

# Fosforförluster från jordbruksmark

– bakomliggande orsaker och effektiva motåtgärder



Stiftelsen Lantbruksforskning

Rapporten finansierades av Jordbruksverket och Naturvårdsverket

**Koordinator:** *Stiftelsen Lantbruksforskning*

**Författare:** Pia Geranmayeh, *Sveriges lantbruksuniversitet*, och Helena Aronsson, *Sveriges lantbruksuniversitet*

*Rapporten är framtagen inom ramen för Stiftelsen Lantbruksforskning's fosforprogram med finansiering från Jordbruksverket och Naturvårdsverket. Fosforprogrammet syftar till att öka kunskapen om hur fosforförluster från jordbruksmark uppkommer samt finna hållbara och effektiva åtgärder mot fosforförluster från jordbruksmark.*

# Innehåll

|                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Förord                                                                             | 3         |
| Sammanfattning                                                                     | 4         |
| Summary                                                                            | 5         |
| <b>1. Inledning</b>                                                                | <b>6</b>  |
| <b>DEL 1. Vilka konkreta råd till brukare och rådgivare utmynnade projekten i?</b> | <b>7</b>  |
| <b>2. Praktiska råd</b>                                                            | <b>8</b>  |
| <b>DEL 2. Vad krävs för att resultaten ska spridas och användas?</b>               | <b>10</b> |
| <b>3. Resultatens genomslag på nationell nivå</b>                                  | <b>10</b> |
| 3.1 Åtgärder inom Vattendirektivet                                                 | 10        |
| 3.2 Rådgivningsarbetet                                                             | 10        |
| 3.3 Tillsyn och provning                                                           | 10        |
| 3.4 Foderrekommendationer                                                          | 10        |
| <b>4. Utmaningar att tillämpa resultaten i praktiken</b>                           | <b>11</b> |
| 4.1 Kommunikationskanaler                                                          | 11        |
| 4.2 Större investeringar som grund för fortsatta åtgärder                          | 11        |
| 4.3 Styrmedel för precisionsarbete                                                 | 11        |
| 4.4 Hästhållning faller mellan stolarna                                            | 12        |
| 4.5 Få och korta studier behöver följas upp                                        | 12        |
| 4.6 Fördelning av resursen fosfor                                                  | 12        |
| 4.7 Systemets inneboende tröghet                                                   | 13        |
| 4.8 Helhetsgrepp kring åtgärder                                                    | 13        |
| <b>5. Metodik och indikationer för riskbedömning och åtgärdsplacering</b>          | <b>14</b> |
| 5.1 Träckprov för att spåra överutfodring                                          | 14        |
| 5.2 Jordens fosfor-, järn- och aluminiuminnehåll som ett riskindex                 | 14        |
| 5.3 Lerhalt är en indikator på fosfortransport                                     | 14        |
| 5.4 Kartläggning av hydrologiskt aktiva områden är under utformning                | 14        |
| 5.5 Jordtester som möjlighet för bedömning av erosionskänslighet                   | 15        |
| 5.6 Organiska fosforformers bidrag till övergödning                                | 15        |
| 5.7 Fosfortillgänglighetens pH-beroende                                            | 15        |
| <b>6. Vilka samlade erfarenheter ger resultaten?</b>                               | <b>16</b> |
| 6.1 Betesdjurs påverkan på fosforförlusterna                                       | 18        |
| 6.1.1 Avföringsprov kan indikera överutfodring                                     | 18        |
| 6.1.2 Löst fosfor i avföringen riskerar att läcka                                  | 18        |
| 6.2 Odlingsåtgärders påverkan på fosforförlusterna                                 | 20        |
| 6.2.1 Hög regnintensitet ökar vattnets grumlighet och fosforhalt                   | 20        |
| 6.2.2 Avrinningen har större betydelse än grödan                                   | 20        |
| 6.2.3 Jordbearbetning har begränsad påverkan                                       | 20        |
| 6.2.4 Strukturförbättring är en lovande åtgärd                                     | 20        |
| 6.2.5 Fånggröda riskerar släppa löst fosfor under vintern                          | 21        |

|                                                                       |                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----|
| 6.2.6                                                                 | Mångårig gödsling kan ge större effekt än enstaka giva              | 21 |
| 6.3                                                                   | Åtgärder längs vattenvägar                                          | 23 |
| 6.3.1                                                                 | Kantzoner minskar fosforförluster via ytavrinning                   | 23 |
| 6.3.2                                                                 | Fosfordammar fångar främst partikelbunden fosfor                    | 23 |
| 6.3.3                                                                 | Filtermaterial har potential att binda löst fosfor                  | 23 |
| 6.4                                                                   | Identifiering av riskjordar och riskområden för fosforförluster     | 24 |
| 6.4.1                                                                 | Fosformobilisering från sediment                                    | 24 |
| 6.4.2                                                                 | Källa, mobilisering och transport                                   | 24 |
| 6.4.3                                                                 | Mättnadsgraden påverkar fosformobilisering                          | 24 |
| 6.4.4                                                                 | Jordar känsliga för mobilisering genom erosion                      | 26 |
| 6.4.5                                                                 | Ytmodeller identifierar små riskområden för ytavrinning             | 27 |
| <b>DEL 3. Mer detaljerad beskrivning av projekten för den nyfikne</b> |                                                                     | 29 |
| 7.                                                                    | <b>Projektbeskrivningar och resultat</b>                            | 29 |
| 7.1                                                                   | Djurhållning                                                        | 29 |
| 7.1.1                                                                 | Foderutnyttjande                                                    | 29 |
| 7.1.2                                                                 | Metod som indikerar överutfodring                                   | 30 |
| 7.1.2                                                                 | Gödsel fosfors löslighet                                            | 31 |
| 7.1.3                                                                 | Rasthagar för hästar                                                | 31 |
| 7.2                                                                   | Odlingsåtgärders påverkan på fosforförlusterna                      | 33 |
| 7.2.1                                                                 | Effekt av gödsling och spridningsmetod                              | 33 |
| 7.2.2                                                                 | Effekten av grödans upptag                                          | 35 |
| 7.2.3                                                                 | Effekten av jordbearbetning                                         | 36 |
| 7.2.4                                                                 | Effekten av fånggrödor                                              | 38 |
| 7.2.5                                                                 | Effekten av strukturkalkning                                        | 39 |
| 7.2.5.1                                                               | Kalkens effekt på fosforutlakningen                                 | 40 |
| 7.2.5.2                                                               | Kalkens effekt på markstruktur                                      | 40 |
| 7.2.5.3                                                               | Kalkens effekt på markens pH                                        | 42 |
| 7.2.5.4                                                               | Kalkens effekt på skörden                                           | 42 |
| 7.3                                                                   | Åtgärder längs vattenvägarna                                        | 43 |
| 7.3.1                                                                 | Kantzoner                                                           | 43 |
| 7.3.2                                                                 | Diken                                                               | 44 |
| 7.3.3                                                                 | Fosfordammar                                                        | 45 |
| 7.3.4                                                                 | Reaktiva filtermaterial                                             | 46 |
| 7.4                                                                   | Kvantifiering av källor och flödesvägar för fosfor                  | 47 |
| 7.4.1                                                                 | Organiska fosforformer som bidrar till övergödning                  | 48 |
| 7.4.2                                                                 | Identifiering av riskjordar för fosforförluster                     | 49 |
| 7.4.2                                                                 | Identifiering av kritiska källområden och transportvägar för fosfor | 52 |
| 8.                                                                    | <b>Informationsspridning inom forskningsprogrammet</b>              | 55 |
| 8.1                                                                   | Avhandlingar                                                        | 55 |
| 8.2                                                                   | Vetenskapliga artiklar                                              | 56 |
| 8.3                                                                   | Bokkapitel                                                          | 61 |
| 8.4                                                                   | Rapporter                                                           | 61 |
| 8.5                                                                   | Presentationer                                                      | 61 |
| 8.6                                                                   | Greppa näringen notiser                                             | 64 |



# Förord

Fosfor är ett viktigt grundämne för biologiska processer hos alla levande organismer. Inom jordbruket har fosfor en produktionshöjande effekt och ingår både i organiska och oorganiska gödselmedel. Det har emellertid visat sig att all tillförd fosfor icke tas upp av de växande grödorna utan läcker ut i våra vattendrag och sjöar och en stor del förs vidare ut i havet där den ekologiska balansen rubbas. Exempel på detta är de återkommande massiva algbloomningarna i Östersjön som gynnas av riklig tillgång på fosfor.

Syftet med den nu föreliggande rapporten har varit att på ett samlat sätt beskriva de processer som ligger bakom förluster av fosfor från jordbruksmark och föreslå åtgärder för att motverka dessa processer. Rapporten baseras på inte mindre än 24 olika delstudier som beviljats av Stiftelsen Lantbruksforskning med finansiellt stöd av Jordbruksverket och Naturvårdsverket.

Det är ett gediget arbete som nedlagts. Vid ett seminarium i Stockholm den 2 november 2015, presenterades innehållet i rapporten. Under seminariet framkom att rapporten bidrar med samlad kunskap som dels kan användas för rådgivning till aktiva lantbrukare och djurägare och dels synliggör problemställningar för framtida forskningsprojekt.

**Stockholm i december 2015**

Kjell Malmlöf, *Forskningschef, Stiftelsen Lantbruksforskning*

# Sammanfattning

Denna rapport utgör en sammanfattning av de 24 delstudier som beviljades medel under 2008-2010 och vars mål var att kartlägga och hitta metoder för att förhindra förluster av fosfor från jordbruksmark till vattendrag, sjöar och hav.

Övergripande forskningsteman har varit:

- Åtgärder inom djurhållning och växtodling
- Åtgärder längs vattenvägarna
- Källor och transportvägar för fosfor
- Riskbedömning för identifiering och placering av åtgärder

Finansiering erhöles via anslag från Stiftelsen Lantbruksforskning vilka baserades på återförda miljöskattemedel från Jordbruksverket, men Stiftelsen fick också ett betydande tillskott från Naturvårdsverket. Totalt har cirka 34 miljoner kronor beviljats och projekten har genererat inte mindre än 9 doktorsavhandlingar och 2 licentiatsavhandlingar som berör ett komplext ämnesområde där många fynd kan översättas i praktiska råd och finns beskrivna i den nu föreliggande rapporten. Resultaten visar att det är en palett av platsanpassade åtgärder som i kombination kan få effekt.

Följande generella slutsatser kan dock dras:

- Genom anpassade foderrekommendationer kan vi påverka flödet av fosfor i stallgödseln, som utgör en betydande del av fosfortillförseln till många jordar
- Inom hästhållningen utgör hårt utnyttjade rasthagar en potentiell risk för fosforläckage. Ett antal motåtgärder presenteras.
- Jordens fosforförråd och alvens mättnadsgrad ger viktig information om läckagerisken. Uppgödsling ger en ökad läckagerisk som tar tid att vända med minskad gödsling och bortförsel av fosfor med skörd.
- Kantzoner fångar fosfor via ytavrinning och bör anpassas till områden där detta sker.
- Markens lerhalt är viktig information för riskbedömning av fosforförluster och för implementering av åtgärder. En hög lerhalt ökar risken för fosforläckage.
- Åtgärderna bör anpassas till kritiska källområden och metoder för att hitta dessa områden har tagits fram och/eller är under utveckling.
- De åtgärder som oftast gett snabbast effekt är de som påverkar transportvägarna för fosfor genom marken, på fältet eller längs diken. Åtgärder som undersökts i programmet är på väg ut i praktisk användning. Deras effekter på längre sikt bör följas upp i framtida projekt.

Resultaten från forskningsprogrammet utgör en vetenskaplig plattform för praktisk rådgivning. De ger dessutom uppslag till framtida forskning som ytterligare kan bidra till ett minskat läckage av fosfor från våra odlingsmarker och på det sättet minska belastningen på hav, sjöar och vattendrag.

# Summary

This report summarises 24 research projects granted funding in the period 2008-2010 that had the aim of identifying and developing methods to prevent losses of phosphorus from agricultural soils to ditches, streams, rivers, lakes and seas.

The overarching research themes were:

- Measures within animal farming and arable farming
- Measures along water courses
- Sources and transport pathways for phosphorus
- Risk assessment for identification and positioning of measures.

The research funding consisted mainly of grants from the Swedish Farmers' Foundation for Agricultural Research. These grants were based on environmental tax revenues returned by the Swedish Board of Agriculture, but the Foundation also received a considerable contribution from the Swedish Environmental Protection Agency. A total of around 34 million Swedish crowns were awarded. The projects have generated no fewer than nine doctoral theses and two licentiate theses dealing with a complex range of subjects. Many of the findings reported can be translated into practical advice and are described in the present report. The results show that a palette of site-specific measures applied in combination have the best effect.

The following general conclusions can be drawn:

- Through tailored feed recommendations, it is possible to manipulate the flow of phosphorus in farmyard manure, which represents a considerable proportion of the phosphorus supply to many soils.
- In horse keeping, heavily used outdoor paddocks pose a potential risk of phosphorus losses. A number of countermeasures are presented.
- Soil phosphorus stores and the degree of phosphorus saturation in the subsoil provide important information on the leaching risk. Over-fertilizing gives an increased leaching risk that is difficult to reverse through reduced use of fertilizer and phosphorus removal with the harvested crop.
- Buffer zones capture phosphorus in surface run-off and should be targeted at areas where this occurs.
- Soil clay content provides important information for risk assessment of phosphorus losses and for implementation of countermeasures. A high clay content increases the risk of phosphorus losses.
- Countermeasures should be concentrated to critical source areas. Methods for identifying these areas have been developed, or are under development.
- The measures that often give the most rapid effect are those affecting transport pathways for phosphorus through the soil, in the field or along ditches. Measures investigated in the programme are on their way out into practical use. Their effects in the longer term should be monitored in future projects.

The results from the research programme provide a scientific platform for practical advisory work. They also indicate areas for future research that can help decrease losses of phosphorus from agricultural soils and thereby decrease the loads on ditches, streams, rivers, lakes and seas.

# 1 Inledning

Detta är en syntesrapport för Stiftelsen Lantbruksforsknings program "Fosforförluster från jordbruksmark – bakomliggande orsaker och effektiva motåtgärder", 2008-2010. Den riktar sig till dig som är intresserad av vilka slutsatser som kommit fram i programmets olika projekt, men framförallt hur de tillsammans ökat vår kunskap, hur resultaten får genomslag i jordbruket och var utmaningarna finns för att komma vidare mot bättre resursutnyttjande och friskare vatten. Programmet omfattade forskning längs hela åtgärdsskalan, från foderutnyttjande hos djuren till åtgärder på fälten och längs vattenvägarna.

## Bakgrunden till Stiftelsen Lantbruksforsknings satsning på ett fosforprogram

Fosfor har en nyckelroll för den ekologiska statusen i slutna söt- och bräckvattenmiljöer (som Östersjön), medan kväve har särskilt stor betydelse för öppen marin miljö. Under 1980- och 90-talen var balansen i forskningen förskjuten mot åtgärder för ökat kväveutnyttjande och minskad kvävebelastning, vilket gjorde att det fanns ett stort behov av en samlad insats på forskning kring fosfor under början av 2000-talet. Detta möjliggjordes genom en särskild satsning av Stiftelsen Lantbruksforskning. Med medel främst från Naturvårdsverkets havsmiljöanslag och från handelsgödselavgifterna skapades ett program för åren 2008-2010 om sammanlagt 34 miljoner kronor. Målet var att finansiera forskning kring effektivt fosforutnyttjande och för minskade förluster från jordbruket, som låg nära praktisk tillämpning. Resultatet blev en mångfacetterad forskning i 24 olika projekt som nu är genomförd. Konkreta åtgärder mot fosforförluster till vatten har undersökts från stallet till åkern och längs vattenvägarna (*Figur 1*).

## Bakgrund om fosfor i marken och förluster till vatten

I våra jordbruksmarker finns naturligt stora förråd av fosfor, upp till 3 000 kg/ha, varav det mesta är bundet till markens mineral och en mindre del till organiskt material. Fosforbortförsel med skörd av vanliga grödor utgör cirka 20 kg/ha, och detta är också en vanlig fosforgödselgiva.

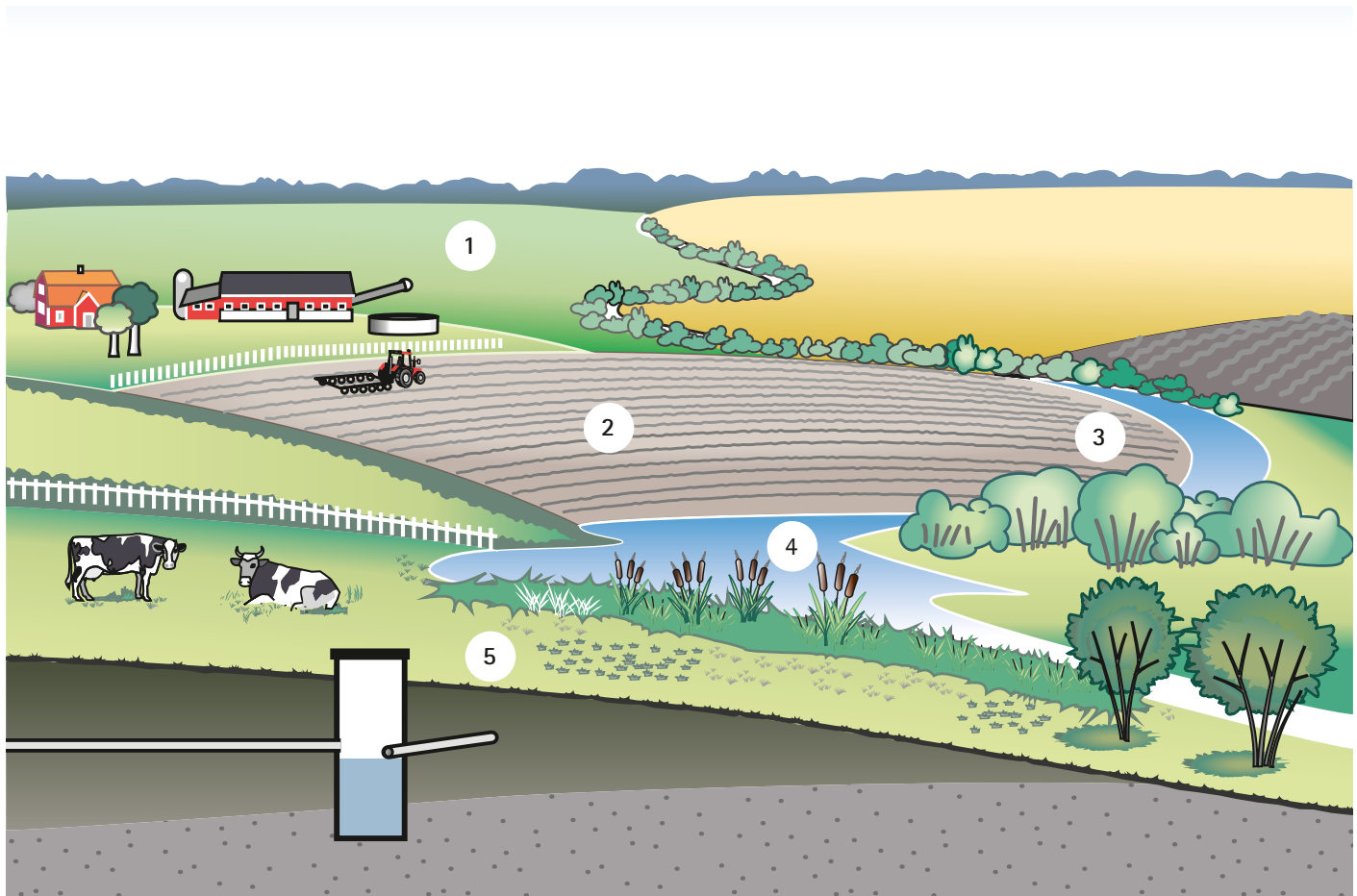
Den mängd fosfor som förloras från åkermarken till vattenmiljön genom partikeltransport (partikelbunden fosfor) och löst fosfor är i detta perspektiv mycket liten, i medeltal 0,5 kg/ha från svenska åkrar och därmed betydelselös ur produktionshänseende. Däremot har fosforläckaget betydelse för övergödningssproblemen. Halterna i dräneringsvatten är ofta lägre än de krav man ställer på kustnära avloppsreningsverk för fosforhalt. Att arbeta för att minska de förhållandevis låga halterna av fosfor i reningsverken såväl som i jordbruksvatten är svårt och resurskrävande. Fosforförluster från mark till vatten kännetecknas av att de är mycket variabla, både i tid och rum. En uppskattning är att 80-90 % av fosforläckaget från ett avrinningsområde kan ske från 10-20 % av ytan under 1 % av tiden. Därför är fosforförlusterna svåra att förutsäga, men desto viktigare att förebygga. Några huvuddrag vad gäller fosfors uppträdande i mark och dess förluster är:

- Fosfor förloras både i partikelbunden och löst form, genom ytavrinning och läckage. För ytvattenförluster, som är vanligast på ler- och mjälajordar, dominerar partikelbunden fosfor.
- Både markens kemi och transportvägar har stor betydelse för fosforläckaget. Lerjordar kan ha ojämn infiltration och transportvägar (preferentiella flöden) som kan ge snabb respons på till exempel gödsling. På jordar med jämnare infiltration, till exempel sandjordar, har markens kemi särskilt stor betydelse för i vilken utsträckning fosfor binds eller läcker.



- Fosforförluster till vatten styrs till stor del av markens infiltrationsförmåga, dräneringsförhållanden, topografi och av episodiska väderhändelser som är svåra att förutse, till exempel kraftiga regn och snösmältning. Det gör att effekter av åtgärder är osäkra och varierande.
- Att fosfor lagras i marken gör att odlingshistorien kan påverka läckaget under lång tid.
- Kritiska källområden för fosforförluster, så kallade hot spots, är de områden där det dels finns en fosforkälla (naturligt eller tillförd) och dessutom en risk för att transport av fosfor.
- Nyckelbegrepp för hot spots: erosionskänslighet, lerhalt, marklutning, makroporer, preferentiella flöden, markstruktur, infiltrationsförmåga, aggregatstabilitet, pH-förhållanden, syreförhållanden, bindningsförmåga, mättnadsgrad och organiskt material.

Figur 1



Åtgärder för ökat fosforutnyttjande och minskade fosforförluster har studerats hela vägen från stallet, via åkern till vattenvägar:

- 1) Foderutnyttjande och stallgödselhantering
- 2) Odlingsåtgärder för minskat läckage och erosion (gödslingsstrategier, fånggrödor, strukturkalkning, jordbearbetning)
- 3) Kantzoner med anpassad skötsel
- 4) Sedimentationsdammar för partikulärt fosfor
- 5) Reaktiva kalkfiltermaterial i marken i anslutning till diken

## DEL 1. Vilka konkreta råd till brukare och rådgivare utmynnade projekten i?

# 2 Praktiska råd

Programmet har mynnat ut i resultat kring olika åtgärder för att minska fosforförluster. För en del åtgärder har tydliga rekommendationer utkristalerats medan resultaten är mer preliminära för andra. Det beror ibland på att tiden varit för kort för att verifiera resultaten. Det är särskilt för foderrekommendationer, hästhagar, fångdammar

och strukturskalkning som ny och direkt användbar kunskap har framkommit inom programmet. För andra åtgärder, som gödsling, kantzoner, fånggrödor och jordbearbetning, har resultaten kunnat bekräfta eller ytterligare förklara tidigare studiers resultat.

### GÖDSLING (4R-PRINCIPEN)

- **RÄTT MÄNGD**  
Anpassa efter P-status och gröda.  
Följ Jordbruksverkets riktlinjer för fosforgödsling kopplat till fosforklass i marken.
- **RÄTT PLACERING**  
Anpassa till markens P-status. Ta gärna prov även på alven och analysera dessutom Al och Fe. Snart finns också kunskap för att bedömma förlustrisker kopplat till markens fosformättnadsgrad.
- **RÄTT TIDPUNKT**  
Sprid på våren och inte innan regn.
- **RÄTT METOD**  
Att mylla gödseln så att den får bra kontakt med jordpartiklarna kan minska risken för fosforläckage på lerjordar. Det är särskilt viktigt vid höstspredning av gödsel.

### FODERREKOMMENDATIONER

- För både djur, ekonomi och miljö finns anledning att kolla upp balansen mellan fosforinnehållet i fodret och djurens behov genom att analysera fodret (alternativt provta gödseln).
- Överutfodring sker och träckprov kan användas som markör för överutfodring. För vuxna hästar bör träcken inte innehålla mer än 8 g fosfor per kg ts.
- De svenska rekommendationerna är bättre än de amerikanska (NRC) för fosforinnehåll i foder för hästar i Sverige.

### HÄSTHAGAR

- I hästhagar är utfodrings- och avföringsytorna riskområden för fosforförluster genom läckage eller ytavrinning och risken ökar med hagens ålder.
- Att inte lägga foder på marken utan täcka marken med flis, att mocka bort gödseln från rasthagen och att ha skyddszon mellan hage och vattendrag är viktiga åtgärder.

### ÅTGÄRDER FÖR BÄTTRE MARKSTRUKTUR

- En bra markstruktur är något av det viktigaste för att undvika partikelbundna förluster av fosfor. Strukturkalkning kan rekommenderas för struktursvaga lerjordar. Vissa år är åtgärden skördehöjande, men inte alltid.
- En bra dränering kan lägga grunden för en förbättrad struktur och bör därför exempelvis göras före en strukturkalkning.

### JORDBEARBETNING

- Jordbearbetningsstrategi (till exempel plöjning eller reducerad jordbearbetning) har inte visat sig påverka fosforläckaget på ett entydigt sätt. Det viktigaste är att använda den jordbearbetningstyp som ger bäst markförhållanden för grödan.

