



Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för mark och miljö

Möjligheter till ökat utnyttjande av fosfor genom grödan med mineralgödselmedel

*Possibilities to increase the phosphorus utilization rate in crops
with the use of inorganic fertilizers*

Lisa Ehde

Kandidatuppsats i biologi

SLU, Sveriges lantbruksuniversitet
Fakulteten för naturresurser och lantbruksvetenskap
Institutionen för mark och miljö

Lisa Ehde

Möjligheter till ökat utnyttjande av fosfor genom grödan med mineralgödselmedel
Possibilities to increase the phosphorus utilization rate in crops with the use of inorganic fertilizers

Handledare: Holger Kirchmann, institutionen för mark och miljö, SLU
Examinator: Thomas Kätterer, institutionen för mark och miljö, SLU
EX0418, Självständigt arbete i biologi, 15 hp, Grund C

Institutionen för mark och miljö, SLU, Examensarbeten 2010:05
Uppsala 2010

Nyckelord: Fosforeffektivitet, mineralgödsel, fosforutnyttjande, fosforkemi, rotupptag

Abstract

The objective of this thesis is to explore opportunities to enhance the phosphorus use efficiency of inorganic fertilizers in crop production, with techniques available today and in the future. Phosphorus is a finite resource of declining quality; therefore a phosphorus use efficiency in crop production of only 15-30 % is unacceptable. The main reason for low efficiency is the retention by Ca and Mg in calcareous soils and Fe and Al in non-calcareous soils. Due to the low mobility of phosphorus, plant uptake is mainly dependent on root growth rather than diffusion. Therefore, measurements need to be taken that benefit contact between root and fertilizer, before fertilizer phosphorus becomes unavailable to the plant. Among the most common fertilizers no consistent difference in efficiency exists although the initial reaction pH of the fertilizer may have an impact on the efficiency. Dressing should be done every year in spring and root uptake is enhanced by placing the fertilizer in bands under the seed, about 10 cm from the surface. It is possible to make complimentary dressing by foliar application. Further enhancements may be accomplished by using liquid fertilizer. Efficiency may be further improved on some soils by increasing the granular size to limit contact between fertilizer and soil, thereby minimizing retention and keeping phosphorus in solution. On other soils it might be of advantage to use a smaller granular size that places phosphorus fertilizers in a continuous band to improve root proliferation. Enhanced efficiency phosphorus fertilizers (EEF:s) may further increase plant utilization by slow release or cation adsorption. However, more research needs to be done on the subject. For maximum efficiency, fertilizer phosphorus in soil solution must be synchronized with plant demand. To feed a growing world population at a reasonable environmental as well as monetary expense, further steps need to be taken to increase the efficiency to an acceptable level.

Innehållsförteckning

1. Varför bör fosforutnyttjandet öka?.....	5
2.2 Avgränsning	6
2.3 Metod.....	6
3.1 Vad innebär effektivitet i fosforutnyttjande?	6
3.2 Hur ser fosforanvändningen och effektiviteten ut i Sverige idag?.....	6
4. Vad styr växttillgängligheten av fosfor i marken?.....	8
4.1 Markens fosforkemi	8
4.2 Rotens fosforupptag	10
5. Olika fosforgödselmedel.....	11
5.1 Kalciumfosfater	11
5.2 Ammoniumfosfater	12
6. Gödselmedlets reaktioner i marken.....	12
6.1 Vad händer med fosforgödselmedlet i marken?	12
6.2 Vilket fosforgödselmedel är effektivast?.....	13
6.3 Fosforgödselmedlets påverkan på markens pH-värde.....	14
7. Hur optimeras fosforutnyttjandet idag ?.....	16
7.1 När bör fosforgödsling ske för bästa effektivitet?.....	16
7.2 Hur kan tidpunkten för spridning av fosforgödselmedel optimeras?.....	17
7.3 Kan man bladgödsla med fosfor?.....	17
7.4 Hur bör fosforgödselmedlet spridas och placeras för bäst effekt?.....	18
7.5 Olika spridningsmetoder.....	18
7.6 Var bör fosforgödslingen placeras för att maximera rotupptaget?.....	19
8. Vilka möjligheter finns till ökat fosforutnyttjande i framtiden?	21
8.1 Har granulstorleken någon betydelse?.....	21
8.2 Granul eller vätska - vad är effektivast?	25
8.3 Framtidens gödselmedel för ökad fosforutnyttjandegrad med handelsgödsel.....	25
8.4 Kan retentionen förhindras med polymercoating med hög katjonbyteskapacitet?	26
8.5 Kan långsam upplösning av fosforgödselmedlet förhindra retention?.....	26
9. Möjligheter till ökat fosforutnyttjande med mineralgödsel nu och i framtiden.....	27
Referenser	30

1. Varför bör fosforutnyttjandet öka?

Fosfor är ett för växter essentiellt makronäringsämne som krävs bland annat för energiöverföring, i cellmembran och i DNA. Fosfor som mineralgödsel är därmed även oundgängligt inom jordbruket för en framgångsrik växtproduktion. Fosfordynamiken i marken är komplicerad och växttillgängligheten av applicerad fosfor varierar, vilket påverkar effektiviteten av använd fosfor som i nuläget enbart är 15-30 % (Venugopalan och Prasad, 1990). Förutom den uppenbart ekonomiska förlusten i ett dåligt fosforutnyttjande finns det ytterligare anledningar till att fosforutnyttjandegraden bör öka. Fosforråvara, och framförallt fosforråvara med lågt kadmiuminnehåll, är en begränsad resurs som vi bör hushålla med.

Den fosfor som används för tillverkning av mineralgödsel härrör i huvudsak från brytning av den sedimentära bergarten apatit, och ungefär 90 % av den brutna apatiten används för tillverkning av mineralgödsel. De största reserverna av apatit finns i Marocko, Ryssland, USA, Sydafrika och Kina. Beräkningarna av hur länge denna fosfor kommer att räcka varierar beroende på hur beräkningarna sker (Naturvårdsverket, 1997). Med utgångspunkt från storleken på reserverna som kan brytas med dagens teknik och dagens konsumtion räcker reserverna i ungefär 90 år¹ (U.S. Geological Survey, 2009). Beräkningarna är dock gjorda med tanke på dagens fosforanvändning, vilket betyder att med en förväntad befolkningsökning och ökad efterfrågan på mat, räcker förmodligen inte fosforreserverna ens så länge som beräknat ovan. Fosfor är därmed en ändlig resurs som vi bör hushålla med.

Ytterligare en aspekt av fosforproblematiken är att all fosforråvara innehåller kadmium i varierande koncentrationer. Kadmium är giftigt för människor i för höga koncentrationer, då det bland annat kan störa njurfunktioner. I Sverige får därför inte kadmiumhalten i gödselmedel överstiga 100 mg/kg fosfor. Minst kadmium finns i råfosfaten från Kola i Ryssland, Palfos i Sydafrika och Siliinjäri i Finland där koncentrationerna ligger på enbart 0,9 mg/kg P. Övriga reserver har betydligt högre koncentrationer, Marockos reserver har koncentrationer på 220-274 mg/kg P och USA:s 56-278 mg/kg P (Naturvårdsverket 1997). Tillgången på fosforråvara med låg kadmiumhalt är därmed begränsad och i nuläget blandas gödselmedel av varierande kadmiumhalt för ett fosforgödselmedel med acceptabel kadmiumkoncentration. I framtiden då tillgången på råfosfat med låg kadmiumhalt minskar, ökar dock kravet på rening, vilket stegrar priset för gödslet och ger en kadmiumrik restprodukt som måste omhändertas (Naturvårdsverket, 1997).

Av vad som anförts ovan framgår att fosfor är en ändlig resurs som är på väg att ta slut, och att reserver av god kvalitet minskar än fortare. I ett fungerande jordbruk som kan föda en växande befolkning har vi därmed inte råd med dagens låga fosforutnyttjandegrad.

¹ Reserverna i världen uppgår till 15 000 000 ton och produktionen till 167 000 ton år 2008.

2.1 Syfte

Syftet med detta arbete är att finna möjligheter till ökat fosforutnyttjande med mineralgödsel genom att söka svar på frågorna; hur ser fosforanvändningen och utnyttjandegraden ut i Sverige idag? Vad styr växttillgängligheten av fosfor i marken? Hur fungerar olika fosforgödselmedel? Hur optimeras fosforutnyttjandet idag? Och vilka möjligheter finns till att öka fosforutnyttjandet i framtiden?

2.2 Avgränsning

Arbetet avgränsas till utnyttjande av fosfor från mineralgödsel främst genom stråsåd och oljeväxter och fokuserar på de kemiska processer som styr fosforutnyttjandegraden.

2.3 Metod

Detta arbete baseras på en litteraturstudie.

3.1 Vad innebär effektivitet i fosforutnyttjande?

För att beräkna effektiviteten i fosforutnyttjandet finns olika metoder, vilka ger olika resultat. Fosforutnyttjandet kan beräknas enligt följande metod:

$$\text{Fosforutnyttjande (\%)} = P_{\text{ut}}/P_{\text{in}} \cdot 100$$

P_{ut} = fosforupptaget i grödan

P_{in} = fosforgiva

Denna metod kan vara missvisande då ingen hänsyn tas till att upptaget fosfor kan härröra från andra källor än årets gödsling, det vill säga från markförrådet. Vid beräkning av fosforutnyttjandegrad med denna metod erhålls därmed ofta relativt höga siffror. En mer lämplig metod är istället den så kallade differensmetoden:

$$\text{Fosforutnyttjande (\%)} = ((P_g - P_o)/(P_{\text{in}})) \cdot 100$$

P_g = fosforupptag i gödslat led

P_o = fosforupptag i ogödslat led

Med denna metod beaktas den del av fosfor som härrör ifrån markförrådet. Effektiviteten i fosforutnyttjande i detta arbete är uteslutande beräknat enligt differensmetoden.

3.2 Hur ser fosforanvändningen och effektiviteten ut i Sverige idag?

Historiskt sett har användningen av mineralgödsel i lantbruket varit en förutsättning för att skapa den avkastningsökning som skett i svenskt jordbruk sedan 1950/1960-talet, och fosforgödslingen har givetvis varit en del av detta. Rekommendationerna för fosforgödsling har varierat över tiden, bland annat beroende på fosforpriset. Generellt sett har en uppgödsling av svenska jordar skett bland annat på grund av den låga utnyttjandegraden av fosfor (Jordbruksverket, 1995). Fosforutnyttjandegraden i jordbruket ligger idag på cirka 15-30 % (Gökmen, Sencar 1999). Huvuddelen av den fosfor som historiskt sett tillförts marken, och därmed inte utnyttjats av växter, har därmed gått in i markförrådet vilket lett till en uppgödslingen av svenska jordar.

Tabell 1. Rekommenderad fosforgiva kg/ha för olika P-AL enligt Jordbruksverkets rekommendationer för gödsling och kalkning år 2009 respektive 2010.

Gröda	Skörd ton/ha	Bortförelse kg/ha	Rekommenderad fosforgiva kg/ha P-AL-tal (mg P/100 g jord)											
			I < 2		II 2-4		III 4,1-8,0		IVA ² 8,1-12,0		IVB ² 12,1-16,0		V > 16	
			2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
Vårsäd	5	17	25	25	10	20	10	15	0	5	0	0	0	0
Höstsäd	6	19	25	25	10	20	10	15	0	5	0	0	0	0
Oljeväxt	2	12	25	12-21 ¹	15	20-30	15	15-25	5	10-15	0	0	0	0
Slåttervall	6	14	25	25	10	15	10	10	0	0	0	0	0	0
Fodermajs	10	26	50	50	40	45	40	40	30	30	15	15	15	15
Potatis	30	15	70	70	40	50	40	40	30	30	15	15	15	15
Sockerbeta	45	18	35	35	20	30	20	25	15	20	15	15	0	0
Ärt	3,5	13	25	25	10	20	10	15	0	5	0	0	0	0

¹2010 görs skillnad mellan våroljeväxter respektive höstoljeväxter

²Klass IV indelas i två olika klasser, IVA och IVB då spannet i denna klass annars anses bli väl stort.

