

# Fosfor i ekologiskt lantbruk



Foto: Ghita Cordsen Nielsen

# Fosfor i ekologiskt lantbruk

Text: Tore Sjöqvist, Jällaskolan, Uppsala

## Inget liv är möjligt utan fosfor

I alla levande celler på jorden oavsett, om det rör sig om bakterier, svampar, växter eller djur, har fosfor en rad livsnödvändiga funktioner. Man kan fråga sig varför fosfor har fått denna betydelse. Det är omöjligt att ge ett fullständigt svar på den frågan, men en bidragande orsak är troligen att fosfor från början har funnits väl spridd i jordskorpan och dessutom har fosfor funnits i lättillgänglig form i de vattenmiljöer där man tror att de första livsformerna bildades. Detta har förmodligen bidragit till att livsprocesserna har utvecklats på ett sådant sätt att fosfor har en central roll i alla de ekosystem som vi känner till. I alla livsformer utgör fosfor en viktig byggsten i arvsmassan och deltar dessutom i de flesta omvandlingar av energi i cellerna. I de membran som omger alla celler har också fosfor en viktig funktion. Hos djur är dessutom fosfor en nödvändig beståndsdel i skelettet.

Ett problem inom livsmedelsproduktionen är att tillgångarna av brytvärda fosformineral är begränsade samtidigt som ett effektivt kretslopp av fosfor i samhället är svårt att uppnå. Hanteringen av fosfor i odlingssystemen kan dessutom leda till stora miljöproblem genom att fosfor transporteras från odlingsmark till vattendrag, sjöar och kustvatten. Anrikning av fosfor i naturliga vatten leder till övergödning vilket orsakar igenväxning och andra störningar i de biologiska systemen.

Denna skrift behandlar grundläggande frågor om hur fosfor förekommer och uppträder i marken samt vilka faktorer som påverkar växtens möjligheter att utnyttja markens fosfor.

## Koncentrerade fosformineral är en begränsad resurs

Huvuddelen av den fosfor som används i form av industriprocessade gödselmedel eller som tillsatser i mineralfoder kommer ursprungligen från icke förnybara tillgångar av råfosfat.

Råvarorna för framställning av de lättlösliga produkter som används som fosforgödselmedel inom konventionellt jordbruk utgörs av råfosfater i vilka fosfor förekommer i en mycket svårtillgänglig form. Vid handelsgödseltillverkning och framställning av mineralfodertillsatser överförs råfosfatfosfor till lättlöslig form genom behandling med koncentrerade syror. Inom KRAV-godkänd odling får råfosfat användas som fosforgödselmedel, men ett villkor är att den inte har behandlats med kemikalier för att bli mera lättlöslig. Finmalning av produkten är däremot tillåten (KRAV, 2004). Användning av råfosfat inom ekologisk odling bör ske endast till jordar där det råder brist på fosfor och det inte finns

tillgång till alternativa KRAV-godkända gödselmedel. Intresset från ekologiska odlare att använda råfosfat är emellertid enligt uppgifter från gödselmedelsindustrin mycket begränsad.

Innehåll av icke önskvärda tungmetaller, särskilt kadmium, begränsar den direkta användningen av en stor del av världens råfosfattillgångar (Gunnarson 1983). Sedimentära råfosfater, som utgör huvuddelen (beräknat till ca 85%) av dessa tillgångar, har oftast så höga kadmiumhalter att de inte anses lämpliga som fosforkälla inom livsmedelsproduktionen i ett längre perspektiv. Gödselindustrin har emellertid tekniker att framställa fosforgödselmedel med mycket låg kadmiumhalt ur sedimentära råfosfater. Råfosfat från kolahalvön, vilket är av vulkaniskt ursprung, har mycket låga halter av kadmium och kan därför direkt användas inom livsmedelsproduktionen. De svenska fosfortillgångarna, härrörande från apatitjärnmalmer, har också låga kadmiumhalter, men höga halter av arsenik begränsar deras användning (Gunnarsson 1983).

Världens totala tillgångar på brytvärda råfosfater är begränsade. Till detta kommer att den fosfor som bryts idag i huvudsak används i det högteknologiska västerländska jordbruket. Många länder, särskilt i tropiska områden, har stor brist på tillgänglig fosfor i sina jordar men odlarna har inte råd att köpa den fosfor som de skulle behöva.

Följande viktiga mål bör gälla när det gäller hanteringen av världens fosfortillgångar

- De fosfortillgångar som finns ska i första hand användas i de områden där fosfortillgången i de odlade jordarna är begränsande för människors förmåga att framställa tillräckligt med livsmedel. Ytterligare nettotillförsel av fosfor till fosforrika, ofta starkt uppgödslade jordar ska begränsas så långt det är möjligt.
- Den fosfor som förs bort från odlingssystemen ska ingå i ett fungerande kretslopp och återföras till åkermarken.
- Odlingssystemen ska utformas så att läckage av fosfor till vattensystemen undviks så långt det är möjligt.

## Förråd av fosfor i svenska jordar

Fosforinnehållet och upplagringen av fosfor i svenska jordar har undersökts av Naturvårdsverket (Eriksson et al. 1997, Andersson et al. 1998). Omkring 3 000 provpunkter från matjord och 1 700 från alv analyserades med avseende på förrådsfosfor (P-HCl) och tillgänglig fosfor (P-AL). Analyserna med P-HCl visar innehållet av lättillgängliga och svårtillgängliga fosforformer i jorden. Det genomsnittliga innehållet i matjorden av P-HCl är 2 700 kg per ha och i alvskiktet, 40–60 cm, 1 400 kg per ha.

Omräknat till skiktet 25–60 cm ger det ett innehåll i alven på ca 2 400 kg per ha. Detta ger ett genomsnittligt innehåll av P-HCl på något över 5 ton i det markskikt som de flesta växter kan nå med sina rötter. I Götaland är halterna i matjorden i genomsnitt högre (ca 50 % högre) än i övriga delen av landet, men i både Svealand och Norrland förekommer områden med halter i samma nivå som de högsta i Sydsverige.

En del av den fosfor som är bunden i markens organiska material löses inte upp vid analys enligt P-HCl. Den totala halten av fosfor i marken är därför något större än det värde som anges av P-HCl. Det finns tyvärr inga säkra uppgifter på hur stor andel av den organiskt bundna fosfor som ingår i P-HCl.

Förutom den storskaliga variationen mellan olika landsdelar är det betydande lokala variationer i markens fosforinnehåll. Den totala variationen i de jordar som analyserades av Naturvårdsverket var stor, vilket framgår av tabell 1. Fem procent av provplatserna hade värden på P-HCl i matjorden som var lägre än 1 500 kg per ha, medan lika stor andel hade ett motsvarande värde som var större än 5 000 kg per ha (Eriksson et al. 1997). Låga fosforvärden är vanligast på lätta jordar med låg mullhalt, medan de flesta lerjordar har höga värden.

