produceras är det även reglerat hur många djur av olika slag, som får finnas på en viss yta (Ulén & Jakobsson, 2005). Som nämnts är spridningsmetoden av gödsel av betydelse. Radgödsling kan rekommenderas då större del av den tillförda fosfor kommer växterna till godo (vilket gör att gödselgivan kan minskas) samt förlusterna blir mindre (SJV, 2008).

I tabell 3 framgår hur mycket fosfor som beräknas vara lämpligt att gödsla med i olika grödor enligt Jordbruksverkets rekommendationer.

Tabell 3. Gödslingsrekommendationer till olika grödor vid P-AL-klass III (SJV, 2008)

<u>Gröda</u>	<u>Uppskattad skörd ton/ha</u>	<u>P-giva kg/ha</u>
Vårsäd	5	10
Höstsäd	6	10
Oljeväxter	2	15
Potatis	30	40
Ärter	3,5	10

Även gödselmedelsföretaget Yara ger ut gödselrekommendationer. Deras aktuella rekommendationer visas i tabell 4.

Tabell 4. Gödslingsrekommendationer till frilandsgroänsaker för jordar med P-AL-klass III (tillförsel motsvarar bortförsel vid skörd) (Yara, 2009 a)

<u>Gröda</u>	<u>Uppskattad skörd ton/ha</u>	<u>P-behov kg/ha</u>
Blomkål	15-25	30-40
Broccoli/brysselkål/grönkål	10	40
Brytböner/vaxböner	10	50-70
Dill	5-10	30-40
Gurka/pumpa/zucchini	50-80	40-60
Kålrot/rova	60-80	20-40

Kepalök/gräslök	30-50	40-60
Morot/palsternacka	35-100	50-70
Blad- krus- och rotpersilja		30-40
Purjolök	30	50-70
Rättika		30-40
Rödbeta	40	30-40
Vitkål/rödkål/rosenkål/	30-70	30-50
Salladskål	40	20-40
Isbergssallat	20-35	50-80
Rotselleri		50-70
Stjälkselleri		40
Sockermajs	5-10	40-60
Potatis (mat- och industri)	30	60
	60	75
Potatis (stärkelse)	40	40
	60	50

Tabell 5. Åtgärder för att minska fosforförluster i svenska lerjordar (minst 15 % ler) med stort makroporflöde (Ulén & Jakobsson, 2005)

Åtgärd	Korttidseffekt	Långtidseffekt
Hänsyn till aktuell P-AL-status vid gödsling	ja	ja
Ej gödsling på våt mark	ja	nej
Kombisådd eller omedelbar nedbrukning av gödsel	ja	nej
Tätt vegetationstäckande under vintern	ja	nej
Höstbrukning på torra jordar	ja	ja
Minskad markpackning	ja	ja
Ökad humuskoncentration i marken	ja	ja
Styrning av ytvatten	ja	nej
Kalkfilterdiken	ja	nej

Kontrollerad dränering	ja	nej
Underhåll av diken i sluttning	ja	nej
Kantzoner längs vattendrag	ja	nej
Gräsbevuxna områden i fälten	ja	nej

Tabell 6. Åtgärder för att minska fosforförluster i svenska siltjordar med erosionsrisk (Ulén & Jakobsson, 2005)

Åtgärd	Korttidseffekt	Långtidseffekt
Hänsyn till aktuell P-AL-status vid gödsling	ja	ja
Ej gödsling på våt mark	ja	nej
Kombisådd eller omedelbar nedbrukning av gödsel	ja	nej
Tätt vegetationstäck under vintern	ja	nej
Vårplöjning	ja	nej
Tidig höstbrukning på torra jordar	ja	ja
Minskad markpackning	ja	ja
Ökad humuskoncentration i marken	ja	ja
Styrning av ytvatten	ja	nej
Kalkfilterdiken	ja	nej
Kontrollerad dränering	ja	nej
Underhåll av diken i sluttning	ja	nej
Kantzoner längs vattendrag	ja	nej
Gräsbevuxna områden i fälten	ja	nej

Tabell 7. Åtgärder för att minska fosforförluster på svenska sandjordar med låg P-sorptionskapacitet i alven (Ulén & Jakobson, 2005).

Åtgärd	Korttidseffekt	Långtidseffekt
Hänsyn till aktuell P-AL-status vid gödsling	ja	ja
Ej gödsling på våt mark	ja	nej
Kombisådd och omedelbar nedbrukning av gödsel	ja	nej
Tätt vegetationstäck under vintern	ja	nej
Vårplöjning	ja	nej
Höstbrukning på torra jordar	ja	ja
Minskad markpackning	ja	ja
Styrning av ytvatten	ja	nej
Kalkfilterdiken	ja	nej
Kontrollerad dränering	ja	nej
Underhåll av diken i sluttning	ja	nej
Kantzoner längs vattendrag	ja	nej
Gräsbevuxna områden i fälten	ja	nej

Sammanfattande diskussion

Det är nödvändigt att försöka minska användandet av fosforgödsel, dels för att hushålla med de begränsade fosforresurserna, men inte minst för att kunna begränsa fosforförlusterna från odlingsmarken till sjöar och vattendrag vilket idag är ett miljöproblem. Detta är ingen nyhet utan fosforgödslingen har stadigt minskat under senare år, vilket har bidragit positivt till minskade fosforförluster. Fortfarande har dock många svenska jordar höga P-AL-klasser på grund av att mycket fosfor ackumulerats under tidigare decenniers överskottsgödsling.