Hur ser då dagens rekommendationer ut för fosforgödsling? Mängden totalfosfor i marken har lite att göra med mängden växttillgänglig fosfor. Av denna anledning används vid markkartering en svag extraktionslösning, ammoniumacetatlaktat (AL), för att uppskatta markens fosforlevererande förmåga. Den fosfor som återfinns i extraktionslösningen utgörs av den fosfor som finns i marklösningen, adsorberat på markpartiklar, utfällt som sekundära mineral samt till viss del från primära mineral (se avsnitt 4 nedan). Beroende på mängden fosfor i extraktionen (mg P/100g jord) får marken ett P-AL tal och indelas i klasser från I-V. Klass III anses vara en tillfredställande fosforklass och motsvarar 4,1-8,0 mg P/100 g jord. Med ökad fosforgiva ökar generellt skörden men effekten av fosforgödslingen avtar ju högre P-AL tal jorden har (Hahlin och Ericsson, 1981).

Jordbruksverkets gödslingsrekommendationer baseras på markens P-AL tal men varierar över tiden beroende på gröda och pris. Tidigare gödslingsråd har varit väl höga i vissa avseenden och 2005 genomfördes en ny utvärdering av fosforgödsling, både med tanke på miljö och produktion, vilket till viss del förändrat rekommendationerna. Denna utvärdering visar att det är ekonomiskt lönsamt att gödsla upp jordar i klass I-II, ersättningsgödsla vid klass III och att tära på förrådet vid högre klasser. Med variation beroende på avkastning och gröda innebär

ersättningsgödsling i genomsnitt 15 kg P/ha (Naturvårdverket, 2005). Tabell 1 på sidan 7 visar Jordbruksverkets gödslingsrekommendationer för fosfor år 2009 och 2010.

Tabell 1 visar att relativt stora skillnader finns mellan gödslingsrekommendationerna för 2009 och 2010, rekommendationerna 2010 ligger högre än 2009 beroende på skillnader i fosfor- och spannmålspris. Båda åren är gödselgivan relativt låg och ersättningsgödsling sker knappt i klass III, särskilt inte 2009. Så sent som 1981 var den rekommenderade givan för vårsäd och höstsäd på en klass III jord 15-20 kg/ha respektive 20-25kg/ha med ett påslag på 5-10 kg/ha vid ensidig stråsädesodling (Hahlin och Ericsson, 1981), alltså betydligt högre än dagens rekommendationer. Fosforrekommendationerna är grundade på ett ekonomiskt optimum och låga givor är möjliga därför att svenska jordar generellt sett är uppgödslade med fosfor. Frågan är dock hur länge lantbrukare kan leva på ”gammal” fosfor innan givan eller effektiviteten måste öka?

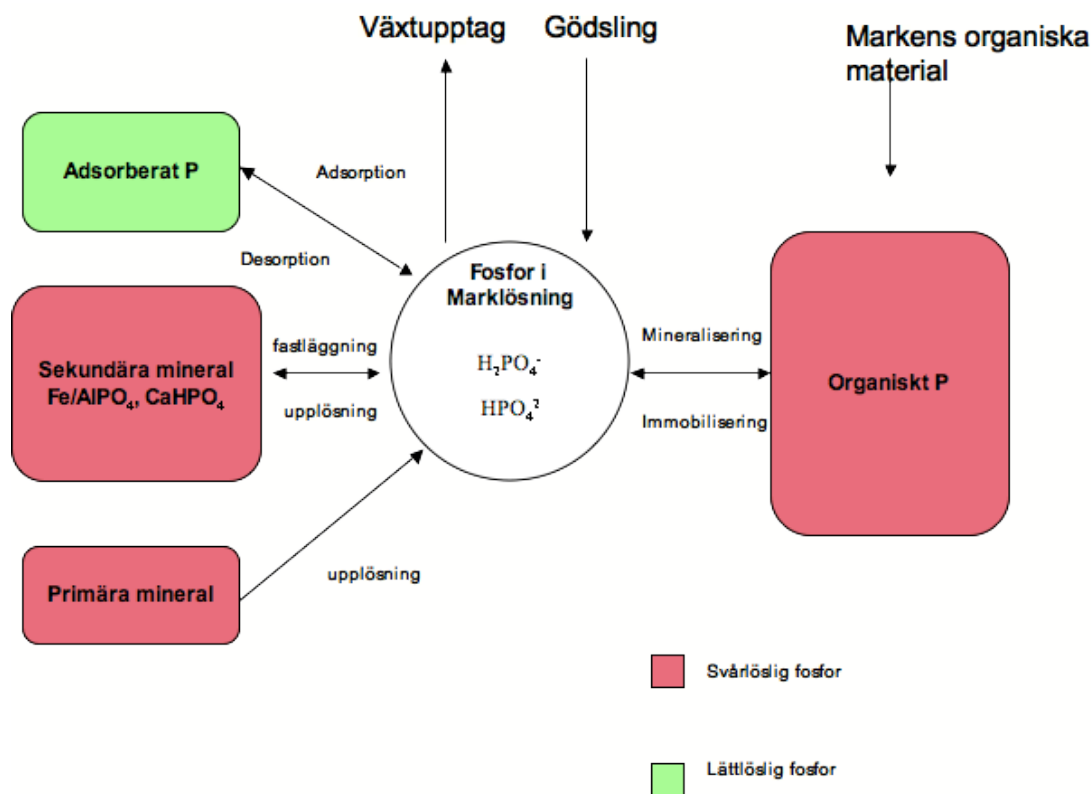
Fastläggningen av fosfor i otillgänglig form ökar med tiden varför mängden växttillgänglig fosfor minskar (Hahlin och Johansson, 1977). Dagens gödslingsrekommendationer är baserade på att fosfortillståndet i marken är relativt gott på grund av tidigare uppgödsling, alltefter- som tiden går minskar dock tillgängligheten och fosforgivorna eller fosforutnyttjandet måste öka drastiskt. Av vad som framförts ovan framgår att det främst är fastläggning av fosfor som leder till ett dåligt fosforutnyttjande och för att kunna öka denna måste vi därför förstå vad som styr växttillgängligheten av fosfor i marken.

4. Vad styr växttillgängligheten av fosfor i marken?

Att mängden totalfosfor i svenska jordar generellt är hög, och vi trots detta har ett gödslingsbehov, innebär att kvantiteten totalfosfor i marken har lite med mängden växttillgängligt fosfor att göra. För att förstå vad som styr växttillgängligheten av fosfor är det därför viktigt att förstå markens fosforkemi om man vill förbättra och styra rotupptaget av fosfor.

4.1 Markens fosforkemi

Växten tar upp fosfor främst i form av H_2PO_4^- och HPO_4^{2-} . Växter kan även tillgodogöra sig mindre organiska molekyler innehållande fosfor såsom nukleinsyror och fytin, upptaget av dessa föreningar är dock försumbart. I vilken form fosfatjonerna förekommer beror på pH-värdet i marken, och upptaget av H_2PO_4^- går snabbare än upptaget av HPO_4^{2-} . Vid pH under 7,2 dominerar H_2PO_4^- och vid pH över 7,2, HPO_4^{2-} . Växters upptag begränsas till den fosfor som finns löst i marklösningen. När roten tar upp fosfor ur marklösningen minskar koncentrationen av fosfor, vilket främst buffras genom att fosfor adsorberat på mineral- och lerpartiklar går i lösning. Mer svårlösliga föreningar såsom primära och sekundära mineral och organisk fosfor bidrar också till en ökning av fosforkoncentrationen i marklösningen, men med en mycket lägre hastighet (se Figur 1 nedan).



Figur 1. Markens fosforpooler och dess bidrag till marklösningen.

Vid tillförsel av vattenlösligt mineralgödsel ökar koncentrationen av fosfor i marklösningen drastiskt. Den fosfor som inte tas upp av rötterna adsorberas på ler- och mineralpartiklar eller bildar föreningar med järn, aluminium och kalcium som sekundära mineral. En del av fosfor immobiliseras även av mikroorganismer, för att sedan mineraliseras och återgå till marklösningen. För att bibehålla en hög koncentration av fosfor i marklösningen, vilket krävs för att tillgodose växtens behov av fosfor och för att öka fosforutnyttjandegraden, krävs därmed en stor andel lättillgänglig fosfor som snabbt kan dissociera i marklösningen (Beaton et al., 2005).

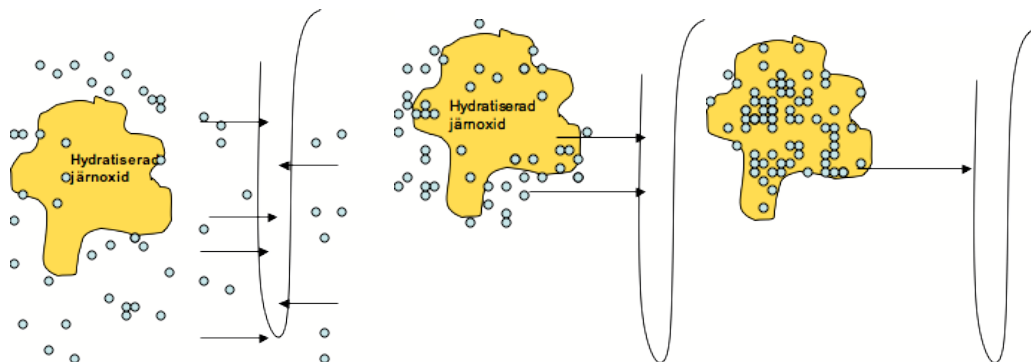
Adsorption och bildandet av sekundära mineral kallas tillsammans för retention, och det är graden och typen av retention som till stor del bestämmer hur mycket fosfor som kommer att finnas växttillgängligt i marklösningen. Styrande vad gäller graden av retention är framförallt markens pH-värde. Maximal andel lättillgänglig fosfor i marklösningen finns runt pH 6,5. I sura jordar bildas i synnerhet sekundära mineral tillsammans med aluminium eller järn. Adsorption sker även till aluminiumhydroxider, järnhydroxider och lerpartiklar - dessa reaktioner sker i princip omedelbart efter tillförsel av fosfor. I neutrala eller kalkrika jordar bildas främst sekundära mineral med kalcium och magnesium. Retentionen är som störst vid låga pH-värden, då andelen positiva laddningar ökar. Kalkning ökar därför ofta tillgängligheten av fosfor, trots att mängden kalcium i marken också ökar. Ytterligare en faktor som påverkar hur stor retentionen blir är andelen ler och typen av lerpartiklar. Leror av typen 1:1, exempelvis kaolinit, adsorberar mer fosfor än 2:1 leror på grund av ökad andel aluminium- och järnhydroxider, generellt ökar adsorptionen med ökad lerhalt. Dessutom ökar retentionen om utbyteskomplexet till stor del består av divalenta katjoner i jämförelse med monovalenta katjoner.

Organiskt material kan till viss del motverka retention, då organiska anjoner kan konkurrera om adsorptionsplatser och bilda organofosfatkomplex som växten kan ta upp. Bestämmande för med vilken hastighet adsorption sker är temperaturen i marken, där ökad temperatur ger ökad retention (Beaton et al., 2005). Olika jordar har därmed olika fosforsorptionskapacitet vilken beror på relativt konstanta parametrar såsom textur, ler-mineralogi, calcitinhåll och mängden organiskt material. Detta betyder dock inte att en jords förmåga till fosforfixering är konstant utan den beror även på årsmån, typ av bruk och val av gödselmedel (Hedley och McLaughlin, 2005).

Styrande vad gäller typen av retention, det vill säga om adsorption eller utfällning kommer ske, är fosforkoncentrationen i markvätskan. Vid låga koncentrationer i marklösningen dominerar adsorption, och vid höga sker mer utfällningar (Beaton et al., 2005). Med tiden kan lättlösligt fosfor övergå till adsorberat fosfor och till ännu svårslösligare former, så kallat "åldrande fosfor". Exempelvis kan adsorberat fosfor på kalciumkarbonater med tiden övergå till svårslöslig apatit, något som sker snabbare på sura jordar (Mengel och Kirkby, 1987). Nyligen fastlagd fosfor är därmed relativt lättillgängligt eftersom en stor yta fortfarande är exponerad mot marklösningen. Allteftersom fosfor rör sig inåt i markpartiklarna blir den dock alltmer otillgänglig (se figur 2 nedan). Fosforfixering är i princip irreversibel, men om en del av den fixerade fosfor är relativt löslig och de flesta fixeringsytorna är upptagna, kan en del av fosfor gå i lösning igen om den kommer i kontakt med vatten med låg fosforkoncentration (Brady och Weil, 2002). Därför finns det ett samband mellan fosfortillståndet i marken och effekten av fosforgödning.