### GRÖDORS FOSFORUPPTAG OCH FÅNGGRÖDOR

- Det visade sig att grödans fosforupptag inte nämnvärt påverkade fosforläckaget. Att 'odla bort' ett fosforöverskott i jorden är en metod som ger effekt genom minskat läckage först efter mycket lång tid.
- Att odla fånggrödor är en åtgärd mot kväveläckage, inte mot fosforläckage.

### KANTZONER

- Skörd och bortförsel av gräset på kantzonerna förbättrar infiltrationen i marken och därmed den positiva effekten.
- Ökar infiltrationen och bör anpassas till områden med ytavrinning.

### FÅNGDAMMAR FÖR FOSFOR

- Fångdammar, som i Norge visat sig ha effekt i siltområden kan också fungera i svenska lerjordsområden.
- Dammen ger bäst effekt om den placeras i område med höga fosforhalter i vattnet. I områden med sluttande fält, hög lerhalt och fosforklass i marken.
- Dammen ska placeras högre upp i avrinningsområdet så den hydrauliska belastningen inte blir för stor.
- En långsmal damm med djupdel vid inloppet ger säkrast effekt.

### REAKTIVA FILTER

- Studier av filtermaterial på labb visar på en potential att fånga fosfor, men hög halt partiklar i vattnet förkortar filtermaterialens livslängd. Rådet är därför att placera kalkfilter, till exempel, efter partikelfångande damm.

# Tabell 1

| KÄLLA          | INDIKATORER                                                                 | RISKOMRÅDEN OCH RISKIDPUNKTER                             | ÅTGÄRDER                                                                              | LÄS MER I AVSNITT        |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Gödselgiva     | P-AL i matjord                                                              | Nära stall & ladugårdar                                   | Anpassa efter markens P-status<br>(Jordbruksverkets gödslingsråd)                     | 6.2.6 &<br>6.4.2         |
| Gödseltidpunkt |                                                                             | Kraftig nederbörd                                         | Gödsla på våren<br>Gödsla inte innan regn<br>Mylla flytgödsel vid höstspredning       | 6.2.6.                   |
| Markfosfor     | P-AL i matjord<br>Fosformättnadsgrad                                        | Nära stall & ladugårdar                                   | Minska gödselgivor på fosforrik mark<br>Analysera även Fe och Al                      | 6.2.6.                   |
| Fosfor i foder | TP träck                                                                    |                                                           | Anpassa fodergiva<br>Analysera fodret                                                 | 6.1.1.<br>& 6.1.2        |
| Hästhagar      | Djurtäthet<br>Hagens ålder<br>Trampskador<br>Bar mark                       |                                                           | Minska djurtätheten<br>Byta hästhagens plats vart 10:e år                             | 6.1.2.                   |
|                |                                                                             | Utfodringsplats                                           | Inte utfodra på marken<br>Träflis som marktäcke<br>Tak<br>Kantzonen intill vattendrag | 6.1.2.                   |
|                |                                                                             | Avföringsplatser                                          | Träflis som marktäcke<br>Kantzonen intill vattendrag                                  | 6.1.2.                   |
| Växtbiomassa   | Mängd<br>Frostkänslighet                                                    | Höst: nedbrukning<br>Vinter: fryser-tinar                 | Fånggrödor är inte en fosforåtgärd                                                    | 6.2.5.                   |
| MOBILITET      |                                                                             |                                                           |                                                                                       |                          |
| Markstruktur   | Markpackning<br>Ytavrinning<br>Stående vatten                               | Ojämn infiltration<br>Dålig infiltration                  | Jordbearbetning som gynnar en god markstruktur<br>Strukturkalkning                    | 6.2.3.<br>& 6.2.4        |
| Läckagerisk    | Fosformättnadsgrad i matjorden & alven                                      | Ojämn infiltration/<br>preferentiella flöden<br>Lerjordar | Se åtgärder under "KÄLLA"<br>Placering av kalk mellan matjord och alv                 | 6.4.2.                   |
| Erosionsrisk   | Lerhalt<br>Aggregatstabilitet<br>Marklutning<br>Växttäcke<br>Stående vatten | Mjåla- & lerjordar                                        | Strukturkalkning<br>Kantzonen<br>Fosfordamm                                           | 6.4.3.                   |
| TRANSPORT      |                                                                             |                                                           |                                                                                       |                          |
| Ytavrinning    | Regnintensitet<br>Grumligt vatten                                           | Kraftig nederbörd<br>Snösmältning                         | Kantzonen<br>Fosfordamm                                                               | 6.2.1, 6.3.1.<br>& 6.3.2 |
| Dränering      | Regnintensitet<br>Grumligt vatten                                           | Kraftig nederbörd                                         | Fosfordamm<br>Fosfordamm & reaktiva filter                                            | 6.2.1, 6.3.2<br>& 6.3.3  |

Indikatorer för rådgivningsarbetet med föreslagna åtgärder beroende på källan till fosforförlusterna, faktorer som påverkar rörligheten av fosfor i jorden (mobilitet) och transportvägar för fosfor utifrån resultaten i detta forskningsprogram.

# 3

## Resultatens genomslag på nationell nivå

Jordbruksnäringen har ett stort ansvar i arbetet för minskad övergödning. Våra åtaganden inom de nationella miljömålen, internationella överenskommer inom Aktionsplanen för Östersjön, och genomförandet av EU:s ramdirektiv för vatten samt Havsmiljödirektivet ställer stora krav på åtgärder för minskad näringsbelastning, på både söt- och havsvatten.

### 3.1 Åtgärder inom Vattendirektivet

Forskningsprogrammet har varit avgörande för att få fram resultat kring några av de åtgärder som nu ses som viktiga, och som fått genomslag i jordbruket. Strukturkalkning har implementerats i stor omfattning genom LOVA-stödsystemet. Vidare är strukturkalkning, fosfordammar och anpassade skyddszoner några av de åtgärder som lyfts fram i Vattenmyndigheternas förslag till åtgärdsprogram (2016-2021) inom Vattendirektivet.

### 3.2 Rådgivningsarbetet

Rådgivningssatsningen Greppa Näringen är en viktig avnämare för resultaten. Under 2016 görs exempelvis en särskild satsning på rådgivning för precisionsplacering av fosforåtgärder på gårdsnivå. Inom programmet har man haft ett tydligt informationsflöde av resultat till rådgivning i form av seminarier, kursmedverkan och material. Konkreta exempel är uppdatering av Jordbruks-

verkets broschyr om häst och hästgödsel samt utbildningsmaterialet "Fånga fosfor – Dammar, filter och tvåstegsdiken" framtaget av Hushållningssällskapet i samarbete med forskarna. <http://hushallningssallskapet.se/wp-content/uploads/2014/10/fanga-fosfor-dammar-filter-och-tvastegsdiken.pdf>

### 3.3 Tillsyn och prövning

Resultaten påverkar avvägningar som görs vid Länsstyrelsernas prövningar av ansökningar om utökad djurhållning, där nu en praxis framträder att ta hänsyn till markens fosforförråd i beslut om stallgödselmängder i förhållande till spridningsareal. Detta är en viktig fråga speciellt i sydöstra Sverige där det finns växande djurbesättningar. Det påverkar även Länsstyrelsernas handläggning av miljöåtgärder som till exempel anläggning av fosfordammar där nya råd finns tillgängliga.

### 3.4 Foderrekommendationer

Forskningen kring utfodring av hästar och mjölkkor har bidragit till att vi kan ligga kvar på svenska rekommendationer för fosfor i foder istället för att övergå till nya amerikanska riktlinjer. Dessa skulle riskera försämrat fosforutnyttjande på grund av överutfodring med fosfor.

# 4

## Utmaningar att tillämpa resultaten i praktiken

Vid sammanfogandet av alla erfarenheter från projekten visar det sig att vissa resultat redan fått, eller är på väg att få, genomslag inom jordbruket. Det framkommer även utmaningar för att komma vidare i arbetet för bra fosforutnyttjande och minskade förluster. Det kan gälla ytterligare behov av kunskap för utformning av åtgärder, men också att komma över andra hinder, till exempel kommunikationsfrågor, tveksamhet kring större investeringar kopplat till markägarförhållanden och oprecisa styrmedel.

### 4.1 Kommunikationskanaler

För att ny kunskap ska få genomslag krävs att det finns kommunikationskanaler och system för att omsätta kunskapen i praktiken, och för fosforåtgärder är det extra viktigt eftersom åtgärder kräver ett arbete ned på den lilla skalan. Tillgängliggörandet av resultat verkar ha fungerat väl. Det finns tydliga och effektiva kanaler från forskningen till myndigheter, rådgivningsverksamhet, industri, men det finns många aktörer inom området, till exempel i kommuner och i konsultbranschen, och inte minst alla lantbrukare. Att nå alla berörda med kunskap, metoder och redskap för åtgärdsarbetet är en utmaning, men viktigt för att forskningsresultat ska ge bästa möjliga genomslag. Exempelvis gäller det foderfrågan där det finns all anledning att hitta effektiv samverkan mellan rådgivning och foderindustrin för att nå djurägare. Det gäller även utbildning, information och tillgängliggörande av resultat från forskning till alla berörda på olika nivåer så rätt åtgärd hamnar på rätt plats.

### 4.2 Större investeringar som grund för fortsatta åtgärder

Dräneringssystemens konstruktion och tillstånd har indikerats ha stor betydelse för fosforförlusterna från lerjordar. 70 % av Sveriges jordbruksmark är dränerad, men underhållet är ofta eftersatt och renoveringsbehovet därmed stort. Väldränerad mark är en viktig grundförutsättning för ett fortsatt åtgärdsarbete med strukturförbättrande och erosionsminskande åtgärder, exempelvis strukturskalkning. Investering i renovering av dikessystem eller omdränering är stora beslut där exempelvis arrendemarker kan utgöra ett hinder för ett effektivt åtgärdsarbete genom att man som arrendator kan ha svårt att motivera sådana investeringar.

### 4.3 Styrmedel för precisionsarbete

Att införa åtgärderna kräver någon form av styrmedel; kunskapsbaserat, tvingande eller ekonomiskt. Utifrån forskningsprogrammets resultat är det tydligt att fosforåtgärder behöver anpassas efter platsen, ibland med kvadratmeterskalan som utgångspunkt. Dagens generellt utformade styrmedel och investeringsstöd har oftast utgått från kväveåtgärder och är uppenbart ofta för trubbiga för att träffa rätt när det gäller fosforåtgärder. Att ge stimulans för att åstadkomma både kunskapshöjning och motivation att ta fram anpassade åtgärder på gårdar kan komma att kräva andra tänkesätt än de vi hittills använt. Ett stort ansvar för slutgiltiga beslut om åtgärder ute på gårdar verkar vara nödvändigt och det gäller att stödja detta på effektivast sätt. Här finns också stora utmaningar i att underlätta ett effektivt åtgärdsarbete för att förhindra att det fastnar på grund av juridiska processer, hand-



läggningstider med mera. Stora åtgärder behöver övervägas noga. Det tar tid, ofta mer än ett år. Om andra styrmedel, exempelvis stöd, är begränsade till en viss period finns det risk att en åtgärd inte utförs alls eller utförs under olämpliga förhållanden eller på fel sätt. Inom programmet har metoder för att hitta rätt plats tagits fram, eller är på god väg att tas fram, och dessa bör användas även om det kommer innebära en ökad kostnad att få rätt åtgärd på rätt plats. Å andra sidan är det väldigt låg kostnadseffektivitet eller kanske till och med helt verkningslöst att ha fel åtgärd på fel plats.

#### 4.4 Hästhållning faller mellan stolarna

Jordbruksverkets rekommendationer och rådgivningsverksamhet är en betydelsefull länk ut i jordbruket, men det finns ett område där viktig kunskap kommit fram som kräver särskild omsorg för att bli tillgänglig där den kan göra nytta. Det gäller hästhållning, och då särskilt rasthagar för hästar och möjligheter att undvika överutfodring med fosfor. De flesta hästägare och stallägare faller utanför jordbrukssektorn. Hästhållningen omnämns i vattenmyndigheternas förslag till åtgärdsprogram, och en ökad satsning på vägledning för tillsynsmyndigheter är den åtgärd som föreslås. Att nå tillsynsmyndigheters tjänstemän med kunskap och verktyg samt häst- och stallägare för en beteendeförändring är utmaningar som kräver helt andra former och kontaktvägar än de för jordbrukare. Medan djurantalet generellt minskar på gårdarna i Sverige, så stiger antalet hästar och hästgårdar. Det är framförallt runt de större städerna i exempelvis Mälardalen det finns många hästgårdar, som dessutom ofta ligger på lerjordar som är riskjordar för fosforförluster.

#### 4.5 Få och korta studier behöver följas upp

Flera av åtgärderna är alltså på väg att få ett stort genomslag, men har åsatts värden för förväntad effekt utifrån några få års resultat på ett fåtal platser. Fosforförlusternas stora variabilitet och beroende av väderförhållanden förstärker osäkerheten av alla prognoser. Värdet av långa mätserier har varit tydligt inom programmet och långliggande fältförsök på SLU har varit avgörande för att kunna visa exempelvis långsiktiga effekter av gödslingsstrategier på markens fosforförråd och förluster till vatten. Att upprätthålla anpassade mätningar

över tiden är helt avgörande för att kunna göra tillförlitlig effektuppföljning av åtgärder mot fosforförluster. Det är också nödvändigt för att kunna ge råd om skötsel och underhåll av åtgärder, som gjorts med stora investeringar. Att anlägga en fosfordamm innebär exempelvis ett åtagande på 20 år, men idag finns inte kunskap för att ge råd hur den ska skötas för att behålla effektiviteten under hela livslängden. För att kunna ge mer allmänna råd om införande av åtgärder som fångdammar för fosfor behövs fler erfarenheter och långa tidsserier för att täcka in olika förhållanden med någon form av generella samband. Detta gäller även inverkan av jordars lerhalter och fosforinnehåll på effekter av strukturkalkning. Ett samordnat program för uppföljning av effekter, och även för att kartlägga den erfarenhetsbas som byggts upp om platsanpassning av åtgärder runtom i landet, är något som är viktigt för utvecklingen på sikt. Det skulle också lägga en grund för att kunna beräkna kostnadseffektivitet av olika åtgärder med acceptabel precision och blir därmed viktigt för att kunna göra en prioritering av åtgärdsarbetet i framtida åtgärdsprogram.

#### 4.6 Fördelning av resursen fosfor

Eftersom fosforförlusterna till vattenmiljön i absoluta tal är väldigt små är det i realiteten ingen resursfråga för jordbruket utan enbart en vattenkvalitetsfråga. Det är däremot markens förråd av fosfor, som påverkar behovet av gödsling. Ett onödigt stort förråd är också en vattenkvalitetsfråga. Att fördela stallgödseln mer effektivt över åkerarealen skulle kunna innebära att fosforutarmning av marker i områden utan stallgödsel kunde undvikas samtidigt som riskabel uppbyggnad av markfosfor kunde undvikas i djurtäta områden. Det handlar också om att inte överutfodra med fosfor. Detta kräver utveckling och satsning på samarbeten, logistik, teknik och innovativa lösningar. Det kan handla om avvattning för att samla fosfor i den fasta fraktionen, struvitfällning av fosfor i stallgödsel, förbränning med efterföljande utvinning av fosfor med mera. Resultaten från programmet visar att detta kan vara en viktig framtidsfråga och kan förhoppningsvis vara en del i att driva på utvecklingen.

På samma sätt som marken kan utgöra ett värdefullt förråd av fosfor som varar länge innebär det också att den ökade läckagerisken som uppstår då det finns ett stort fosforinnehåll i marken i kombination med hög fosformätningsgrad kan bli långvarig. Det gör att åtgärder som sätts in för att minska förrådet på, inte kan avläsas genom förbättrad vattenkvalitet förrän kanske efter minst ett decennium. Denna inneboende tröghet i systemet är en stor pedagogisk utmaning och kan påverka motivationen i åtgärdsarbetet på alla nivåer.

På samma sätt kommer stora delar av den partikulärt bundna fosfor som förloras från åkermarken att lagras i dikes- och sjösediment under kortare eller längre tid. Genom så kallad internbelastning kommer fosfor sedan att frigöras i mer eller mindre grad beroende på en rad faktorer i diket eller sjön. Detta påverkar också i hög grad trögheten i vattensystemens respons på minskad belastning.

Forskningsmässigt finns fortfarande mycket att göra vad gäller att bedöma internbelastningens och olika fosforkällors betydelse för övergödningen, exempelvis med avseende på årstidsdynamiken. Så utgör exempelvis utsläpp via avlopp en större andel av belastningen än jordbruksmark under lågflödesperioder, vilket kunnat kvantifieras med avrinningsområdesmodeller som använts inom forskningsprogrammet. En samverkan mellan olika verksamheter som ger påverkan inom ett avrinningsområde kan alltså vara viktigt för ett kostnadseffektivt åtgärdsarbete, men också för att samordna större projekt som påverkar flera brukare och för att skapa en gemensam drivkraft i området. För denna samverkan kan kommuner ha en viktig roll tillsammans med markägare och experter.

Redan från projektstart samlades projektens forskare till ett upptaktsmöte för att ge möjligheter till samverkan mellan projekten. Det skedde på initiativ av SLU Fältforsks ämnesgrupp Vatten, som också tog fram en broschyr för programmet som använts i både svenska och internationella sammanhang. Ett konkret resultat av initiativet var ett nätverk som bildades för gruppen av doktorander. Jordbruksverket finansierade syntesarbetet av forskningsprogrammet. Det inleddes med en workshop med projektledare våren 2015, som tillsammans med slutrapporterna utgjorde ett underlag för denna rapport. För arbetet fanns en referensgrupp som bestod av Josefin Walldén (Havs- och vattenmyndigheten), Katarina Börling (Jordbruksverket), Kjell Ivarsson och Markus Hoffmann (LRF).



# 5

## Metodik och indikationer för riskbedömning och åtgärdsplacering

I programmet har det framkommit kunskap om vilken information som är praktiskt användbar för att identifiera behov och lämplig placering av åtgärder. Det finns till exempel indikatorer för fosforförluster som kan användas inom rådgivningen. Några är färdiga att använda, medan andra är på god väg eller mer preliminära. Det har också framkommit kunskap och förståelse som på sikt kan bli viktig för åtgärdsarbetet för bättre fosforutnyttjande och mindre förluster.

### 5.1 Träckprov för att spåra överutfodring

Att anpassa utfodringen för att undvika överutfodring med fosfor betyder att man behöver ha koll på fodrets sammansättning, men det kan också vara en väg att titta på träckens och urinens sammansättning för att se om kosten är balanserad. I programmet har man tagit fram enkla riktlinjer för träckprov och gränsvärden för fosfor i träckprov som indikerar överutfodring av hästar och kor.

### 5.2 Jordens fosfor-, järn- och aluminium-innehåll som ett riskindex

Att jordens fosforförråd har betydelse för läckage-risken, och att detta är en faktor att ta med i gödslingsplanering och riskbedömning har tidigare varit känt. Programmets forskningsresultat lyfter även fram betydelsen av jordens fosforbindande förmåga och mättnadsgrad som en viktig faktor. Analyser av ammoniumlaktatlösligt järn och aluminium (som lätt kan göras vid markkarteringsanalyser) har visat sig ge goda indikationer på dessa egenskaper och är på god väg att bli en del i riskanalysarbetet på gårdar. Underlag från ett stort antal jordtyper finns, men det behövs fler tester, speciellt på alven, för att kunna hitta tröskelvärden och ta fram ett färdigt riskindex. Erfarenheterna är också viktiga i utvecklingsarbetet av dynamiska simuleringsmodeller, exempelvis ICECREAM som används för nationella belastningsberäkningar.

### 5.3 Lerhalt är en indikator på fosfortransport

Programmets forskningsresultat har visat att väderförhållanden som regnintensitet och avrinning har stor betydelse för fosforförlusterna. Resultaten visar också att transportvägar har stor betydelse och kan överskrida betydelsen av källorna. De hydrologiskt aktiva områdena kan stå för stora delar av totala förluster oavsett om källfaktorn (P-AL, gödsling) är hög eller låg. Flera projekt visar att lerhalten i matjorden är en tydlig indikator för riskområden för fosforförluster och därmed kan användas för att identifiera dessa hydrologiskt aktiva områden där åtgärder bör prioriteras.

### 5.4 Kartläggning av hydrologiskt aktiva områden är under utformning

Att anpassa åtgärder efter fältens variationer är ett område där viktig kunskap initierats inom programmet, exempelvis för att hitta de delar av fältet där erosion kan uppstå och bör förhindras. För detta krävs ett omfattande, men ändå lättillgängligt informationsunderlag. Att framställa rådgivnings-/diskussionsunderlag i form av riskkartor baserat på den nationella höjddatabasen (NNH) i kombination med olika riskindexparametrar är ett koncept som nu vidareutvecklas i andra projekt och som provats på gårdar. Likaså testades i programmet olika proximala sensorer som kan användas för att ta fram detaljerad markinformation. I det här sammanhanget kan nämnas att SLU tillsammans med Sveriges geologiska undersökning under 2015 tar fram ett nytt detaljerat kartunderlag med information om matjordens textur som kommer att kunna tillämpas för identifiering av riskområden för fosforläckage.

## 5.5 Jordtester som möjlighet för bedömning av erosionskänslighet

Att bedöma jordars erosionskänslighet handlar inte bara om fältens lutning, förmågan att "ta emot" (infiltrera) nederbördsvattnet och dräneringssystemens utformning, utan också om jordens kornstorleksförhållanden och hur stabila jordaggregaten är. Lerhalten är en indikator i sig, men jordaggregatens stabilitet har också betydelse. På struktursvaga lerjordar är risken för partikelbunden transport av fosfor stor och efter lyckad strukturskalkning har en stabilisering av de större jordaggregaten kunnat demonstreras som en viktig effekt. I programmet har man utprovat möjliga metoder och index för att karaktärisera erosionskänslighet och aggregatens stabilitet, vilka ger mått på risken för erosion. Men enkla rekommendationer för praktiskt bruk saknas ännu.

## 5.6 Organiska fosforformers bidrag till övergödning

I vilken grad fosforförluster från åkermark slutligen bidrar till övergödningens problemen är en komplex fråga som bland annat har att göra med i vilken form fosfor förloras. I programmet har kunskapen kring analysmetodik för och förekomstformer av organiska fosforföreningar förts

ett steg framåt. Genom analyser av gödsel, jord och bottensediment har kunskapen ökat om vilka organiska fosforföreningar som finns kvar i sedimenten och vilka som frigörs och bidrar till övergödningen. Detta är ett viktigt underlag för fortsatt forskning och kan på sikt exempelvis få betydelse för riskbedömning kopplat till olika gödselslag, där DNA-P lyfts fram som en möjlig riskmarkör i projektet.

## 5.7 Fosfortillgänglighetens pH-beroende

Fosfortillgänglighet för grödor och en eventuellt minskad risk för läckage från jordar med högt pH är en viktig fråga för regioner med naturligt kalkhaltiga jordar. En aktuell fråga är också vad som händer med fosfors löslighet och tillgänglighet efter strukturskalkning. Grödans upptag av fosfor är givetvis inte enbart beroende av pH och strukturskalkningen påverkar marken på flera olika sätt, exempelvis såbäddens egenskaper. Forskningen inom programmet har inte framkommit med generella råd men kunskapsnivån har ökat. Det gäller bland annat lerhaltens inverkan på fosforlöslighet, fosforkällans inverkan och löslighet efter pH-höjning genom kalkning och hur snabbt pH jämviktas sig med lermaterial.