**Tabell 1.** Innehåll av förrådsfosfor (P-HCl) och tillgänglig fosfor (P-AL) i matjorden från odlad mark i Sverige. (Ur data från Eriksson et al. 1997 och Andersson et al. 1998)

Andel av jordarna	P-AL (mg/100 g)	P-HCl (mg/100 g)	P-HCl (kg/ha) 0–25 cm
5 %	<3	<43	<1500
5 %	3–4	43–49	1500–1700
15%	4–5	49–59	1700–2000
25%	5–8	59–74	2000–2500
25 %	8–13	74–96	2500–3200
15 %	13–20	96–124	3200–4200
5 %	20–26	124–149	4200–5000
5 %	>26	>149	>5000

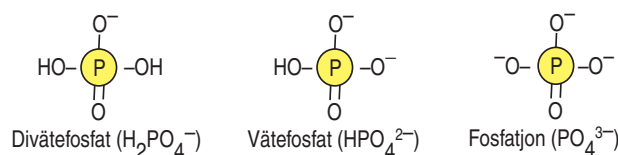
Genom att jämföra med markanalyser från 1950-talet kunde också uppgödslingen av fosfor under de senaste 50 åren beräknas (Andersson et al. 1998). För hela landet beräknades ökningen av fosformängden i matjorden till ungefär 800 kg per ha. Variationen inom landet är emellertid stor i detta avseende, med en ökning från 200–300 kg/ha i övre Norrland till över 1 000 kg/ha i södra Sverige. Ökningen av fosforhalterna speglar den betydande import av handelsgödsel och fodermedel som skett under de senaste 50 åren. Detta innebär att en betydande del av den fosfor som dagens grödor tar upp härrör från processad råfosfat som tidigare spridits i form av handelsgödsel.

Markens totala innehåll av fosfor kan sättas i relation till den bortförel som sker i olika odlingssystem. Vid en årlig negativ fosforbalans på 5 kg per ha skulle fosfor i de flesta jordar rent matematiskt räcka i mer än tusen år. Odlingssystemet skulle emellertid komma ur balans mycket tidigare beroende på att den återstående fosfor blir allt mera svår-tillgänglig. Problemen kring detta diskuteras senare.

## Fosfor i naturen förekommer som fosfat

Nästan all fosfor i berggrunden och all fosfor i organismer förekommer i samma kemiska struktur. Denna kemiska struktur är det som i dagligt tal kallas för fosfat. I marken kan fosfat förekomma i tre olika varianter som förutom grundämnet fosfor innehåller grundämnena syre och väte. Nedan visas hur dessa varianter är uppbyggda. Som synes är fosforatomen i samtliga former av fosfat omgiven av fyra syreatomer. En eller två av syreatomerna kan dessutom binda en väteatom.

P fosforatom    O syreatom    H väteatom



**Figur 1.** Strukturer av fosfat.

### Divätefosfatjon och vätefosfatjon

Dessa båda former av fosfat är vattenlösliga och förekommer därför lösta i markvattnet. All fosfor som växterna tar upp är i en av dessa former. Vilken form som dominerar beror på markens pH-värde. I jordar där pH-värdet i markvattnet är högre än 7,2 dominerar vätefosfat medan divätefosfat dominerar i neutrala eller sura jordar. I de flesta svenska åkerjordar tar därför växterna upp den mesta fosfor i form av divätefosfat. Den fosfor som är bunden till ytorna av markpartiklarna förekommer också huvudsakligen i någon av dessa former.

### Fosfatjon

Koncentrationen av fosfatjoner i markvattnet är mycket låg och har därför ingen direkt betydelse för växternas fosforupptag. Om fosfatjoner tillförs markvattnet genom gödsling eller vittring kommer de att övergå i divätefosfat eller vätefosfat beroende på vilket pH-värde som råder. I råfosfat och i skelett hos djur förekommer fosfatjoner hårt bundna till kalcium och är då mycket svårslösliga. Den fosfor som är fixerad inuti markmineralen förekommer också huvudsakligen i denna form.

Följande beteckningar kommer att användas för att beteckna hur fosfat förekommer i marken:

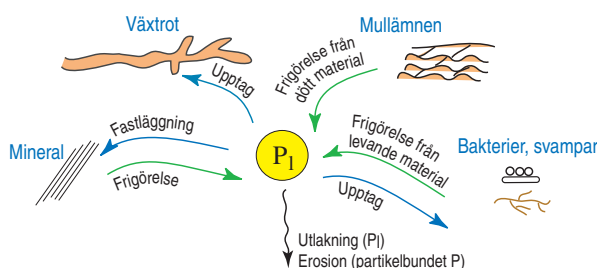
<b>P<sub>1</sub></b>	Fosfat löst i markvätskan
<b>min-P</b>	Fosfat bundet i markmineral eller på ytan av markmineral
<b>org-P</b>	Fosfat bundet till dött organiskt material i marken, t.ex. till växtrester eller mulllämnen
<b>Al-P, Fe-P och Ca-P</b>	Fosfat bundet till aluminium, järn respektive kalcium

## Fosfat i markvätskan

Vi börjar med att se på det fosfat som finns löst i markvätskan. Koncentrationen av fosfat i markvätskan är låg. Analyser har visat att den totala mängden fosfor i form av fosfat som finns löst i markvätskan normalt varierar från några hundra gram upp till något kilo per hektar. Att ställa markvätskans innehåll av fosfor i relation till den mängd fosfor som en gröda behöver ta upp under en vegetationsperiod är intressant. I en korngröda som ger 4 000 kg kärna per hektar är det totala upptaget av fosfor i kärna, halm och rötter under hela vegetationsperioden ca 30 kg per ha. Om vi antar att mängden fosfor i markvätskan i genomsnitt är 500 g täcker detta endast 1/60 av grödans behov. Under den tid som grödan tar upp fosfor måste det alltså vara ett stort flöde av fosfat till markvätskan och vidare fram till växtroten för att växtens behov ska kunna tillgodoses. Detta är det centrala problemet när det gäller växternas möjlighet att tillgodose sitt fosforbehov.

En viktig men svår utmaning för alla odlare är därför att utveckla system så att markens fosfat så långt det är möjligt blir tillgänglig i takt med grödornas behov. Förståelse för de mekanismer som styr flödena av fosfat i marken är därför en viktig förutsättning för att man ska kunna utveckla odlingssystem som på ett effektivt sätt utnyttjar markens tillgångar. I det följande ska vi diskutera de processer i marken som styr fosforflödet mot växtroten.

Figur 2 visar att det finns ett flöde till markvätskan från mikroorganismer, från nedbrytning av organiskt material och genom att fosfat frigörs från markmineraler. Samtidigt finns flöden i motsatt riktning genom att fosfat kan bindas till mineraler eller tas upp av mikroorganismer.



Figur 2. Flöden av fosfat i marken.

## Rötternas upptag av fosfat

Växtrötternas förmåga att ta upp fosfat ur marklösningen beror främst av följande faktorer:

- totala rotytan (inklusive mykorrhiza)
- flödes hastigheten av fosfor från markkolloiderna till växtroten

Det gäller alltså för odlaren att gynna en god rotutveckling tidigt under grödans utveckling. Det är också viktigt med en hög flödes hastighet av fosfat till marklösningen från mineraler och organiskt material, alltså en stor förmåga hos marksystemet att snabbt ersätta den P<sub>1</sub> som tas upp av växtrotter och mikroorganismer. Det är inte den enskilda rot delens upptagningsförmåga utan transporten av fosfat fram till rotytan som oftast är begränsande för växtens upptag av fosfor (Miyasaka and Habte 2001).

Något generellt värde på den koncentration av P<sub>1</sub> i marklösningen som krävs för att växten inte ska drabbas av fosforbrist kan inte anges. Denna kritiska koncentration påverkas, förutom av ovanstående faktorer, av art, utvecklingsstadium, jordart, pH och marklösningens innehåll av andra näringsämnen (Wild 1988). Ett riktvärde på nödvändig halt av P<sub>1</sub> som ofta anges är omkring 0,2 mg fosfor per liter marklösning för växter i tidiga utvecklingsstadier.

En god rotutveckling både med avseende på djup och rottäthet är en viktig faktor när det gäller växtens förmåga att utnyttja markens tillgängliga fosfor. Betydelsen av rotutvecklingen i alven har beskrivits av Haak (1981). Han visade att 20–50 % av fosforupptaget hos havre och korn sker från alven.