4.2 Rotens fosforupptag

Mobiliteten av fosforjoner i marken är mycket låg, endast ca 0,1 mm/dygn, då transport sker huvudsakligen genom diffusion och fosforupptag genom massflöde är mycket litet (Haak, 1994). Den låga mobiliteten gör att växtupptaget av fosfor till stor del beror på rottillväxten. Växter kan som förklarar ovan enbart ta upp fosfor ifrån marklösningen, i vilken koncentrationen av fosfor är mycket låg, ofta 10^2 - 10^3 gånger lägre än vad som finns adsorberat. När rötter tränger sig fram igenom marken kommer de i kontakt med fosfatet i marklösningen, upptag sker snabbt, och koncentrationen av fosfor i marklösningen minskar drastisk. Detta skapar en koncentrationsgradient och diffusion sker mot roten (Mengel och Kirkby, 1987).

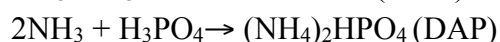


Figur 2. Schematisk bild över fosfors "åldrande". Allteftersom tiden går blir mindre och mindre fosfor exponerad för marklösningen och rotupptaget minskar.

Kalciumfosfater saluförs i både granulär och icke-grnulär form och var det vanligaste fosforgödselmedlet i Amerika innan ammoniumfosfaterna introducerades (Beaton et al., 2005).

5.2 Ammoniumfosfater

Ammoniumfosfater produceras genom att reagera fosforsyra med ammoniak enligt reaktionsformeln nedan, vilket ger antingen monoammoniumfosfat (MAP) eller diammoniumfosfat (DAP), som är det vanligaste gödselmedlet i USA idag. MAP innehåller 11-13 % N och 21-27 % P (48-62 % P₂O₅) varav allt är växttillgängligt. DAP innehåller 18-21 % N och 46-53 % P varav allt är växttillgängligt.



Ammoniumfosfater påverkar pH-värdet i marken i högre grad än vad kalciumfosfaterna gör. Vid den initiala reaktionen ger DAP ett pH-värde i marken på 8,5 och MAP 3,5. Det höga pH-värdet gynnar ammoniakavgång vilket kan skada fröet om gödningsmedlet placeras för nära, särskilt vid odling av raps, rybs eller lin som har extra känsliga frön.

Ytterligare ett kväveinnehållande fosforgödselmedel är ammoniumpolyfosfat (APP). En polyfosfat består av två eller flera ortofosfatjoner. Ammoniumpolyfosfat innehåller 10-15 % N och 34-37 % P varav allt är växttillgängligt. Ammoniumpolyfosfater erhålles genom att reagera pyrofosforsyra (H₄P₂O₇) med ammoniak. Ammoniumpolyfosfat är en vätska med ett reaktions-pH på omkring 6. Växter kan ta upp polyfosfater direkt. (Beaton et al., 2005).

6. Gödselmedlets reaktioner i marken

Existerar det någon skillnad i effektivitet mellan de olika gödselmedlen? För att förstå detta måste vi först förstå vad som händer när gödselmedlet når marken. Vilka parametrar styr växttillgängligheten av fosforgödselmedlet? Reagerar olika fosforgödselmedel på olika sätt?

6.1 Vad händer med fosforgödselmedlet i marken?

Vattenhalten i marken har stor påverkan på effektiviteten och växttillgängligheten av applicerad fosfor. Vid fältkapacitet kan 50-80 % av den vattenlösliga fosfor diffundera från gödselgranulen inom 24 h och vid en vattenhalt på 2-4 % kan 20-50 % diffundera inom samma tid. Kalcium- och ammoniumfosfater är till 90-100% vattenlösliga, varför de löses mycket snabbt i fuktig jord, vilket leder till en dramatisk ökning av fosforkoncentrationen i marklösningen runt gödselkornet. Vatten rör sig inåt i granulen och fosformättad lösning rör sig utåt, så länge granulen finns kvar. Beroende på vattenhalt sker diffusion dock inte längre än 3-5 cm från gödselkornet (Beaton et al., 2005). Jorden runt den upplösta gödselgranulen kan indelas i tre zoner med skiftande fosforkoncentration. Längst in finns det som möjligen återstår av granulen och en gränsyta med eventuella olösliga produkter från gödselgranulen, samt utfälda fosfater. Utanför denna zon finns en fosformättad zon där fosforsorptionskapaciteten för jorden är överskriden och koncentrationen av löst fosfor är som högst. I den yttersta zonen är där-

emot marken omättad på fosfor och fosforkoncentrationen relativt låg på grund av adsorption (Hedley och McLaughlin, 2005).

Fosforlösningen har beroende på gödningsmedel ett pH-värde på 1,5-8,5 och innehåller mellan 2,9-6,8 ml P/l. Denna lösning löser upp mineral i marken och Fe-, Al-, Mn-, K-, Ca- och Mg-joner frigörs. Dessa katjoner kan reagera med fosfor och bilda så kallade reaktionsprodukter. Lösligheten av dessa reaktionsprodukter bestämmer fosfortillgängligheten på längre sikt. Utfällning av sekundära mineral gynnas av höga fosforkoncentrationer, vilket finns i närheten av gödselgranulen. Adsorption sker till största delen vid lägre fosforkoncentrationer i periferin av gödselgranulen (Beaton et al., 2005). Mellan de vanligaste gödselmedlen finns ingen större skillnad vad gäller lösligheten av själva gödselmedlet, då alla är i princip vattenlösliga. (Mengel och Kirkby, 1987). Mycket vattenlösligt fosfor i gödselmedlet gynnar tillväxten tidigt på säsongen (Venugopalan och Prasad, 1989).

6.2 Vilket fosforgödselmedel är effektivast?

Vilket fosforgödselmedel är då effektivast? Frågan är svårutredd då effekten av olika gödselmedel varierar på olika jordar och olika klimatbetingelser. Några försök har dock gjorts för att utreda frågan.

Gökmen och Sencar (1999) lyckades inte påvisa någon signifikant skillnad i effekten mellan DAP och TSP på två leriga jordar i Turkiet (pH 7,8 och 8,2). Försök på en sandig jord i Indien (pH 7,8) visar att kärnskörden för vete var störst med APP jämfört med DAP och TSP, men att skillnaden mellan APP och TSP var relativt liten (Venugopalan och Prasad, 1989). I försök med korn på en kalkrik jord med olika gödslingsintensiteter, 0, 15, 30 och 45 mg/kg av DAP, MAP och TSP var DAP och MAP bäst på att tillgängliggöra fosfor vid den lägsta fosforgivan. Vid fosforgivor på 30 och 45 mg/kg var MAP och TSP effektivast. Möjligen kan den lägre effektiviteten av DAP i den kalkrika jorden förklaras med fosforimmobilisering samt ammoniakavgång gynnad av det höga pH-värdet. På kalkrika jordar kan MAP och TSP rekommenderas vid fosforgivor som överstiger 30 mg/kg (Papadopoulos, 1985).

Tabell 2. Inbördes ranking av olika fosforgödselmedel i fem försök på kalkrika jordar.

Försök	Inbördes ranking av gödselmedel (effektivast först)
Gökmen och Sencar (1999)	DAP=TSP
Venugopalan och Prasad (1989)	APP≈TSP>DAP
Papadopoulos (1985), låg fosforgiva (15 mg/kg)	DAP=MAP
Papadopoulos (1985), hög fosforgiva (30-45 mg/kg)	MAP=TSP
Khasawneh et al. (1979)	DAP>APP

I försök med APP och DAP sökte Khasawneh et al. (1979) fastställa vilka reaktioner som sker mellan mark och gödselmedel i en typisk Hapludult.² Detta försök visade att mobiliteten av DAP och APP var i princip densamma och att diffusion i huvudsak skedde i ortofosfatform. Hydrolys av polyfosfater gick till och med snabbare än diffusion av gödsel fosfor. Även om hydrolys av polysfosfater skedde snabbt, stod utfällning av polyfosfater för ungefär 25 % av fastläggningen av applicerad fosfor. Utfällning av polyfosfater var i princip irreversibel och koncentrerad till väl definierade zoner. Utfällning av ortofosfat var positivt korrelerade med två faktorer, vilka var tid och koncentrationen av vattenlösliga ortofosfatjoner. Retentionen var i huvudsak utfällning och inte den mer reversibla adsorptionen. Utfällning av ortofosfatjoner var mer utspridd och uppvisade viss reversibilitet. Efter fyra veckors inkubering hade 63 % av APP och 45 % av DAP fällts ut. Då effektiviteten av ett gödselmedel till stor del beror på graden av retention får DAP anses vara mer effektivt än APP i detta försök.

Utifrån försöken ovan kan inga entydiga slutsatser dras om vilket fosforgödselmedel som är effektivast. Effekten varierar i olika försök och på olika jordar, trots att samtliga jordar har högt pH-värde. Tabell 2 ovan visar hur effektiviteten av olika gödselmedel rankades i ovanstående försök. Tabell 2 är på intet sätt uttömmande då alla försök inte beaktat alla gödselmedel och försöken är utförda på olika sätt. Samtliga försök är dessutom utförda på jordar med högt pH-värde. Den enda slutsatsen som möjligen kan dras utifrån dessa data är att TSP oftast fungerar bra på kalkrika jordar i jämförelse med andra fosforgödselmedel, i de fall där TSP beaktats, vad kan detta bero på?

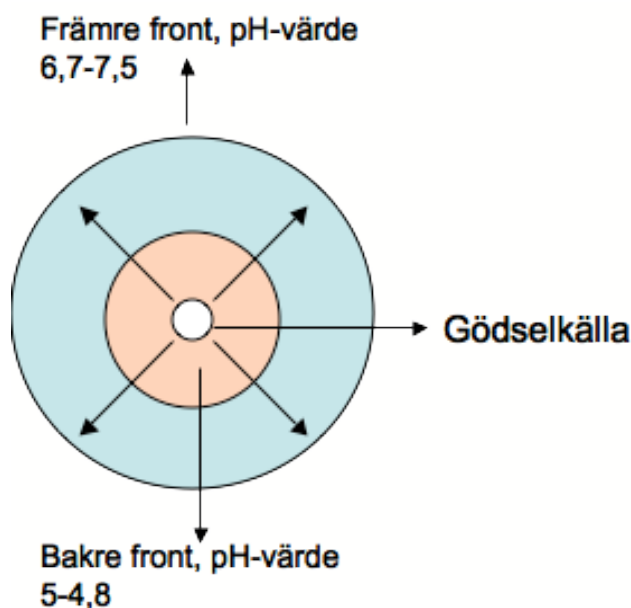
6.3 Fosforgödselmedlets påverkan på markens pH-värde

I försök har skillnaden i sammansättningen i marklösningen runt MAP- och DAP-granuler undersökts. Resultaten visar att i närheten av en MAP-granul, vars mättade lösning har lågt pH, sker främst retention till följd av reaktioner med järn- och aluminiumhydroxider. DAP, med ett högt reaktions-pH värde, orsakar å andra sidan främst retention till följd av reaktioner med kalcium och magnesium (Moody et al., 1995). Då effekten av gödslingen beror på markens kemiska och fysikaliska egenskaper är det rimligt att anta att effektiviteten av olika gödselmedel varierar mellan olika jordar, vilket kan förklara de varierande resultaten ovan. Den främsta anledningen till dåligt fosforutnyttjande är utfällning av sekundära mineral, vilket huvudsakligen styrs av markens pH. På en kalkrik jord gynnas därför utfällning av framförallt kalciumföreningar, medan utfällning på surare jordar främst sker med järn och aluminium. Ett gödselmedel med ett reaktions-pH som motverkar dessa utfällningar skulle därmed möjligen kunna öka effektiviteten av fosforgödslingen. På en kalkrik jord skulle därmed MAP (pH 3,5) eller TSP (pH 1,5) kunna minska retention genom en sänkning av pH-värdet i den fosformättade zonen runt gödselgranulen. En kalkrik jord har även en hög basmättnadsgrad vilket betyder mindre andel järn och aluminium som kan fixera fosfor i otillgänglig form vid låga pH-värden. På en surare jord finns det en möjlighet att välja DAP (pH 8,5) eller APP (pH 6,0) för att minska fastläggningen på grund av dess höga reaktions-pH. Moody et al. (1995) visade att re-

² Hapludult är en typ av Ultisol en starkt vittrad tropisk, lerjord som inte innehåller någon kalk och har mindre än 35 % basmättnadsgrad.

tention runt en DAP-granul främst beror på reaktioner med kalcium och magnesium, vilket förekommer i mindre grad på en surare jord med lägre basmättnadsgrad. Därmed kan möjligen DAP vara att föredra på en jord med lägre pH-värde. Försöken ovan ger visst stöd för denna tes, samtliga försök är gjorda på jordar med högt pH-värde och TSP med lägst pH är effektivast i dessa försök (då TSP beaktats). Däremot är inga av försöken utförda på surare jordar. Frågan är dock om gödselmedlets reaktions-pH faktisk har någon effekt på pH-värdet i marklösningen eller om gödselmedlets faktiska påverkan på pH i marklösningen är försumbart?