Forskningsresultaten presenteras i nio doktors- och tre licenciatavhandlingar vid Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Linköpings universitet (LiU), Uppsala universitet (UU) och Göteborgs universitet (GU)

**Helena Andersson** 2016 SLU, doktorsavhandling  
*The importance of subsoil properties for phosphorus leaching in agricultural soils.*

**Ann-Kristin Eriksson** 2016 SLU, doktorsavhandling  
*Phosphorus speciation in Swedish agricultural clay soils – influence of fertilization and mineralogy.*

**Karin Johannesson** 2015 LiU, doktorsavhandling  
*Particulate phosphorus accumulation and net retention in constructed wetlands receiving agricultural runoff – critical analysis of factors affecting retention estimates.*

**Pia Kynkäänniemi (Geranmayeh)** 2014 SLU, doktorsavhandling  
*Small wetlands designed for phosphorus retention in Swedish agricultural areas – efficiency variations during the first years after construction.*

**Jian Liu** 2013 SLU, doktorsavhandling  
*Phosphorus leaching as influenced by animal manure and catch crops.*

**Andreas Milver** 2014 GU, licenciatavhandling.  
*Spatial and temporal dynamics of nutrients in two agricultural catchments in Southeast Sweden.*

**Maria Nordqvist** 2012 SLU, licenciatavhandling  
*Assessing phosphorus overfeeding in dairy cows.*

**Julia Paraskova** 2014 UU, doktorsavhandling  
*Organic phosphorus speciation in environmental samples – methods development and applications.*

**Masud Parvage** 2015 SLU, doktorsavhandling  
*Impact of horse-keeping on phosphorus (P) concentrations in soil and water.*

**Annika Svanbäck** 2014 SLU, doktorsavhandling  
*Mitigation of phosphorus leaching from agricultural soils.*

**Ana Villa Solis** 2014 SLU, doktorsavhandling  
*Risk assessment of erosion and losses of particulate phosphorus – a series of laboratory, field and catchment scales.*

## 6

## Vilka samlade erfarenheter ger resultaten?

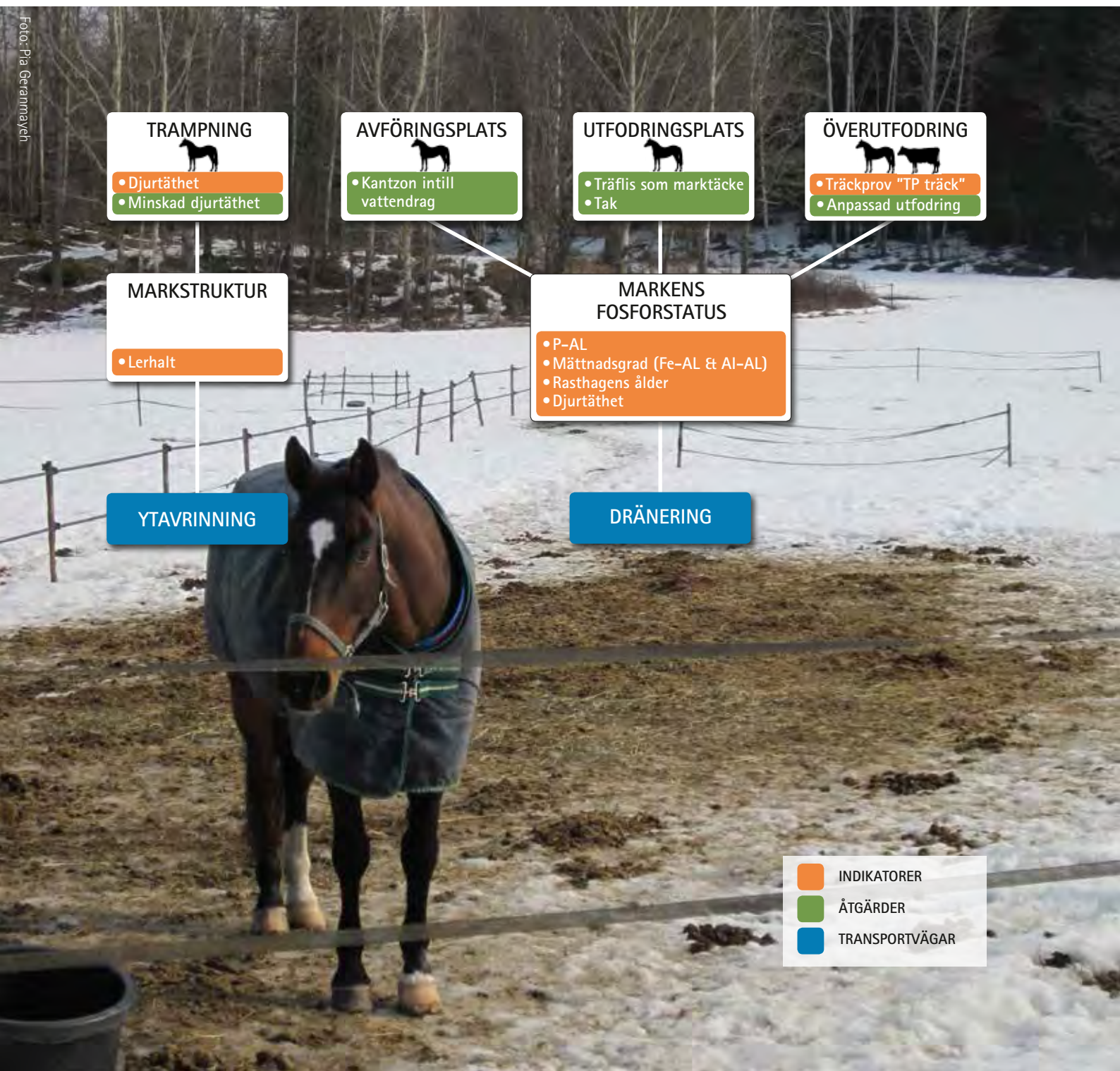
Forskningsprogrammet möjliggjorde en bred satsning på 24 forskningsprojekt med målet att ta fram kunskap som kan bli direkt användbar inom svenskt jordbruk. De projekt som angripit olika

delar av fosforproblematiken i olika skalor med olika metoder har i den här rapporten delats in i temaområden och sammanfattas i följande del av rapporten (*Tabell 2*).

| TABELL 2. DE OLIKA PROJEKTEN OCH PROJEKTLEDARE INDELADE I TEMAOMRÅDEN (UNIVERSITET) |                                                                                                                                               | PROJEKTNUMMER |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>DJURHÅLLNING</b>                                                                 |                                                                                                                                               |               |
| Jansson A.                                                                          | Hästars fosforbehov (SLU)                                                                                                                     | 1             |
| Swensson C.                                                                         | Minskad fosfor i gödsel från ungnötsuppfödning (SLU)                                                                                          | 2             |
| Holtenius K.                                                                        | Fosfor i träck från hästar och mjölkkor – en miljöbelastning (SLU)                                                                            | 3             |
| Ulén B.                                                                             | Miljöhänsyn för mark och vatten vid hästhållning (SLU)                                                                                        | 4             |
| <b>ODLINGSÅTGÄRDER</b>                                                              |                                                                                                                                               |               |
| Delin S.                                                                            | Fosforutlakning i förhållande till grödans upptag vid olika spridningsteknik (SLU)                                                            | 5             |
| Ulén B.                                                                             | Fånggröda för fosfor (SLU)                                                                                                                    | 6             |
| Aronsson H.                                                                         | Metoder för minskat fosforläckage och ökat växtnäringens utnyttjande vid användning av flytgödsel (SLU)                                       | 7             |
| Ulén B.                                                                             | Stallgödsling som anpassas till fosforstatus och typ av jord för att minska fosforläckaget från jordbruksmark (SLU)                           | 8             |
| Wesström I.                                                                         | Effekter av jordbearbetningssystem på vatten-, sediment- och fosfortransport i övre delen av marken vid olika regnintensitet (SLU)            | 9             |
| Ulén B.                                                                             | Långtidseffekter med reducerad jordbearbetning, gödsling med kombisädd och strukturkalkning på fosforförluster via dränering (SLU)            | 10            |
| Ulén B.                                                                             | Skörd och fosforförlust efter strukturkalkning med släckt kalk – kvantifiering med befintliga utlakningsrutor (SLU)                           | 11            |
| Berglund K.                                                                         | Markstrukturförbättring och begränsning av fosforförluster från åkermark med hjälp av inblandning av olika kalciumprodukter i matjorden (SLU) | 12            |
| <b>ÅTGÄRDER LÄNGS VATTENVÄGARNA</b>                                                 |                                                                                                                                               |               |
| Etana A.                                                                            | God skötsel av kantzoner för effektivare fosforretention (SLU)                                                                                | 13            |
| Djodjic F.                                                                          | Diken – den bortglömda länken mellan fält och vattendrag (SLU)                                                                                | 14            |
| Ulén B.                                                                             | Designade våtmarker för minskning av fosforförluster från "hot-spots" i jordbruksområden (SLU)                                                | 15            |
| Renman G.                                                                           | Fastläggning av fosfor som förloras från jordbruksmark och produktiv återföring med hjälp av reaktiva filtermaterial (SLU)                    | 16            |
| <b>KÄLLOR</b>                                                                       |                                                                                                                                               |               |
| Andersson L.                                                                        | Var kommer fosfor ifrån? Kvantifiering av flödesvägar för fosfor och sedimentförluster i ett jordbruksdominerat avrinningsområde (SMHI)       | 17            |
| Rydin E.                                                                            | Identifiering av organiska fosforformer i åkermark; vilka bidrar till övergödning? (UU)                                                       | 18            |
| <b>RISKJORDAR</b>                                                                   |                                                                                                                                               |               |
| Gustafsson J.P.                                                                     | Riskbedömning av fosforläckage – modellutveckling och implementeringsstrategier (KTH)                                                         | 19            |
| Blombäck K.                                                                         | Förbättrade estimeringsrutiner för beräkning av fosfors löslighet och omsättning i svenska åkerjordar – utveckling av ett modellverktyg (SLU) | 20            |
| Bergström L.                                                                        | Alven – en viktig länk i förståelsen av fosforutlakning för valet av motåtgärder (SLU)                                                        | 21            |
| <b>TRANSPORTVÄGAR</b>                                                               |                                                                                                                                               |               |
| Bergström L.                                                                        | Identifiering av kritiska källområden och transportvägar för fosfor (SLU)                                                                     | 22            |
| Rydberg A.                                                                          | Ny teknik för förbättrad insamling av data till fosformodeller (JTI)                                                                          | 23            |
| Djodjic F.                                                                          | Riskbedömning och kvantifiering av erosion och förluster av partikelbunden fosfor från lerjordsområden (SLU)                                  | 24            |



Figur 2. Djurhållning



Överutfodring, foderrester och avföring ackumulerar fosfor i marken och riskerar att läcka via dräneringar eller spolas bort med ytavrinning, då en stor andel i avföringen är löst fosfor. Ytavrinningen kan öka på grund av dålig infiltration i rasthagar med hög belastning, beroende på till exempel trampskador. Fosforstatusen i marken ökar med rasthagens ålder och djurtäthet.

## 6.1 Betesdjurs påverkan på fosforförlusterna

I (Tabell 2) visas de projekt som ingick i temat.

I texten nedan hänvisas till projektledare och projektnummer i löpande ordning:

Jansson A.<sup>1</sup>, Swensson C<sup>2</sup>, Holtenius K.<sup>3</sup> och Ulén B.<sup>4</sup>.

I forskningsprogrammet har flera besättningar av kor och hästar undersökts för att se hur mycket fosfor som djuren behöver (Jansson<sup>1</sup>, Swensson<sup>2</sup> och Holtenius<sup>3</sup>), eftersom överutfodring varken är ekonomiskt eller miljömässigt försvarbart (Figur 3). Dessutom undersöktes om djurens avföring innehåller fosfor i en form som kan riskera att lakas ut. Ett projekt har jämfört fosforläckage från hästhagar och jordbruksmark samt undersökt ifall det finns specifika riskområden för fosforförluster inom hästhagarna (Ulen<sup>13</sup>).

### 6.1.1 Avföringsprov kan indikera överutfodring

När det gäller djurens fosforbehov visade projektresultaten (Jansson<sup>1</sup>, Swensson<sup>2</sup> och Holtenius<sup>3</sup>) att de flesta ungnöt fick tillräckligt med fosfor från grovfoder och kraftfoder utan tillskott av mineralfoder (Swensson<sup>2</sup>). Däremot om djuren går ute på bete kan främst högdräktiga ston och lakterande ston och kor behöva fosfortillskott. Resultaten visar att svenska kor överutfodras med 1 800 ton fosfor årligen och att överutfodringen är något mindre omfattande i eko-besättningar. Resultaten visar även att den höjning av fosforbehovet till växande hästar som amerikanska NRC föreslagit är överskattat och en höjning av de svenska rekommendationerna skulle innebära överutfodring av även växande hästar (Jansson<sup>1</sup>). Överutfodring innebär att överskottet hamnar i avföringen.

Det är viktigt att djuren varken överutfodras eller underutfodras, projekten har undersökt en metod att bedöma detta. Träckprov visade sig vara en bra markör för eventuell överutfodring för hästar, men urinprov fungerar bara vid mycket kraftig överutfodring. Enligt projektresultaten innebär det överutfodring om träcken hos vuxna hästar innehåller >8 g fosfor/kg ts. För unghästar är 8 g fosfor/kg ts en bra nivå, medan föl får för lite om träcken innehåller runt 4 g fosfor/kg ts (Jansson<sup>1</sup>).

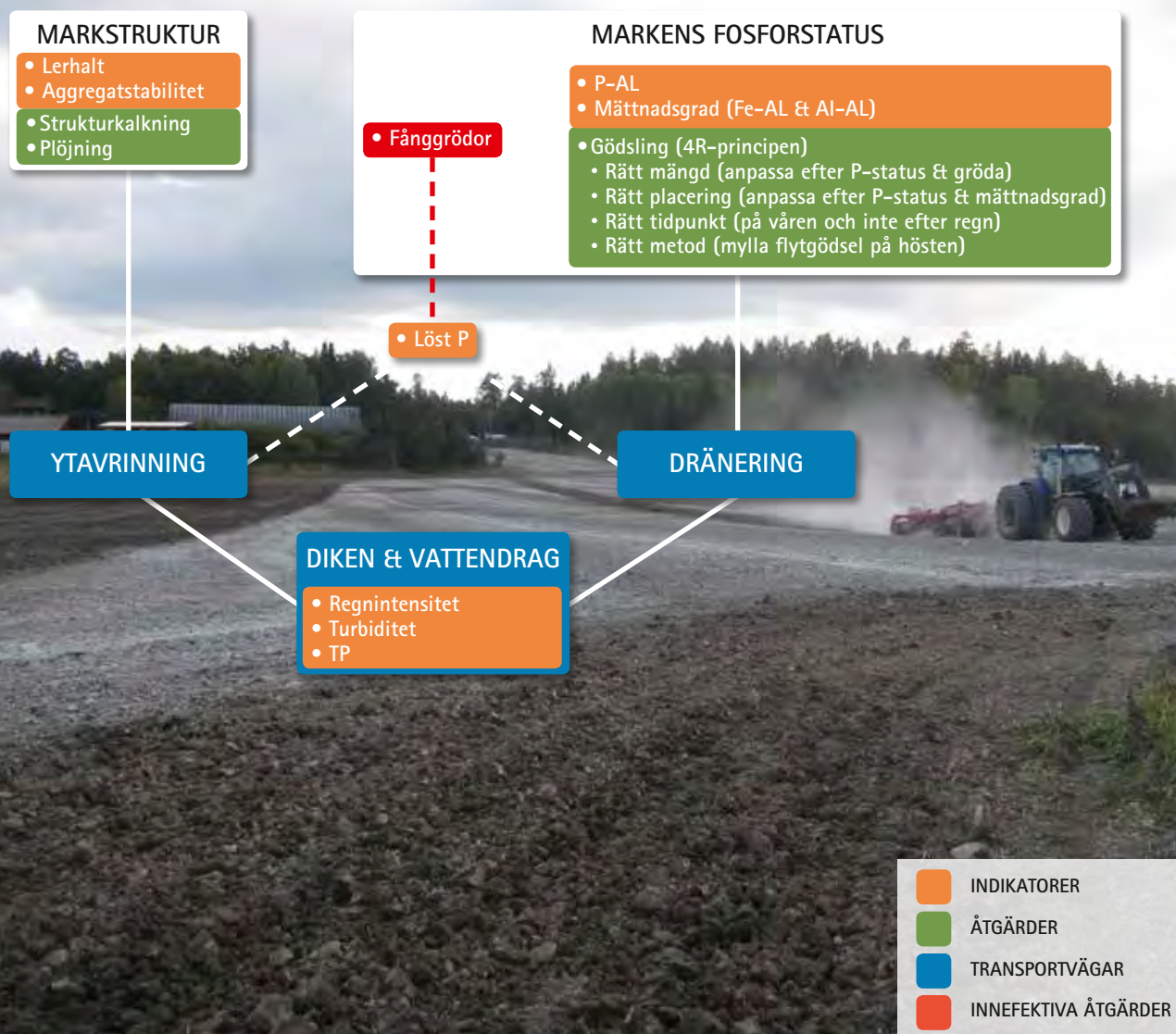
### 6.1.2 Löst fosfor i avföringen riskerar att läcka

Projekten har visat att hästar utsöndrar sitt fosforöverskott i en form som är löslig och därmed riskerar att lacka ut (Holtenius<sup>3</sup>). Marken i hästhagar har ofta högre fosforinnehåll än ordinär jordbruksmark (Ulen<sup>4</sup>) och högre halter löst fosfor i dräneringsvattnet har påvisats. Speciellt är det utfodrings- och avföringsytor inom hästhagarna som innehåller mycket fosfor och är riskområden för fosforförluster. Därför är det viktigt att hantera dessa ytor, till exempel genom bortförsel av foderrester och gödsel, för att hindra att fosfor ansamlas. Dessa ytor bör dessutom ligga långt från vattendragen och förses med träflis, som visade sig minska fosforförlusterna, om det tas bort regelbundet. Utfodringen bör inte ske direkt på marken och idealt bör platsen förses med tak. Markens fosformättnadsgrad och mängden fosfor i vattenlöslig form ökade i samband med ökande hästtäthet och med åldern på rasthagen. Därmed utgör dessa små högbelastade hästhagar riskområden för förhöjda fosforläckage.



Figur 3. Odlingsåtgärder

Foto: Pia Geramayi



Avrinning och regnintensitet ökar förlusterna av fosfor, vilket syns då vattnet blir grumligare. Detta är viktigare än grödupptag. Strukturförbättrande åtgärder som strukturkalk på lerjordar och konventionell plöjning tenderar att minska fosforförlusterna, medan fånggrödor riskerar att öka förlusterna av löst fosfor.

För gödsling gäller 4R-principen:

- 1) Rätt mängd (anpassa efter gröda & P-status)
- 2) Rätt placering (anpassa efter P-status & mättnadsgrad)
- 3) Rätt tidpunkt (på våren & inte innan regn)
- 4) Rätt metod (mylla flytgödseln vid höstspridning)

## 6.2 Odlingsåtgärders påverkan på fosforförlusterna

Följande projekt ingick i temat, hänvisade till projektledare och projektnummer (*Tabell 2*): Aronsson H.<sup>7</sup>, Ulén B.<sup>6,8,10,11</sup>, Delin S<sup>5</sup>, Wesström I.<sup>9</sup> och Berglund K.<sup>12</sup>.

I forskningsprogrammet har olika odlingsfaktorerers inverkan på fosforförluster studerats för ökad kunskap och för vägledning om åtgärder för minskade förluster. Flera projekt (Aronsson<sup>7</sup>; Ulén<sup>8,10</sup>) har studerat gödslingens betydelse i olika avseenden; effekt av mångårig stallgödseltillförsel, tidpunkter för spridning och myllning (*Figur 3*). Betydelsen av grödans fosforupptag för att minska läckaget undersöktes både för spannmålsgröda, fånggröda samt för mark i träd i olika projekt (Ulén<sup>6,10</sup>; Delin<sup>5</sup>). Fånggrödor studerades särskilt med avseende på frosthållanden (Ulén<sup>6</sup>). Ett par projekt belyste effekten av jordbearbetningssystem med och utan plöjning (Ulén<sup>10</sup>; Wesström<sup>9</sup>). Strukturkalkning för bättre markstruktur och minskat läckage undersöktes i två projekt (Ulén<sup>10,11</sup>; Berglund<sup>12</sup>).

### 6.2.1 Hög regnintensitet ökar vattnets grumlighet och fosforhalt

Den övergripande bild projektresultaten ger är att odlingsåtgärder kopplat till gröda, jordbearbetning och gödsling på kort sikt har liten eller marginell inverkan på fosforläckaget genom markprofilen i jämförelse med episodiska väderhändelser, exempelvis regnintensitet och avrinningsförhållanden (Wesström<sup>9</sup>). Både en ökning av mängd avrinnande vatten och en ökning av regnintensiteten resulterade mycket snabbt i grumligare vatten och högre fosforhalter i vattnet, och det tog tid innan de sjönk igen.

### 6.2.2 Avrinningen har större betydelse än grödan

Resultat från forskningsprogrammet visade att under växtsäsongen kan en högavkastande gröda begränsa utlakningen, genom högre fosforupptag och därmed större fosforbortförsel med skörd (Delin<sup>5</sup>). Men avrinningen har större betydelse för fosforläckaget. Detta beror på att stor del av avrinningen och därmed fosforutlakningen sker under vinterhalvåret innan någon gröda etablerats eller då befintlig gröda inte har någon kraftig tillväxt.

### 6.2.3 Jordbearbetning har begränsad påverkan

För jordar som uppvisar stora läckage genom till exempel dålig infiltration och hög vattenhalt i markytan har ibland regelbunden plöjning visat sig vara bra för att minska fosforläckaget. I fältstudierna tenderade konventionell plöjning ge mindre fosforläckage (Ulén<sup>10</sup>; Wesström<sup>9</sup>) och avrinning samt mindre grumligt vatten än reducerad jordbearbetning (Wesström<sup>9</sup>).

### 6.2.4 Strukturkalkning är en lovande åtgärd

Den enda odlingsåtgärd som visade säker effekt i forskningsprogrammet genom att tydligt minska fosforförlusterna var strukturkalkning som undersöktes i tre projekt (Ulén<sup>10,11</sup>; Berglund<sup>12</sup>). Strukturkalkning gav förbättrad markstruktur (ökad aggregatstabilitet) i båda fältförsöken med läckagemätningar, minskad utlakning av partikelbunden fosfor vid en försöksplats med lågt P-AL-tal och av löst fosfor på en annan försöksplats med högt P-AL-tal (Ulén<sup>10,11</sup>). Åtgärden har också varit skördefrämjande, och vid höga kalkgivor har aggregatstabiliteten förbättrats även om resultaten inte var entydiga (Berglund<sup>14</sup>).

### 6.2.5 Fånggröda riskerar släppa löst fosfor under vintern

Resultaten från projekten visar att åtgärder som begränsar kväveläcket långt ifrån rakt över kan tillämpas som åtgärder mot fosforförluster. Exempelvis träda, med utebliven gödsling och jordbearbetning, gav upphov till kraftigt minskat läckage av kväve men inte av fosfor (Ulén<sup>10</sup>). Att en fånggrödans upptag efter skörd av huvudgrödan skulle kunna minska fosforläcket efterföljande vinter kunde inte fastställas (Aronsson<sup>7</sup>; Ulén<sup>6</sup>). Studierna av fånggrödor verifierade däremot misstanken att den fosfor som tas upp av fånggrödan kan förloras efter att ha utsatts för frysning och tining (Ulén<sup>6</sup>). Det fanns dock skillnader mellan olika fånggrödearter. För rajgräsfånggrödor, som effektivt minskar kväveläcket, kunde det konstateras att fosforläcket snarare riskerar att öka (Ulén<sup>6</sup>).

### 6.2.6 Mångårig gödsling kan ge större effekt än enstaka giva

Att mylla flytgödsel vid spridning på hösten lyftes fram som en viktig åtgärd för att minska fosforläckerisken i ett projekt (Aronsson<sup>7</sup>), genom att öka bindningen till markpartiklar. Vid vårspridning av flytgödsel eller handelsgödsel hade myll-

ningen ingen avgörande betydelse enligt två olika studier (Aronsson<sup>7</sup>; Ulén<sup>10</sup>). Undersökningarna av gödsling visade att mångårig tillförsel av stallgödsel som ökar markens fosforinnehåll får ett betydande genomslag på fosforutlakningen (Ulén<sup>8</sup>). De långsiktiga effekterna av stallgödsetillförsel visade sig till och med vara större än enstaka stora givor i vissa fall, men responsen var olika för olika jordar. Detta visar att det kan dröja länge innan effekten av förändrad gödsling ger genomslag.

När det gäller gödsling, stödjer resultaten från forskningsprogrammet den så kallade 4R-principen (rätt mängd, rätt placering, rätt tid och rätt metod), även om man alltså bara ibland får utslag av vissa av dem (*Figur 3*), till exempel i samband med kraftig nederbörd. Rätt mängd gödsel (R1) kopplar till grödans behov och markens fosforinnehåll där anpassning efter markkartan har att göra med den rätta placeringen (R2) (se exempelvis [www.precisionsodling.se](http://www.precisionsodling.se)). Rätt tidpunkt (R3) är då risken för omfattande transport är liten, det vill säga främst på våren. När gödseln sprids vid andra tidpunkter kan rätt metod (R4) vara avgörande för att minska förlustrisken, det vill säga att mylla gödseln.



Figur 4. Åtgärder längs vattenvägar

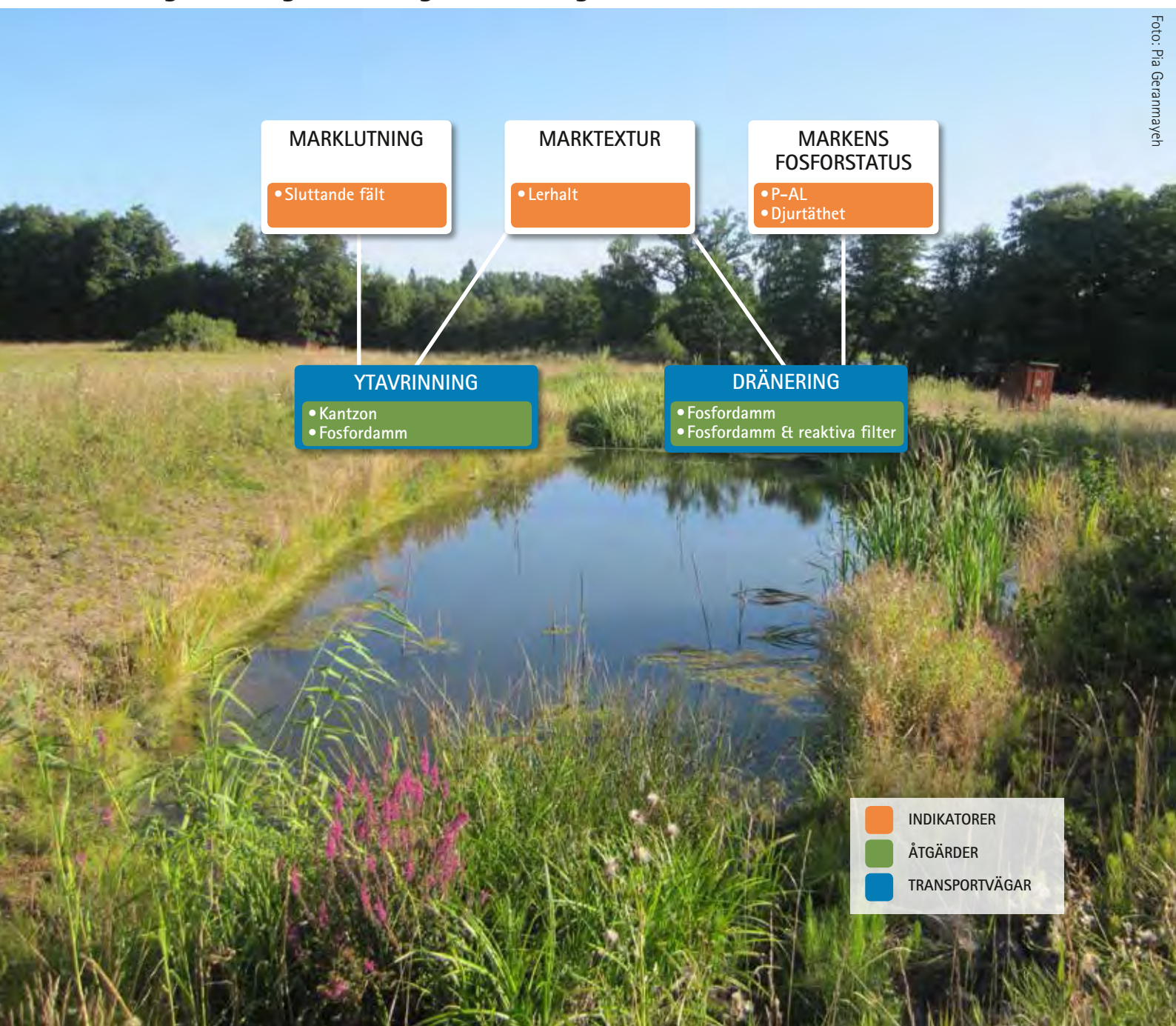


Foto: Pia Geranmayeh

Kantzoner kan öka infiltreringen och därmed minska ytvattenförlusterna av fosfor, däremot kan förlusterna av löst fosfor via dräneringen öka. Fosfordammar bör utformas långsmala med en djupdel som gynnar fosfor ackumuleringen. Små våtmarker fångar fosfor, men vattenmängden de tar emot i termer av hydraulisk belastning bör vara mindre än 200 m/år. Våtmarker fångar mer fosfor där djurtätheten, fosforstatusen i marken och marklutningen är hög (hög fosforbelastning). Om inflödet sker i form av en dräneringskylvert eller som ett öppet dike har också betydelse. Partiklar i vattnet förkortar filtermaterialens livslängd och en eventuell låda med filtermaterial bör därför alltid anläggas efter en damm.