## Bristssymptom

Som tidigare framhållits ger en brist på fosfor under växtens tidiga utveckling effekter som kan ha en starkt negativ effekt på skörden. Allmänt kan sägas att om tydliga bristssymptom av fosfor kan iakttas på en gröda är det fråga om en allvarlig fosforbrist som kommer att medföra en stark hämning av växternas utveckling. En måttlig brist på fosfor, som också kan ge en betydande skördesänkning, ger oftast inte några tydliga symptom och konstateras säkrast genom kemisk analys av växtmaterialet.

Fosfor är lätt rörligt i växten och kommer i brist-situationer att omfördelas från äldre till yngre delar av växten. Symptomen blir därför tydligast på de äldsta bladen. Fosforbrist ger en låg tillväxt, främst av de ovanjordiska delarna hos växten. Hos spannmål och gräs med stark fosforbrist syns en rödfärgning av den nedre delen av stammen samtidigt som de nedre bladen vissnar från spetsen. Bladen på den övriga delen av växten blir ofta smalare än hos normalt utvecklade plantor och får ett upprätt växtsätt. Symptom liknande dem hos spannmål och gräs uppträder även hos andra växter. Äldre blad får ofta en matt mörkgrön färg som kan övergå i rödviolet färg innan bladen dör. Yngre blad blir mindre och får ofta ett mera upptriktat växtsätt. Betor har stort behov av fosfor under tidiga stadier, vilket förklarar de

relativt höga rekommenderade givorna i fosforklasserna I och II (tabell 5).



Fosforbrist i korn. Observera de rödvioletta bladskivorna och de starkt förgrenade rötterna. (Foto: Ghita Cordsen Nielsen)

### Vad kan odlaren göra för att gynna rötternas upptag av fosfat?

För en god rotgenomträngning i alven krävs goda näringsmässiga betingelser under plantans tidigaste utvecklingsstadier. Under tiden närmast efter groning är en god tillgång på fosfat viktig för rotutvecklingen, och därmed också för växtens förmåga att försörja sig med fosfor under den fortsatta utvecklingen. Dåliga betingelser i detta avseende under plantans tidiga utveckling går ofta inte att kompensera genom åtgärder vid senare tidpunkter (Grant et al. 2001). Det är därför viktigt att det finns lättillgängligt fosfat och lämplig fuktighet i de nivåer som växten kan nå tidigt i utvecklingen.

I konventionell odling är radmyllning av lättlöslig fosfat ca 5 cm under såddjup ett enkelt sätt att tillföra lättillgänglig näring som växten kan nå i tidigt stadium. För en ekologisk odlare finns pelleterade KRAV-godkända gödselmedel med relativt lättill-

gängligt fosfat som är möjliga att radmylla. Dessa gödselmedel är emellertid förhållandevis dyra. Djupmyllning av stallgödsel före sådd skulle sannolikt vara en mycket bra metod om det vore möjligt att genomföra med tanke på såtid och tillgång till redskap. När det gäller aggregat för djupmyllning av flytgödsel pågår det utvecklingsarbete. Om det vore möjligt att genomföra djupmyllning av stallgödsel strax under såddjup före sådd är det troligt att även relativt små givor skulle ge en betydande skördeökning.

Ett gott multtillstånd som gynnar en hög mikrobiologisk aktivitet i marken skapar förutsättningar för ett nettoflöde av fosfat till marklösningen. Stallgödselspridning, gröngödsling och vallodling är åtgärder som verkar i denna riktning. Dessa åtgärder påverkar emellertid många andra faktorer som är gynnsamma för grödornas utveckling och det är därför svårt att utvärdera i vilken mån de specifikt påverkar fosfatupptaget hos grödorna i tidigt stadium.

Markstruktur och vattentillgång är andra faktorer som påverkar rotutvecklingen (djup och täthet) under plantans utveckling. En god rotgenomträngning under senare stadier kan försvåras av t.ex. jordpackning, halmlager, plogsula eller skarpa gränser mellan grovkorniga och finkorniga lager.

### Upptag och avgivning av fosfat genom mikroorganismer

De mikroorganismer som har störst betydelse för omsättning av markens näringsämnen är bakterier och svampar. Den totala mängden av fosfor som är bundet i mikroorganismer kan vara upp till 100 kg per ha (Brookes et al. 1984), men stora variationer i detta värde kan förekomma under en växtsäsong. Under de perioder då det är en tillväxt av mikroorganismer i marken kan de ha ett stort behov av att ta upp fosfor från marklösningen. Nedbrukning av fosforfattigt material, t.ex. halm och andra skörderester, skulle därför kunna medföra att mikroorganismer under nedbrytningsprocessen konkurrerar med växtrötterna om lättillgängligt fosfat.

Under perioder då antalet mikroorganismer minskar eller om de substrat som de lever av innehåller mycket fosfor kan det i stället ske ett flöde av fosfat från mikroorganismerna till markvätskan. Många studier har gjorts för att försöka beräkna dessa flöden, men mikroorganismerna ingår i ett mycket komplicerat samspel med alla delar av marksystemet vilket gör att sådana beräkningar är osäkra.



Figur 3. Upptag och avgivning av fosfor genom mikroorganismer

# Flöden av fosfat från markens mullförråd

## Nedbrytningsprocesser

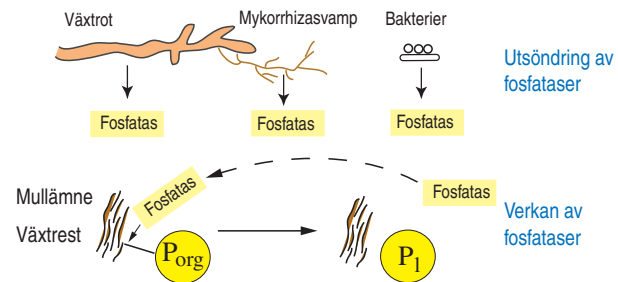
Flödet av fosfat från organiskt material till marklösningen är en nyckelprocess i fosfors kretslopp. Halten fosfor i markens organiska material varierar mellan olika jordar. I de skånska bördighetsförsöken var fosforhalten i det organiska materialet vid försökens start mellan 0,6 och 1,1 % (Gunnarsson, 1987). För att få en grov uppskattning av mängden org-P kan man utgå ifrån att 1% av markens organiska material utgörs av fosfor. I matjordsskiktet skulle då mängden org-P vara omkring 300 kg per procentenhet organiskt material. I en jord med 5 % mullhalt finns det då i storleksordningen 1,5 ton org-P i matjorden.

I växtnäringsrådgivning tas det liten hänsyn till det fosforförråd som utgörs av org-P. En anledning till detta är att analyser av org-P sällan görs på grund av att analysen är ganska komplicerad och dyr. Det är också svårt att utvärdera en analys av org-P eftersom mineraliseringshastigheten är starkt beroende av hur org-P är bundet till det organiska materialet. Huvuddelen av det org-P som är bundet i stallgödsel, skörderester och döda mikroorganismer frigörs ganska lätt, medan org-P som är bundet till stabila mullämnen har mycket låg omsättningshastighet (Oberson et al. 1996).

Hastigheten med vilken org-P frigörs är starkt beroende av markens mikrobiologiska aktivitet. Om marken är lagom fuktig och väl genomluftad samtidigt som det finns en god tillgång på lätt nedbrytbart fosforrikt organiskt material kan man förvänta sig ett betydande nettoflöde av org-P till marklösningen. Om detta sker samtidigt som grödan har ett stort behov av fosfat och rotutvecklingen är god kan flödet ha stor betydelse för växtens fosforförsörjning. Det är emellertid mycket svårt att mäta hur stor del av en grödas fosforupptag som härrör från ett direkt flöde från organiskt material till växtrötterna. Detta beror bl.a. på att en stor del av det fosfat som tillförs marklösningen under nedbrytningsprocesserna tas upp av mikroorganismer eller adsorberas av markmineraler innan det återigen kan frigöras och bli tillgängligt för växterna.