Sample et al. (1979) jämförde pH-värdet i jordkolonner med utgångspunkt från pH 6, gödslade med APP och DAP. Försöket visar att en förändring av pH-värdet runt en gödselgranul beror på fler faktorer än det initiala reaktions-pH värdet för gödselmedlet. I detta försök har en mättad lösning med APP respektive DAP använts med pH-värden av 6,0 respektive 8,1. Efter gödsling och inkubering mättes pH-värde i olika sektioner med utgångspunkt från gödselgranulen. Mätningarna visade att i den främre delen av "fosforfronten" ger APP och DAP pH-värden på 6,7 och 7,5. Detta visar att det initiala pH-värdet i den mättade fosforlösningen en viss betydelse för pH-värdet i marklösningen. Skillnaden i pH är dock mindre än det var från början. Några millimeter bakom fronten med högt pH-värde sjunker dock pH-värdet med 1,7-2,7 enheter för båda gödselmedlen enligt Figur 3 nedan. Anledningen till detta tros vara komplexa reaktioner som involverar diffusion av utbytbara baser, hydrolys av vatten och bildandet av acidifierande ammoniumsalter. Försök gjordes även med applicering av DAP på en jord med ett initialt pH på 4,9 för att undersöka om pH-höjningen blev densamma. Resultatet var fortfarande en främre zon med högre pH-värde. Sample et al. (1979) visade även i detta försök att den bakre "fronten" med lågt pH var tillräckligt sur för att upplösa aluminiumjoner som fällde ut fosfor men inte tillräckligt surt för att lösa ut järn.



Figur 3. Schematisk bild som illustrerar skillnader i pH-värde runt en gödselkälla bestående av APP eller DAP.

Utifrån detta försök förstås att frågan om huruvida pH-värdet på gödselmedlet skulle kunna motverka utfällning i olika jordar är komplex. Däremot visar försöket att även i en sur jord (pH-värde 4,9) bibehålls ett högt pH-värde i den främre fronten med ett gödselmedel med högt reaktions-pH, vilket till viss del möjligen skulle kunna motverka utfällningar av aluminium och järn på en sådan jord. Försöket behandlar dock inte hur pH-värdet ser ut runt ett gödsel med lågt reaktions-pH (MAP och TSP) i en jord med högt pH-värde. Jorden som försöket utfördes på, en ultisol, har även en relativt låg basmättnadsgrad, max 35 %, vilket skulle kunna leda till att pH-sänkningen blir än större på grund av dålig buffertkapacitet.

Förutom löslighet och skillnader i reaktions-pH finns ytterligare en aspekt som kan påverka skillnaden i effektivitet mellan olika fosforgödselmedel. Det faktum att ammoniumfosfater (MAP och DAP) innehåller kväve har visat sig kunna ha en positiv effekt på fosforupptaget och därmed även på fosforutnyttjandegraden. Kväve ökar tillväxten av rötter till gödselkornet och kan ändra lösligheten och tillgängligheten av fosfor på grund av dess påverkan på pH-värdet i närheten av gödselgranulen, NH_4^+ är då bättre än NO_3^- (Beaton et al., 2005).

Skillnaderna i effektivitet mellan våra vanligaste fosforgödselmedel är därmed mycket svåra att mäta. Beroende på bland annat jordart, vattenhalt och kalktillstånd kan samma gödselmedel bli mer eller mindre växttillgängligt och effektiviteten varierar därefter. Den största effektivitetsökningen erhålles idag istället genom olika gödslingsstrategier och gödslingstekniker.

7. Hur optimeras fosforutnyttjandet idag ?

Inga större skillnader finns i effektivitet mellan dagens vanligaste fosforgödselmedel men skillnader i effektivitet kan uppmätas beroende på vid vilken tidpunkt gödslet sprids, gödselmedlets placering samt i vilken form gödslet förekommer.

7.1 När bör fosforgödsling ske för bästa effektivitet?

Av arbetstekniska skäl kan det vara en fördel att förrådsgödsla med fosfor för några år i taget på den fosforkänsligaste grödan, övriga grödor får sedan klara sig på den fosfor som finns i marken. Försök som belyser huruvida skillnad finns i effektivitet mellan denna metod och gödsling till varje gröda varje år har givit varierande resultat (Hahlin och Ericsson, 1981). Då dåligt fosforutnyttjande främst beror på retention, vilket ökar med tiden, borde dock denna typ av rekommendation vara inaktuell ur effektivitetssynpunkt på jordar med hög fosforfixeringskapacitet. Enligt Jordbruksverkets rekommendationer för 2010 bör fosfor tillföras varje gröda i enlighet med grödans behov och förrådsgödsling bör undvikas. De rekommenderade givorna ökar med minskat P-AL tal för att en viss uppgödsling bör ske till en acceptabel fosfornivå i marken (ungefär klass III). Gödsling bör företrädesvis ske på våren och höstgödsling kan enbart motiveras till höstgrödor vid P-AL tal II eller mindre (Jordbruksverket 2009) då ett gott fosfortillstånd på hösten gynnar rotutvecklingen och minskar uppfrysning (Holmberg et al., 2006). Då retention ökar med tiden bör perioden som mineralgödslet befinner sig i marken, utan att växten har något eller litet fosforbehov, minimeras frågan är om det finns sådana tidpunkter under grödans tillväxtperiod?

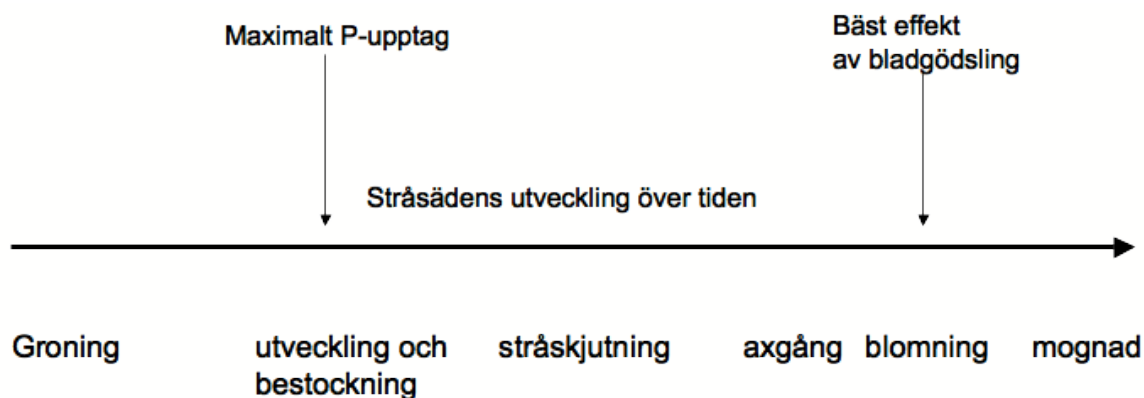
7.2 Hur kan tidpunkten för spridning av fosforgödselmedel optimeras?

Gödslingsrekommendationer antyder att fosforbehovet för grödan är som störst i början på tillväxtperioden. I försök på vårveete sökte Römer och Schilling (1985) svar på frågan hur fosforbehovet ser ut under vetets livscykel. Detta försök visar att rottillväxten hos vete föregår skotttillväxten. Då skottet har nått 35 % av total biomassaproduktion, har roten redan nått maximal tillväxt. Likaså föregår fosforabsorptionen skotttillväxten, då 50-60% av det totala fosforupptaget skett då skotten enbart utvecklats 20-35 % av den totala biomassan. Vetets kapacitet att omvandla upptaget fosfor till merskörd var effektivast fram till utveckling enligt Feekes skala vid stadie 9 (flaggbladet synligt). Försöket visar även att intensiteten i fosforupptaget per "rotenhet" inte är konstant utan når ett maximum vid Feekes stadie 3 (bestockning, huvudskott och sex sidoskott) för att sedan avta. Intensiteten i fosforupptaget beror dock även på den totala rotmassan (Römer och Schilling, 1986). Vilka implikationer får detta ur fosforutnyttjandesynpunkt? Rottillväxten föregår skotttillväxten och fosforupptaget likaså, vilket betyder att fosforbehovet faktiskt är störst i början av vetets tillväxtperiod. Gödsling bör därför ske så tidigt som möjligt, helst med kombisådd, och mängden lättlöslig fosfor i marken bör runt stråskjutning vara relativt låg då upptaget är litet och retentionen ökar. Då behovet av fosfor är stort i början för att sedan avta är en tänkbar strategi att ge en lägre giva vid sådd som i princip motsvarar vetets behov under fasen med intensivt fosforupptag. När upptaget minskar i senare utvecklingsstadier leder höga koncentrationer av fosfor i marklösningen enbart till ökad retention. Kompletteringsgödsling skulle i detta stadium kunna ske med hjälp av bladgödsling.

7.3 Kan man bladgödsla med fosfor?

Vattenlösliga mineralgödsel kan appliceras direkt på de ovanjordiska delarna av plantan, detta kallas för bladgödsling. Näringsämnen penetrerar kutikulan eller stomata och tar sig in i cellerna. Absorption och translokation av näringsämnen påverkas bland annat av temperatur, luftfuktighet och ljusintensitet. Vanligast är att bladgödsling används för mikronäringsämnen, då saltkoncentrationen annars kan bli för hög. Koncentrationen i lösningen får vanligen inte överstiga 1-2 %. Bladgödsling av fosfor är ovanligt, bland annat för att koncentrationen av fosfor i näringslösningen inte för överstiga 0,5 % för att undvika skador på plantan (Beaton et al., 2005). Några försök har dock gjorts med bladgödsling av fosfor.

I ett försök i Oklahoma applicerades fosfor med bladgödsling i givor om 0,1,2 och 4 kg/ha år 2002 och 2003. År 2004 gavs doser om 8,12,16 och 20 kg/ha, samtliga givor gavs till en jordförgödslad med 30 kg P/ha och utan P. Givorna gavs vid olika utvecklingsstadier. Applicering vid Feekes stadie 7 (andra noden på strået synlig, näst sista bladet just synligt) gav större kärnskörd än utan bladgödsling. Fosforutnyttjandegraden nådde ett maximum på 47 %, vid applicering vid utvecklingsstadie 10.54 (blomning klar) jämfört med 39 % vid stadie 7. Fosforutnyttjandegraden var högst vid givan på 2 kg/ha. Störst ökning av kärnskörd till följd av bladgödslingen erhöles på försöksplatsen Lahoma med minst fosfor i marken. Från dessa försök kan slutsatsen dras att fosforbrist kan åtgärdas med bladgödsling och att detta kan öka fosforutnyttjandet jämfört med gödsling på marken (Desta et al., 2006). Utifrån detta är det därmed tänkbart att byta ut en del av fosforgödslingen mot bladgödsling för att öka utnyttjandegraden. Bladgödslingen bör dock enligt detta försök ske efter blomning för bäst



Figur 4. Stråsådens utveckling över tiden samt maximalt upptag av fosfor och bäst effekt av bladgödsling.

fosforutnyttjande. Intensiteten i rotupptaget når dock sitt maximum tidigare, nämligen redan vid bestockning (se Figur 4 ovan). En ur fosforeffektivitetssynpunkt optimal gödslingsstrategi med låg startgiva, som enbart täcker grödans behov under den intensiva upptagsfasen, för att sedan bladgödsla, ger enligt dessa försök ett ”glapp” i fosfortillgången. Vid tillämpning av sådan gödslingsstrategi måste istället startgivan göras större eller bladgödslingen ske i ett tidigare utvecklingsstadium. Risken är då ökad retention av gödslet i marken eller sämre effekt av bladgödslingen till följd av dålig täckningsgrad. Är det då möjligt att minska retentionen i marken genom att placera gödselmedlet på ett annorlunda sätt?