### 6.3 Åtgärder längs vattenvägar

Följande projekt ingick i temat, hänvisade till projektledare och projektnummer (Tabell 2): Etana A.<sup>13</sup>, Ulén B.<sup>15</sup> och Renman G.<sup>16</sup>.

I forskningsprogrammet har olika åtgärders förmåga att fånga upp fosfor som förlorats från fälten studerats (Figur 4) för att öka kunskapen om vilka former av fosfor som fångas och till vilken grad. Ett projekt har studerat gräsbevuxna kantzoner på mellanlera med olika skötsel (Etana<sup>13</sup>). Möjligheten att fånga fosfor som förlorats från dränerade lerjordar i små fosfordammar undersöktes i ett annat projekt (Ulen<sup>15</sup>). Det fanns även projekt med studier av reaktiva filtermaterial för att fånga fosfor på samma sätt som vid rening av avloppsvatten (Renman<sup>16</sup>).

#### 6.3.1 Kantzoner minskar fosforförluster via ytavrinning

Enligt fältförsöket minskade gräsbevuxna kantzoner mängden ytavrinnande vatten, och därmed också fosforförlusten med ytavrinning. Däremot påverkades fosforförlusterna med dräneringen inte märkbart (Etana<sup>13</sup>). Generellt var ytavrinningen liten och vattnet nådde vattendragen främst via dräneringen, vilket gjorde att kantzonernas effekt var begränsande. Kantzonen skulle förmodligen haft större effekt om den placerats i område där det sker mycket ytavrinning. Kantzonerna behöver med andra ord anpassas till de områden där det sker en ytavrinning för att få effekt. Annars kan de, precis som fånggrödor, utgöra en risk för utlakning av löst fosfor. Avslagning och bortförsel av gräs förväntades minska risken för förluster av löst fosfor både på ytan och genom profilen, men åtgärden gav inget tydligt utslag.

#### 6.3.2 Fosfordammar fångar främst partikelbunden fosfor

Fältmätningar i två fosfordammar visar att det går att få en betydande fosforavskiljning i små fosfordammar, men avskiljningens varaktighet varierar under året och det är inte fastställt vilken effekt man kan räkna med på årsbasis (Ulen<sup>15</sup>). Fosforfastläggningen och eventuell frisättning av fosfor påverkas av bland annat flödes- och sedimentationsförhållanden och av växtligheten. När sju andra våtmarker inkluderades i studien bekräftades att våtmarker för fosforavskiljning kan vara små, men mängden vatten som våtmarker mottar (hydrauliska belastningen) bör hållas inom vissa gränser, vilket påverkar var de bör placeras. När det gäller utformningen av våtmarker visade resultaten att en djupdel främjar sedimentation av partiklar och fosfor, vilket påvisar bra utformning av fosfordammar med en initial djupdel. Resultaten visar även att fosforackumuleringen främjas av en långsmal form. Projektet har även visat att fosforavskiljningen var större när fosforkoncentrationen och fosforbelastningen var högre i inkommande vatten. Faktorer i avrinningsområdet som ökade fosforavskiljningen var sluttande fält, hög lerhalt och hög fosforklass i marken. Både med avseende på hydraulisk belastning och fosforbelastning bör placeringen alltså avvägas noga.

#### 6.3.3 Filtermaterial har potential att binda löst fosfor

Resultat av laboratorieförsök (Renman<sup>16</sup>) visar att filtrering av partikelrikt vatten kan ge en betydande fosforavskiljning, men också att hög grumlighet/innehåll av lerpartiklar kan halvera filtermaterialets livslängd. Därför ger resultaten slutsatsen att filtren bör placeras i mindre grumligt vatten, till exempel efter en damm som fångar partiklar. Filtermaterialen Polonite och Sorbulite, hade en effektiv förmåga att binda löst och partikulär fosfor, även om koncentrationerna i vattnet var relativt låga. Avskiljningen av fosfat varierar beroende på filtrets ålder och hur mycket vatten som runnit igenom.

## 6.4 Identifiering av riskjordar och riskområden för fosforförluster

Följande projekt ingick i temat, hänvisade till projektledare och projektnummer (*Tabell 2*): Rydin E.<sup>18</sup>, Bergström L.<sup>21,22</sup>, Rydberg A.<sup>23</sup>, Djodjic F.<sup>14, 24</sup>, Blombäck K.<sup>20</sup>, Gustafsson J.P.<sup>19</sup> och Andersson L.<sup>17</sup>.

Ett projekt undersökte fosforformer som riskerar att bidra till internbelastning från sediment (Rydin<sup>18</sup>). Tre projekt identifierade riskområden för höga ytvavrinningsförluster av fosfor (Bergström<sup>22</sup>; Rydberg<sup>23</sup>; Djodjic<sup>24</sup>) och tre projekt undersökte matjordens och alvens betydelse för fosforläckaget för olika jordtyper (Bergström<sup>21</sup>; Blombäck<sup>20</sup>; Gustafsson J.P.<sup>19</sup>). Bland annat användes modellapplikationer (Andersson L.<sup>17</sup>) i jämförelse med fältobservationer, samt enklare jordtest för att identifiera erosionsbenägenhet och risker för fosformobilisering (*Figur 5*).

### 6.4.1 Fosformobilisering från sediment

Fosfor som förlorats från åkermarken kan ansamlas i dikens och sjöars sediment där den sedan kan frigöras till vattenmassan igen i partikulär eller löst form. Vid närmare studier av organiska fosforformer i jordbruksmark och sjösediment kunde man konstatera vilka former av organisk fosfor som är mer beständiga i sedimenten och därmed inte bidrar till övergödningen (Rydin<sup>18</sup>). Inositoler som är en av fosforfraktionerna i stallgödsel bevaras i sedimenten, medan DNA-fosfor mineraliseras och därmed kan utgöra en markör för hur löst fosfor frigörs och senare kan bidra till övergödning genom så kallad internbelastning från sediment.

### 6.4.2 Källa, mobilisering och transport

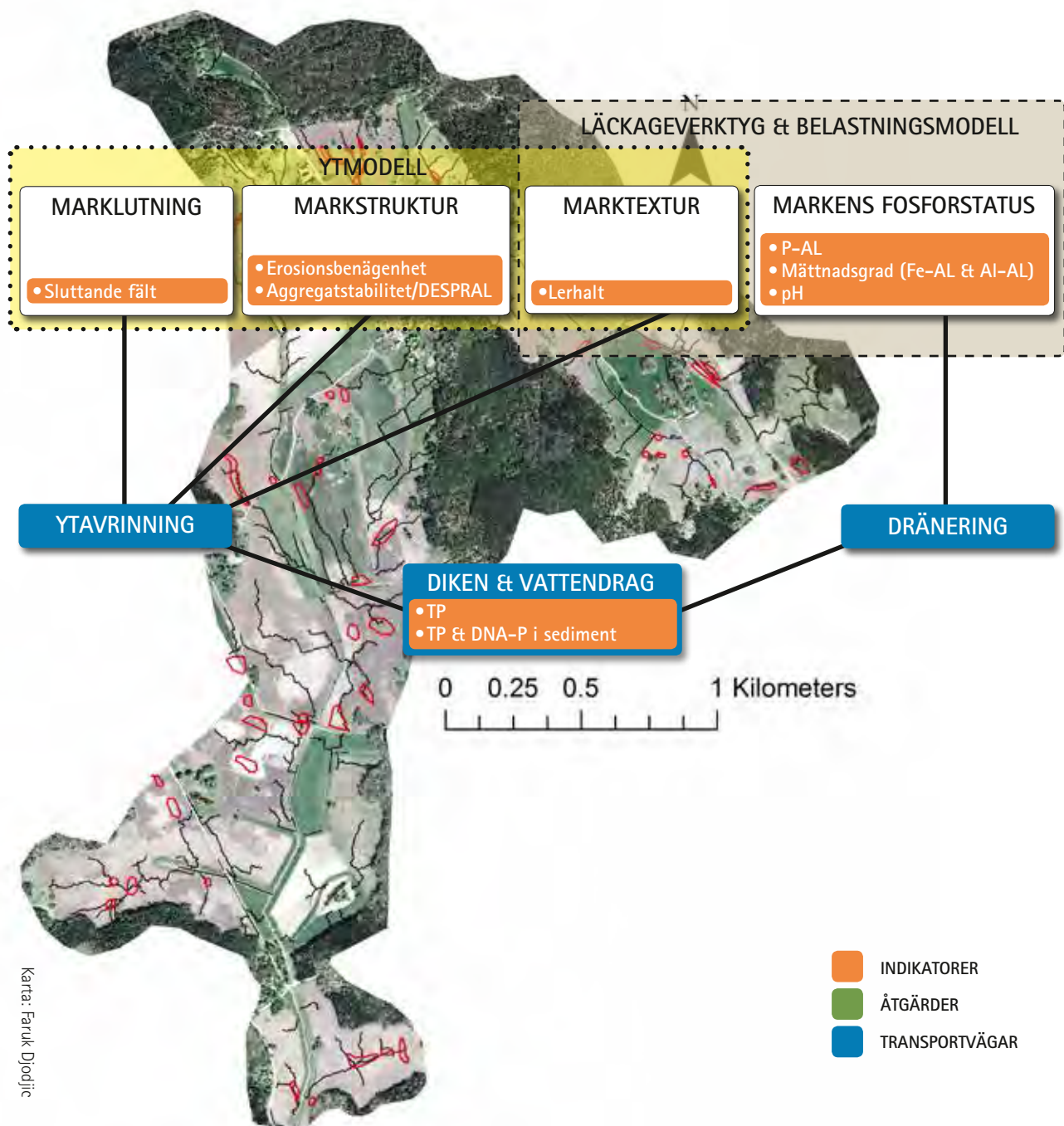
Fosforhalter i dikessediment visade sig oftast vara högre än vad som uppmättes i prover från intilliggande åkermark och var starkare kopplad till lerhalten i området än till åkermarkernas fosforhalter (Djodjic<sup>14</sup>). Kritiska källområden karaktäriseras ofta av fält med hög fosforstatus, men resultaten från forskningsprogrammet visar att även om fosforinnehållet i marken är lågt eller måttligt kan ett område som är hydrologiskt aktivt lida av stora fosforförluster. På samma sätt sker en stor transport om transportrisken är hög (till exempel vid en lång sluttningsslängd), även om jorden inte är erosionskänslig. Det handlar således om en källa, mobilisering och transport och det är därför viktigt att identifiera var den här transporten sker då den kan ha större betydelse än källan.

### 6.4.3 Mättnadsgraden påverkar fosformobilisering

Genom att kartlägga ett 60-tal jordar har visats att fosforinnehållet i matjorden och mängden löst fosfor kan användas som indikator för fosforläckage (Blombäck<sup>20</sup>). Den svenska standardanalysen av P-AL (ammoniumlaktatlöslig fosfor) kunde antingen själv eller, med ännu bättre resultat, tillsammans med Al-AL och Fe-AL användas för att uppskatta mängden löst fosfor i marklösningen. Mängden ammoniumlaktatlösligt aluminium och järn ger nämligen ett mått på hur stor potential en jord har att binda / frigöra fosfor till markvätskan och används tillsammans med P-AL för att uppskatta markens så kallade fosformättnadsgrad. I Sverige finns redan god tillgång till data på P-AL för åkermark, och till viss del även Al-AL och Fe-AL. Därför är det önskvärt att även bestämning av Al-AL och Fe-AL kunde ingå i standardkarteringen för att ge ett underlag för bedömning av fosforlösligheten för varje karterat fält. Genom att kunna uppskatta lösligheten av fosfor ökar möjligheten att bedöma läckagerisken på ett enkelt och billigt sätt, och skulle därför kunna fungera som ett riskindexverktyg. Det har dessutom visats att P-AL-värdet i matjorden i icke-kalkhaltiga



Figur 5. Kritiska källområden



Kritiska källområden för fosforförluster är områden med en källa där fosfor ackumulerats (hög djurtäthet och fosforstatus), där jorden har en risk för att mobiliseras (sluttande mark, hög erosionsbenägenhet, mättnadsgrad och lerhalt) och dessutom transporteras iväg genom dräneringsledningar eller ytavrinning. Det är i dessa områden fosforförlusterna är som störst och vattenkvaliteten sämre och där åtgärder framförallt bör sättas in. Indikatorerna i orange samt ytmodeller och läckageverktyg kan vara underlag för att hitta dessa kritiska källområden.

jordar, tycks ge en bra beskrivning av hur mycket fosfor som på kort sikt är potentiellt tillgängligt eller riskerar att lakas ur. (Gustafsson<sup>19</sup>). Lerhalten påverkar hur fosforlösligheten beror av pH-värdet. I jordar med låg lerhalt stiger lösligheten av fosfor med ökande pH. För jordar med hög lerhalt finns dock ett minimum i fosforlöslighet mellan pH 6 och 7. Då pH är under 6 stiger lösligheten i allmänhet med minskande pH. En orsak till detta kan vara att lerjordar binder fosfor främst till hydroxy-Al-polymerer eller till någon annan aluminiumfas i leran vilka påverkas av pH och är instabila vid sjunkande pH-värden, därmed frigörs en del av fosfor. Ammoniumlaktatextraherat fosfor, järn och aluminium tillsammans med pH och lerhalt är viktiga parametrar för beräkningsmodeller.

Det visade sig i ett annat projekt (Bergström<sup>21</sup>) att inte enbart matjordens egenskaper, utan även alvens har mycket stor inverkan på potentiell mobilisering och läckage av fosfor genom markprofilen. Jordar med låg fosforbindningsförmåga i alven visade sig betydligt känsligare för fosformobilisering från matjorden än jordar där alven effektivt kunde binda fosfor och därmed minska läckaget från hela jordprofilen. Alvens egenskaper är därmed en viktig faktor att ta med vid bedömning av åtgärdsbehov och förväntade effekter av åtgärder.

#### **6.4.4 Jordar känsliga för mobilisering genom erosion**

Kvantifieringen av jordarnas erosionsbenägenhet är en viktig del av riskbedömningen, eftersom jordarnas sårbarhet mot erosion uppvisar stora variationer. Lerjordar är mer erosionsbenägna än sandjordar, där lerhalten är en viktig indikator, men även jordaggregatens stabilitet har betydelse. På gårdsskala kan man utifrån jordartskartan göra ett urval av jordprover för att bedöma jordarnas sårbarhet mot erosion. DESPRAL är en enkel metod som testades i ett projekt (Djodjic<sup>24</sup>) för att rangordna jordar med avseende på deras benägenhet för erosion och förlust av löst fosfor. Detta tillsammans med bedömning av fältens hydrologiska konnektivitet (topografiska avståndet till ytvattenbrunn, dike, vattendrag eller sjö) kan vara en metod för att rangordna enskilda fälts sårbarhet mot fosforförluster via ytavrinning.



#### 6.4.5 Ytmodeller identifierar små riskområden för ytavrinning

Fältinventering i ett av projekten (Bergström<sup>22</sup>) identifierade små områden inom avrinningsområdet (0,4-2,6 %) som visade spår av ytavrinning och erosion, och det var därför viktigt att utgå från en hög detaljgrad i ytmodellerna. Resultaten visade att det finns stora möjligheter att kombinera höjdmodeller med mark- och markanvändningsdata där fjärrmätverktyg användes för att karaktärisera bland annat variationer i lerhalt, som är en viktig parameter i dessa sammanhang.

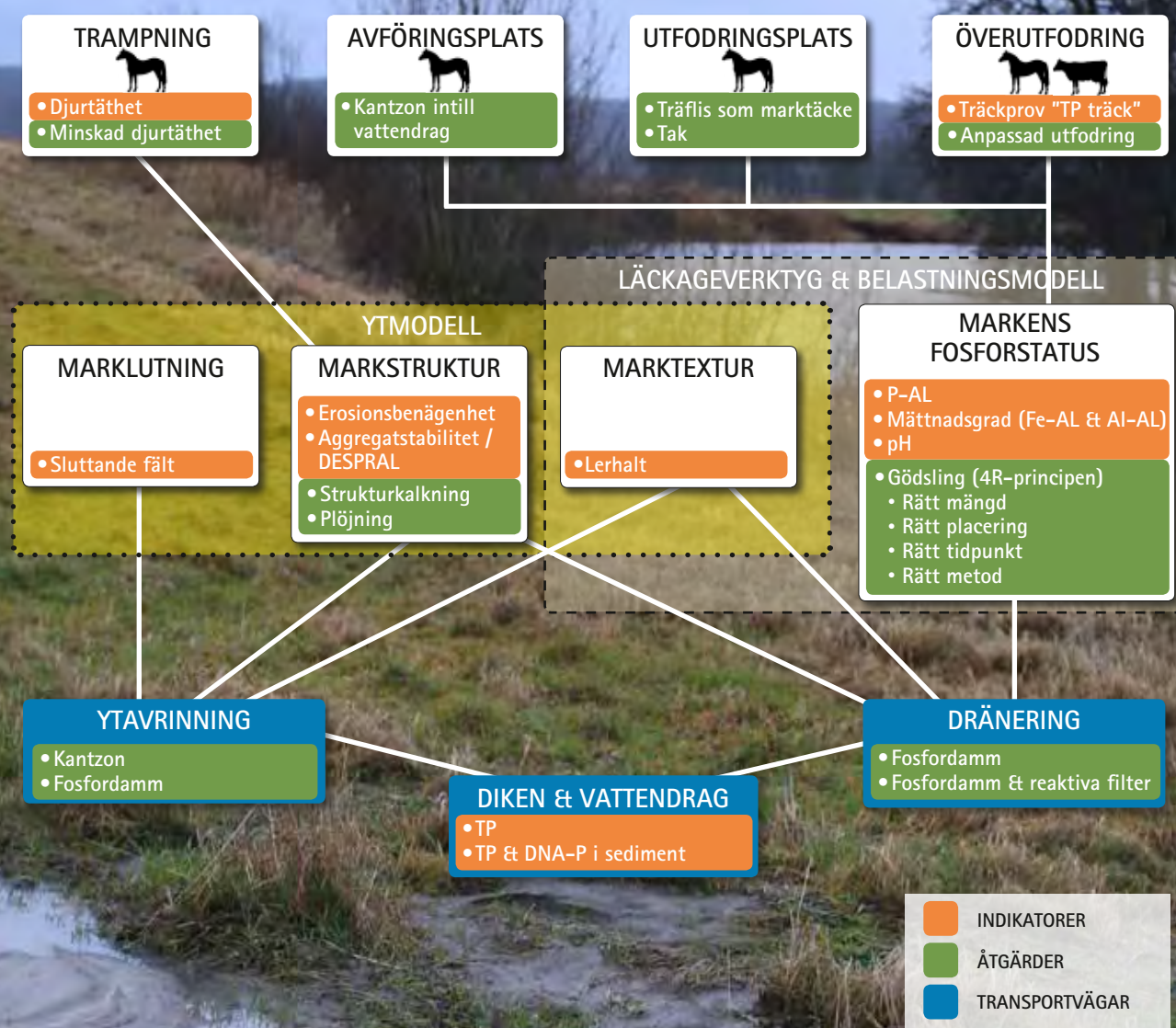
Det finns alltså goda möjligheter att använda modellberäknade riskområden som kartunderlag vid rådgivning på gårdsnivå. Digitala ytmodeller skulle exempelvis kunna användas för att hitta

bästa placering för anläggning av fosfordammar eller anpassade kantzoner, eller för att i större skala prioritera de delar av ett avrinningsområde där det är mest angeläget att sätta in åtgärder för att minska fosforförluster. Efterföljande forskningsprojekt har visat att dessa modeller är användbara för att skapa en gemensam bild av problemområden för både forskare, rådgivare och lantbrukare.

På avrinningsområdesskala förklarades de brister som fanns i överensstämmelse mellan simulerad och uppmätt fosfortransport med brister i dagens fosformodeller med att beskriva markens fosfordynamik (Andersson<sup>17</sup>).

Helhetsbild av vad fosforsatsningens projekt har kommit fram till redovisas i *figur 6*.

Figur 6. Fosforsatsningens projekt



Helhetsbild av vad fosforsatsningens projekt har kommit fram till. Åtgärderna måste platsanpassas, kantzoner ska placeras där det är ytavrinning, medan fosfordammar kan fånga fosfor från både dräneringar och ytavrinning, men vattenmängden som dammen mottar får inte vara för stor. Reaktiva filter behöver partikelrening innan, exempelvis en fosfordamm. Det gäller att hitta de kritiska källområdena för fosforförluster, vilket kan göras med hjälp av ytmodeller som tar hänsyn till höjddata, lerhalt, P-status och erosionsbenägenhet. Lerjordar kan behöva strukturförbättrande åtgärder som strukturkalkning och plöjning. Det gäller även att minska ackumuleringen vid källan genom att justera djurtätheten, hindra upplagring i hagar och minska fosforstatusen på fält genom 4R-principen vid gödsling.

# 7

## Projektbeskrivningar och resultat

### 7.1 Djurhållning

#### 7.1.1 Foderutnyttjande

Fosfor har en avgörande betydelse för viktiga funktioner hos däggdjur och fosforbrist leder till bland annat nedsatt fruktsamhet och benskörhet. I ett globalt perspektiv orsakar fosforbrist större ekonomiska förluster inom animalieproduktionen än något annat mineralämne. I Sverige är emellertid fosforbrist mycket ovanligt, istället verkar överutfodring vara ett större problem, till exempel av mjölkkor. För nötkreatur eller hästar är det ingen fördel av att bli överutfodrade med fosfor. Tvärtom när hästar och nötkreatur får i sig mer fosfor än de behöver, utsöndras istället överskottet i träcken och urinen. Fosforöverskottet riskerar därmed att bidra till ökade mängder fosfor i beteshagar eller på åkermark, som kan bidra till förhöjt fosforläckage till vattendrag, sjöar och hav.

Fosforstatus hos mjölkkor är relativt välkänd och många undersökningar har visat att mjölkkor överutfodras med fosfor. En studie under stallperioden av 20 större mjölkkobesättningar i Halland visade att fosforutfodringen varierade i stor utsträckning mellan besättningar och att på dessa gårdar överutfodrades mjölkorna med i genomsnitt 27 % (Danielsson, 2004). Fosforstatus hos yngre nötkreatur är mindre känd. Swensson<sup>2</sup> misstänkte att även ungnöt överutfodras och att den svenska fosforrekommendationen till växande nötkreatur är för hög. I en fältundersökning i Skåne togs foder- och träckprov från 5-7 ungdjur från 14 mjölkgårdar och även på en dikobesättning. Träckproven analyserades på såväl totalfosfor som löst fosfor. Resultaten från Swenssons<sup>2</sup> undersökningar visade låga nivåer av oorganisk fosfor i träck från ungdjur, vilket innebär att ungnöt inte hade fosforöverskott. Det är tvärtom mot resultaten från liknande undersökningar av träck från mjölkkor. Dou m.fl. 2010 har fastställt en övre gräns (4,75 g) för den oorganiska fosfor

i kogödsel, överskrider denna gräns anses det vara ett dåligt utnyttjande och onödig utsöndring. För ungdjurens del överskreds denna gräns i ett enda fall av 34 träckprover, det vill säga cirka 2 % av proverna. Det innebär att ungdjuren i de undersökta mjölkkobesättningarna hade ett balanserat fosforutnyttjande. Ungdjuren i de besökta besättningarna utfodrades framförallt med grovfoder eller grovfoder blandat med kraftfoder, i de flesta fall spannmål. Tilldelning av foder skedde mera "på känn", intrycket var att i åtminstone de besökta mjölkkobesättningarna var fokus på utfodring av mjölkorna.