Det är intressant att titta lite närmare på de processer som gör att org-P kan frigöras. Huvuddelen av markens org-P är bundet till mycket stora kemiska föreningar (makromolekyler) som inte kan tas upp av levande celler. För att denna form av fosfor ska bli tillgänglig för växter och mikroorganismer måste den överföras till  $P_1$ . Denna process sker under inverkan av enzymer. Enzymer är livsprocessernas verktyg och deltar i alla biologiska processer där ämnen sönderdelas eller sätts ihop. Alla nedbrytningsprocesser i marken sker därför med hjälp av enzymer. De enzymer som bryter den bindning med vilken fosfat är bundet till det organiska materialet kallas fosfataser. Fosfataserna är av fundamental

betydelse för att markens org-P ska bli tillgänglig för växterna (Tarafdar and Classen, 1988). Processen kan kortfattat beskrivas på följande sätt:



Figur 4. Produktion och verkan av fosfataser i marken.

Man vet att fosfataser utsöndras både av mikroorganismer och växtrötter och därför kan verka utanför cellerna. De är alltså naturens redskap för att den fosfor som är bunden till döda växtdelar och mullämnen ska kunna frigöras och via marklösningen bli tillgängligt för växter och mikroorganismer.

Många undersökningar har visat att låga halter av  $P_1$  i rotmiljön stimulerar utsöndring av fosfataser hos växtrötterna (Tadano et al., 1993). Detta antas vara ett sätt för växten att öka tillgången på fosfor när fosforhalten i marklösningen når kritiska nivåer. Det har också visats att rötternas produktion av fosfataser varierar mellan olika arter och mellan olika sorter hos samma art. Att det inom en art finns en variation mellan olika sorter när det gäller förmågan att utnyttja org-P skulle troligen kunna utnyttjas i förädlingsarbete för att ta fram sorter som har bra förmåga att frigöra fosfat i rotmiljön just vid de stadier då fosforbehovet hos växten är som störst.

## Organiska gödselmedel och mullhalt

I ett 100-årigt fältförsök i Danmark bestämdes organiska och oorganiska fraktioner av fosfor i ögödslande, NPK-gödslande och stallgödslande försöksrutor (Rubaek och Sibbesen, 1995). Samma mängd fosfor, 24 kg per ha och år, hade tillförts NPK- och stallgödselbehandlade led. Ögödslande rutor hade som väntat lägre innehåll av oorganisk och organisk fosfor än de rutor som var gödslande. Rutor gödslande med stallgödsel eller NPK skilde sig inte signifikant från varandra med avseende på halten organisk fosfor. Författarna antog att detta var ett resultat av snabb mineralisering av den organiska fosfor som tillförts med stallgödsel och att den fosfor som därigenom frigjordes till marklösningen i stor utsträckning bands till markens mineralfraktion. I detta sammanhang bör påpekas att en betydande del av fosfor i stallgödsel, i vissa fall uppemot hälften, kan utgöras av vattenlösligt fosfat, alltså i princip samma form av fosfor som förekommer i superfosfat.

Resultaten från Rubaek och Sibbesen (1995) tyder på att växter och mikroorganismer inte direkt

kan utnyttja en stor del av den fosfor som frigörs efter tillförsel av stallgödsel. En bidragande orsak till detta är troligen att stallgödseln nedbrukas vid tidpunkter då det inte finns några växter som kan utnyttja den fosfor som frigörs vid mineraliseringsprocesserna. En höstspredning av stallgödsel eller andra organiska gödselmedel, där en stor del av fosforinnehållet utgörs av fosfat eller lättmineraliserade organiska fosforföreningar, medför därför att den fosfor som tillförs marklösningen i stor utsträckning binds in i markens mineralfraktion. Detta leder fram till en viktig fråga för ekologiska odlare: Bör man sträva efter att utveckla gödslings- och odlingsstrategier där fosfor som tillförs med organiska gödselmedel i större utsträckning byggs in i markens organiska material eller är det en fördel att en stor del av fosfor som tillförs med organiska gödselmedel vid mineralisering binds in i markens mineralfraktion? Idag kan man inte ge något säkert svar på denna fråga.

Om det vore möjligt att genom inblandning av halm eller annat relativt fosforfattigt material med hög org-C/org-P kvot binda in en större andel av fosfor i markens mikroorganismer, och därmed fördröja mineraliseringen till en tidpunkt när växtrötterna behöver mycket fosfor, skulle kanske utnyttjandet av fosfor bli effektivare. Det har visats att tillförsel av organiskt material med hög org-C/org-P kvot kan gynna processer där lättillgängligt fosfat binds in i mikrobiell biomassa. Zhang et al. (1994) visade att tillsats av cellulosa tillsammans med oorganisk fosfor medförde en ökning av halten lättnedbrytbara organiska fosforfraktioner. Deras slutsats var därför att tillsats av fosforfattigt organiskt material skulle kunna vara ett sätt att gynna bildningen av organiskt bunden fosfor i marken och därmed motverka fastläggning av fosfat i markmineralerna.

## Flöden av fosfat till och från markmineralerna

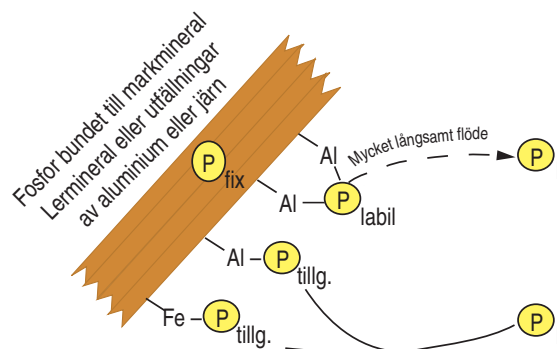
### Fosfors tillgänglighet

I de flesta mineraljordar är mer än hälften av markens totala fosforinnehåll bundet inuti eller på ytan av markmineralerna. De faktorer som styr flödena av fosfat till och från markmineralerna har därför mycket stor betydelse för växternas fosforförsörjning.

Det råder mycket komplicerade förhållanden mellan fosfat i marklösningen och olika former av min-P. Detta beror på att min-P kan bindas på många olika sätt till markmineralerna och att bindningsformerna varierar mellan olika jordtyper. För att beskriva tillgängligheten hos markens mineralbundna fosfor används ofta begreppen löst, lättillgänglig, labil och fixerad fosfor. Det bör emellertid betonas att denna indelning endast är ett sätt att få ett grovt mått på tillgängligheten och att det inte finns några entydiga gränser mellan de olika fraktionerna. Om flödena mellan olika fraktioner betecknas med pilar kan

förhållandena mellan de olika fraktionerna beskrivas på följande sätt:

$P_1 \leftrightarrow \text{min-P tillg} \leftrightarrow \text{min-P labil} (\leftarrow) \rightarrow \text{min-P fix}$



Figur 5. En modell över hur fosforfraktioner med olika tillgänglighet kan bindas till markmineralerna.

Fosfat som är löst i markvätskan är direkt tillgängligt för växterna. Tillgängligt fosfat är löst bundet till partikelytorna, oftast till järn eller aluminium. Denna fraktion av fosfor kan frigöras och bli tillgängligt för växterna under odlings säsongen. Det labila fosfatet är hårdare bundet, t.ex. till två aluminiumatomer, och kan möjligen bli tillgängligt på längre sikt. Fixerat fosfat är bundet inuti mineralpartiklarna och därmed utanför kretsloppet på över-skådlig tid.