7.4 Hur bör fosforgödselmedlet spridas och placeras för bäst effekt?

Immobiliteten av fosfor i marken och dess benägenhet till snabb retention, gör att placering av fosforgödslet är minst lika viktigt som att fastställa fosforgivan. Vid placering av gödsel i allmänhet bör hänsyn tas till hur placeringen kan bidra till en god näringstillförsel från groningen till skörd och placeringen får inte heller vara sådan att gödselmedlet kan skada utsädet. För fosfor i synnerhet gäller att en placering som minimerar kontakt med jorden även minimerar retention (Beaton et al., 2005).

7.5 Olika spridningsmetoder

De vanligaste spridningsmetoderna för fosfor är bredspridning och bandspridning. Bredspridning är det enklaste och snabbaste sättet att sprida gödsel på före eller efter sådd. Mineralgödsel sprids jämt över ytan och kan sedan inkorporeras i marken med exempelvis plog eller kultivator. Bredspridning ger en jämn fördelning av fosfor i marken och maximal jordkontakt. Bandspridning placerar, ofta med hjälp av en kniv, gödselmedlet i band vid sidan av eller under fröet. Bandspridning koncentrerar därmed fosfor i smala zoner där näringskoncentrationen är mycket hög (Beaton et al., 2005). Fördelen med olika spridningsmetoder beror på vilken typ av jord odlingen bedrivs på. Oftast är dock bandspridning att föredra framför bredspridning med inkorporering (Gökmen och Sencar, 1999) då kontakten mellan jorden och gödselgranulen är så liten som möjligt.³ I jordar med lägre fosforklass kan bandspridning vara

³ Ett undantag vad gäller skillnaden mellan bredspridning och bandspridning är vid vallodling där bredspridning fungerar bättre på grund av upptag på bladytan och av grunt belägna rötter (Beaton et al., 2005).

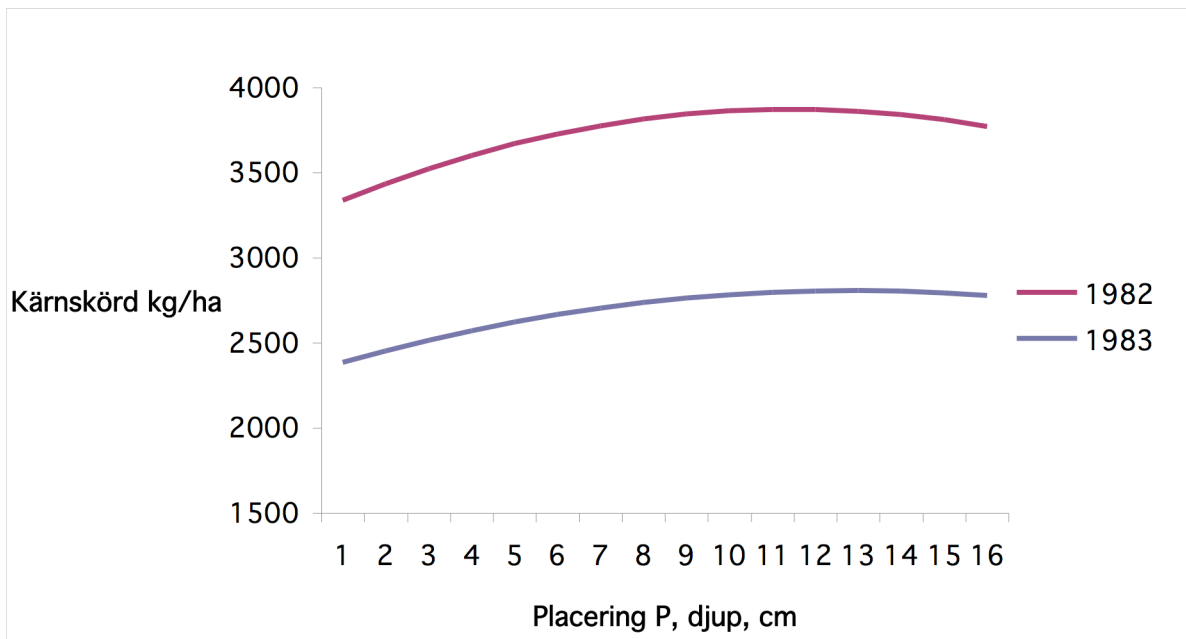
uppemot tre gånger mer effektivt än bredspridning, medan effektiviteten i jordar med gott fosfortillstånd är i princip densamma som vid bredspridning (Peterson et al., 1981). Skillnaden mellan bredspridning och bandspridning minskar även med tilltagande fosforgiva (Beaton et al., 2005). En spridningsmetod som gör att kontakten mellan jord och gödselmedel är stor, såsom bredspridning med inkorporering, gör alltså att mer fosfor fixeras i mindre tillgänglig form, vilket minskar fosforutnyttjandegraden. Om gödselgranulen dessutom placeras så att sannolikheten för kontakt mellan rot och gödselkorn minskar, minskar även utnyttjandegraden ytterligare. Bandspridning ökar sannolikheten för kontakt mellan rot och gödselgranul men det koncentrerar fosfor i mindre zoner där halten av fosfor är hög, vilket kan gynna utfällning av sekundära mineral. Ingen av spridningsmetoderna är med andra ord optimal ur fosforutnyttjandesynpunkt, även om bandspridning helt klart är att föredra framför bredspridning. Frågan kvarstår dock om vilket djup som ger högst effektivitet vid placering av gödselmedlet.

7.6 Var bör fosforgödslingen placeras för att maximera rotupptaget?

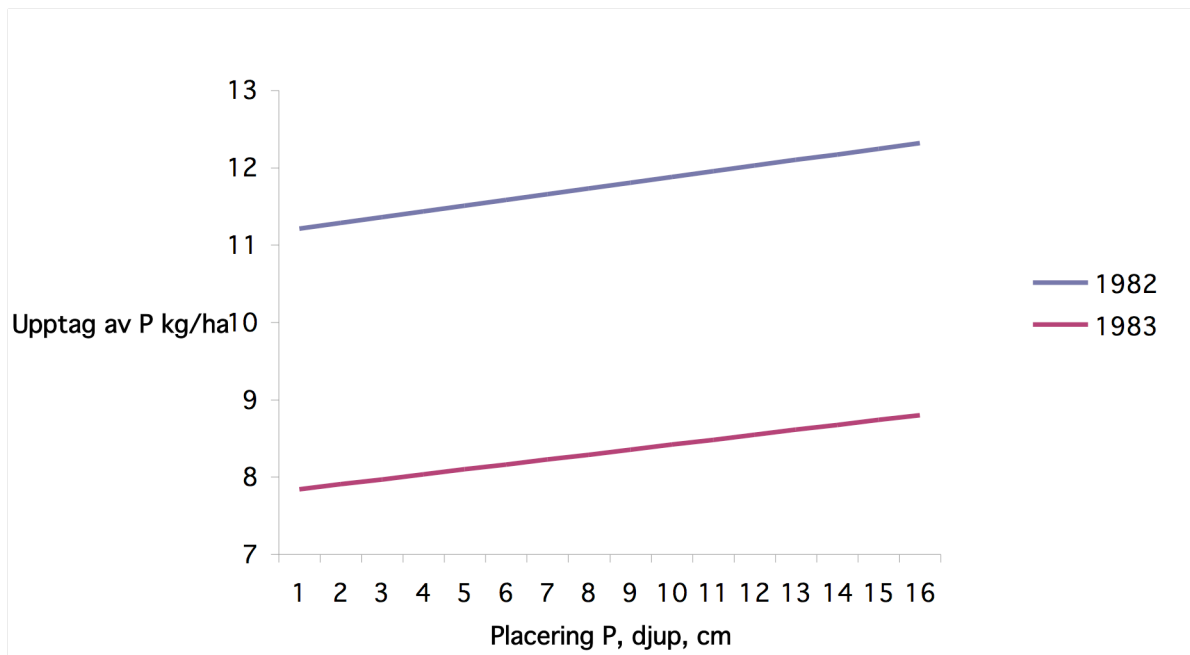
Svårörligheten av fosfor i marken gör att en placering i rad i närheten av roten gynnar rotupptaget. En placering alltför nära fröet kan dock försena eller förhindra groningen och uppkomst, särskilt vid användning av höga doser MAP eller DAP som bildar för kärnan giftig ammoniak (Beaton et al., 2005). I försök på höstvetete på en jord med högt pH placerades DAP och TSP 5 cm åt höger respektive vänster och under kärnan för att undersöka vilken placering som gav den största skörden. Maximal skörd erhöles då gödselgranulen placerades 5 cm under kärnan. Ett band under kärnan ökar sannolikheten för roten att komma i kontakt med gödselgranulen, då rötter oftast växer nedåt. Hur stor skördeökningen till följd av korrekt placering blir från år till år varierar dock enligt Tabell 3 nedan (Gökmen och Sencar, 1999). Då enda kontrollerbara skillnaden mellan försöksleden redovisade i Tabell 3 är placeringen av fosforgödselmedlet, borde en ökad skörd bero på ökat fosforupptag, vilket i sin tur torde kunna tillskrivas en högre fosforutnyttjandegrad. Även i Nebraska mellan 1982-1983 testades optimal placering av fosforgödsel. Gödselmedlet placerades då på 0, 5, 10 och 15 cm djup med ett sådjup på 2-3 cm och fosforgivan var 11 kg P/ha. Figur 5-6 nedan visar effekten av djupet på placeringen av gödslet på kärnskörd och fosforupptag (McConnell et al., 1986).

Tabell 3. Effekten av placering av gödselkorn på höstveteskörd enligt Gökmen och Sencar 1999.

Placering	Skörd kg/ha	
	1990-1991	1991-1992
Bredspridning	1603	3220
Intill frö	1507	3448
5 cm till höger respektive vänster om frö.	1710	3784
5cm under frö.	2138	4059



Figur 5. Kärnskörd av höstvetete som funktion av placeringsdjup för fosforgödsel enligt McConnell et al.(1986).



Figur 6. Upptag av fosfor som funktion av placeringsdjup för av fosforgödsel enligt McConnell et al.(1986)

År 1982 är det optimala djupet för gödselmedlets placering 11,9 cm och 1983 10,4 cm (McConnell et al.,1986). Gökmen och Sencar (1999) fann att högst skörd erhöles när fosforgödselmedlet placerades 5 cm under fröet. Då såddjupet i försöket i Nebraska var 2-3 cm, och placeringsdjupet räknas från ytan ligger optimalt djup i Nebraskaförsöket längre ner än 5 cm. Gökmen och Sencar (1999) gjorde dock inga försök på lägre djup än 5 cm under kärnan, varför det är möjligt att optimalt djup faktiskt ligger ännu längre ner och närmar sig de 10,4-11,9 cm som fastställdes av McConnell et al. (1986).

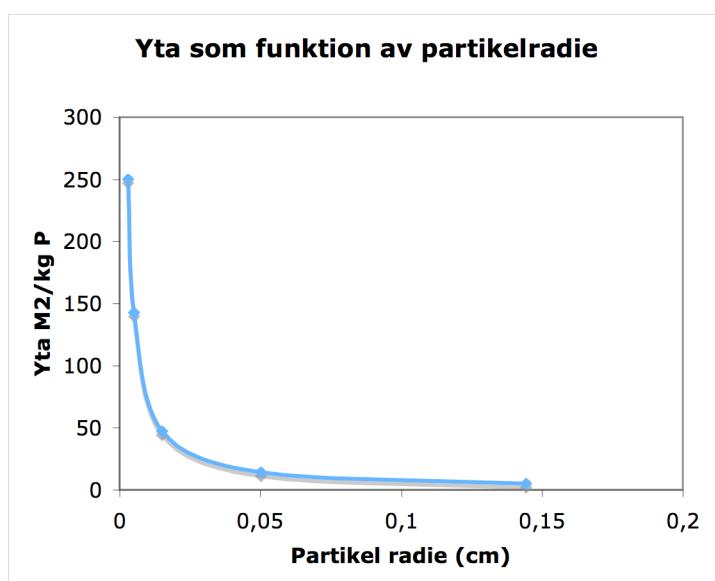
Vid gödsling med våra vanligaste gödselmedel, kalcium- och ammoniumfosfater, verkar vi följaktligen öka fosforutnyttjandegraden främst genom bandspridning av gödselmedlet med en placering på ungefär 10 cm djup. Viktigt är också att spridningen sker vid rätt tidpunkt så att växtupptaget blir så stort som möjligt. Även om dessa åtgärder vidtas kommer dock inte fosforutnyttjandegraden nå önskvärd nivå. För att öka effektiviteten i fosforutnyttjandet i framtiden bör därmed alternativa tekniker och typer av gödselmedel undersökas.