Holtenius<sup>3</sup> projekt undersökte träckförlusterna genom en fosforbalans hos mjölkkor och även hästar på bete eller andra utomhusformer. Nio mjölkbesättningar och fem hästanläggningar besöktes och 167 respektive 74 träckprov togs som analyserades på totalfosfor och lösligt fosfor. De flesta lakterande kor fick mineralfoder som innehöll fosfor när de var på bete, men bara var tredje besättning försåg sina övriga kor med fosfor och andra mineraler. Foderanalyserna visade att fodret (fodertillskott plus gräs från bete) inte innehöll tillräckligt med fosfor för att täcka de lakterande kornas fosforbehov och därför bör mineraltillskott ges till dem. Resultaten visade även att fosfornivån i betet i allmänhet var för lågt för att täcka lakterande stons fosforbehov och att det därmed är rekommendabelt att ge mineralfoder som innehåller fosfor till dem. Beten som användes till hästarna hade betydligt lägre fosforinnehåll än beten för mjölkorna.

Den amerikanska organisationen NRC går regelbundet igenom den vetenskapliga litteraturen kring husdjurens näringsbehov och skapar rekommendationer. NRC höjde 2007 fosforrekommendationer till växande hästar från 10 till 18 mg per kg kroppsvikt, och frågan väcktes om detta var relevant för svenska förhållanden. En höjning av rekommendationerna skulle få stor betydelse i

den praktiska utfodringen av unghästar och innebära att många fler svenska foderstater än tidigare måste kompletteras med fosfor, och i många fall med förhållandevis stora mängder. En onödig ökning av fosforgivan med 6-8 g fosfor per dag till uppskattningsvis 23 000 svenska unghästar motsvarar cirka 58 ton fosfor per år.

I Janssons<sup>1</sup> projekt undersöktes fosforomsättningen hos sexton unghästar och tio föl. De dagliga endogena förlusterna av fosfor uppskattades vara lägre än 18 mg/kg kroppsvikt och snarare i samma storleksordning som tidigare NRC rekommendationer baserats på. Vidare kom projektet fram till att NRCs nuvarande skattning av de kroppsegna förlusterna hos växande hästar är för hög och mot den bakgrunden är en ökning av den svenska rekommenderade dagliga fosforgivan inte relevant. Det totala dagsbehovet av fosfor till växande tvååriga hästar i träning (förväntad vuxenvikt cirka 500 kg) uppskattades i Janssons projekt till minst 17 och maximalt 32 g per dag. En noggrann beräkning är i stället viktig, speciellt med tanke på den globala strävan att hushålla och minska världens fosforanvändning.

Holtenius<sup>3</sup> projekt undersökte även om förlusterna av fosfor hos unghästar har överskattats i ett försök med 14 hästar som fodrades med två fosfornivåer, 70 respektive 130 % av fosforbehovet enligt gällande utfodringsnorm. De endogena förlusterna av fosfor skattades och fosforbalansen beräknades. Resultaten tyder på att fosforbehovet till växande hästar är överskattat. De endogena förlusterna av fosfor via träck endast var 2.5 g/kg kroppsvikt, vilket är mycket lägre än vad som antagits i NRCs (2007) rekommendationer, 18 g/kg kroppsvikt. De endogena fekala förlusterna av kalcium och magnesium överensstämde med litteraturen.

### 7.1.2 Metod som indikerar överutfodring

De tre projekten Janssons<sup>1</sup>, Swenssons<sup>2</sup>, Holtenius<sup>3</sup> analyserade fosforhalten i djurens träckprov, för att ta fram instrument att bedöma fosforstatus och utveckla en metod för att avgöra om djuren överutfodras med fosfor. I Janssons<sup>1</sup> projekt analyserades både totalfosfor och lösligt fosfor som extraherades med en svag saltsyralösning i urin och träck, på både unghästar och vuxna. Den mest omfattande studien gjordes på vuxna hästar som utfodrades med sex nivåer av fosfor: 50, 75, 100, 125, 150 och 175 % av NRCs rekommendationer. Resultaten visade att ju större intag av totalfosfor (högre koncentration), desto mer utsöndrades i träcken. Sambandet kan användas för att skatta fosforintaget hos grupper av hästar som utfodras likvärdigt och kan också användas för att skatta intaget på individnivå. För att metoden ska fungera på individnivå måste dock träckprov tas vid flera tillfällen. Om koncentrationen av fosfor i träcken överstiger 8 g TP/kg torrsubstans (ts) hos vuxna hästar är det troligt att överutfodring sker. Janssons<sup>1</sup> studier visades även att en fosforkoncentration runt 4 g/kg ts träck motsvarar ett för lågt fosforintag hos föl och att koncentrationen hos unghästar bör vara runt 8 g per kg ts. Sammanfattningsvis kan träckprov användas som tydlig markör för överutfodring för hästar, men urinprov fungerar bara vid mycket kraftig överutfodring.

Även Holtenius<sup>3</sup> projekt visade med över 230 träckprov från hästar och kor, att träckprov som analyserades på totalfosfor och löst fosfor (delar av metoden beskriven av Dou m.fl., 2007) är en bra indikator på överutfodring. Resultat visade också att så kallad spot-sampling istället för totaluppsamling av träck kan vara användbar för att skatta överutfodringen av fosfor hos hästar.



### 7.1.2 Gödsel fosfors löslighet

Överutfodring av fosfor är inte försvarbart, vare sig ekonomiskt eller miljömässigt. Även vid väl anpassad utfodring sker en utsöndring av fosfor, som främst hamnar i träcken. Lösligheten hos gödsel fosfor avgör dess värde som gödselmedel och dess risk för att läcka till vatten. Hos mjölkkor utgör lösligt fosfor vanligtvis mellan 50 och 75 % av totalfosfor i träcken (Nordqvist et al., 2009; Dou et al, 2010). Resterande fosfor är dels från fodret som är hårt bundet i strukturer som inte är tillgängliga för absorption och troligen en mindre del organiskt fosfor som härrör från mikroorganismer, celler från tarmslemhinnan och utsöndring från olika sekretoriska celler i tarmen. Holtenius<sup>3</sup> undersökte hur stor andel av fosfor i träck som är löslig hos nio mjölkbesättningar och fem hästanläggningar på bete. Resultaten visade att hästar som hölls utomhus utsöndrade mer löslig fosfor än kor som också vistades ute. Däremot var sambandet mellan total mängd fosfor i träck och den lösliga mängden svagare hos hästar än kor. Detta beror troligtvis på anatomiska och fysiologiska skillnader mellan arterna i digestionskanalens utformning. Sådana skillnader bör medföra att hästar utgör en större fosforbelastning på mark och vatten än kor när de hålls på bete. En stor del av fosfor (80-100 %) visade sig vara lätt att lösa ut och den lösliga delen blev större vid tillskott av mineralfoder. Andelen löslig fosfor, det vill säga fosfor lösligt i svag saltsyra, i träck var generellt högre hos hästar än hos kor. Hästar utsöndrar sitt fosforöverskott som löslig träckfosfor.

Jansson<sup>1</sup> har också undersökt hur löslig fosfor är i hästträck. Oavsett fosforgiva och typ av häst (unghäst, vuxen ridhäst, fölsto) verkar det som att minst 60 % av fosfor går att lösa ut med en svagt sur lösning och att något mindre löses ut med rent vatten. Att fosfor i hästgödsel är så löslig ökar risken för läckage från rasthagar och andra vistelseytor utomhus.

### 7.1.3 Rasthagar för hästar

Enligt Jordbruksverket (2013) har antalet grisar, mjölkkor och köttboskap minskat i Sverige under de två senaste årtiondena, medan antalet hästar har ökat mer än 300 % från knappt 89 000 år 2000 till drygt 360 000 tio år senare. Antalet hästar ökar fortfarande och idag finns det fler hästar än mjölkkor i Sverige. Av totala arealen jordbruksmark består 10 % av hästgårdar, vilket motsvarar 300 000 ha. Av hästgårdarnas areal, är 34 000 ha hästhagar. Knappt 18 000 hästgårdar har en yta på 5 ha eller över, de flesta är därmed relativt små. Antalet hästar per ytenhet blir därför ofta högt och vegetationstäcket inte så kraftigt, vilket ökar risken för fosforläckage när djuren gödslar. Jordprover från 30 hästanläggningar visade att fosfor- och kväveinnehållet var högst i rastfällor och lösdryftsytor (Dahlin och Johansson (2008)). I många fall är betestillgången begränsad eller obefintlig och djuren får både inköpt kraftfoder och fosforinnehållande mineralblandningar, vilket leder till en ökad fosforbelastning. Rasthagar för hästar ligger ofta i direkt anslutning till stallbyggnader och används året runt, år efter år. Djurens gödsling och söndertrampning som försämrar infiltrationen gör att det finns en uppenbar risk för att dessa små, men hårt nyttjade, ytor kan ge fosforbelastning på näraliggande vatten. Uléns<sup>4</sup> projekt undersökte rasthagars påverkan på fosforläckaget och identifierade vilken del av rasthagarna som är ett problem. I studien ingick sju hästgårdar i Uppland som hade olika gamla hagar, olika lerhalt i jorden och varierande hästtäthet. Hästhagarna delades in i betes-, utfodrings- och avföringsytor. Jordprover analyserades på den växttillgängliga fosforhalten (P-AL) tillsammans med fosforbindande faktorer som aluminium, järn och pH. Även effekten av hästtäthet, rastgårdarnas ålder med mera belystes. I ett delprojekt togs jordkolonner (lysimetrar) från hagar med ler- respektive sandjord ut för tre olika delar av rasthagen och utsattes för regnsimulering

på laboratoriet. Resultaten visade att marken i hästthagar har högre fosforinnehåll och högre potential för fosforläckage än annan jordbruksmark. Läckaget av fosfor uppgick i medeltal till 1,1 kg/ha, vilket kan jämföras med 0,2-0,9 kg fosfor/ha från åkermark. Inom hästthagarna visade både jordprovtagningen och lysimeterförsöken att det fanns mycket fosfor i jorden där hästarna utfodrades och där träcken ansamlas. Detta innebär att utfodrings- och avföringsytorna var tydliga riskområden för fosforförluster. Därför att det är viktigt att hantera dessa ytor, till exempel genom bortförsel av foderrester och gödsel, för att hindra att fosfor ansamlas. Ulén<sup>4</sup> har räknat på vad dessa små arealer med stor belastning (hot-spots) betyder i det stora hela och vad det betyder för belastningen på Östersjön. Att halvera läckaget för alla typer av vistelseytor för hästar, kan minska fosforbelastningen på Östersjön med 4 % (20 ton).

Observationer som gjordes på en hästgård var att vissa av hästthagarna låg väldigt nära vattendragen, utan kantzoner, och ibland ligger utfodrings- och avföringsytorna precis intill vattendragen. Det är att rekommendera att ha kantzon eller en fosfordamm mellan hästthagen och vattendragen eller sjön. Ulén<sup>4</sup> provade även att täcka jordkolonnerna med vete, halm, torv och träflis för att binda fosfor och därmed minska risken för läckage från hästthagar. På jordkolonnerna i laboratoriet lades de tre materialen ut och ovanpå färskt hästgödsel, varefter de vattnades för att efterlikna regn. Resultaten från lysimetrarna visade att träflis (tillskillnad från halm och torv) kunde binda fosfor och därmed minska läckaget av fosfor. Därmed rekommenderas att lägga ut träflis på ytor där hästarna utfodras och där gödsel ansamlas. Om detta material sedan komposteras utgör det ett lovande jordförbättringsmedel för marker med hög lerhalt och låg mullhalt. Foderplatsen bör läggas så långt som möjligt ifrån vattendragen och helst bör man byta platsen för rasthagen efter 15-20 år. Att lägga ut träflis i hagen på en lämplig avföringsplats, kan även hjälpa till att locka och styra hästarna att urinera längre från vattendragen, eftersom hästar inte gillar när urinen skvätter det.

### Slutsatser djurhållning

- Träckprov kan användas som en god markör för eventuell överutfodring för hästar, men urinprov fungerar bara vid mycket kraftig överutfodring.
- >8 g/kg ts träck innebär överutfodring av vuxna hästar, 8 g/kg träck är en bra nivå för unghästar, medan föl får för lite runt 4 g/kg.
- Resultaten tyder på att ungnöt inte överutfodras och att den svenska fosforrekommendationen till växande nötkreatur inte är för hög.
- Fosforbehovet till växande hästar föreslagit av amerikanska NRC är däremot överskattat och en höjning av de svenska rekommendationerna är således inte nödvändigt.
- Det är främst högdräktiga ston och lakterande ston och kor som behöver fosfortillskott i samband med betesgång.
- Helst bör fodren analyseras och sedan bara kompletteras med fosfor om det är nödvändigt och för de hästar där foderintaget är okänt (till exempel vid bete), då kan träckprov användas.
- Hästar utsöndrar sitt fosforöverskott i en form som riskerar att bidra till övergödningen av omgivande vatten.
- En fallstudie visade på höga halter reaktiv fosfor i dräneringsvattnet från rastfällor för hästar.
- Riskindex fosfor i jorden (fosformättnadsgrad, fosfor i vattenlöslig form) visade på samband med hästtäthet och med åldern på rasthagen.
- Speciellt är det utfodrings- och avföringsytorna i hästthagar som innehåller mycket fosfor och är riskområden för fosforförluster. Därför är det viktigt att hantera dessa ytor, till exempel genom bortförsel av foderrester och gödsel, för att hindra att fosfor ansamlas. Dessa ytor bör dessutom ligga långt från vattendragen och förses med träflis som tas bort regelbundet. Utfodringen bör inte ske direkt på marken och idealt bör platsen förses med tak.

## 7.2 Odlingssäters påverkan på fosforförlusterna

Fosforutlakning via dräneringssystem sker ofta med höga koncentrationer under korta perioder (Ulén, 1995) och har ofta sitt ursprung från anrikade källor i matjorden (Grant m.fl. 1996; Öygarden m.fl. 1996). Börling (2003) visade från långliggande försök, att gödsling med oorganiskt fosfor med 42-49 kg/ha och år i mer än 30 år medförde fosforackumulering ner till 40 cm djup i marken. Under detta djup fanns inga skillnader i fosforinnehåll mellan gödslad och ogödslad jord.

### 7.2.1 Effekt av gödsling och spridningsmetod

Ett effektivt utnyttjande av växtnäringen på gården är viktigt både för produktionen och för miljön. Frågor kring hantering och spridning av stallgödsel är mycket centrala i detta sammanhang. Stallgödseln påverkar fosforhushållning och risken för fosforförluster både långsiktigt, genom uppbyggnad av markens fosforinnehåll, och kortsiktigt, genom direkta förluster. Högre fosforstatus i marken innebär generellt en högre fosforfrigörelse, och ofta även högre fosforförluster från enskilda jordar (Heckrath m.fl. 1995; Sibbesen m.fl., 1997; Börling m.fl., 2004). Sambandets utseende varierar dock mellan olika jordar (Svanbäck m.fl. 2013).

Aronssons<sup>7</sup> projekt undersökte växtföljder med spridning av flytgödsel från svin och nöt, för att identifiera var riskerna uppstår i växtföljden och hur de bör hanteras genom val av tidpunkt och teknik för spridning av gödsel. I ett utlakningsförsök på mellanlera i Halland studerades två växtföljder; en med vårspannmål och tillförsel av svinflytgödsel och en vallväxtföljd med nötflytgödsel. Kompletterande studier gjordes i matjordskolonier från olika jordar som bevattnades på labb efter olika stallgödselbehandlingar. Studierna på labb visade att risker för fosforläckage i samband med spridning av flytgödsel är mycket jordartsberoende. Lerjorden (30 % ler) i fältförsöket, klassades

som en högriskjord för fosforläckage. Mo- och sandjordar, med stort innehåll av järn och aluminium som kan binda fosfor, är däremot lågriskjordar. På sådana jordar innebär inte enstaka givor av mineral- eller stallgödsel någon påtaglig risk för fosforläckage. Däremot kunde konstateras att en uppbyggnad av fosfortillståndet genom tillförsel av stallgödsel under lång tid (som ökar fosformättnadsgraden) ger en ökande potential för fosforläckaget även på lågriskjordar. Detta visade sig i lysimeterförsöket vara viktigare för fosforläckaget än den direkta effekten av en enstaka giva.

Tidpunkt för spridning av flytgödsel hade betydelse för både kväve- och fosforläckaget enligt fältstudien, där vårspridning var att föredra för både gödslingseffekt och förlustrisker. Tillförsel av flytgödsel på hösten på markytan av växande vall hade ett ökat fosforläckage. Vid höstspridning på stubb med efterföljande plöjning var utlakningen mindre, men ändå något förhöjd. Vid spridning på våren i fältförsöket fanns inga skillnader beroende på om gödseln harvades ned eller inte vilket troligen berodde på att det inte skedde någon omfattande nedtransport med vattenflöden denna årstid. I labb-studien, där man vattnade efter gödsling, visades att myllning av gödseln, istället för att sprida på ytan, minskade det potentiella läckaget av fosfor med 50 % från mellanleran på Böslid.

Bredspridning av handelsgödsel av fosfor kan öka fosforkoncentrationen i matjorden medan radmyllning ökar markfosfor under markytan, närmare växternas rötter (Saarela and Vourinen, 2010; Fernández and Schaefer, 2012). Därför kan radmyllning vara ett sätt att öka grödans utnyttjande av fosfor (ökad skörd trots samma fosforgiva) och minska risken för förluster. Detta undersöktes som en delstudie av Ulén<sup>10</sup> vid försöksfälten med 28 dränerade rutor vid Bornsjön i Mälardalen. Matjorden bestod till 60 % av lera av marint ursprung, med måttlig fosforstatus, men ganska hög förmåga att binda fosfor.

Tabell 3

| Led | Jordbearbetning (djup), gödslingsmetod & kalkning                                          |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| A)  | Konventionell höstplöjning (23 cm), radmyllning av handelsgödsel                           |
| B)  | Konventionell höstplöjning (23 cm), radmyllning av handelsgödsel och strukturkalkning år 1 |
| C)  | Konventionell höstplöjning (23 cm), ingen handelsgödsel                                    |
| D)  | Grund höstbearbetning (12 cm) och radmyllning av handelsgödsel                             |
| E)  | Grund höstbearbetning (12 cm) och bredspridning av handelsgödsel                           |
| F)  | Ogödslad träda                                                                             |
| G)  | Specialanpassad växtföljd, radmyllning eller bredspridning av handelsgödsel                |

Försöksled med olika jordbearbetning och spridningsmetod av 20 kg P/ha handelsgödsel samt kalkning vid Bornsjön fältförsöksrutor.

Fosfor tillfördes med mineralgödsel (20 kg/ha) genom bredspridning på ytan av marken respektive genom radmyllning under 6 år. De sju led som studerades visas i *tabell 3*. Resultaten visade att gödslingsmetoden inte signifikant påverkade fosforläckaget under försöksperioden. Det var heller ingen skillnad i nivå eller fördelning av P-AL-värdet efter sex år med bredspridning (E) jämfört med radmyllning (D). I en helt ogödslad träda var det en tydlig tendens av sjunkande P-AL-värdet i markens ytligaste del (0-2 cm), men läckaget av fosfor var ändå inte signifikant lägre än från gödslad mark. På lång sikt bör dock radmyllning av fosforhandelsgödsel kunna innebära att fosforgivan kan minskas och inte gödsla med ett litet överskott som nu sker. Fortsatta studier har också visat på en tendens till att läckaget av den partikelbudna fosfor minskar.

### Slutsatser gödsling

- En uppbyggnad av fosfor i jorden till följd av gödsling år efter år ger en alltmer ökad läckagerisk, som kan betyda mer än enstaka givror. Det finns starka samband mellan P-AL-talet och fosforläckage från matjorden, men sambandet skiljer sig mellan olika jordar.
- Fytoläkning är ett sätt att utarma en jord som gödslats upp till en hög nivå men det tar mycket lång tid att minska P-AL-tal och fosforläckage. Försöket vid Bornsjön visade att man inte fick lägre läckage om man helt slutade med gödslingen. Däremot påverkades skörden negativt.
- Myllning av mineral- och stallgödsel kan minska risken för läckage enligt studier av matjordskolonner på lab. Det kunde däremot inte verifieras i vid vårgödsling i fältförsök på två platser.
- Fältförsök på mellanlera i Halland visade att höstspridning av flytgödsel är ett riskmoment för både kväve- och fosforläckage, för fosfor särskilt vid ytspridning på hösten i växande vall.
- Försöket vid Bornsjön (med ganska lågt P-AL-tal i matjorden) visade att fosforläckaget inte blev lägre om gödslingen helt avslutades. Däremot påverkades skörden negativt.



### 7.2.2 Effekten av grödans upptag

Fosforutlakningen påverkas inte minst av jordtyp, men också av olika odlingsåtgärder såsom jordbearbetning och gröda (Bergström m.fl., 2007). Flera studier pekar på att gödsling (Ulén & Mattsson, 2003) och grödans upptag av fosfor (Bergström & Kirchmann, 2006) har betydelse för utlakningens storlek, men hur dessa samband hänger ihop är långt ifrån klarlagt. För att kunna bedriva ett jordbruk där hänsyn tas till både produktion och utlakning bör vi få bättre klarhet i vilken roll ett effektivt fosforupptag från grödan har för fosforutlakningens storlek. En faktor som påverkar fosforupptaget är grödans skördepotential. En kraftig gröda med väl utvecklat rotsystem har större behov av fosfor och större förutsättningar att tillgodogöra sig fosfor som finns tillgängligt i marken än en svag gröda. Därför är också markens dränering viktig. Studierna vid Bornsjön har visat på en betydande rumslig variation, även i ett flackt landskap som i detta fall kunde relateras till avståndet till dalgångens mitt.

En faktor som kan vara av betydelse för fosforförlusterna är att man har en livskraftig gröda som kan ta upp tillgänglig fosfor och därmed hålla nere mängden lättlösligt fosfor som kan läcka ut med dräneringsvattnet. Delins<sup>5</sup> projekt undersökte i vilken mån fosforutlakningen påverkas av grödans fosforupptag, som förmodades öka med ökad skördenivå i gödslingsförsök. Fosforutlakning mättes i ett försök med havre med stigande kvävegivor i en utlakningsanläggning på lerjord i Västergötland. Förutom fosforutlakning mättes markens fosforstatus (P-AL-klass) samt fosforupptag i grödan samt fosfor bortförd med skörd. Resultaten visade att fosforupptaget och fosfor bortförd med skörd ökade med stigande kvävegödslingsnivå, med 3-5 kg fosfor per hektar utan kvävegödsling till 15-17 kg fosfor per hektar vid gödsling över 100 kg N/ha. Utlakningen minskade

mycket riktigt med ökat fosforupptag hos grödan, men bara under växtodlingssäsongen då utlakningen för ogödslad gröda var högre än i övriga led. Utlakningen var dock som störst utanför odlingsssäsongen (under vinterhalvåret) och var då inte längre kopplad till havrens fosforupptag. Utlakningen kunde heller inte kopplas till fosformättnadsgraden, troligen eftersom halten lättlöslig fosfor i marken var måttlig (P-AL låg i klass II i matjorden och klass III i alven).

Även Ulén<sup>11</sup> undersökte skördens effekt på fosforläckaget vid experimentfälten vid Bornsjön i Mälardalen, där matjorden till 60 % består av lera av marint ursprung, med relativt låg fosforstatus. Två växtföljder (led A-E och G, *tabell 3*) och ogödslad träda följdes under totalt 6 år. Balanserad gödsling med fosfor till grödan jämfördes med försöksrutor som inte fått någon gödsling alls av fosfor, bara kväve. Resultaten visade att gödsling med samma mängd fosfor som förs bort med skörden, inte medförde högre förluster än om gödslingen helt avslutades. När ingen fosforgödsling skedde blev skördarna dåliga men fosforläckaget var oförändrat.

### Slutsatser grödupptag

- Under växtsäsongen kan en högvakastande gröda begränsa utlakningen, genom sitt fosforupptag, men effekten på den totala utlakningen är begränsad, åtminstone på kort sikt.
- Avrinningen och avrinningsmönstret har större betydelse än grödupptaget. Stor del av avrinningen och därmed fosforutlakningen sker under vinterhalvåret innan någon gröda etablerats eller då befintlig gröda inte har någon kraftig tillväxt. Snabbt varierande flöde ger också högre förluster.
- Att helt sluta med gödsling om man har ett lågt fosfortal i marken resulterade inte i lägre fosforförluster än med en balanserad gödsling.

### 7.2.3 Effekten av jordbearbetning

Jordbearbetning kan påverka risken för fosforförluster, både genom erosion på markytan och genom läckage. Tidigare har det ansetts att ytaavrinning är den dominerande orsaken till fosforförluster från jordbruksmark. Sedan mitten av 1990-talet har dock ett flertal Europeiska studier visat att stora fosforförluster sker genom de grävda täckdikessystemen (Ulén 1995; Heathwaite & Dils 2000; Chapman m.fl. 2001; Gentry m.fl. 2007). I en sammanställning för svenska jordar är fosfortransporter genom ytaavrinning grovt skattat i storleksordningen 0,02-0,4 kg/ha och år och utlakning via dräneringsvattnet mellan 0,1 till 1,8 kg/ha och år (Bergström m.fl. 2007). Storleken på avrinning och erosion beror på många faktorer. Bland de viktigaste är nederbörds mängd och intensitet, jordens egenskaper, topografi och markanvändning. Aggregatstabilitet och hydraulisk konduktivitet är viktiga platsbundna egenskaper, som i stor utsträckning påverkas av jordbearbetning. Deras interaktion påverkar vattnets flödesvägar och sedimenttransport, som i sin tur bestämmer hur fosforförlusterna sker på markytan respektive i markprofilen.