Aktuella rekommendationer går ut på att inte gödsla upp till högre P-AL-värden än motsvarande klass III. Generella gödselrekommendationer tar i regel bara hänsyn till grödans behov och P-AL-klassen i marken. Det hade med fördel kunnat göras separata rekommendationer för olika jordtyper, då fosfor från gödsel reagerar olika i skilda jordtyper. Mer detaljerade jordartskartor för enskilda fält hade kunnat underlätta att göra adekvata gödselberäkningar. Till exempel har en jord med högt innehåll av järn och aluminium högre sorptionskapacitet, vilket kan vara positivt på så sätt att fosforläckaget blir mindre, men samtidigt negativt för växttillgängligheten av fosfor. Oavsett fosforinnehållet i jorden och jordens sorptionskapacitet har det visat sig att det största läckaget sker från jordar med stort makroporflöde, även om framför allt jordar med låg sorptionskapacitet är känsliga för hur mycket fosfor som tillförs.

Det är av vikt att beräkningar av gödslingsmängd tar hänsyn både till grödans behov, den aktuella fosforstatusen i marken (vilken bör kontrolleras genom regelbundna analyser) samt jordtyp och andra faktorer som till exempel topografi. Det är även viktigt att räkna med stallgödselgivorna vid gödslingberäkning samt att känna till fosforinnehållet i olika typer av stallgödsel. Då fosforinnehållet i stallgödseln kan variera kraftigt beroende på vilka djur den kommer ifrån och vad för foder dessa får behöver P-analyser göras på gårdens egen gödsel. För att minska fosforläckaget från jordarna med störst förluster behöver man använda sig av speciella odlings- och brukningsåtgärder. I Sverige finns som nämnts tre typer av jordar som anses som speciella riskjordar: lerjordar med stort makroporflöde, siltjordar med stor risk för förluster genom erosion och lätta sandjordar med dålig sorptionskapacitet. Kontroll av flödet från dessa jordar kan göras genom en rad olika åtgärder som odling av fånggrödor som tar upp fosfor ur marken, anläggning av kantzoner som bromsar upp vattenflödet från odlingsmarken så att vattnet hinner filtreras ner i marken (vilket gör att fosfor ackumuleras i kantzonen istället för att nå ut till diken och vattendrag) samt anläggning av kalkfilterdiken. Åtgärderna fungerar dock olika effektivt på olika jordar och resultatet blir inte alltid det förväntade då det är lätt att förbise viktiga faktorer. Till exempel kan odling av fånggrödor ha positiva effekter inledningsvis, genom att dessa tar upp stora mängder fosfor ur marken, men sedan vid frysning då växtcellerna sprängs läcker ut den ackumulerade fosfor, vilket istället leder till ökade fosforförluster. Det svenska klimatet med låga temperaturer under stor del av året är alltså en viktig faktor att ta hänsyn till vid utvecklingen av åtgärder. Även anläggning av kantzoner, som är en ofta använd åtgärd, har oftast goda kortsiktiga effekter på fosforförlusterna, men fungerar sämre på längre sikt då alltför mycket fosfor ackumulerats i

kantzonen och läckaget ökar igen. En utveckling av dessa metoder är viktig för att de inte ska ge oönskade resultat i längden.

Ett flertal av de åtgärder mot fosforförluster som används idag har alltså konstaterats ha god effekt på kort sikt, men sämre på lång sikt. Detta torde kunna bero på att det ändå är marken i sig, det vill säga jordarten, markhydrologin och markkemin, som är den mest avgörande faktorn för hur stora fosforförlusterna blir. Som visas i tabellerna 5-7 är vissa åtgärder generellt sett effektivare på lång sikt än andra åtgärder. Dessa åtgärder är just sådana som påverkar markinnehåll och markstruktur, nämligen: invägande av aktuell P-AL-status i marken vid gödsling, undvikande av markpackning för att inte förstöra filtrationen i ler- och siltjordar, tidig höstbrukning på torra jordar samt ökning av humushalten i marken. Att skapa en jämn och god filtration, utan snabba flöden på ytan eller genom makroporer, genom effektiv dränering och brukning gör att en större del av fosfor i marklösningen hinner bindas till markpartiklar istället för att föras ut i diken och vattendrag.