8. Vilka möjligheter finns till ökat fosforutnyttjande i framtiden?

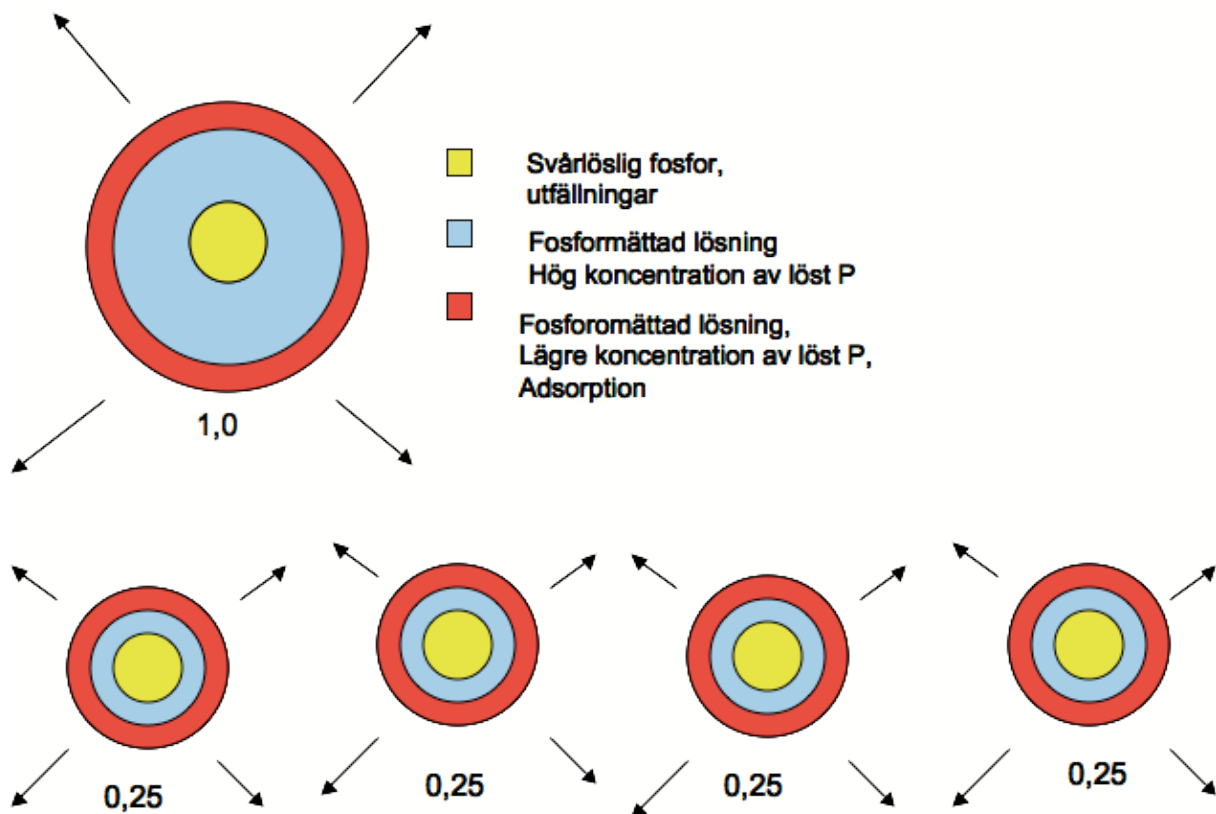
Ovan har möjligheter till ökat fosforutnyttjande redovisats utifrån de vanligaste sätten att sprida, de i modernt jordbruk, vanligaste fosforgödselmedlen. Om en godtagbar fosforutnyttjandegrad skall nås måste dock nya tekniker och kanske till och med nya gödselmedel undersökas. Vanligast idag är fosforgödselmedel i granulform men vilken storlek på granul ger maximalt fosforutnyttjande? Är granulformen av fosforgödsel att föredra eller ökar effektiviteten om fosforgödselmedlet istället appliceras i vätskeform? Om tillfredställande resultat inte kan nås med dagens fosforgödselmedel, vilka nya typer av preparat kan i framtiden öka effektiviteten?

8.1 Har granulstorleken någon betydelse?

Fördelen med bandspridning av fosforgödsel jämfört med bredspridning med efterföljande inkorporering är att kontakten mellan granul och jord minimeras. Enligt Figur 5 nedan innebär en större gödselgranul mindre kontakt mellan jord och gödselmedel. Följaktligen borde storleken på granulen kunna ha betydelse för graden av retention. (Beaton et al., 2005). Den låga diffusionskoefficienten för fosfor (10^{-12} - 10^{-15} m/s) gör dock att växtens fosforupptag till stor del beror på att roten kommer i kontakt med fosforkällan. Sannolikheten borde dock minska med ökad granulstorlek. Frågan är vilken process som är förhärskande, retention eller rottillväxt? Vad är en optimal granulstorlek för minimerad retention och hög sannolikhet för kontakt mellan rot och fosforkälla?



Figur 7. Kontaktyta ($m^2/kg P$) mellan gödselkorn och jord som funktion av gödselkornets radius (cm) enligt Sander och Eghball (1988).



Figur 8. Schematisk bild som visar hur en större granulstorlek (storlek 1,0) skulle kunna innebära att en stor del av gödsel-fosfor behålls i lösning jämfört med flera små granuler (storlek 0,25) med samma totala massa. Den innersta kärnan består av eventuell svårlöslig fosfor och utfällningar medan den mittersta delen föreställer den fosformättade zonen med mycket fosfor i lösning. Den yttersta fronten består av fosformättad lösning med en lägre fosforkoncentration som domineras av adsorption.

En större granulstorlek borde kunna innebära att mer fosfor kan hållas i lösning, då den fosformättade zonen runt granulen blir större på grund av minskad yta i kontakt med jorden (se Figur 8 ovan). Detta torde innebära att mer växttillgänglig fosfor finns runt granulen under en längre tid, vilket gynnar rotupptaget om roten kommer i kontakt med gödselkällan. Sannolikheten för kontakt mellan rot och gödsel minskar dock med ökad granulstorlek samtidigt som koncentrationsgradienten blir större och diffusionen kan ske över en längre sträcka från gödselkornet. Diffusion bestäms av Ficks lag enligt följande:

$$q_d = D \cdot dc/dz$$

q_d = diffusionflödet av ett ämne ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

D = diffusionskonstanten för ämnet i rent vatten ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), för fosfor 10^{-12} - 10^{-15} m^2/s .

c = koncentrationen av ämnet (g m^{-3})

z = avståndet (m)

Hur långt fosfor kan diffundera från en gödselgranul beror därmed inte enbart på diffusionskoefficienten, utan även på koncentrationsgradienten ($dz = D \cdot dc / q_d$). Med en större gödselgranul blir koncentrationsgradienten större och diffusion kan ske längre i marken. Diffusionskoefficienten (D) är dock inte konstant utan beror i sig på en rad olika parametrar enligt nedan. (Hedley och McLaughlin, 2005).

$$D = P_L \cdot \theta \cdot f \cdot dP_L / dP_S$$

P_L = Diffusionskoefficienten för fosfor i vatten

θ = Vattenvolymen i jorden

f = Reducerande faktor på grund av att fosforns rörelse i mikroporer är icke-linjär och beror på vattnets kontinuitet i marken

dP_L / dP_S = kvoten mellan koncentrationen av fosfor i marklösningen (dP_L) och adsorberat på markpartiklar (dP_S), jordens fosforbuffertkapacitet

De parametrar som styr storleken på diffusionskoefficienten varierar. Vattenvolymen i jorden (θ) kan variera upp till 300 gånger beroende på typ av jord och säsong. Jordens fosforbuffertkapacitet (dP_L / dP_S) kan skilja sig upp till 100 gånger beroende på jordtyp och i vilken zon runt gödselgranulen mätningen sker (Hedley och McLaughlin, 2005). Det räcker inte heller enbart med att hålla mer fosfor i lösning, för att effektiviteten i upptaget skall öka utan även grödupptaget måste öka. Det betyder att rötter måste hinna växa till gödselkornet innan fosfor fastläggs i otillgänglig form. Av vad som anförts ovan framgår att partikelstorlekens betydelse för effektiviteten i fosforutnyttjandet är komplicerad, några försök har dock gjorts för att reda ut begreppen.

När ett gödselmedel placeras i fuktig jord diffunderar fosfor ut i alla riktningar och efter ungefär en vecka är gödsel fosfor i princip stationär i en sfärisk form runt källan, med en hög koncentration i mitten. Beroende på mängden gödselgranuler kan dessa sfärer existera separat eller ge ett visst överlapp. Rotupptaget är obefintligt i den del av jorden där ingen fosfor finns, och om inget överlapp existerar kan det totala upptaget beräknas som summan av upptaget från de olika delarna. Växttillgängligheten av fosfor i dessa delar kan beräknas enligt ekvationen nedan (Burns et al., 1963).

$$A = N \sum_{i=1}^n G_i V_i$$

A = Index utnyttjandegrad

N = Antal partiklar av en viss storlek

G_i = Tillgänglighetsindex för gödslet

V_i = Volymen av den sfär av jord som innehåller fosfor som härstammar från en gödselgranul

Eftersom att antalet partiklar (N) minskar vid en större partikelstorlek och volymen jord som innehåller fosforgödsel (V_i) likaså, måste växttillgängligheten och upptaget av gödslet i den sfär av jorden som innehåller fosfor från gödselgranulen öka, om den totala utnyttjandegraden av fosfor skall öka. Har partikelstorleken någon betydelse för detta? Burns et al. (1963) visade i försök på sex olika jordar att effektiviteten i fosforupptaget ökade med ökad partikelstorlek på fem av sex jordar av varierande typ. Den jord där en effektivitetsökning inte erhöles med en ökning av partikelstorleken var en alkalisk kalkrik jord med pH-värde på 8,4. På den alkaliska jorden minskade istället tillgänglighetsindex med ökad partikelstorlek och upptaget likaså. Även tidigare försök har visat att stora partiklar är mer effektiva på neutrala och sura jordar medan det motsatta är sant på alkaliska, kalkrika jordar (Wilding, 1949). Koncentratio-

nen av fosfor i marklösningen efter diffusion av överskottet ökar med ökad partikelstorlek på grund av en längre period med hög fosforkoncentration i marklösningen, och en högre grad av mättnad. Burns et al. (1963) menar att i en jord innehållande mycket CaCO_3 som reagerar med fosfor uteblir denna effekt. Tillgängligheten blir då istället beroende av att den totala jordvolymen ($\sum V_i$) som innehåller gödsel fosfor vilken ökar med minskad partikelstorlek.