Med grund bearbetning, vanligen kallad reducerad bearbetning, vänder man inte jorden utan man bearbetar den till ett djup av 5-15 cm med en kultivator eller tallriksredskap. Detta lämnar markytan täckt med åtminstone 15 % växtrester året runt enligt den amerikanska definitionen (ASAE 2006), vilket minskar risken för erosion av partikelbunden fosfor. Det kan emellertid öka risken för fosforförluster om det samtidigt innebär en anrikning av organiskt material nära markytan som avger fosfor (Gaynor & Findlay 1995). Vattenflödena genom marken kan också förändras.

Ulén<sup>10</sup> undersökte hur läckaget av fosfor påverkades av olika jordbearbetningsstrategier vid Bornsjöns experimentfält (gyttjelera, 60 %, i Mälardalen). Två strategier för jordbearbetning jämfördes: konventionell höstplöjning (led A och B, tabell 3) och grund höstbearbetning enbart med kultivator (led D och E). Uléns<sup>10</sup> resultat visade att i genomsnitt var totalfosforläckaget efter konventionell plöjning 0,79 kg/ha och år, varav 87 % som partikulär fosfor. Det fanns en tendens (men utan statistisk säkerhet) att fosforförlusterna var lägre vid vanlig plöjning än med reducerad plöjning. Träda som inte bearbetades alls innebar en väsentlig minskning av kväveläckaget, men det kvarstod avsevärda förluster av partikelbunden fosfor, trots att den inte gödslades. De relativt stora förlusterna efter grund jordbearbetning med kultivator i det här försöket skulle kunna vara en effekt av ojämn infiltration och preferentiell transport längs halmrester (Kasteel m.fl. 2007), vilket undersöks i pågående försök.

Förhållandena mellan kväve och fosfor i försöket varierade kraftigt mellan behandlingarna, där N/P-kvoten för trädan var låg (8). Det är nära den nivå som kan trigga tillväxten av kvävefixerande bakterier och alger i Östersjön (Boesch m.fl. 2006). Resultaten pekar på att det inte är någon bra lösning för den närliggande Östersjön om odlingen upphör och marken läggs i träda. Mycket tyder på att det viktigaste är att förbättra strukturen på odlingsmarken och plöja regelbundet för att minska de snabba transportvägarna för fosfor.

Wesströms<sup>9</sup> projekt studerade hur olika jordbearbetning påverkade fosfortransporten i övre delen av markprofilen (matjorden och övre alven) på två försöksplatser med långliggande jordbearbetningsförsök nära Ultuna i Uppland.

Konventionell plöjning på 25 cm djup och reducerad bearbetning som innebar ytlig (10 cm djup) bearbetning med kultivator och/eller tallriksredskap jämfördes. Båda försöksplatserna var väl aggregerade lerjordar med måttligt krympande/svällande egenskaper. Däremot var Vipängen en styv lera (45-60 % ler) med hög mjälahalt och Säby en moig mellanlera (30-35 % ler) med gytteinnehåll. Lättillgänglig fosfor (P-AL) i matjorden var i klass II-III respektive I-II. På varje mätplats i fält, simulerades regn på våren efter sådd/uppkomst och på hösten efter skörd och jordbearbetning för att identifiera kritisk regnintensitet för frigörelse av partiklar och fosfor på dessa jordar. Dessutom mättes förändringen i aggregatstabilitet, markens porsystem och genomsläpplighet i makroporsystemet efter regnet.

Resultaten visade lägre turbiditet (vattnets grumlighet) för reducerade bearbetning än konventionell bearbetning, trots att avrinningen var något högre. Analyserna visade ett tydligt samband mellan avrinning och turbiditet där vattnet blev grumligare under hög avrinning. När avrinningen ökade, ökade även fosforkoncentrationen i utflödet. Sambandet mellan turbiditet och koncentrationerna partikelbunden fosfor brukar vara tydlig för en och samma plats (t.ex. Ulén m.fl. 2012). Vid Vipängen var utflödet av fosfor något högre för reducerad bearbetning vid både låg och hög regnintensitet. Vid Säby fanns inga större skillnader i fosforutlakning mellan de olika bearbetningssystemen.

En höjning av regnintensiteten gav en mycket snabb ökning av turbiditeten, men vid en sänkning av intensiteten tog det betydligt längre tid innan turbiditeten sjönk till lägre värden. Under naturliga regnförhållande kan därför korta episoder av hög regnintensitet under ett regntillfälle vara av betydelse för transport av partiklar och fosfor.

Koncentrationen av fosfor i avrinningsvatten (alla former av fosfor) var något högre för den höga regnintensiteten jämfört med den låga. En ökad regnintensitet medförde en ökad utlakning av fosfor. På en av försöksplatserna ökade fosforutlakningen med i genomsnitt cirka 12 % för varje mm per timme som utflödet ökade. Enligt framtida klimatscenerier kommer regnintensiteten att öka med cirka 15 % i östra Sverige. Wesströms<sup>9</sup> resultat visar att 15 % ökning vid låg intensitet (i genomsnitt 7 mm per timme) med 1 timmes varaktighet, skulle medföra att den totala fosfortransporten ökar med i samma storleksordning som cirka 1 % av den årliga totala fosforutlakningen i Sverige. Vid hög intensitet (25 mm per timme) med 15 minuters varaktighet, blev motsvarande ökning av totala fosfortransporten cirka 4 % av den årliga totala fosforutlakningen i Sverige.

#### Slutsatser jordbearbetning

- I försöken fanns en tendens att fosforförlusterna var lägre vid vanlig plöjning än med reducerad plöjning, men turbiditeten var lägre vid reducerad jordbearbetning i en av studierna.
- Jord som inte bearbetades (ogödslad träda) innebar en väsentlig minskning av kväveläcket men fosforläcket minskade inte.
- En ökning av regnintensiteten höjde mycket snabbt turbiditeten och fosforkoncentrationen i avrinningsvattnet, men avklingningen tog relativt sett längre tid när intensiteten minskade.
- Turbiditet är en tänkbar indikator för fosforinnehållet i avrinnande vatten men måste kalibreras på platsen. En platskalibrering är nödvändig om turbiditet ska användas som indikator för fosforinnehåll i avrinningsvatten.

#### 7.2.4 Effekten av fånggrödor

Fånggrödor odlas under perioderna mellan två huvudgrödor för att minska läckaget av framför allt kväve, men fånggrödor kan också minska risken för erosion av jord och fosfor. Att odla fånggröda är en viktig åtgärd mot kväveläckaget i Sverige, och under 2011 var arealen med fånggröda 143 000 ha. Fånggrödor kan antingen sås in tillsammans med huvudgrödan eller efter huvudgrödan har skördats. Vanligen plöjs fånggrödan ner på senhösten eller på våren innan den följande grödan sås. Engelskt rajgräs (*Lolium perenne* L.), ibland med inslag av klöver, som sås in i huvudgrödan på våren är den vanligaste och effektivaste fånggrödan, men det finns också ett intresse för andra typer av fånggrödor, som kan ge variation i växtföljden. Det gäller bland annat fånggrödor som sås efter skörd av huvudgrödan, till exempel oljerättika (*Raphanus sativus* L.) och vitsenap (*Sinapis alba* L.). Växternas vävnader, både ovanför marken och från rötterna, är dock tänkbara källor för näringsläckage speciellt om de skadas av frost. Det har särskilt visat sig gälla risken för fosforförluster på eller genom marken under förhållanden med upprepade frysning och tining under vintern. Fenomenet har rapporterats både från vallar, gräsbevuxna kantzoner och från fånggrödor (Bechmann m.fl. 2005; Sturite m.fl. 2007).

Förutom det vanliga kravet att en fånggröda ska vara lätt att etablera och kunna ta upp så mycket kväve som möjligt efter det att huvudgrödan har skördats, bör därför en fånggröda också kunna hålla kvar så mycket som möjligt av fosfor i sina vävnader under hösten och vintern, för att inte bli en källa till fosforförluster. Förutom att utvärdera fosforläckaget från tänkbara fånggrödor för fosfor med avseende på frysning och tining ville Uléns<sup>6</sup> projekt utvärdera eventuella samband mellan fosforfrigörning och rötternas form och

egenskaper. Målet var att kunna ge råd om fånggrödor som är anpassade för att ha en god förmåga att ta upp och lagra fosfor utan att öka risken för läckage av fosfor i ett klimat där omväxlande frysning och tining under vintern är att vänta.

Uléns<sup>6</sup> försök undersökte fyra olika fleråriga och fyra ettåriga fånggrödor. De perenna arterna som undersöktes var; engelskt rajgräs (*Lolium perenne* L.), hundäxing (*Dactylis glomerata* L.), cikoria (*Cichorium intybus* L.), och rödklöver (*Trifolium pratense* L.) och de ettåriga arterna; honungsört (*Phacelia tanacetifolia* L.), vitsenap (*Sinapis alba* L.), och två olika rättika (*Raphanus sativus* L.). Den ena arten var oljerättika (oleifera) som är en vanlig fånggröda i Danmark och södra Sverige. Den andra arten var longipinnatus, "Strukturator" som förväntas förbättra markens struktur genom att fördela det organiska materialet i marken med sin snabbt växande pålrot. I Uléns<sup>6</sup> projekt odlades fånggrödorna fram i växthus, skott (färska blad) och rötter (inklusive så mycket som möjligt av grenar och finrötter) extraherades med vatten analyserades på fosfor. Innan proceduren med frysning extraherades ett prov med vatten för att få fram den initiala frigörningen av fosfor från intakt växtmaterial. Dels odlades fånggrödorna på tre platser (Brunnby, Linnés Hammarby och Lanna) i fält under 1, 2 respektive 3 år. Alla tre platserna har en jord med hög ler- och mjälahalt (40-50 % för båda storleksfraktionerna), medan Lanna representerar ett nederbördsrikare och mildare klimat. Antalet frysning-tining-tillfällen har under senare vintar varierat mellan 6 och 15 i fältexperimenten. Jordkolonner från dessa platser med olika fånggrödor togs och nederbörd efterliknades genom bevattning på laboratorium med analys av fosfor i avrinnande vatten, före och efter behandling.



Uléns<sup>6</sup> laboratoriestudier av växthusodlade fånggrödor visade att frysning-tining medförde en ökning av den tänkbara fosforförlusten från både skott och rötter i jämförelse med ingen frysning. Oljerättika och vitsenap innehöll mera vattenlösligt fosfor än andra arter, medan cikoria och honungssört hade lägst. I medeltal hade skotten 43 % mer vattenextraherad fosfor än rötterna. Frigörningen av fosfor, speciellt från skotten, ökade med ökat antal frysningstillfällen. Upprepad frysning/tinings tycktes innebära mer fosforfrigörning, än en enda lång frysperiod. Försöket med växthusodlade fånggrödor visade även att fleråriga arter inte riskerar lika höga fosforförluster som ettåriga. För arter med pålrot ökade fosforfrigörningen med ökad längd, yta och volym hos rötterna. Cikoria kan vara den bästa fosforfånggrödan av de testade arterna, eftersom dess rot är motståndskraftig mot frost. I jämförelse med andra ettåriga arter tycktes honungssört vara mest motståndskraftig mot att förlora fosfor efter frysning.

I fältförsöken på de tre platserna tog ettåriga arter upp mer fosfor i skotten än perenna arter. Under senhösten, då växterna vintrat in och slutat växa, innehöll skotten 1-6 kg P/ha. Inga skillnader mellan olika arter, olika ställen och olika år fanns, men det största fosforupptaget skedde i jordar med högst fosforinnehåll (P-AL). Överlevnaden efter tre vintrar var 55-76 % av de fleråriga arterna medan alla ettåriga fånggrödor dog ut helt.

Fånggrödan i jordkolonnerna från de tre platserna minskade inte fosforläckaget som uppmättes efter regnsimulering. Däremot ökade fosforläckaget efter det att fånggrödan exponerats för frost före det konstgjorda regnet, med det var stor variation mellan olika år och mellan olika arter. I det här fallet framkallades sju cykler med frysning och tining. De vanliga odlade fånggrödorna engelskt rajgräs och oljerättika tenderade att läcka mer fosfor än de övriga fem testade arterna efter exponering för frost. Cikoria hade lågt fosforläckage både före och efter frysning och verkade vara en lovande fånggröda på det viset att den inte ökade fosforläckaget.

### Slutsatser fånggrödor

- Fånggrödor bidrog inte till minskat fosforläckage enligt studier på labb. Istället ökade risken för fosforläckage efter det att fånggrödan utsatts för frost.
- Fleråriga fånggrödor riskerade inte lika höga fosforförluster som ettåriga arter.
- De vanliga odlade fånggrödorna engelskt rajgräs och oljerättika tenderade att läcka mer fosfor efter exponering för frost, än de övriga fem testade alternativa arterna.
- Den inhemska arten Cikoria hade lågt fosforläckage både före och efter frysning och verkar vara en lovande fånggröda för fosfor.

### 7.2.5 Effekten av strukturkalkning

En god markstruktur är grunden för en väl fungerande odlingsjord. Många miljöproblem vid odling, till exempel kväve- och fosforförluster, är relaterade till en dåligt fungerande markstruktur. Eftersom en stor del av fosforläckaget på lerjordar sker genom partikulärt bunden fosfor som följer med yt- och dräneringsvattnet bör markstrukturförbättrande åtgärder, där målet är att lerpartiklarna bildar större svårtransporterade aggregat, minska fosforläckaget avsevärt. Strukturkalkning är en åtgärd som visat lovande resultat i laboratoriet (Ala-kukku & Aura, 2006) och som studerats i fältförsök inom forskningsprogrammet. Strukturkalk finns i två former – antingen i form av aktiv bränd kalk det vill säga kalciumoxid (CaO), eller som Ca(OH)<sub>2</sub> som har fått reagera med vatten till släckt kalk. När dessa kalkformer blandas med jord som innehåller tillräckligt mycket lera inträffar flera olika markfysikaliska reaktioner. När kalk sätts till en lerjord sker det ett utbyte av katjoner och kalciumjonerna adsorberas till lermineralerna. Vartefter attraheras lerpartiklarna, som kommer närmare varandra, och det sker en flockulering och partikelaggregering (Bell, 1996). Dessutom leder den s.k. puzzolanreaktionen mellan kalk, kisel och aluminium till att det bildas en cementprodukt och under en längre tid ökar aggregatstyrkan (Locat m.fl., 1990). Efter strukturkalkning är det

också känt att lerkolloiderna bildar ett korthus-mönster (Koorevaar m.fl., 1982; Wells & Theng, 1988). Det är bara strukturkalk, inte kalkstensmjöl, som ger de ovannämnda effekterna på leraggregaten.

#### 7.2.5.1 Kalkens effekt på fosforutlakningen

Uléns<sup>11</sup> fältförsök vid Bornsjöns experimentfält med dränerade rutor på gyttjelera (60 % ler) är det första som undersökte effekten av strukturkalkning (led C, *tabell 3*) på fosforläckaget i Sverige. Strukturkalk i form av bränd kalk spreds i september 2007 för hand med en giva motsvarande 5 ton CaO/ha. Den spreds på stubben under optimala väderförhållanden (inget regn eller blåst) och med noggrann inblandning i jorden med kultivator i två riktningar omedelbart efteråt. I ett nyare fältförsök vid Wiad (25 % ler) studerade Ulén<sup>11</sup> även effekterna av släckt kalk (i form av den komersiella blandprodukten Nordkalk aktiv) som finns kommersiellt tillgänglig och som spreds med hjälp av en entreprenör. Även här skedde spridningen under torra väderförhållanden och med omedelbar inkultivering. Wiad har en gammal anläggning där vattenproverna tas manuellt, medan försöket vid Bornsjön har teknik med datastyrd vattenprovtagning som anpassas till flödet.

Resultaten visade att totalfosforläckaget från Wiad var måttligt (medel 0,2 kg TP/ha och år) redan före strukturkalkningen. Löst reaktivt fosfor utgjorde i genomsnitt cirka 55 % av fosforläckaget. Läckaget av totalfosfor och löst reaktiva fosfor var lägre från Wiad efter strukturkalkningen under de två år som mätningarna varade. Det partikelbundna fosforläckaget var däremot inte statistiskt lägre efter kalkningen, men visade en sådan tendens. Laboratieförsöken med regnsimulering visade i stort sett samma sak. En förklaring till minskat läckage av löst fosfor skulle kunna vara bildning av komplex av kalciumfosfat eller kalciumfällningar i jorden, som förmodligen har hög koncentration av löst fosfor i markvattenlösningen till följd av stort fosforinnehåll i jorden (140 mg P-AL/kg).

För Bornsjön visade sex (numera åtta) års resultat precis tvärtom, att läckage efter kalkning var lägre för partikelbunden fosfor, men inte för löst reaktiv fosfor. Å andra sidan var andelen löst reaktiv fosfor bara 20 %, då fosforinnehållet i matjorden var betydligt lägre (50 mg P-AL/kg). Fosforläckaget totalt sett var däremot betydligt större från den styva leran vid Bornsjön (medel 0,9 kg TP/ha och år) jämfört med Wiad med mellanlera.

Mot bakgrund av de allmänt höga förlusterna av partikelbunden fosfor från Bornsjöexperimentet kunde slutsatsen dras att ansträngningar för att minska eutrofieringen av den närliggande Östersjön borde koncentras till att förbättra jordstrukturen. Jordar som vid Bornsjön bör man till exempel strukturkalka och därefter plöja regelbundet. Studierna vid Wiad visar betydelse av att samtidigt minska risken för fosfor i löst reaktiv form genom att prioritera platser med hög fosforstatus. Det behövs emellertid mer fältstudier för att klargöra hur effekten av strukturkalkning beror på lerhalten i kombination med markens innehåll av tillgänglig fosfor.

Bränd kalk tillfördes även i Bergströms<sup>21</sup> lysimeterstudie. Mängden tillförd kalk (CaO) motsvarade en normal använd dos på 5 ton/ha. Lysimetrarna gödslades även med maximal rekommenderad dos 22 kg fosfor/ha ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>). Bergströms<sup>21</sup> resultat visade att ytapplicering av kalk, minskade läckaget av partikulärt fosfor med ungefär 50 % på lerjordarna under en treårig försöksperiod. Även läckaget av löst fosfor var lägre i de kalkade lysimetrarna, men variationen mellan lysimetrarna var för stor för att tendensen skulle visa signifikant minskning.

#### 7.2.5.2 Kalkens effekt på markstruktur

Tidigare studier har visat att inblandning av strukturkalk (bränd och släckt kalk) kan ge bättre markstruktur (Berglund, 1971). De strukturkalkningsmedel som idag används i lantbruket är en blandning av bränd eller släckt kalk (cirka 15 %) och kalkstensmjöl (cirka 85 %). Inom den ekologiska odlingen har gips (kalciumsulfat som inte höjer

pH) lanserats som ett alternativ. Dessa nya strukturalkningsmedel av blandprodukter är betydligt billigare och lättare att hantera och sprida än den rena släckta kalken, men deras effekt har inte i någon större omfattning testats under kontrollerade förhållanden. Aggregatstabilitet används ofta för att mäta effekten av olika åtgärder på markstrukturen på lerjordar. Den kan även visa hur känsliga större jordaggregat är för att lösas upp av vatten. Aggregatens stabilitet mäts genom att försiktigt doppa aggregat i vatten där instabila aggregat faller sönder och vattnet blir grumligt, sedan mäts vattnets grumlighet (turbiditet). Turbiditeten har i sin tur visat sig vara väl korrelerad med förlusten av partikulär fosfor (Etana m.fl. 2009).

Uléns<sup>10,11</sup> projekt vid Bornsjön kunde visa på förbättrad aggregatstabilitet fyra år efter strukturalkning med bränd kalk (som plöjts varje höst), jämfört med icke-strukturalkat led som antingen kultiverats grunt eller plöjts varje höst (Ulén m.fl., 2012). Det var däremot inte några skillnader i porositeten, mellan dessa led. Bara i trädan (led F, tabell 3) var den vattenhållande förmågan bättre. Infiltrationsmätningarna i fält indikerade något jämnare infiltration i det strukturalkade ledet, men skillnaderna var inte signifikanta.

Uléns<sup>10,11</sup> aggregatstabilitetstester med jordar tagna från utlakningsrutorna, 2 respektive 3 år efter strukturalkningen, visade på säkra förbättringar för jordaggregat. Jordaggregat från strukturalkade försöksrutor vid Wiad, uppvisade en bättre stabilitet jämfört med aggregat från rutor utan strukturalkning. Detta gällde tydligast för de största aggregaten som innehåller många små lerpartiklar. Om dessa i stället löses upp och faller sönder, har de ytterst små lerpartiklar förutsättningen att bära med sig fosfor långa sträckor.

Berglunds<sup>12</sup> projekt utvärderade effekten på markstruktur och skörd av inblandning av olika kalciumprodukter i matjorden på lerjordar. I fyra fältförsök på Säby i Uppland testades olika givor (motsvarande 1, 2 och 6 ton CaO/ha) av släckt kalk och Nordkalks Aktiv Struktur (NKAS) som är en blandprodukt med släckt/bränd kalk och kalciumkarbonat (kalkstensmjöl). I ett av försöken

ingick även gips. De fyra försöken lades ut utan finansiering när det hösten 2010 stod klart att LOVA-stöd för strukturalkning skulle bli verklighet. Påpassligheten var avgörande för att resultat snabbt skulle finnas tillgängliga för svenskt jordbruk, men spridning och nedbrukning av kalk utfördes därmed också under stor tidspress och under icke optimala förhållanden. Kalkprodukterna spreds sent på hösten, i andra halvan av oktober, med minusgrader på nätterna och nedbrukningen inskränktes till ytlig bearbetning med en till två överfarter (Carrier) samma dag som spridningen eller dagen efter. Konventionell höstplöjning utfördes 0–4 dagar efter spridningen. De höga temperaturer som krävs för puzzolanreaktioner och den grundliga inblandning mellan jord och kalk som bör eftersträvas för maximal jordkontakt uteblev alltså på hösten men reaktionerna kan möjligtvis ha fortsatt på våren.

Trots dåliga förutsättningar visade resultaten att turbiditeten minskade, det vill säga aggregatstabiliteten förbättrades, från våren 2013 (cirka 2,5 år efter spridning) vid de högsta givorna av släckt kalk och blandprodukten NKAS jämfört med okalkad jord. Det är möjligt att strukturförbättringen inträder från det första kilot av produkt som blandas med en lerjord, men det var enbart med de högsta givorna som signifikanta aggregatstabilitetsförbättringar gick att visa. Uléns<sup>10,11</sup> projekt visade också en förbättring av markstrukturen med höga givor av bränd kalk, och dessa resultat från Berglund<sup>12</sup> visade att även blandprodukten NKAS kan ge en strukturförbättring. Något förvånande är att högsta givan (6 ton CaO/ha) för både släckt kalk och blandprodukten NKAS gav ungefär samma minskning av turbiditet. I försöken baserades givorna på tillförd mängd kalcium (Ca). Andelen Ca som tillfördes i form av den reaktiva  $\text{Ca(OH)}_2$  var dock relativt liten i NKAS, där större delen av kalciumet tillfördes i form av  $\text{CaCO}_3$ . Den förbättrade effekt på markstrukturen som kunde förväntas av släckt kalk utifrån en högre halt av  $\text{Ca(OH)}_2$  blev alltså ungefär densamma som för blandprodukten NKAS. Resultaten förväntar och behöver verifieras med fler undersökningar.

En annan indikation på att strukturalken förändrade markens aggregat fanns vid såbäddsundersökningen våren 2013. Där var andelen fina aggregat ( $< 2$  mm) i såbädden högre i leden med 2 ton CaO som  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  än i de obehandlade leden utan kalk, samtidigt som det fanns en tydlig tendens till en mindre andel grova aggregat ( $> 5$  mm) för de kalkade jordarna.

#### 7.2.5.3 Kalkens effekt på markens pH

Mätningarna i Berglunds<sup>12</sup> projekt visade att matjordens pH-värde (mätt som  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ) var signifikant högre vid de höga givorna av släckt kalk och NKAS cirka 2 år efter spridningen i tre av försöken vid Säby. Ytterligare ett år senare (cirka 3 år efter spridningen) återstod inga signifikanta skillnader i pH. I ett av försöken vid Säby, där start-pH i det obehandlade ledet var betydligt mycket högre än i övriga försök (pH 7,3), fanns inga signifikanta pH-effekter av strukturalktillförseln.

I Uléns<sup>11</sup> försök vid Wiad var det ingen skillnad i pH i matjorden mellan strukturalkade och inte strukturalkade rutor ett halvår efter behandlingen och en jämviktning med ler verkar ha skett i jorden. På liknande sätt var pH i dräneringsvatten stabilt och utan signifikanta skillnader mellan strukturalkade rutor och med icke-kalkade rutor.

#### 7.2.5.4 Kalkens effekt på skörden

Inblandning av strukturalk (bränd och släckt kalk) har i tidigare studier även visats kunna ge högre skörd (Berglund & Blomquist 2002). För lantbrukaren är en förväntad positiv effekt på avkastningen sannolikt avgörande för att markägaren ska välja att strukturalka.

Uléns<sup>11</sup> projekt undersökte strukturalkningens effekt på skörden vid Bornsjöns experimentfält. Det första året var skördeeffekterna från strukturalkningen tydligt positiv men därefter har effekten varit lägre eller uteblivit.