Flödesschemat ovan visar att ingen av fraktionerna kan förändras oberoende av de andra. Detta innebär t.ex. att tillförsel eller bortförsel av P tillg på sikt påverkar mängd och sammansättning av samtliga övriga fraktioner. Det måste framhållas att ovanstående resonemang ger en starkt förenklad bild av den oorganiska fosfors flöden, men resultat från forskning och försök ger stöd för att det i princip är riktigt (Gunnarsson 1987, Havlin et al. 1999).

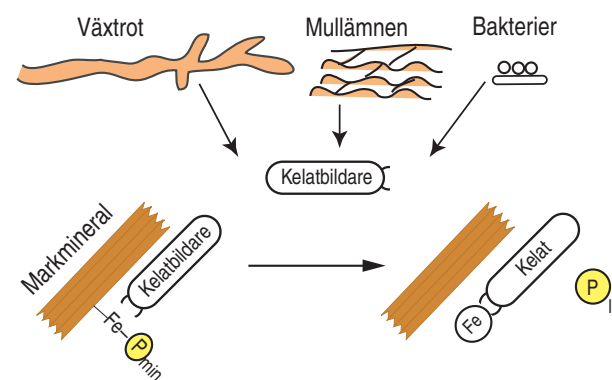
I de skånska bördighetsförsöken har man studerat hur en hög tillförsel av  $P_1$  till marklösningen påverkar bildandet av mycket svårtillgängliga former av fosfor (Gunnarsson 1987, Ivarsson 1989). Studierna ger också en antydning om huruvida utsvältning av marken med avseende på fosfor medför att det blir en nettotransport av svårtillgänglig fosfor mot växttillgängliga former. I försöksled där ingen tillförsel av fosfor skett under nära 30 år minskade såväl relativt lättillgängliga (min-P tillg.) som mycket svårtillgängliga (min-P fix. + min-P labil) fraktioner av fosfor, medan det skedde en ökning av samma fraktioner i de jordar som årligen tillförts 15 eller 30 kg fosfor per hektar utöver bortförseln med grödan. Vid låg tillförsel av fosfor skedde alltså en minskning av halten hårt bunden fosfor, vilket kan tolkas som att det hade skett ett nettotillskott från hårt bunden fosfor i försöksled där ingen fosfor tillfördes marksystemet medan nettoflödet gått i motsatt riktning där jorden som tillförts rikligt med fosfor.

Markkemiskt fungerar det så att fosfat i första hand binds till de ”lediga” platser på markmineralen där det binds hårdast. Detta innebär att ju mer fosfat som binds på mineralytorna desto svagare blir den genomsnittliga bindningsstyrkan. Detta leder i sin tur till att andelen lättillgängligt fosfat ökar. Om en jord genom gödsling går mot ett högre fosfortillstånd kommer därför halten tillgängligt fosfor på mineralytorna att öka (Börling 2003).

I detta sammanhang kan det vara lämpligt att titta lite närmare på de markprocesser som bidrar till att min-P frigörs till markvätskan. En viktig faktor är koncentrationen av  $P_1$ . Om rotutvecklingen är god och växtens behov av fosfor är stort uppstår ett flöde av  $P_1$  mot rötterna. Då kommer marklösningen att fyllas på av lättillgänglig min-P. Om det tillförs fosfat till markvätskan genom gödsling eller nedbrytning av organiskt material, och växter eller mikroorganismer inte kan ta upp överskottet, binds fosfatet snabbt till markens mineralbeståndsdelar.

### Kelatbildare ökar tillgängligheten

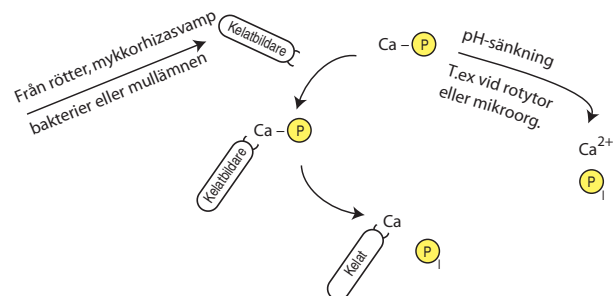
Naturen har utvecklat en intressant mekanism för att frigöra fosfat som är bundet till ytan av markmineraler. Både växtrötter och mikroorganismer kan utsöndra ämnen som har förmåga att binda starkt till bl.a. järn, aluminium och kalcium. Även vid nedbrytning av organiskt material i marken bildas ämnen med dessa egenskaper. Den kemiska benämningen på dessa ämnen är kelatbildare. När en kelatbildare har bundit till en metall har det bildats ett kelat. Om en kelatbildare angriper ett järnfosfat ( $Fe-P$ ) kommer järnatomen att dras bort från fosfatet. Då frigörs fosfatet och kommer ut i marklösningen. Processen illustreras i figur 6.



Figur 6. Frigörande av fosfat genom kelatbildning.

Kelatbildning har troligen mycket stor betydelse i naturen genom att hårt bundet fosfat på detta sätt förs ut i marklösningen och blir tillgängligt för växterna. Stimulering av den mikrobiella aktiviteten i marken genom tillförsel av organiska gödselmedel är exempel på åtgärder som gynnar bildningen av kelatbildare i marken (Schilling et al. 1998, Kamh et al. 1999).

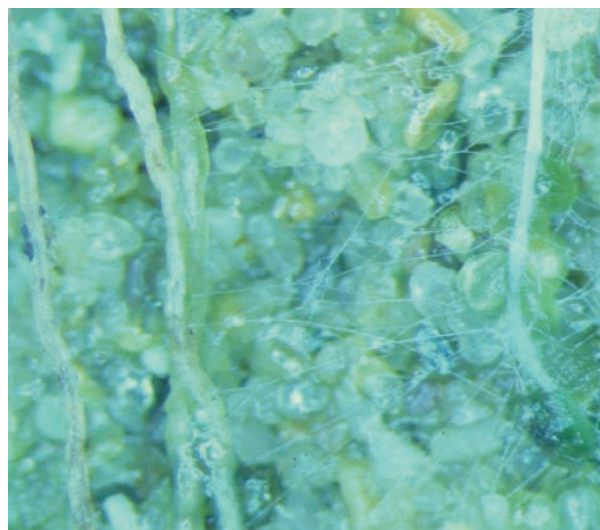
Ett problem i kalkrika jordar är att fosfor binds mycket hårt till kalcium. Kelatbildare har förmågan att frigöra fosfat i sådan mark. Växterna kan också utsöndra syror som sänker pH-värdet i området närmast rötterna, varvid det kalciumbundna fosfatets löslighet ökar (figur 7).



Figur 7. Processer för att frigöra kalciumbundet fosfat i kalkrika jordar.

### Mykorrhiza gynnar upptag av fosfor

Mykorrhiza är en samverkan, symbios, mellan svamptrådar i marken och växtrötter. Svamptrådar tränger in i rötterna och kan på så sätt sägas utgöra en utvidgning av rotsystemet (se bild nedan). Svampen drar nytta av symbiosen genom att ta energi ifrån växten bl.a. i form av socker. Från markmineralen och markens organiska material har svampen stor förmåga att ta upp fosfat och andra näringsämnen som växten kan utnyttja (Kling 1998, Börling et al. 1999). Det finns också starka indikationer på att bakterier kan samverka med mykorrhizasvampar i ritzosfären (Johansson et al., 2004). Mykorrhizasvamparnas förmåga att frigöra fosfat beror dels på den stora kontaktyta som bildas genom svamptrådarnas rika förgrening och genom att svampen kan utsöndra både kelatbildare och fosfater (Joner et al., 2000, Ryan och Graham, 2002).