Det finns alltså ett fortsatt behov av att utveckla metoderna och att ytterligare studera långtidseffekterna. En kombination av flera åtgärder och mer lokal anpassning av dessa är troligtvis nödvändigt för att uppnå önskade resultat. Studier av jordar med lågt fosforläckage skulle kunna vara till hjälp för att bättre förstå hur olika faktorer kan samverka på bästa sätt.

Källförteckning

Bechmann ME, Kleinman PJA, Sharpley AN, Saporito LS (2005) Freeze-thaw effects on phosphorus loss in runoff from manured and catch-cropped soils, *Journal of Environmental Quality* 34 6 2301-2309

Bergström L, Djodjic F, Kirchmann H, Nilsson & Ulén B (2007) *Fosfor från Jordbruksmark till Vatten – tillstånd, flöden och motåtgärder i ett nordiskt perspektiv*, Rapport MAT 21 nr 2/2007, SLU

Bertilsson G, Rosenqvist H, Mattsson L (2005) *Fosforgödsling och odlingsekonomi med perspektiv på miljömål*, SNV Rapport 5518, Naturvårdsverket, Stockholm

Börling K (2003) *Phosphorus Sorption, Accumulation and Leaching – Effect of long-term inorganic fertilization of cultivated soils*. Doctoral diss. Dept of Soil Sciences, SLU. Acta Universitatis agriculturae Sueciae, Agraria vol 428

Djordjic F (2001) *Displacement of phosphorus in structured soils*. Doctoral diss. Dept of Soil Sciences, SLU. Acta Universtatis agriculturae Sueciae, Agraria vol 283

Egnér H, Riehm H, Domingo W R (1960) *Untersuchen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Böden II. Chemische Extraktionsmethoden zu Phosphor- und Kaliumbestimmung*, K. Lantbr. Högsk. Annlr 26, 199-215

Eriksson J, Nilsson I & Simonsson M (2005) *Wiklanders marklära*, Studentlitteratur, Lund

Glaesner N, Kjaergaard C, Rubaek G H & Magid J (2008) *Phosphorus leaching from a textural gradient comparing two application techniques*. NJF seminar 401, NJF rapport 4

Greppa näringen (2008). Tillgänglig online 2009-02-25 på

<http://www.greppa.nu/uppslagsboken/renavattnet/erosionsskydd/skyddszoner.4.1c0ae76117773233f7800011337.html>

Havlin J, Beaton J, Tisdale S & Nelson W (2007) *Soil Fertility and Fertilizers – An Introduction to Nutrient Management*, Prentice Hall, Upper Saddle River

Ingram D S, Vince-Prue D & Gregory P J (2006) *Science and the Garden*, Blackwell Publishing, Oxford

Johnsson H, Larsson M, Lindsjö A, Mårtensson K, Persson K & Torstensson G, *Närsaltläckage från åkermark – Beräkningar av normalläckage av kväve och fosfor för 1995 och 2005*. Manuskript.

Magnusson M (2000) *Myten om ett idealiskt pH*. 10:e Regionala Lantbrukskonferensen för norra Sverige den 14-15 mars 2000 Umeå. Röbbäcksdalen meddelar Rapport 1:2000 s 11-14

Muukkonen P, Hartikainen H, Lahti K, Sarkela A, Puustinen M & Alakukku L (2007) Influence of no-tillage on the distribution and lability of phosphorus in Finnish clay soils, *Agricultural Ecosystems & Environment* 120 2-4 299-306

Raven P H, Evert R F & Eichhorn S E (2005) *Biology of Plants*, W. H. Freeman and Company Publishers, New York

Sheppard SC, Sheppard MI, Long J, Sanipelli B, Tait J (2006) Runoff phosphorus retention in vegetated field margins on flat landscapes, *Canadian Journal of Soil Science* 86 5 871-884

SJV (2006) *Åtgärdsprogrammet mot växtnäringsförluster från jordbruket*, Statens jordbruksverk

SJV (2008) *Riktlinjer för gödsling och kalkning 2009*, Statens jordbruksverk

Sturite I, Henriksen TM, Breland TA (2007) Winter losses of nitrogen and phosphorus from Italian ryegrass, meadow fescue and white clover in a northern temperate climate, *Agricultural Ecosystems & Environment* 120 2-4 280-290

Syers J K, Johnston A E & Curtin D (2008) *Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use – Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information*, FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 18, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome

Ulén B (2005) *Fosforförluster från mark till vatten*, SNV Rapport 5507, Naturvårdsverket, Stockholm

Ulén B & Jakobsson C (2005) Critical evaluation of measures to mitigate phosphorus losses from agricultural land to surface waters in Sweden, *Science of The Total Environment* 344 1-3 37-50

Yara (2009) a. Gödslingsrekommendationer för frilandsgrönsaker. Tillgänglig online 2009-02-23 på

http://fert.yara.se/se/crop_fertilization/crop_advice/horticulture/outdoor_crops/frilandsgronsaker.html

Yara (2009) b. Phosphorus. Tillgänglig online 2009-02-23 på http://www.yara.com/en/about/production_processes/phosphorus.html