I Berglunds<sup>12</sup> fyraåriga fältförsök vid Säby, visades i medeltal inga signifikanta effekter på avkastningen av spannmål i led som strukturalkats med pH-höjande kalciumprodukter. Effekten av strukturalk i dessa fyra försök varierade med en ökning av skörden på 11 procent till en minskning på lika mycket. Varför de olika försöksplatserna reagerade på så olika sätt för strukturalk är oklart, men kan ha haft att göra med kalkningens påverkan på mängden tillgänglig fosfor och andra näringsämnen för grödan. Halterna av Mn och Cu var signifikant lägre med högsta givorna av släckt kalk och NKAS, trots att någon signifikant pH-ökning inte förelåg nästan fyra år efter kalkspridningen. Av de mätta ämnena var det bara Mn som låg inom det kritiska intervallet, där skördenedsättning kan förekomma. Detta är dock en iakttagelse som bör tas i beaktande både vid strukturalkning i praktiken och i fortsatta undersökningar.

Utgångsläget var det motsatta i försöksplatsen där det var en signifikant positiv effekt av strukturalk, som var mer uttalad i det plöjningsfria ledet än i det plöjda. Jorden hade högre pH-värde och högre basmättnad i det okalkade ledet och framför allt mycket högre P-status (klass V: P-AL 16,5). På denna försöksplats förändrade sannolikt strukturalken jorden i positiv riktning utan de negativa konsekvenserna för grödorna. Denna förbättring yttrade sig som en signifikant större andel fina aggregat och en mindre andel grova aggregat i såbäddsundersökningen 2013. Den mer finbrukade såbädden hade rimligen ett positivt inflytande på avkastningen genom lägre vattenavdunstning och bättre vattenhushållning, vilket gav utslag under den mycket torra våren och försommaren 2013.



Med den högsta givan gips, som motsvarade 6 ton CaO/ha, ökade avkastningen (+ 7 %) i medeltal år 2011–2014. Med gipsgivan tillfördes betydande mängder fosfor som, eftersom den aktuella produkten framställts genom reaktion mellan kalksten och svavelsyra, kan ha en tillgänglighet liknande den i fosforinnehållande mineralgödsel. Dessutom tillfördes med gipsen stora mängder svavel, som grödorna kunde tillgodogöra sig under de följande fyra försöksåren. Växtnäringsanalyserna på vårkornkärna det sista försöksåret 2014 visade inga skillnader med avseende på något av de analyserade makro- och mikronäringsämnen och grödan bedömdes därför inte var svavelbegränsad. Det förefaller troligt att gipsens positiva avkastningseffekter har att göra med tillgängligheten av fosfor. Den aktuella typen av gips är inte godkänd för användning inom ekologisk odling.

#### Slutsatser strukturräkning

- Strukturräkning är en lovande åtgärd för att minska fosforläckaget från lerjordar, genom minskad partikeltransport och/eller fastläggning av löst fosfor. Däremot minskar inte kväveläckaget vid strukturräkning.
- Studierna vid Wiad tyder på att platser med hög fosforstatus bör prioriteras för strukturräkning i åtgärdsarbetet, eftersom strukturräkning där minskade läckaget av löst reaktivt fosfor under de två år undersökningen varade.
- Aggregatstabiliteten förbättrades med höga givor av bränd kalk, släkt kalk och blandprodukten NKAS.
- Strukturräkningen ökade skörden med 11 % på mark med god fosforstatus, men minskade skörden med 11 % på mark med låg fosforstatus.
- Den högsta givan gips (som inte höjer pH) ökade avkastningen med 7 %.

### 7.3 Åtgärder längs vattenvägarna

I åtgärdsarbetet mot fosforförluster bör ett bra fosforutnyttjande hos djur och grödor, följt av åtgärder för att förhindra att fosfor förloras från fälten komma i första hand. Emellertid kommer förluster till vattendragen alltid att ske och det är nödvändigt, ibland också effektivt och lönsamt, att arbeta med åtgärder längs med och i jordbruksdiken och vattendragen. Åtgärder längs med vattendragen kan vara kantzoner, tvåstegsdiken, fosfordammar och adsorberande filterdiken. Några av dessa åtgärder kan markägaren få miljöersättning för investeringen och skötsel från jordbruksverket. Tvåstegsdikens förmåga att fånga fosfor har dock inte utvärderats i Sverige, och fanns inte med i SLF:s forskningsprogram.

#### 7.3.1 Kantzoner

I Sverige är det i dagsläget obligatoriskt med kantzon längs med öppna diken och vattendrag, där ingen gödsling eller besprutning får ske. Etanas<sup>13</sup> projekt har undersökt gräsbevuxna kantzoner, och skötsel av dessa på försöksfältet Krusenberga i Uppland. En ruta utan kantzon jämfördes med kantzon med icke skördad gräsvall och med gräsvall som skördades en gång per år, för att hindra upplagring av fosfor i kantzonen. På försöksfältet mättes fosforförluster både via ytvatten och dränerande vatten. Lutningen var måttlig och jordarten var en mellanlera, som är en vanlig jordtyp i Mellansverige. Etanas<sup>13</sup> resultat visade att kantzonen minskade ytavrinningen (det vill säga ökad infiltration) och därmed minskade yttransporten av jordpartiklar och partikelbunden fosfor. Däremot minskade enbart förlusterna av jordpartiklar och inte partikelbunden fosfor i dräneringsvattnet. En anledning till att kantzonen inte lyckades minska förlusterna av partikelbunden fosfor kan vara att 85 % av jordtypen var finler, som binder mer fosfor än grövre partiklar, som inte fångades upp i markprofilen utan transporterades vidare

med dräneringsvattnet. Generellt var ytaavrinningen liten och fosfor förlorades främst via dräneringen, vilket innebär att kantzonen hade liten möjlighet att fånga dessa förluster. Kantzonerna bör därför anpassas och placeras där det framförallt sker ytaavrinning för en ökad effekt av kantzonen. Studier har visat att relativa retentjonen ökar med kantzonens bredd och att den övre delen av kantzonen är mest effektiv att minska förlusterna av totalfosfor på fält med silt och sandjordar (ingen skillnad på lerjordar), eftersom sedimentation är den viktigaste avskiljningsprocessen (Syversen m.fl. 2001; Uusi-Kämpä m.fl. 2000). I dagsläget kan kantzoner bli placerade längs vattendrag oavsett fältets lutning eller ytaavrinning och kan hamna i områden där reduktionen av fosfor blir låg. Med hjälp av högupplöst höjddata går det dock i dag med stor precision att identifiera erosions- och ytaavrinningsvägar i landskapet Djodjic<sup>24</sup>, vilket därmed utgör ett viktigt komplement till annan information. Således kan både identifiering av ineffektiva skyddszoner (där ingen ytaavrinning förekommer) och förbättring av placeringen och utformningen av effektiva skyddszoner ske. Detsamma gäller för alla andra åtgärder vars effekt är beroende av inkommande halter och landskapets form till exempel våtmarker, dammar och tvåstegsdiken.

Andra kompletterande åtgärder behövs för att fånga förlusterna via dräneringen, inte minst för att minska förlusterna av den lösta reaktiva fosfor. Det har visats att kantzoner kan öka förlusterna av löst fosfor, speciellt under vintern när frusna växtdelar frigör löst fosfor (Uusi-Kämpä 2007). Försökstiden har hittills varit för kort för att mäta fosforanrikning i kantzonen, så forskningen fortsätter några år till för att avgöra om bortförsel av gräs är fördelaktigare än att lämna kvar all vegetation i kantzonen. Pågående studier visar dock att gräset bör avlägsnas för att förbättra infiltationen.

### 7.3.2 Diken

De senaste århundradens uträtning av diken och vattendrag samt sänkning av sjöar och våtmarker har minskat landskapets förmåga att rena vattnet. Diken är en viktig länk mellan åkermark och vattendrag, vilket uppmärksammades i Djodjics<sup>14</sup> projekt. Projektet undersökte jordbruksdikens variation i växttillgänglig och löslig fosfor i dikessedimenten och jämförde dem med omkringliggande jordar och med långsiktig miljöövervakningsdata på vattenkvalitet. Resultaten visade att det sker en anrikning av olika ämnen i dikessediment, jämfört med värden från omkringliggande åkermark. Generellt hade dikessedimenten högre medelhalter av fosfor, kalium och järn jämfört med åkermark. Långtidsmedelvärden av fosforhalter i avrinnande vatten kunde korreleras i högre grad till avrinningsområdenas lerhalter snarare än till åkermarkens eller dikessedimentens fosforhalter. Fosforhalter i avrinnande vattnet från avrinningsområden med högre lerhalter var högre än motsvarande halter från avrinningsområden som domineras av lättare, sandiga jordar. Det bör noteras att detta skedde trots att åkermarkens P-AL-halter oftast var högre i de sistnämnda områdena. Därmed verkar mobiliserings- och transportprocesserna av fosfor och finare partiklar ha en större betydelse för fosforförluster från små avrinningsområden än markens halt av växttillgänglig fosfor (mätt som P-AL).

Fosforhalter i dikessediment är mycket varierande både mellan olika små områden, men även inom ett och samma område. Delar av ett dike kan agera som en sänka där fosfor bundet till partiklar sjunker till botten (sedimenterar), medan andra delar eroderar och därmed blir en källa till fosfor. Sedan nittioalet har forskare i Norge jobbat mot fosforförluster via ytaavrinning från sluttande fält med siltjordar, där de breddat och fördjupat små jordbruksdiken till en damm som ska sänka

vattnets hastighet och därmed få fosfor bunden till jordpartiklarna att sedimentera. Baserat på resultat från dessa fosfordammar i Norge (Braskerud 2002), kan markägare sedan januari 2010 söka investeringsstöd från Lantbruksprogrammet för anläggning av fosfordammar. Vid den tidpunkten fanns inga undersökningar av fosfordammar med svenska förhållanden. Fosfordammar är enligt norsk modell mindre (0,1-0,5 % av tillrinningsområdet) än våtmarker som ska avskilja kväve, som optimalt ska vara större (>1 %).

### 7.3.3 Fosfordammar

De två första fosfordammarna i Sverige anlades inom Uléns<sup>15</sup> projekt vid Bornsjön 2009 och vid Kilaån 2011 i Mälardalen för att undersöka om partiklar och fosfor kan fångas upp från svenska dränerade lerjordar. Fosfordammarna vid Bornsjön och Kilaån var små (0,3 % respektive 0,2 % av tillrinningsområdet) och lutningen på jordbruksfälten omkring 4 %. Dammarna utformades långsmala med en initial 1 m djup del, som följdes av ett grundområde (0,3-0,4 m) som planterades med vegetation. Fosfordammen vid Bornsjön grävdes bredvid dräneringskulverten under torra förhållanden i augusti, varefter vattnet släpptes på. Den andra fosfordammen vid Kilaån anlades genom att fördjupa och bredda dräneringsdiket, när vattnet flödade i oktober. En tidig vinter fick avbryta anläggandet som fortsattes på våren, men ytterligare omkonstruktion behövdes även under sommaren på grund av kraftiga flöden som förstörde utloppet. Den årliga fosforavskiljningen uppskattades med två oberoende mätmetoder: flödesproportionell vattenprovtagning vid fosfordammarnas inlopp och utlopp samt fosforackumulationen i sediment. Sedimentackumulationen jämfördes med sju existerande våtmarker med annan utformning.

Uléns<sup>15</sup> resultat visade att fosforackumulationen var högre i fosfordammarna, än i sex av de sju andra våtmarkerna. Det förekom även intern erosion i de nyanlagda dammarna och fortsatta långsiktiga studier behövs för att se om det är ett tillfälligt fenomen innan kanterna och botten stabiliserats. Vattenprovtagningen i fosfordammen vid Bornsjön visade också en högre fosforretention jämfört med andra våtmarker i södra Sverige. Retentionen var varaktig i minst fyra år (i medeltal 90 kg TP/ha och år), men hur länge avskiljningen fortsätter under de 20 år man ålägger sig att ha en våtmark eller fosfordamm är fortfarande oklart då det inte finns långsiktiga studier. De studier på våtmarker som finns är kortvariga och i många fall med bristfälliga mätmetoder (manuella stickprover). Uléns<sup>15</sup> resultat visade att fosforkoncentrationen varierar under några timmar, vilket demonstrerar vikten av flödesproportionell vattenprovtagning för uppskattning av fosforretentionen. Manuella stickprov varje månad är inte tillräckligt, då är sedimentprovtagning ett bättre alternativ.

I tre våtmarker som hade olika djupsektioner, var sedimentackumulationen högre i de djupa än de grunda delarna. Detta demonstrerar vikten av en djupdel, för fosforretention, som främjar sedimentering av partiklar. Fosforackumulationen var positivt korrelerad med våtmarkens längdbreddförhållande. Våtmarker som ska fånga fosfor bör därför vara långsmala och likt fosfordammar ha en initial djupdel.

Resultaten visar att våtmarker bör anläggas där fosforhalterna i inkommande vatten är höga, eftersom fosforavskiljningen per ytenhet ökade när fosforbelastningen till våtmarken ökade. Fosforackumulationen ökade även med den hydrauliska belastningen, upp till en viss brytpunkt där fosforavskiljningen verkar minska. Den hydrauliska belastningen (m/år), mängden vatten som våt-

marken mottar, är kopplad till våtmarkens relativa storlek i förhållande till avrinningsområdet (% av tillrinningsområdet). Projektet visade således att små våtmarker effektivt kan fånga fosfor, men om den hydrauliska belastningen överskrider 200-300 m per år så minskar effektiviteten. Våtmarkerna bör därför placeras högt upp i avrinningsområdet nära källan, så en mindre vattenmängd renas men med högre fosforkoncentration. Studien visade även att fosforavskiljningen i våtmarker är kopplad till avrinningsområdets faktorer och bör placeras vid sluttande fält, där lerhalten är hög och fosforklassen i marken är hög. Fosfordammar kan liksom kantzoner fånga upp ytvavrinningen från fälten, och även fosfor som läcker genom dräneringsvatten. Eftersom flera faktorer påverkar fosfordammarnas förmåga att fånga fosfor, gäller det att i största utsträckning se till att fosfordammens utformning, storlek och placering blir optimal för ett kostnadseffektivt åtgärdsarbete.

#### 7.3.4 Reaktiva filtermaterial

Fosfordammar har visats främst fånga partikelbunden fosfor och i mindre utsträckning löst fosfor. Ett sätt att fånga löst fosfor kan vara att i diken installera särskilda anordningar där vattnet filtreras genom fosforbindande material. Gemensamt för dessa typer av filtermaterial är att de har en porös struktur och därmed stor yta. Fosfor kan fällas ut från vattnet och sen fastna på filterpartiklarna. Allt eftersom mer och mer vatten filtreras sjunker materialens fosforbindande förmåga och till slut är det dags att byta filtermassa. Den kan sen tillgodogöras som gödningsmedel på åkermark.

Renmans<sup>16</sup> projekt testade lådformade konstruktioner med reaktiva material som bestod av kalciumsilikater; Sorbulite som är krossad lättbetong och Polonite som sedan tidigare används för fosforrening i små avloppsanläggningar. Ett filter med sex liter material testades på labb. Resultaten visade att 52 % fosfor avskiljdes i genomsnitt, när 14 000 L kranvatten med tillsatt fosfor pumpades igenom på ungefär en timme. Eftersom dikesvattnet ofta innehåller lerpartiklar som följer med från åkermarken, tillfördes en kemiskt ren kaolinlera för att göra vattnet grumligt. Efter att 7000 l vatten passerat genom filtret kunde det konstateras att fosforavskiljningen var under 50 %, det vill säga lerpartiklarna gjorde att filtermaterialet utmatades dubbelt så fort som utan lera. Vid fältförsök med liknade lådor fyllda med enbart Polonite placerade i diken i Vallentuna, kunde samma fenomen observeras, men god fosforavskiljning kunde uppnås i alla fall (68-86 %).

Ett filter med volymen 5 m<sup>3</sup> anlades efter fosfordammen vid Kilaån och ett delflöde av vattnet som passerat fosfordammen leddes in i filtret. Efter att 8 870 m<sup>3</sup> vatten behandlats kunde det konstateras att i genomsnitt endast 11 % av fosfor hade bundits. Om filtermaterialet bytts ut efter att hälften så mycket vatten runnit igenom så hade reningsgraden legat på cirka 60 %. Den genomsnittliga avskiljningen av fosfat varierade från 11 % till 86 % beroende på filtrets gångtid. Analyser med hjälp av röntgenspektroskopi (XANES) visade att fosfor var bunden i olika mineralfaser av kalciumfosfat. Den dominerande fasen hos Sorbulite var apatit (65-70 %), men också noterbara mängder av amorf kalciumfosfat (ACP), oktakalciumfosfat (OCP) och monetit hittades. Slutsatsen var att filtermaterialen Polonite och Sorbulite som testades, hade en effektiv förmåga att binda löst och partikulär fosfor som finns i relativt låga koncentrationer i avrinningsvatten. Fler undersökningar bör utföras innan lämpliga rekommendationer kan publiceras om hur dikesfilter ska utformas och vilka filtermaterial som kan vara lämpliga att använda.



### Slutsatser åtgärder längs vattenvägarna

- Skyddszonen med gräs minskade mängden ytavrinnande vatten och fosfortransporten.
- Effekten av att skörda kantzonen studeras i pågående projekt, likaså hur detta påverkar infiltrationen.
- Fosforhalter i dikessediment är oftast högre än de värden som vanligtvis mäts i prover från intilliggande åkermark.
- Fosforhalter i dikessediment är mycket varierande både mellan olika små områden, men även inom ett och samma område.
- Det går att få en betydande fosforretention i små fosfordammar, men retentionens varaktighet varierar och är omöjlig att fastställa utan långtidsmätning. Detsamma gäller för att kunna ge skötselråd.
- En djupdel främjar sedimentation av partiklar och fosfor.
- Fosforackumuleringen är positivt korrelerad till dammens längd-breddförhållande, därför bör våtmarker utformas långsmala.
- Små våtmarker kan effektivt fånga fosfor, men den hydrologiska belastningen får inte vara för hög (<200-300 m/år).
- Fosforavskiljningen ökade med ökad fosforkoncentration och belastning.
- Våtmarker bör placeras vid sluttande fält med erosionskänsliga ler- och mjälajordar och där fosforklassen i marken är hög.
- För att uppskatta fosforretentionen i våtmarker är inte manuella stickprov tillräckliga, utan sedimentprovtagning eller flödesproportionell provtagning behövs.
- Labbförsök visar att filtermaterialets livslängd halverades när vattnet innehöll lerpartiklar jämfört med utan partiklar.
- Filtermaterialen Polonite och Sorbulite, hade en effektiv förmåga att binda löst och partikulär fosfor som finns i relativt låga koncentrationer i avrinningsvatten. Den genomsnittliga avskiljningen av fosfat varierade från 11 % till 86 % beroende på filtrets gångetid.

### 7.4 Kvantifiering av källor och flödesvägar för fosfor

Ett viktigt första steg för att vidta rätt åtgärder mot fosforbelastning på vattenmiljö är att identifiera olika källors betydelse för fosforbelastningen i avrinningsområden, där ofta bidrag från jordbruk och enskilda avlopp är betydande, men svåra att kvantifiera.

Anderssons<sup>17</sup> projekt undersökte källor till fosfortransport och flödesvägar för vatten och fosfor i ett litet (7,3 km<sup>2</sup>) jordbruksdominerat område samt i ett större område (160 km<sup>2</sup>) i Östergötland, med nya metoder. En teknik var att undersöka hur "fingeravtryck" i form av innehåll av olika grundämnen i jord från olika delar av landskapet avspeglas i "fingeravtrycket" på suspenderade partiklar som lämnar avrinningsområdet. Vidare undersöktes hur fördelningen av syreisotopen i vatten varierar över tiden. Eftersom vatten med olika uppehållstid i marken har olika signatur kan det användas till att spåra vattnets (och därmed även fosfors) flödesvägar. Detta är viktig information för att bestämma vilka åtgärder som är lämpliga i ett visst avrinningsområde. Variationer i sammansättningen av syreisotopen i löst fosfat ( $\delta^{18}\text{OP}$ ) i vattendraget kan användas för att skilja mellan fosfor från jordbruksmark och fosfor från enskilda avlopp. Sammanfattningsvis visade resultaten att  $\delta^{18}\text{OP}$  kan vara ett användbart verktyg för att skilja mellan vissa källor till fosfat, till exempel var signalen från grundvatten och från utsläpp från enskilda avlopp distinkt olika. Signalen från fosfat i vatten från dräneringsbrunnar varierade påtagligt under året, sannolikt beroende på både tidpunkten för spridning av stallgödsel och ursköljning av löst fosfat i samband med avrinning från de övre jordlagren, från vilka isotopsignaturen kan förväntas vara påverkad av biologiska jämviktsprocesser. Det är därför svårt att på ett enkelt sätt använda denna metod för källfördelning på avrinningsområdesskala, särskilt i kraftigt dränerade områden med en betydande andel av avrinning genererat från de övre jordlagren. Studien visade ändå att analyser av tids- och rumsmässiga variationer av  $\delta^{18}\text{OP}$  potentiellt kan bidra till att öka förståelsen av kopplingen mellan vattnets flödesvägar och fosfatens rörelse i marken.

Dessutom analyserade Andersson<sup>17</sup> hur ökad användning av lokalt insamlad information, exempelvis kring fosforpooler i marken, samt kring hur jordbruk bedrivs, tillsammans med lokala meteorologiska data påverkar överensstämmelsen mellan uppmätta värden av vatten och närsalts-transport i vattendragen med den hydrologiska avrinningsområdesmodellen HYPE. Den nationella uppsättningen av vatten, kväve och fosfor i modellen HYPE bygger på regional parameterisering, som i vissa fall kompletteras med kalibrering för att förbättra överensstämmelse med uppmätta data. Användning av väderdata (nederbörd och temperatur) från en lokal meteorologisk station, som sattes upp specifikt för projektet, förbättrade överensstämmelsen mellan uppmätta och modellerade vattenflöden. Vid en påkoppling av en fosfor-modul ledde däremot användning av lokal information om gödsling med mineral- och stallgödsel, utsläpp från enskilda avlopp, samt markpooler av fosfor inte alls, eller i mycket begränsad omfattning, till bättre överensstämmelse mellan tidsserier av modellerade och uppmätta fosforkoncentrationer i vattendraget, jämfört med regionala data. En förbättrad överensstämmelse mellan simulerad och uppmätt fosfortransport berodde alltså enbart på bättre precision i vattenflödesmodellering och inte för fosforkoncentrationerna i vattnet.

Inom Anderssons<sup>17</sup> projekt undersöktes även om det går att särskilja bidragen av partiklar från olika delområden genom att jämföra sammansättningen av grundämnen i jordprover från områdena med grundämnena i suspenderade partiklar från avrinningsområdets utlopp. Testet av så kallade fingeravtryck i ett större avrinningsområde visade att det fanns signifikanta skillnader i signaturer mellan jordprover som representerade olika kombinationer av jord/markanvändning och prover tagna från åfåran ("streambank"). Det fanns dock så många möjliga modeller för hur dessa kunde kombineras för att motsvara samlingsprovet från suspenderade partiklar, att osäkerheten i att använda detta för källfördelning bedömdes vara stor, vilket innebär en begränsning i användning av metoden för källfördelning av integrerade sedimentprov i vattendraget.

#### **7.4.1 Organiska fosforformer som bidrar till övergödning**

Gödsel innehåller en stor andel organiska fosforformer, och i vilken form fosfor förekommer påverkar dess löslighet. En del organiska fosforformer binds exempelvis inte till jordpartiklar, medan andra gör det, vilket kan ha stor betydelse för hur stor risken för läckage är. Rydins<sup>5</sup> projekt har utvecklat kemiska analysmetoder för att extrahera och identifiera de organiska fosforföreningar som dominerar i jordbrukslandskapet och kvantifiera hur mycket av de organiska fosforformerna som finns i jord, sediment och gödsel. DNA, lipider och inositoler utgör en stor andel av den totala organiska fosforpoolen i de undersökta materialen. Genom att följa hur motståndskraftiga de tre formerna var mot nedbrytning i sjöars botten-sediment kunde deras bidrag till övergödningen av sjöar och hav bestämas. En form (inositoler) kan bindas hårt, medan de två andra formerna (DNA-P och fosfor bundet till lipider) är mer lättlösliga och kan föras bort via diken och vattendrag till sjöar och hav. I recipienten ackumuleras fosforföreningarna i bottensedimenten och komposteras i olika utsträckning, och allteftersom frigörs löst fosfor till vattnet och bidrar till övergödningen. Speciellt nedbrytningen av DNA i näringsrika sjöars sediment är en kvantitativt viktig del av övergödningmekanismen, då fosfor frigörs. Fosfor i inositoler ser däremot ut att bindas permanent i sjöars bottensediment och bidrar därmed inte till övergödningen. Med denna kunskap kan åtgärder riktas och bli mer verksamma; det blir mer kostnadseffektivt att hindra övergödning i recipienten genom att hitta områden med stor andel fosforformer som bryts ner (till exempel DNA-P) och driver övergödningen i sjöar och vattendrag och hindra att dessa frigörs.

Med den kunskapen kan man till exempel bedöma vilka gödseltyper som innehåller en större andel övergödningssdrivande fosfor än andra. Det kan i sin tur innebära att det finns anledning att se över var, när och hur olika gödselformer sprids. De skillnader i nedbrytbarhet som de olika organiska fosforformerna uppvisar har även betydelse för produktionen i jordbruket. Det organiska

fosforförrådet görs tillgängligt för växtupptag av andra faktorer än övrig fosfor i jorden. Med de utvecklade analysmetoderna finns nu möjligheten att följa hur de omsätts i marken och bidrar till produktionen på åkern.