Rötter och mykorrhiza i jord. Man ser både svampphyferna och rötterna med mellanliggande jordmaterial. (Foto: Andy Taylor)



Undersökningar har visat att låg halt lättillgängligt fosfat i marken gynnar etableringen av mykorrhiza. I väl kontrollerade försök har det också visats att mykorrhizabildning i fosforfattiga jordar leder till högre upptag av fosfor och förbättrad utveckling av växterna (Börling et al. 1999, Miyasaka and Habte 2001). Alla undersökningar har inte visat på lika entydiga samband mellan skörd och mykorrhizabildning. Detta beror troligen på att många faktorer varierar samtidigt när studier görs under fältförhållanden. Vid sådana studier är det därför svårt att värdera hur mycket av variationen av en grödas utveckling som kan knytas till en så svårstuderad företeelse som mykorrhiza (Ryan and Graham 2002).

### Kalkning

Allmänt kan sägas att i sura jordar gynnas tillgängligheten av markens oorganiska fosfor av kalkning, medan tillgängligheten av fosfor i kalkrika jordar skulle gynnas av en pH-sänkning. Kalkningens effekter i sura jordar beror på att fosfatets bindning till aluminium och järn försvagas vid högre pH-värden.

I kalkrika jordar är en stor del av fosfor hårt bunden som svårslösliga kalciumföreningar, vilket kan leda till att flödes hastigheten av fosfat till marklösningen är så låg att växtens fosforbehov inte kan tillgodoses. Att sänka pH i kalkrika jordar är oftast inte praktiskt möjligt. I stället bör de biologiska processer som verkar i riktning mot en ökad upptagning av fosfat i rotmiljön gynnas i största möjliga utsträckning, t.ex. kelatbildning och mykorrhiza.

Det är flera faktorer i marken som påverkas av kalkning, varför orsakerna till kalkningens fosforeffekter är komplicerade. Som exempel kan nämnas att ökad markbiologisk aktivitet och därmed ett ökat flöde av fosfor från organiskt material kan bidra till förhöjda nivåer av lättillgänglig fosfor efter kalkning. Fosforupptaget kan dessutom öka som en följd av kalkningens gynnsamma inverkan på markstrukturen, vilket gynnar rotutvecklingen hos grödan.

Ur markkemisk synpunkt är det väl dokumenterat att fosfat i mineraljordar har störst tillgänglighet vid pH-värden nära 6,5. När det gäller kalkningens inverkan på skördenivån är det däremot svårare att ge generella rekommendationer eftersom det råder mycket komplicerade samspel mellan markens pH, jordart, struktur, näringsämnen, markorganismer och olika grödor (Magnusson, 2000, Ståhlberg, 1982, Haak och Siman, 1991).

### Transport av fosfat genom markprofilen

Fosfat rör sig långsamt i markprofilen. Data från ett försök i Rothamsted i England visar detta (tabell 2). En årlig tillförsel av 34 kg fosfor per ha under 150 år gav en betydande höjning av den totala fosforhalten i matjorden och en svag ökning ned till 46 cm i jämförelse med en markprofil som inte tillförts någon fosfor under motsvarande tid. Spridning av 40 kg fosfor per år med stallgödsel resulterade i en större transport nedåt i profilen, men ökningen skedde ändå huvudsakligen i matjorden. Från de svenska bördighetsförsöken har liknande resultat redovisats. Efter över 30 års gödsling med ca 45 kg fosfor per år förelåg inga skillnader i fosforinnehåll under 40 cm djup (Börling 2003). Orsakerna till den ökade transporten av fosfat i jordar som tillförts stallgödsel kan vara följande:

- ökad vertikal transport av org-P med daggmaskar
- större transport av partikelbunden min-P i maskgångar och sprickor
- ökad halt av vattenlösligt org-P
- högre halt av P<sub>1</sub> på grund av hög mineraliseringshastighet
- högre halt av P<sub>1</sub> på grund av kelatbildning.

Trots att fosfat har låg rörlighet i marken kan transporten från åkermark orsaka miljöproblem genom övergödning av vattendrag, sjöar och kustvatten. De vattenburna förlusterna av fosfor från åkermark sker genom yttransport av partikelbunden fosfor, genom att fosfor bundet till mycket små partiklar transpor-

**Tabell 2.** Fosforinnehåll på olika djup efter i stort sett årlig gödsling mellan åren 1843–1974. Rothamsted, England. (Ur: Johnston A.E. 1976)

Djup cm	Ingen fosforgödsling	Superfosfat 34 kg fosfor per ha och år vid 115 tillfällen	Stallgödsel Ca 40 kg fosfor per ha och år vid 102 tillfällen
	Totalfosfor (mg per kg jord)		
0–23	780	1 350	1 380
23–30	460	540	650
30–46	410	450	530
46–53	400	400	440

teras genom markens porsystem och genom transport av fosfat löst i markvätskan (Ulén, 2002, Börling 2003, Ulén 2004). Mätningar har visat att spridning av flytgödsel på vattenmättade marker kan ge stora fosforförluster, även i de fall då flytgödseln sprids på vallar. De viktigaste rekommendationerna som rör ekologisk odling är att inte sprida stallgödsel på blöta marker eller när det är risk för häftiga regn. Det bästa alternativet ur både växtnäringssynpunkt och för att minimera förluster är att sprida och mylla ned stallgödseln före vårsådd.

I försök på lerjord i Västergötland och sandig grovmo i Halland har bl.a. utlakning av fosfor studerats i ekologisk odling med och utan djur. Genom närliggande försök kunde utlakningen jämföras med konventionell odling (Torstensson, 2003 a,b). I försöken kunde det inte konstateras någon skillnad i utlakning av fosfor mellan ekologisk och konventionell odling. I lerjorden med ekologisk odling var det en tendens till större utlakning i inriktningen utan djur (tabell 3), vilket möjligen kan förklaras av svårigheter att kontrollera tillförseln av lättillgänglig fosfor med grön gödselvallar. Lerjorden hade större utlakning än grovmon, vilket troligen kan förklaras av en större transport av finkorniga partiklar med dräneringsvattnet. Siffrorna i tabellen gäller endast två försök så man kan inte dra några generella slutsatser av resultaten.

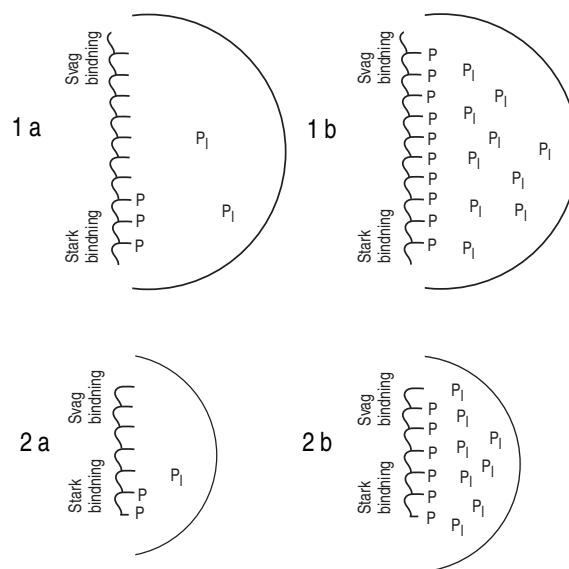
**Tabell 3.** Utlakning av fosfor i ekologisk odling med och utan djur.