Effekten av granulstorlek på höstveteskörd undersöktes även av Sander och Eghball (1988). I detta försök applicerades Ammoniumpolyfosfat (APP) i storlekar från 0,00019 till 22 mg. ”Normal” storlek på granuler ligger på ungefär 20 mg. Fosforgivan varierades från 8,4-25,2 kg P/ha på fyra olika jordar av olika typ med pH-värden som låg mellan 5,6-6,5. Sander och Eghball (1988) visade att partikelstorleken påverkade höstveteskörden på två av jordarna, båda från en torr respektive något nederbördsfattig region. Resultaten visade i motsats till vad som anförts ovan att skörd, P-upptag och kärnvikt *minskade* med ökad storlek på granulen på dessa jordar, maximal skörd erhöles vid storleken 0,025 mg. Effektiviteten i fosforupptaget nådde ett maximum på 47 % vid storleken 0,15 mg och givan 8,4 kg P/ha, detta var 20 % bättre än vid ”normal” storlek. För 22 mg var avståndet granuler emellan vid denna giva i genomsnitt 2,8 cm medan 0,025 mg låg i ett sammanhängande band. Resultaten förklaras med att rotproliferationen ökar när fosforgödselmedlet ligger i ett sammanhängande band. Den låga diffusionskoefficienten på 10^{-12} - 10^{-15} m/s är bestämmande för diffusionsflödet, beroende på storleken på de andra parametrarna ligger diffusionen på fosfor bara omkring 0,1 mm/dygn (Haak, 1994) och roten måste istället växa till gödselkällan. Hastigheten för rottillväxt ligger i storleksordningen 1-20 mm/dag och rothår 0,1 mm/dag, varför rottillväxten i högre grad än diffusionshastigheten torde vara bestämmande för huruvida rotupptag eller retention sker. Även om någon enstaka rot kan tillgodose hela grödans fosforbehov är det fördelaktigt om så stor andel av rotsystemet som möjligt har kontakt med fosforkällan. Försök på majs har visat på en 20 % minskning i tillväxt om delar av rotsystemet inte har tillgång till fosfor (Stryker et al., 1974). När gödselgranulerna ligger separerade från varandra krävs många kontakter mellan rot och gödsel för att tillfredställa grödans fosforbehov. Om gödselmedlet föreligger som ett sammanhängande band kan det vara tillräckligt med en kontakt för tillräckligt fosforupptag (Eghball och Sander 1987). I detta fall är därmed den minskade kontakten med jorden, mer fosfor i lösning och den ökade koncentrationsgradienten till följd av ökad granulstorlek inte tillräcklig för att öka rotupptaget. De jordar där Sander och Eghball (1988) erhöles signifikanta resultat av minskad partikelstorlek var dock av typen Argiustoll, varav en var arid. Detta försöks tillämplighet på Svenska förhållanden kan därmed vara begränsat. Mindre vatten i marken minskar mobiliteten av fosfor varför ett sammanhängande band av fosforgödselmedel kan vara extra fördelaktigt på torra jordar till skillnad från jordar med högre vattenhalt. Tilläggas bör att optimal partikelstorlek varierar med fosforgiva, där en högre giva minskar effekten av granulstorlek (Sander och Eghball, 1988) på grund av ökad sannolikhet för kontakt mellan rot och gödselmedel.

Granulstorleken på gödselmedlet kan med andra ord ha betydelse för fosforutnyttjandegraden, vilken effekt som erhålles beror dock bland annat på typ av jord, gödselgiva och typ av gödselmedel. Hur mycket fosfor som behålls i lösning, och därmed förblir växttillgängligt, be-

stäms som förklarar av en rad parametrar med vilka vi kan laborera för att öka effektiviteten i fosforutnyttjandet. Skillnader i dessa parametrar förklarar även varför en ökning eller minskning av granulstorleken ger olika resultat i olika försök. Om förutsättningarna är sådana att sannolikheten för kontakt mellan rot och gödselmedel är relativt höga på grund av exempelvis god vattenhalt, bra markstruktur, hög gödselgiva och bra gödselplacering, kan möjligen en ökning av granulstorleken öka effektiviteten i fosforupptaget på grund av minskad retention. Om förutsättningarna för kontakt mellan rot och gödselkälla däremot är mindre på grund av torka, markpackning, lägre giva och en sämre placering, kan det möjligen vara fördelaktigt att placera gödselmedlet i ett sammanhängande band. Utifrån vad som anförts ovan kan slutsatsen dras att granulstorleken har viss betydelse för fosforutnyttjandegraden, frågan är dock om fosforgödselmedel i granulform är det mest effektiva över huvudtaget eller om vätskeform är att föredra?

8.2 Granul eller vätska - vad är effektivast?

På kalkrika jordar innehållande 5-67 % kalciumkarbonat visade Holloway et al. (2001) att MAP i vätskeform (TGMAP) är 4-15 gånger mer effektivt än MAP i granulär form. Den största skördeökningen till följd av användning av TGMAP jämfört med MAP var 31 %. På den jord som innehöll minst kalciumkarbonat var skillnaden mindre, 15 %. Vad den stora skillnaden mellan MAP och TGMAP berodde på var dock oklart. Lombi et al. (2004) söker svaret på frågan genom att undersöka diffusionen från MAP och TGMAP, samt pH-förändringen i närheten av gödselmedlen. På ett avstånd på 0-7,55 mm från både MAP och TGMAP minskade pH-värdet med 0,23-0,24 enheter jämfört med resten av jorden, en relativt liten pH-sänkning som kan tillskrivas jordens goda buffertkapacitet. I jordar med sämre buffertkapacitet har pH-minskningar på upp till två pH-enheter noterats (Sample et al., 1979). Försöket visade att diffusionen och lösligheten av fosfatet ökade med TGMAP, vilket möjligen kan bero på skillnader i fuktighetsgradient, mobilitet och typ av reaktionsprodukter. Kemisk data visar även att MAP-granulen inte helt upplöstes efter 5 veckor till viss del beroende på innehåll av svårösliga komponenter. Dessutom visade det sig att Ca och Al diffunderade in i granulen vilket ledde till utfällningar in situ. Huruvida dessa resultat har relevans för svenska förhållanden är svårt att avgöra då vi har få jordar med så här höga halter av kalciumkarbonat. En del av förklaringen till den ökade effektiviteten är dock ökad diffusion till följd av skillnad i fuktighetsgradient, något som torde vara oberoende av halten kalciumkarbonat i jorden. Ökad diffusion borde därmed öka sannolikheten för rotupptag i de flesta typer av jordar som inte har väldigt hög fosforfixeringsförmåga. Att MAP-granulen inte löses upp fullständigt är ett problem då växten ej kan tillgodogöra sig denna fosfor som riskerar fixeras i marken i otillgänglig form. Applicering av fosforgödselmedel i flytande form skulle därmed kunna öka effektiviteten i fosforutnyttjande, särskilt på torra och kalkrika jordar.

8.3 Framtidens gödselmedel för ökad fosforutnyttjandegrad med handelsgödsel

Att öka effektiviteten i fosforutnyttjandet med handelsgödsel är komplicerat då rotupptaget styrs av en rad olika parametrar som typ av gödsel, jord, gröda och årsmån. Den huvudsakliga anledningen till att fosforutnyttjandegraden är så låg är dock att retentionen är så pass omfattande. En stor del av problemet är fastläggning genom reaktioner med Ca, Mg, Fe och Al och det faktum att fosfor blir mer otillgänglig med tiden. Detta öppnar upp för produkter som

kan motverka dessa processer, så kallade Enhanced Efficiency Fertilizers (EEF). EEF:s är gödselmedel som minskar förluster av näring till omgivningen och/eller ökar tillgängligheten av näringsämnet jämfört med konventionella gödselmedel. För fosforgödselmedel finns så kallade ”slow-release” produkter samt coating med polymerer, ökar dessa produkter effektiviteten i fosforupptaget?

8.4 Kan retentionen förhindras med polymercoating med hög katjonbyteskapacitet?

En stor del av otillgängliggörandet av fosfor i marken kan tillskrivas fosfors reaktioner med olika katjoner. Av denna anledning finns det idag produkter som innehåller polymerer med hög katjonbyteskapacitet som påstås reagera med dessa katjoner och göra mer fosfor tillgänglig för växten, en sådan produkt är Avail®. Enligt företaget som marknadsför denna produkt gör Avail® att mer fosfor finns tillgänglig under växtsäsongen och att skörden ökar med 10-15 % ,enligt opublicerade försök (Avail, 2010-05-14).

Avail® består av en polymer som antingen kan användas som coating på gödselgranuler eller blandas med flytande fosforgödselmedel. Denna förening har hög katjonbyteskapacitet och sägs skapa en ”mikromiljö” med hög koncentration fosfor genom att adsorbera multivalenta katjoner. Mellan 2007-2009 genomfördes opublicerade försök där detta undersöktes (Karamanos et al., 2009). Försöken utfördes på sex olika jordar med varierande innehåll av fosfor, organiskt material, och pH-värden från 6,1-8,0. Fosforgödsling gavs i varierande givor i form av MAP. Försöken visar ingen signifikant effekt av tillsatsen av Avail® till MAP.⁴ För att fastställa huruvida en polymercoating med hög katjonbyteskapacitet kan öka effektiviteten i fosforutnyttjandet krävs därmed mer forskning.

8.5 Kan långsam upplösning av fosforgödselmedlet förhindra retention?

En stor del av fosforretentionen beror på att mer fosfor finns i marklösningen än roten kan ta upp. För att öka effektiviteten i rotupptaget av fosfor finns det därför produkter som löses upp långsamt och tillför fosfor till marklösningen kontinuerligt, ökar detta fosforutnyttjandegraden?

I växthusförsök (Nyborg et al., 1998) simulerades en långsam upplösning av fosfor genom att MAP, DAP och APP tillfördes korn i små kontinuerliga doser. Resultatet visade att retentionen av fosfor minskade och att upptaget ökade jämfört med en stor giva av fosfor i början av tillväxtsäsongen. Resultaten visade även att effekten av DAP var bättre än MAP. I ytterligare försök (Pauly et al., 2001) på korn i växthus undersöktes hur effektiviteten i fosforupptaget påverkades av att gödselmedlet, MAP och DAP, täcktes av en tunnare (1,8 % av vikten) och en tjockare (2,2 % av vikten) polymerhinna. Konsekvent ökning av fosforutnyttjandegraden erhöles i detta försök enbart med MAP. Resultaten från dessa försök visas i Tabell 4 nedan.

⁴ På företagets hemsida redovisas opublicerade resultat som visar på en ökad fosforutnyttjandegrad med detta preparat, hur försöken är utförda framgår dock ej. Kontakt har sökts med företaget för att få tillgång till mer information, dock utan framgång.

Tabell 4. Totalskörd av körn, P-upptag och effektiviteten i fosforupptaget efter 52 dagars tillväxt med coated och icke-coated MAP, efter Pauly et al. 2001.

Behandling	Totalskörd (g ts/kruka)	P-upptag (mg P/kruka)	Effektivitet (%)
Kontroll	7.76	6.47	NA
Ingen coating	18.96	12.39	27.4
tunn coating	24.41	15.71	42.8
tjock coating	18.64	13.28	31.5

Enligt detta försök ökar effektiviteten i fosforupptaget med hjälp av en coating på MAP som gör gödselmedlet långsamupplösande. I vissa fall hade fosforgödselmedlet utan coating en högre biomassa (ts) i ett tidigt skede av tillväxten, medan leden med coating hade högre biomassa i senare skeden. Effekten är större av en tunnare coating än av en tjockare, och frigörandet av fosfor i början av tillväxten är större än för den tjockare (Pauly et al., 2001). Detta skulle kunna förklara den högre effektiviteten i fosforutnyttjandet med en tunn coating, då grödans fosforbehov är som störst i början av tillväxten. Inga fältförsök på spannmål är funna.

Upplösningen av ett långsamupplösande gödselmedel beror på temperatur, vattenhalt och jordtyp (Rutz och Jones, 2009) varför effekten sannolikt varierar med jord och årsmån. Problemet med ett långsamupplösande gödselmedel är att synkronisera upplösningen med växtens behov. Fosforbehovet för en växt är som förklarat ovan inte linjärt utan varierar över tiden, varför en sådan synkronisering kan vara svår att åstadkomma då upplösningen styrs av biologiska parametrar. Fosforbehovet är stort i början av grödans tillväxtperiod och då föreligger en risk att för lite fosfor frigörs för att tillgodose växtens behov med ett långsamupplösande gödselmedel. Senare på säsongen minskar behovet av fosfor men upplösningen av gödselmedlet fortlöper. Mer fosfor riskerar då att frigöras än växten kan ta upp. Dessutom finns en stor risk att upplösningen fortlöper även efter skörd, med hög vattenhalten och temperaturen. För att tillgodose växtens varierande behov av fosfor krävs en coating som inte styrs av biologiska parametrar, utan är helt anpassat efter växtens fosforbehov, då skulle troligtvis effektiviteten i fosforutnyttjandet öka ytterligare.