	Lerjord Västergötland 1997–2002		Sandig grovmo Halland 1991–2002	
	Utan djur	Med djur	Utan djur	Med djur
Utlakning av fosfor	0,90	0,59	0,24	0,23

## På vilka sätt kan en odlare påverka de processer som styr fosfors tillgänglighet i marken?

Markmineralen har ett stort inflytande på tillgängligheten hos markens fosfat. Det fosfat som tillförs marklösningen genom gödsling eller nedbrytning av organiskt material har stor tendens att bindas till mineralytorna. Det beror på att det finns många bindningsställen för fosfat på mineralytorna. Antalet bindningsställen beror i första hand på totala bindningsytan och halten aktivt järn och aluminium. Finkorniga jordar med stor andel aktivt järn och aluminium på ytorna kan binda mycket fosfat medan lätta jordar med relativt liten andel aktivt aluminium och järn har liten förmåga att binda fosfat. Fosfat

binds i första hand till de starkaste bindningsställena som är lediga. Detta innebär att ju mera mättade mineralytorna är på fosfat, desto svagare är den genomsnittliga bindningsstyrkan. I figur 8 visas enkla modeller över några situationer. Figuren är ett försök att på ett överskådligt sätt beskriva möjliga situationer i jordar med låg respektive hög kapacitet att binda fosfat.



**Figure 8.** Bindningsförhållanden hos mineralbundet fosfat.

1a) En jord med många bindningsställen men som är utarmad på fosfat. Den genomsnittliga bindningsstyrkan för fosfatet är stor, vilket innebär att marklösningen i jämvikt med mineralen har mycket låg koncentration av  $P_i$ . Flödet av fosfat mot växtrötterna blir lågt. Ur miljösynpunkt är situationen gynnsam, eftersom utlakningen är liten. Mineralytorna har stor förmåga att binda fosfat som tillförs marklösningen genom gödselmedel eller mineralisering av org-P. Eftersom det finns många lediga bindningsställen kan det ta många år att gödsla upp jorden.

1b) Samma jord som under många år tillförts ett överskott av fosfat. En stor del av fosfatet på mineralytorna är svagt bundet och marklösningen har en relativt hög koncentration av fosfat. Det finns ett stort kapital av lättillgängligt fosfat att ta av och jorden kan ha en negativ fosforbalans åtskilliga år utan att växternas fosforförsörjning påverkas. Tillförsel av stallgödsel till en sådan jord kan medföra betydande vattenburna förluster.

2a) En grovkornig jord med få bindningsställen som samtidigt är utarmad på fosfat. Bindningsstyrkan hos det bundna fosfatet kan vara stor. Flödet av fosfat mot växtrötterna är mycket lågt. Utlakningen är liten och partikeltransporten av fosfat är låg. Jorden är relativt lätt att gödsla upp.

2b) Samma jord som under ett fåtal år tillförts ett överskott av fosfat. Den genomsnittliga bindningsstyrkan hos fosfatet är mycket låg och marklösningen har en hög koncentration av  $P_1$ . Ytterligare gödsling kan ge betydande utlakning under en nederbördsrik situation. Ett fåtal år med negativ fosforbalans kan medföra att jorden åter får ett lågt fosfortillstånd.

Modellerna ovan visar hur viktigt det är att en odlare har goda kunskaper om sina jordars egenskaper. En analys av lättillgängligt fosfat enligt P-AL skulle förmodligen ge en hög fosforklass för både 1b och 2b ovan, men analysen ger ingen information om jordarnas uthållighet mot negativ fosforbalans.

Odlaren kan inte påverka jordarten. Närings-tillståndet går däremot att styra genom att ha kontroll över gårdens näringsbalans. När det gäller fosfor kan det vara lämpligt att sträva mot ett tillstånd mellan ytterligheterna i modellerna ovan. Vi kan tänka oss en jord där vi vill hålla fosforklassen III och ändå ha en god fosforförsörjning för grödorna.

Viktiga principer inom ekologisk odling är att brukandet ska vara uthålligt och skonsamt mot miljön. Naturens egna mekanismer att frigöra svårtillgängliga näringsämnen ska utnyttjas så långt det är möjligt. I tabell 4 ges en sammanfattning av biologiska processer som påverkar tillgängligheten av fosfat i marken.

**Tabell 4.** Faktorer som påverkar grödans fosforupptag.

Faktor	Effekt	Åtgärder
God rotutveckling (Täthet, djup)	Större total kontaktyta mellan rot och jord. Näringsförråd i alven utnyttjas. Stort rotdjup ger mindre känslighet för torka.	Gynna struktur i matjord och alv genom: – Minskad jordpackning – Hög mullhalt – Hög biologisk aktivitet – Fleråriga klöver eller lusernvallar – Strukturkalkning
Mykorrhizasymbios	Ökar den effektiva rotvolymen. Ökar fosfors löslighet genom utsöndringsprodukter.	Mykorrhizasymbios stimuleras av låg halt lättillgängligt fosfat.
Hög mikrobiell aktivitet	Hög mineraliseringshastighet av fosfor.	Tillförsel av lättnedbrytbart organiskt material genom grüngödsling, marktäckning och vallodling samt tillförsel av stallgödsel och kompost.
Enzymproduktion hos växtrötter (fosfataser)	Gynnar fosformineralisering vid rotytan.	Utveckla sorter med effektiv enzymproduktion. Ett utvecklingsarbete som odlaren inte direkt kan påverka. En låg halt lättillgängligt fosfat stimulerar fosfatasbildning.
Nedbrytningsprodukter från organiskt material	Syror och kelatbildare som bidrar till att mineralbunden fosfor löses ut. Flödet till marklösningen gynnas då.	Öka tillförseln av växtmaterial genom grüngödsling, marktäckning och vallodling. Tillförsel av stallgödsel och kompost.
Utsöndring av kelatbildare från mikroorganismer (t.ex. fosfatbakterier) och rötter	Bidrar till att mineralbunden fosfor löses ut. I sura jordar gynnas utlösning av järn- och aluminiumbundet fosfat. I kalkrika jordar gynnas utlösning av kalciumbundet fosfat.	Gynna den mikrobiella aktiviteten i marken genom t.ex. stallgödsel eller grüngödsling.
pH- värde runt rötter och i marklösningen	I en sur jord gynnas fosfors löslighet av en höjning av pH till ca 6.5.	Kalkning av sura jordar.

## Rekommenderade givor av fosfor

Målet är att hålla en växtnärbalans som är gynnsam både ur odlings- och miljösynpunkt. Råd-givningen har därför inriktats på att fosfornivåerna i marken ska stabiliseras på fosforklass III enligt AL-metoden. Markanalyser, kombinerade med en noggrann dokumentation av växtnärbalansen för olika skiften, är nödvändiga redskap för att uppnå dessa mål. För jordar i fosforklasserna I och II rekommenderas en större tillförsel av fosfor än vad som förs bort med skördeprodukterna, medan jordar i klass IV eller V inte bör uppgödas ytterligare.

Inom ekologisk odling sker fosfortillförseln huvudsakligen med stallgödsel eller andra organiska gödselmedel till de mest krävande grödorna. Därför

kan en krävande gröda, t.ex. potatis tillföras fosfor som täcker behovet för en eller flera följande grödor. Uppgifter om stallgödselns innehåll av fosfor finns i Jordbruksverkets anvisningar för gödsling och kalkning (Jordbruksverket 2004) samt i Steineck et.al (2000). Med kännedom om skördeprodukternas innehåll av fosfor kan en beräkning av fosforbalansen under ett växtföljdsförlopp lätt göras. Ett mycket använt hjälpmedel för beräkning av växtnärbalanser är dataprogrammet STANK.

Växtens totala behov av fosfor under vegetationsperioden är större än bortförseln med skördeprodukterna beroende på upptaget av fosfor i andra delar av växten. För spannmål är upptaget till blad, stam och rötter av ungefär samma storlek som innehållet i kärnan.

**Tabell 5.** Fosforinnehåll i skördeprodukter och fosforbehov för olika grödor. Värdena på bortförsel är hämtade från STANK (Jordbruksverket) och Yara ([www.hydroagri.se](http://www.hydroagri.se))

Gröda	Bortförsel med grödan. Kg per ton friskvikt eller torrsubstans.	Riktgivor för fosforgödsling (Jordbruksverket, 2004)					
		Skördenivå (ton per ha)	P-AI-klass				
			I	II	III	IV	V
Spannmål	3-3,5 (friskv.)	5	35	25	15	10	0
Matpotatis	0,5 (friskv.)	30	100*	80*	60*	40*	20*
Ärter	3,6 (friskv.)	3,5	35	25	15	10	0
Klövergräshö	2,6 (ts.)	6	35	25	15	10	0
Klövergräsensilage	2.1 (ts.)						
Raps	1,3 (friskv)	2	35	25	15	10	0
Socketbetor	0,4 (friskv.)	45	50	40	25	20	0

\* Givan till potatis beräknas räcka för två efterföljande grödor

## Litteraturreferenser

- Andersson A., Eriksson J. och Mattsson L. (1998) Fosforupplagringen i svensk jordbruksmark. SNV Rapport 4919.
- Brookes P.C., Powlson D.S. and Jenkinson D.S. (1984) Phosphorus in the soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry* 16, 169-175.
- Börling B., Djodjic F., Kling M., Ottabong E. och Ulén B. (1999) Fosforhushållning – mykorrhiza, fixering och utlakning i mark. Sveriges lantbruksuniversitet, Fakta jordbruk nr 10, 1999.
- Börling K. (2003) Phosphorus Sorption, Accumulation and Leaking. *Agraria* 428. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences.
- Eriksson J., Andersson A. och Andersson R. (1997) Tillståndet i svensk åkermark. SNV Rapport 4778.
- Grant C.A., Flaten D.N., Tomaszewicz D.J. and Sheppard S.C. (2001) The importance of early season phosphorus nutrition. *Can.J.Plant. Sci* 81, 211-224.
- Gunnarson O. (1983) Heavy metals in fertilizers, do they cause environmental and health problems? *Fertilizers and Agriculture* 85, 27-42.
- Gunnarsson O (1987) Den långsiktiga fosfordynamiken i de skånska bördighetsförsöken. *Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens tidskrift, Supplement* 19, 71-92.
- Haak E (1981) Nutrient uptake from subsoil by cereals. *Proceedings of the 16th Colloquium, International Potash Institute, Bern*.
- Haak E och Simán G (1992) Fältförsök med kalkning av fastmarksjordar till olika basmättnadsgrad. Sveriges lantbruksuniversitet, Avdelningen för växtnäringslära, Rapport nr 188.
- Havlin J.L., Beaton J.D., Tisdale S.L. and Nelson W.N. (1999) *Soil Fertility and Fertilizers* 6th ed. Prentice Hall, New Jersey
- Ivarsson K. (1989) Large amounts of soil phosphorus - difficult for the plant to utilize. *Licenciatavhandling, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för markvetenskap*.
- Johansson J.F., Paul L.R. and Finlay R.D. (2004) Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. *FEMS Microbiology Ecology* 48, 1-13.
- Johnston A.E. (1976) *Agriculture and Water Quality*, MAFF Tech. Bull. 32. London: HMSO.
- Joner E.J., van Aarle I.M. and Vosatka M. (2000) Phosphatase activity of extra-radical arbuscular mycorrhizal hyphae: A review. *Plant and Soil* 226, 199-210.
- Kamh M., Horst W., Amer F., Mostafa H. and Maier P. (1999) Mobilization of soil and fertilizer phosphate by cover crops. *Plant and Soil* 211, 19-27.
- Kling M. (1998) Mykorrhiza – dold kraft i växtproduktionen. Sveriges lantbruksuniversitet, Fakta jordbruk nr 13, 1998.
- KRAV (2004) *Regler för kravgodkänd produktion, 2004*.
- Magnusson M. (2000) *Soil pH and Nutrient Uptake in Cauliflower and Broccoli in Northern Sweden*. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences.
- Miyasaka S. and Habte M. (2001) Plant mechanisms and mycorrhizal symbioses to increase phosphorus efficiency. *Commun. Soil. Sci. Plant. Anal.* 32 (7,8), 1101-1147.
- Oberson A., Besson J.M., Maire N. and Sticher H. (1996) Microbiological processes in soil organic phosphorus transformations in conventional and biological cropping systems. *Biol.Fert. Soils* 21, 138-148.

Rubaek G.H. and Sibbesen E. (1995) Soil phosphorus dynamics in a long-term field experiment at Askov. *Biology and Fertility of Soils* 20, 86-92.

Ryan M.H. and Graham J.H. (2002) Is there a role for arbuscular mykorrhizal fungi in production agriculture? *Plant and Soil* 244, 263-271.

Schilling G., Gransee A., Deubel A., Lezovic G. and Ruppel S. (1998) Phosphorus availability, root exudates and microbial activity in the rhizosphere. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 161, 465-478.

Steineck S., Gustafson A., RichertStintzig A., Salomon E., Myrbeck Å., Albiñ A. och Sundberg M. (2000) Växtnäring i kretslopp. SLU

Ståhlberg S. (1982) Estimation of the requirement of liming by determination of exchangeable soil aluminium. *Acta Agricultura Scandinavica* 32, 357-367.

Tadano T., Ozawa K., Sakai H., Osaki M. and Matsui H. (1993) Secretion of acid phosphatase by the roots of crop plants under phosphorus deficient conditions and some properties of the enzyme secreted by lupin roots. *Plant and Soil* 155/156, 95-98.

Tarafdar J.C. and Classen N. (1988) Organic phosphorus compounds as a phosphorus source for higher plants through the activity of phosphatases produced by plant roots and microorganisms. *Biology and Fertility of Soils* 5, 308-312.

Torstensson G. (2003a) Ekologisk odling – Utlakningsrisker och kväveomsättning. *Ekohydrologi* nr. 72. avdelningen för vattenvårdslära, SLU.

Torstensson G. (2003b) Ekologisk odling – Utlakningsrisker och kväveomsättning. *Ekohydrologi* nr. 73. avdelningen för vattenvårdslära, SLU.

Ulén B. (2002) Svävande partiklar för fosfor till havet. *Fakta jordbruk* nr 6, 2002. SLU.

Ulén B. (2002) Undvik fosforläckage när lerjordar gödglas. *Fakta Jordbruk* nr 2, 2002. SLU.

Ulén B. (2004) Fosforförluster från mark till vatten. *Naturvårdsverket. Rapport. Under publicering.*

Wild A. (1988) Plant nutrients in soil. In: Russel s *Soil Conditions and Plant Growth*, 11th ed. Wild A (ed.). John Wiley & Sons, Inc. pp 695-742.

Zhang Y.S., Werner W., Scherer H.W. and Sun X. (1994) Effect of organic manure on organic phosphorus fractions in two paddy soils. *Biology and Fertility of Soils* 17, 64-68.



Broschyren är en del i kurspärmen "Ekologisk växtodling" 2004.

Jordbruksverket  
551 82 Jönköping  
Tfn 036-15 50 00 (vx)  
E-post: [jordbruksverket@jordbruksverket.se](mailto:jordbruksverket@jordbruksverket.se)  
Webbplats: [www.jordbruksverket.se](http://www.jordbruksverket.se)



Europeiska jordbruksfonden för  
landsbygdsutveckling. Europa  
investerar i landsbygdsområden