9. Möjligheter till ökat fosforutnyttjande med mineralgödsel nu och i framtiden

Av vad som anförts ovan framgår att fosfor är en ändlig resurs av avtagande kvalitet som vi bör hushålla med. Följaktligen är en så låg fosforutnyttjandegrad i växtodlingen som 15-30% oacceptabel, och effektiviteten i fosforutnyttjandet måste öka. Den huvudsakliga anledningen till ett dåligt fosforutnyttjande är retentionen av fosfor, vilken måste förhindras i den mån det går. Kan då några generella slutsatser dras om hur en ökning av effektiviteten i fosforutnyttjandet bör ske utifrån vad som anförts ovan?

Med utgångspunkt från ekvationen för total tillgänglighet av fosfor som användes av Burns et al., (1963) kan antas att en ökning av den totala tillgängligheten (A) även innebär en ökning av rotupptaget och effektiviteten. Med vilka åtgärder kan en ökning av den totala utnyttjandegraden (A) ske?

$$A = N \sum_{i=1}^n G_i V_i$$

A= Index för total tillgänglighet

N= Antal partiklar av en viss storlek

G_i= Tillgänglighetsindex för gödslet

V_i= Volymen av den sfär av jord som innehåller fosfor som härstammar från en gödselgranul

Framtida forskning för att öka utnyttjandegraden av fosfor kräver att enbart en parameter i taget ändras, och att övriga hålls konstanta i den mån det går. Antalet partiklar (N) bestäms av gödselgivan och partikelstorleken, där en ökad giva eller en minskad partikelstorlek ger en ökning av den totala tillgängligheten (A), förutsatt att övriga parametrar ej förändras. Tillgänglighetsindex för gödslet (G_i) beror främst på typ av gödselmedel, gödslets vattenlöslighet, gödselgranulens storlek, pH-värdet på den mättade gödsellösningen, markens pH-värde, mineralogi, basmättnadsgrad, typ av katjoner på utbyteskomplexet, fosforbuffertkapacitet och fosforfixerande förmåga. Volymen av den jord som innehåller fosfor härrörande från gödslet (V_i), vilken till viss del bestämmer sannolikheten för kontakt mellan rot och gödsel, bestäms av gödselgivan, granulstorleken och graden av diffusion. Graden av diffusion beror i sin tur på typ av gödsel, vattenhalt, markstruktur och jordens fosforbuffertkapacitet. Den totala utnyttjandegraden (A) beror därmed på en rad olika parametrar som är olika i olika försök. Detta förklarar den stora variationen i försöksresultat och svårigheten med att öka effektiviteten i fosforupptaget. Med dagens kunskap och teknik är dock följande gödslingsstrategi ett förslag som möjligen kan bidra till en ökning av fosforutnyttjandegraden.

Fosforgödsling bör ske varje år och valet av fosforgödselmedel bör i viss mån anpassas efter typen av jord, även om gödselmedlets påverkan på markens pH är komplicerat och varierat. På en jord med gott kalktillstånd bör möjligen gödselmedel med låga reaktions pH-värden väljas och tvärtom på en surare jord. Gödselmedlet bör även föreligga i vätskeform eller ha en granulstorlek som är anpassad efter jordens egenskaper. Gödselspridning bör ske på våren med hjälp av bandspridning och placering ungefär 10 cm från markytan. En uppdelning av fosforgivan kan göras där en giva som motsvarar grödans behov ges i början av säsongen för att sedan kompletteras med bladgödsling i ett senare skede.

Ovanstående åtgärder räcker dock inte för att fosforutnyttjandet ska nå acceptabel nivå, i framtiden måste istället ytterligare effektivitetsökningar åstadkommas genom nya spridningstekniker eller ”smartare” gödselmedel. Den mängd fosfor som finns i marklösningen måste på något sätt synkroniseras med växtens fosforbehov, och rotupptaget gynnas framför retention. I nuläget baseras svenska gödslingsrekommendationer på jordens P-AL tal, vilket har lite att göra med markens förmåga att hålla gödselphosfor växttillgänglig. För att öka effektiviteten i fosforutnyttjandet måste gödslingsstrategier istället integreras och i högre grad anpassas efter andra variabler än markens fosfortillstånd. I mångt och mycket innebär en ökning av effektiviteten i fosforupptaget att så mycket fosfor som möjligt bör behållas i lösning tills roten hunnit växa till fosforkällan, detta är dock komplicerat och innebär beaktande av en rad paramet-

rar. Endast med beaktande av dessa parametrar kan dock en verkligt effektiv fosforgödslingsstrategi utvecklas. I nuläget är denna typ av forskning och teknik tämligen dyr och ointressant, då det relativt låga fosforpriset gör att stora förändringar blir svåra att räkna hem. Allteftersom fosforreserverna sinar och kravet på kadmiumrening ökar, kommer dock priset på fosfor att skjuta i höjden. Ett framtida jordbruk som kan föda en växande befolkning för en rimlig kostnad har därmed inte råd med en låg fosforutnyttjandegrad.

Referenser

Otryckta källor

Avail (2010-05-14), *Science behind Avail*.

Tillgänglig:

<http://www.chooseavail.com/Science.aspx> (2010-05-14)

U.S Geological Survey (2010-05-23) *U.S Geological survey mineral commodity summaries*

Tillgänglig:

http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/mcs-2009-phosp.pdf januari, 2009

Tryckta källor

Beaton, J., Havlin, J., Nelson, W., Tisdale, S. (2005), *Soil Fertility and Fertilizers- an Introduction to Nutrient Management*, 7th ed, Pearson Education, New Jersey, 372-388, 391-392, 160-182

Brady, N., Weil, R. (2002), *The Nature and Properties of Soil*, 13 th ed, Prentice Hall, New Jersey, 606-619

Burns, G.R., Bouldin, D.R., Black, C.A., Hill, W.L. (1963), *Estimation of particle size effects of water-soluble phosphate fertilizers on various soils*, Soil Science Society America, 27:556-560

Desta, K., Freeman, K., Martin, K., Mosali, J., Raun, W., Teal, R., Lawles, J. (2006), *Effect of foliar application of phosphorus on winter wheat grain yield, phosphorus uptake and use efficiency*, Journal of Plant Nutrition, 29: 2147-2163

Eghball, B., Sander, D.H. (1988), *Phosphorus solution distribution in the band as affected by application variables*, Soil Science Society America Journal, 51: 1350-1354

Grant, C., Wu, R. (2008), *Enhanced-efficiency fertilizers for use on the Canadian Prairies*, Online. Crop Management doi:10.1094/CM-2008-0730-01-RV

Gökmen, S., Sencar, Ö. (1999), *Effects of phosphorus fertilizers and application methods on the yield of wheat grown under dryland conditions*, Journal of Agriculture and Forestry, 23: 393-399

Haak, E. (1994), *Rotens morfologi och fysiologi i relation till alvens funktion*, Kungliga Skogs och Lantbruksakademins Tidskrift, 133:5, 9-20

Hahlin, M, Johansson, O.(1977), *Några analysmetoders förmåga att beskriva växtnäringstillståndet för fosfor och kalium i marken*, Lantbrukshögskolans meddelanden, A, 271

Hahlin, M., Ericsson, J. (1981), *Fosfor och fosforgödsling*, Aktuellt från lantbruksuniversitetet nr 294, Uppsala

Hedley, M., McLaughlin, M. (2005), *Reactions of phosphate fertilizers and by-products in soils*, in Ed. Sims, J.T., Sharpley, A. N.(2005) *Phosphorus: Agriculture and the environment*, Agronomy Monograph nr. 46, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 181-242

Hocking, P.J., George, T.S., Richardson, A.E., Simpson, R.J.(2009), *Plant mechanisms to optimise access to soil phosphorus*, Crop and Pasture Science, 60: 124-143

Holloway, R.E., Bertrand, I., Frischke, A.J., Brace, D.M., McLaughlin, M.J., Sheppard, W.(2001), *Improving fertilizer efficiency on calcareous and alkaline soils with fluid sources of P, N and Zn*, Plant and Soil, 236: 209-219

Holmberg, G., Neuman, L., Skarbäck, G.(2006), *Fosforgödsla rätt*, Jordbiten, nr 5, Länsstyrelsen Västra Götaland

Jordbruksverket (1995), *Växtnäringsförluster - Bakgrund och mål*, Från Nilsson (ed) *Växtnäring och miljö*, nr 20

Jordbruksverket (2008), *Riktlinjer för gödsling och kalkning 2009*, Jordbruksinformation 26, 47-51

Jordbruksverket (2009), *Riktlinjer för gödsling och kalkning 2010*, Jordbruksinformation 13, 49-54

Karamanos, R., Jackson, G., Puurveen, D., Miller, J. (2009), *Is Avail® enhancing phosphorus efficiency in wheat?*, 2009 Manitoba agronomist conference

Kasawneh, F. E., Hashimoto, I., Sample, E.C. (1979), *Reactions of ortho- and polyphosphate fertilizers in soil: II Hydrolysis and reactions with soil*, Soil Science Society America, 43: 52-58

Lombi, E., McLaughlin, M.J., Johnston, C., Armstrong, R.D., Holloway, R.E.(2004), *Mobility and liability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in calcareous soil*, Soil Science Society America, 68: 682-689

Manske, G.G.B., Ortiz-Monasterio, J.I., Van Ginkel, M., Gonzalez, R.M., Rajaram, S., Molina, E., Vlek, P.L.G.(2000), *Traits associated with improved P-uptake efficiency in CIM-*

MYT's semidwarf spring bread wheat grown on an acid andisol in Mexico, Plant and Soil, 221: 189-204

McConnel, S.G., Sander, D.H., Peterson, G.A. (1986), *Effect of fertilizer placement on winter wheat yield*, Soil Science Society of America, 50: 148-153

Mengel, K., Kirkby, E.A. (1987), *Principles of Plant Nutrition*, 4th ed, International Potash Institute, Bern Switzerland, 403-420

Moody, P.W., Aitken, R.L., Edwards, D.G., Bell, L.C. (1995), *Effect of banded fertilizers on soil solution composition and short-term root-growth .2. Mono-ammonium and di-ammonium phosphates*, Australian Journal of Soil Research, 33(4): 689 - 707

Naturvårdsverket (2005), *Fosforgödsling och odlingsekonomi med perspektiv på miljömål*, Rapport 5518, Naturvårdsverket

Naturvårdsverket (1997), *Fosfor - livsnödvändigt, ändligt och ett miljöproblem*, Rapport 4730, Naturvårdsverket

Nyborg, M., Solberg, E. D., and Pauly, D. G. (1998), *Controlled release of phosphorus fertilizers by small, frequent additions in water solution*, Canadian Journal of Soil Science, 78: 317-320

Papadopoulos, I. (1985), *Mono and diammonium phosphates and triple superphosphate as sources of P in a calcareous soil*, Fertilizer research, 6: 189-192

Pauly, D.G., Nyborg, M., Mahli, S.(2002), *Controlled release P fertilizer concept evaluation using growth and P uptake of barley from three soils in a greenhouse*, Canadian Journal of Soil Science, 82: 201-210

Peterson, G.A., Sander, D.H., Grabouski, P.H., Hooker, M.L.(1981), *A new look at row and broadcast phosphate recommendations for winter wheat*, Agron. J., 73: 13-17

Rutz, K., Jones, C. (2009), *Enhanced efficiency fertilizer*, Montana State University Extension, Department of Land Resources and Environmental Sciences, Montana State University, Bozeman

Römer, W., Schilling, G.(1986) *Phosphorus requirements of the wheat plant in various stages of its life cycle*, Plant and soil, 91: 221-229

Sample, E.C., Khasawneh, F.E., Hashimoto, I.(1979), *Reactions of ammonium ortho- and polyphosphate fertilizers in soil: III. Effects of associated cations*, Soil Science Society America Journal, 43: 58-65

Sander, D.H., Eghball, B. (1988), *Effect of fertilizer phosphorus particle size on phosphorus fertilizer efficiency*, Soil Science Society America Journal, 52: 868-873

Stryker, R.B., Gilliam, J.W., Jackson, W.A. (1974), *Nonuniform phosphorus distribution in the root zone of corn: growth and phosphorus uptake*, Soil Science Society America Journal, 38: 334-340

Venugopalan, M.V., Prasad, R. (1989), *Relative efficiency of ammonium polyphosphate and orthophosphates for wheat and their residual effects on succeeding cowpea fodder*, Fertilizer Research, 20: 109-114

Wilding, M.W. (1949), *The effect of the particle size on the fixation and availability of phosphate fertilizers in soils differing in reaction*, Unpublished M.S. Thesis, Iowa State University Library, Ames, Iowa