#### Slutsatser källor

- Möjligheterna att använda syreisotopen i fosfat för att skilja på källor till fosforbelastning visade sig vara en framkomlig väg för att öka förståelsen av kopplingen mellan vattnets flödesvägar och fosfats rörelse i marken i små områden med korta uppehållstider i vattendraget. Tekniken verifierade bl.a. dominansen av avloppsvatten under sommarens lågflödesperioder.
- Genom att inkludera information om syreisotopens sammansättning i nederbörd och bäckvatten förbättras möjligheten till förståelse av koppling mellan fosfortransport och vattnets flödesvägar, vilket även ökar möjligheten till beslut om relevanta åtgärder.
- Användning av lokal meteorologisk information förbättrade vattenflödesberäkningarna i HYPE-modellen.
- Resultaten av modellering av fosforkoncentrationer förbättrades inte av att använda detaljerade lokala databaser istället för nationella databaser. Detta återspeglar att det snarare är komplexiteten i processerna än tillgång till lokal information som bidrar till den största osäkerheten i resultaten.
- Kombination av analyser från övervakningsprogram, modellering samt expertbedömningar, kombinerat med isotoptekniker för ökad förståelse av kopplingar mellan vattnets flödesvägar och ämnestransport rekommenderas som vägen framåt för lokal vattenförvaltning med syfte att nå mål kopplade till minskad transport av fosfor och andra näringsämnen.
- Fosfor i inositoler binds permanent i sjösediment, medan DNA-P bryts ner och kan frigöras från sedimenten och därmed bidra till internbelastning av sjöar.

#### 7.4.2 Identifiering av riskjordar för fosforförluster

Högre fosforstatus i marken innebär generellt en högre fosforfrigörelse, och ofta även högre fosforförluster från enskilda jordar (Heckrath m.fl. 1995; Sibbesen m.fl. 1997; Börling m.fl. 2004). Sambandets utseende varierar dock mellan olika jordar (Svanbäck m.fl. 2013). Den analysmetod som används i Sverige för att bestämma mängden växttillgänglig fosfor i marken är anpassad till de ofta sura skandinaviska jordarna och baseras på extraktion med surt (pH 3.75) ammoniumlaktat, P-AL (Egnér m.fl. 1960). För att få en bättre beskrivning av fosfors rörlighet bör även jordens sorptionskapacitet (PSC) och fosformättnadsgrad (DPS) beaktas (Hooda m.fl. 2000; Börling m.fl. 2004; Borggaard m.fl. 2004). Studier har visat på en koppling mellan förmågan att binda fosfor och förekomsten av olika järn- och aluminiumformer i marken för svenska jordar (Börling m.fl. 2001; Eriksson 2009), liksom förekomst av organiskt kol (C) (Börling m.fl. 2001) och lerhalt (Börling m.fl. 2004).

Blombäcks<sup>20</sup> projekt undersökte samband mellan fosforinnehållet i matjorden och löst fosfor som kan användas som indikator för risken för fosforläckage. I Blombäcks<sup>20</sup> projekt har fosforlösligheten undersökts för ett stort antal jordar (totalt 62 matjordsprover från 39 platser) för att täcka den stora variationen i markegenskaper som man har i svensk åkermark. Provplatserna valdes för att täcka in ett brett spektrum av svenska mineraljordar med avseende på framförallt innehåll av fosfor men också av Fe, Al, Ca, pH och lerhalt. För att undvika påverkan av nyligen gjord gödsling togs jordproverna minst 4, vanligen minst 6-8 månader efter att fosforgödsling skett. Matjordproverna togs till 20 cm djup. Fosfors löslighet i matjorden uppskattades genom att definiera statistiska samband mellan fosfor analyserad med olika extrakt (ammoniumlaktat, kalciumklorid, vatten, karbonatlösning/OLSEN, saltsyra och oxalat) och olika markparametrar som; järn-, aluminium- och kalciumförekomst, pH, organiskt material, textur, sorptionskapacitet (PSC) och

fosformättnadsgrad (DPS). Jordens fosforsorptionskapacitet (PSI) bestämdes genom analys eller genom beräkning utifrån markens järn- och aluminiuminnehåll. Fosformättnadsgraden beräknades från de kemiska parametrarna.

Blombäcks<sup>20</sup> resultat visade att sambandet mellan fosforlöslighet och fosformättnadsgrad beräknad från den svenska standardanalysen (AL-extraherbart fosfor, järn och aluminium) var mycket god för ett brett spann av jordar med avseende på textur och kemiska egenskaper. Resultaten kan användas för att utveckla ett riskindexverktyg och kan även användas som ett underlag vid utveckling av dynamiska simuleringsmodeller, så som ICECREAM. Beräkningar där både sorptionskapaciteten och fosformättnadsgraden togs i beaktande gav bäst resultat, men även en prediktion utifrån endast P-AL gav en god prediktion. Om även pH togs i beaktande ökade prediktionen något.

Någon variant av fosformättnadsgrad visade sig vara den bästa variabeln för att prediktera lösligheten för fosfor oavsett statistisk analysmetod. Det visar att inte bara mängden fosfor i matjorden är avgörande för risken för fosforläckage, utan även markens utrymme att kvarhålla fosfor.

Gustafssons<sup>19</sup> projekt studerade hur fosfat frigörs vid olika pH i tio svenska jordar med olika egenskaper, med processtudier genom laboratorieförsök och modellering. Gustafssons<sup>19</sup> resultat visade att svenska brukade jordar med >10 % ler i regel har ett bindningsmaximum för fosfat mellan pH 6 och 7, då fosfat alltså är som minst lösligt i jorden. Detta är tvärtom mot den "traditionella" föreställningen att fosfat är som mest lösligt vid neutralt pH. Simuleringar med en geokemisk jämviktsmodell antydde att fosfor i lerjordar till ganska stor del binder till hydroxy-Al-polymerer eller till någon annan aluminiumfas, som är instabila då pH sänks. Detta medför att fosfor till viss del blir lösligt då pH sänks under 6. Undantaget

är kalkinnehållande jordar, där bindningsmaximumet för fosforinbindning ligger ännu högre, beroende på att en del fosfor där förekommer som reaktiv apatit. Den reaktiva apatiten börjar lösas upp då pH sänks under cirka 7,5. Jordar med låg lerhalt hade däremot en ökad löslighet av fosfor som en funktion av högre pH (åtminstone då  $\text{pH} > 5$ ), vilket stämmer bättre med den traditionella bilden. Det visade sig vidare att pH-beroendet för inbindningen av fosfat förändras något efter tillsatser av fosfor, så att det flackas ut, d.v.s. lösligheten av fosfat blir mindre beroende av pH. En praktisk innebörd av projektet är att då lerjordars pH-värden i matjorden sjunker under 6 ökar fosforns löslighet. Detta kan öka fosforns tillgänglighet vilket i sig faktiskt kan ha en del positiva effekter för grödorna, men för jordar med hög P-klass innebär det också att risken för utläckage kan öka något, vilket kan tillföra ett argument för kalkning. Resultaten kan i princip användas för att vidareutveckla nuvarande riskindexverktyg så att de även får potential att förutsäga effekter av olika brukningsåtgärder, men ytterligare kunskap behövs om de fosforformer som ackumuleras, särskilt i gödslade jordar. Projektets resultat gav upphov till ett nytt doktorandprojekt finansierat av Formas, där Ann Kristin Eriksson arbetat vidare med dessa aspekter bland annat med hjälp av XANES-spektroskopi. Hennes studier har bekräftat att aluminiumhydroxid och liknande partikelytor är de kanske mest betydelsefulla sänkorna för fosfor i lerjordar efter gödsling (Eriksson m.fl. 2015). Resultaten, särskilt när det gäller fosforlöslighetens pH-beroende, kan dessutom användas för att förbättra existerande belastningsmodeller som ICECREAM där det finns ett stort behov av erfarenheter från markkemiska studier med svenska jordar och under de förhållanden som råder i Sverige.



De flesta mätningarna av fosforinnehåll och sorptionskapacitet har gjorts på matjordar. Trots att många studier har poängterat vikten av alven för fosforläckage, så har få försökt kvantifiera dess effekt som källa eller sänka för fosfor. Bergströms<sup>21</sup> studie undersökte påverkan av fosforinnehåll och fosforsorption i matjord och alv på fosforläckage för fyra olika sydsvenska typjordar, två lerjordar och två sandjordar, med olika egenskaper att fungera som källa eller sänka för fosfor. Lerjordarna var Lanna med välstrukturerad alv, relativt högt pH och lågt fosforinnehåll och Bornsjön med svagt strukturerad alv med lågt pH och lågt fosforinnehåll i såväl matjord som alv. Sandjordarna var Mellby med järnutfällning i alven och Nantuna med högt fosforinnehåll och utan järnutfällning eller kalciumkarbonat. Ostörda jordkolonner (cirka 1 m djupa) i kombinationer med och utan matjord placerades i en lysimeteranläggning, där avrinning och läckage av olika fosforfraktioner mättes under 32 månader. Lysimeterstudierna visade att alven kunde tjäna både som källa och sänka till fosforläckaget och att graden av fosformättnad och fosforstatus mätt med Olsen-P fungerade bra som indikatorer på detta läckage.

### Slutsatser riskjordar

- Den svenska standardanalysen av P-AL kunde antingen själv eller, ännu hellre, tillsammans med Al-AL och Fe-AL användas för att uppskatta mängden löst fosfor i marklösningen med gott resultat. Det här är lovande för möjligheten att ta fram ett verktyg som kan användas för att bedöma olika jordars känslighet för läckage av löst fosfor.
- Eftersom fosformättnadsgraden beräknad utifrån P-AL, Al-AL och Fe-AL fungerade bra, bör även bestämning av Al och Fe ingå i standardkarteringen med AL-analys så att denna variabel kan beräknas för varje karterat fält.
- I Sverige finns redan god tillgång till data på P-AL, men även Al-AL och Fe-AL. Med detta dataunderlag som bas bör de statistiska samband för uppskattning av fosfors löslighet i marken som denna studie presenterat testas i större omfattning och också jämföras med mätningar av fosforläckage, för att testa möjligheten att utveckla ett effektivt och tillförlitligt riskindexverktyg.
- P-AL fungerade inte alltid som indikator på läckaget eftersom metoden överskattar den lätt desorberbara fosfor vid höga pH. I övriga fall, har P-AL värdet i matjorden visats ge en bra indikation på fosfors potentiella löslighet.
- Att enbart titta på matjordens egenskaper är otillräckligt för att fullt ut förstå fosforläckaget från olika jordbruksjordar. För att kunna genomföra rätt motåtgärder för att minska fosforutlakningen är det nödvändigt att ha kunskap om alvens kemiska och fysikaliska egenskaper och hur vattnet rör sig genom marken.
- Alvjordar med dålig förmåga att binda fosfor utgör en risk för fosforläckage. På dessa jordar har matjordens fosforfrigörelse, gödsling och andra jordbruksåtgärder en särskilt viktig effekt på fosforutlakningen.
- För platser där jorden i alven har stor förmåga att binda fosfor är effekten av odlingsåtgärder för att minska fosforutlakningen mindre tydlig.
- Svenska brukade jordar med >10 % ler har i regel ett bindningsmaximum för fosfat mellan pH 6 och 7, då fosfat alltså är som minst lösligt i jorden.
- I lerjordar löses fosfor när pH sänks under 6, eftersom fosfor till ganska stor del binder till hydroxy-Al-polymerer eller till någon annan aluminiumfas i leran som är instabila vid lägre pH.
- För jordar med lägre lerhalt (<10 %) ligger detta bindningsmaximum under pH 5, vilket i praktiken innebär att ett högre pH alltid ger en högre löslighet av fosfor.
- pH-beroendet för inbindningen av fosfat förändras något vid tillsatser av fosfor, så att det flackas ut, det vill säga upplösningen av fosfat blir mindre beroende av pH.

#### 7.4.2 Identifiering av kritiska källområden och transportvägar för fosfor

Diffusa förluster av fosfor från jordbruket är en viktig källa till fosforbelastningen på vattenmiljön, men förlusterna från jordbruksmarken är inte alls jämnt fördelade utan uppvisar stor variation både i tid och rum. Särskilt för fosfor, har markens och landskapets egenskaper stor betydelse för hur stora förlusterna blir. Att identifiera källområdena för fosforförluster i landskapet är en viktig förutsättning för att veta var åtgärder bör sättas in för att få önskvärd effekt. För kartläggning av riskområden för fosforläckage är modeller och kartverktyg viktiga metoder. Beroende på vilken metod man använder är upplösningen en viktig faktor som kan göra att resultatet blir olika, och det gäller att hitta en lämplig skala att arbeta i för att hitta just var åtgärder verkligen gör den bästa nyttan. För låg upplösning ökar risken att missa områden där förlusterna är stora, och där åtgärder skulle kunna göra stor nytta om de sattes in. En för hög upplösning innebär å andra sidan behov av mer omfattande beräkningar, eftersom datamängden blir betydligt större samtidigt som resultatet kan bli plottrigt och svårtolkat. Det är alltså viktigt att hitta en lagom bra upplösning på ytmodellerna för att fosformodellerna ska ge optimalt resultat.

Bergströms<sup>22</sup> projekt handlade om att identifiera små hydrologiskt aktiva källområden i landskapet, vilka möjliggör snabb transport av fosfor till ytvatten. I projektet utvecklades och användes en hydrologisk modell till vilken en enkel fosformodell är kopplad. Modellen simulerade i det här fallet fosforförluster från ett 700 ha stort avrinningsområde i Västergötland och användes för att identifiera riskområden för höga förluster i områ-

det, samt kvantifierade effekterna av olika motåtgärder på enskilda fält. I detta projekt har modellen försetts med högupplösta markdata som tagits fram genom mätningar med proximala sensorer (cirka 1 000 mätpunkter/ha). Modellresultaten har jämförts med synoptiska mätningar av fosforhalter i avrinnande vatten. En god överensstämmelse mellan simulerad och uppmätt vattenföring uppnåddes. Däremot var överensstämmelsen mellan simulerad och uppmätt fosforhalt mindre bra, vilket till stor del beror på att modellen brister vad gäller att beskriva fosfors dynamik i marken.

Tre stora riskfaktorer som har stor inverkan på fosforförluster är: erosion, ytavrinning och dålig infiltration. Eftersom erosion och ytavrinning är större i områden med högre lutning har höjdmodeller en stor betydelse för identifiering av riskområden för fosforförluster. Lantmäteriets äldre höjdmodell hade en upplösning på 50 x 50 m, medan den nya nationella höjdmodellen (NNH) har en upplösning på 2x2 m.

I Rydbergs<sup>23</sup> projekt skapades högupplösta digitala ytmodeller över ett avrinningsområde med hjälp av ett obemannat flygplanssystem, ett så kallat Unmanned Aircraft System (UAS) som flögs på 250 m höjd och utvärderat deras lämplighet att användas i olika modeller för att beräkna fosforförluster. Systemet tog flygbilder, platsbestämda med GPS, och bästa möjliga upplösning i x-y-led på ytmodell (i detta fall 1x1 m) användes för att räkna fram två ytterligare ytmodeller med lägre upplösningar. Dessa upplösningar valdes för att motsvara Lantmäteriets äldre och nya höjdmodell. Vid tidpunkten för projektstart (2009) var den idag tillgängliga nationella höjddatabasen (NNH) bara i planeringsstadiet och enda nationellt tillgängliga

höjddata då var lantmäteriets höjddatabas med en x-y-upplösning på 50x50 m. Fem olika modeller användes för att kartlägga tre riskfaktorer: WATEM och USPED för modellering av risker för erosion, USLE2D och FLOW ACC för ytavrinning samt TWI för risk för stående vatten i fälten. Lantbrukarnas egna observationer på delar av fält och skiften användes för verifiering av modelleringsresultatet. Rydbergs<sup>23</sup> resultat visade att ytmodeller med en upplösning av 1x1 m och 2x2 m, pekar ut i stort sett samma riskområden för fosforförluster via ytavrinning och erosion. Det styrker att den rikstäckande NNH är fullt tillräckligt och ett bra tillskott som dataunderlag till fosformodellering. Kartorna med riskberäkningarna från dessa data är detaljerade och kan vara ett bra underlag till konkreta diskussioner med lantbrukarna kring lokalanpassade åtgärder. Upplösningen på 50x50 m kunde däremot inte användas för fältspecifika åtgärder. Denna studie identifierade generellt större områden som riskområden jämfört med lantbrukarnas egna bedömningar. Tillämpningar av verktyg och modeller som användes här bör kunna leda till säkrare gränsdragningar för riskområden och kan användas för att prioritera de delar av ett avrinningsområde där det är mest angeläget att sätta in åtgärder för att minska fosforförluster. Den typ av data som togs fram inom ramen för detta projekt kan även vara av intresse för lantbruk och miljöarbete i andra sammanhang. Digitala ytmodeller skulle kunna användas för att skapa bättre beslutsstödsmodeller för exempelvis gödsling på fältnivå eller för att bestämma bästa placering för anläggning av nya våtmarker och fosfordammar.

De simuleringsmodeller som utvecklats och använts i projektet är dels en modell (USPED) som beräknar rumslig fördelning av erosion och en modell (SWE) för att kunna förutsäga vattenavrinning och fosforförluster från avrinningsområdet. Den senare kan dessutom användas till att beskriva och kvantifiera effekterna av olika motåtgärder på fosforförlusterna. Hittills gjorda simuleringar med SWE-modellen, med indata från området i Västergötland, var i samma storleksordning som de observerade fosforförlusterna, sett över hela perioden på 5 år. Om man tittar på vattensimuleringarna separat ser man en mycket bra överensstämmelse med observerad vattenföring, men däremot betydligt sämre överensstämmelse mellan simulerade och uppmätta fosforhalter i avrinnande vatten. Den huvudsakliga anledningen till detta är en undermålig beskrivning av fosfordynamiken i modellen, som därmed skulle behöva förbättras. I detta fall användes en förenklad fosformodell för att framförallt begränsa behov för detaljerad indata. Det kräver dock att vi har tillgång till mycket detaljerad och ändamålsenlig indata som underlag för modellutveckling, vilket vi haft i det här projektet. Förhoppningen är att vi med de förutsättningarna når ända fram inom en snar framtid.

En stor del, minst hälften, av transporten av fosfor sker i bunden form, genom transport av jordpartiklarna och till dem bunden fosfor. Jordarnas sårbarhet mot erosion visar stora variationer och är därför en viktig faktor både för riskbedömningen och för genomförande av motåtgärderna. I Djodjics<sup>24</sup> projekt studerades ett enkelt jorddispersionstest, DESPRAL, som en indikator på

jordarnas erosionsbenägenhet och transport av partikulärt fosfor. Djodjics<sup>24</sup> resultat visade att DESPRAL kan rangordna erosionsbenägenhet av svenska jordar. Samtidigt kan mätningarna av fosforhalter i samma extrakt illustrera jordens sårbarhet mot förluster av både partikulärt och löst fosfor. Det är viktigt att betona att DESPRAL illustrerar mobiliseringen av jordmaterialet och fosforfraktionerna. Den efterföljande transporten måste också tas hänsyn till i dräneringssystem, fält- och avrinningsområdesskala, vilket underlättas med den tillgängliga högupplösta höjddata-modellen.

#### Slutsatser kritiska källområden

- Ytmodellerna identifierade generellt större områden som riskområden jämfört med lantbrukarnas egna bedömningar.
- Tillämpningar av verktyg och modeller som användes i Rydbergs projekt bör kunna leda till säkrare gränsdragningar för riskområden och kan användas för att prioritera de delar av ett avrinningsområde där det är mest angeläget att sätta in åtgärder för att minska yterrosion.
- Den typ av data som togs fram inom ramen för Rydbergs projekt kan även vara av intresse för lantbruk och miljöarbete i andra sammanhang. Digitala ytmodeller skulle kunna användas för att skapa bättre beslutsstödsmodeller för odlingsåtgärder eller för att bestämma bästa placering för exempelvis kantzoner.
- Kvantifieringen av jordarnas erosionsbenägenhet är en viktig del av riskbedömningen, eftersom jordarnas sårbarhet mot erosion uppvisar stora variationer. På gårdsskala kan man utifrån jordartskartan göra ett urval av jordprover för att bedöma jordarnas sårbarhet mot erosion.
- DESPRAL är en enkel metod att rangordna jordar med avseende på deras sårbarhet mot erosion. Detta test bör vara lätt att standardisera och därmed lätt att utföra i de flesta jordanalyslaboratorierna i Sverige.
- Kompletterande analyser av lösta och bundna fosforformer i samma DESPRAL-test kan också illustrera sårbarhet mot förluster av olika fosforformer, men här finns ännu en osäkerhet genom att torkning av proverna kan påverka resultaten.
- I ett större perspektiv, på gårds- eller avrinningsområdesskala, kan resultat från DESPRAL kombineras med bedömningen av fältens hydrologiska konnektivitet (topografiskt avstånd till dike, vattendrag eller sjö) och således effektivt rangordna enskilda fälts sårbarhet mot fosforförluster via ytavrinningen.
- Ett sådant systematiskt tillvägagångssätt rustar lantbrukaren med kunskap och verktyg för att bättre fokusera åtgärdsarbetet och samtidigt få högre effekter av de tillämpade åtgärderna.
- När man lägger ut motåtgärder i ett avrinningsområde måste man ta hänsyn till den spatiella variabiliteten i fin skala.
- Åtgärderna måste orsaks- och platsanpassas.
- Mer kunskap om fosfordynamik i marken behövs för att kunna prediktera fosforförluster på ett tillförlitligt sätt.





## Informationsspridning inom forskningsprogrammet

### 8.1 Avhandlingar

**Andersson H.**

The importance of subsoil properties for phosphorus leaching and the selection of effective mitigation strategies. Avhandlingen försvaras februari 2016.

**Eriksson A.K.**

Phosphorus speciation in Swedish agricultural clay soils – influence of fertilization and mineralogy. Avhandlingen försvaras mars 2016.

**Johannesson K.**

2015. Particulate phosphorus accumulation and net retention in constructed wetlands receiving agricultural runoff – critical analysis of factors affecting retention estimates. Linköping Studies in Science and Technology Dissertation No 1648.

**Kynkäänniemi P.**

2014. Small wetlands designed for phosphorus retention in Swedish agricultural areas – Efficiency variations during the first years after construction. Doktorsavhandling. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet, Acta Universitatis agriculturae Sueciae, 1652-6880; 2014:70.

**Liu J.**

2013. Phosphorus leaching as influenced by animal manure and catch crops. Doktorsavhandling. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet, Acta Universitatis agriculturae Sueciae, 1652-6880 ; 2013:55.

**Milver A.**

2014. Spatial and temporal dynamics of nutrients in two agricultural catchments in Southeast Sweden. Licenciatavhandling. Institutionen för Geovetenskaper, Göteborgs universitet.

**Nordqvist M.**

2012. Assessing phosphorus overfeeding in dairy cows. Licenciatavhandling rapport 279. Institutionen för husdjurens utfodring och vård, Sveriges lantbruksuniversitet.

**Paraskova J.V.**

2014. Organic phosphorus speciation in environmental samples – Methods development and applications. Doktorsavhandling. Uppsala: Uppsala Universitet, Acta Universitatis Upsaliensis Uppsala 2014:57.

**Parvage M.M.**

2015. Impact of horse-keeping on phosphorus (P) concentrations in soil and water. Doktorsavhandling. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet, Acta Universitatis agriculturae Sueciae, 1652-6880; 2015:55.

**Svanbäck A.**

2014. Mitigation of phosphorus leaching from agricultural soils.  
Doktorsavhandling. Uppsala: Sveriges lantbruksuniv.,  
Acta Universitatis agriculturae Sueciae, 1652-6880; 2014:36.

**Villa Solis A.**

2014. Risk Assessment of Erosion and Losses of Particulate Phosphorus.  
A series of studies at laboratory, field and catchment scales.  
Doktorsavhandling. Uppsala: Sveriges Lantbruksuniv. Acta Universitatis  
agriculturae Sueciae, 1652-6880; 2014:64.

**Ögren, G.**

2013. Phosphorus to horses and cows. Licentiatavhandling.  
Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för husdjurens  
utfodring och vård, 0347-9838 ; 283.

## 8.2 Vetenskapliga artiklar

**Andersson H., Bergström L., Ulén B., Djodjic F. & Kirchmann H.**

2013. Topsoil and subsoil properties influence phosphorus leaching from four  
agricultural soils. *Journal of Environmental Water Quality* 42:455-463.

**Andersson H., Bergström L., Djodjic F., Ulén B. & Kirchmann H.**

2015. The role of subsoil as a source or sink for phosphorus leaching.  
*Journal of Environmental Water Quality* 44:535-544.

**Aronsson H., Liu J., Ekre E., Torstensson G. & Salomon E. 2014.**

Effects of pig and dairy slurry application on N and P leaching from crop  
rotations with spring cereals and forage leys. *Nutrient cycling in  
Agroecosystems* 98: 281-293

**Bergström L., Kirchmann H., Djodjic F., Kyllmar K., Ulén B.,  
Liu J., Andersson H., Aronsson H., Börjesson G., Kynkäänniemi P.,  
Svanbäck A. & Villa A.**

2015. Turnover and losses of phosphorus in Swedish agricultural soils:  
long-term changes, leaching trends, and mitigation measures.  
*Journal of Environmental Quality* 44: 512-523.

**Djodjic F. & Villa A.**

2015. Distributed, high-resolution modelling of critical source areas for  
erosion and phosphorus losses. *AMBIO* 44: 241-251.

**Djodjic F., Ahlgren J., Kyllmar K. and Wallin M.**

Comparison of nutrient content in soils, ditch sediment and water in small  
Swedish agricultural catchments. (manuskript).

**Eriksson A.K., Ulén B., Berzina L., Iital A., Janssons V.,  
Silsika A.S. & Toomsoo A.**

2013. Phosphorus in agricultural soils around the Baltic Sea – comparison of  
laboratory methods as indices for phosphorus leaching to waters.  
*Soil Use and Management* 29: 5-14.

**Eriksson A.K., Gustafsson J.P. & Hesterberg D.**

2015. Phosphorus speciation of clay fractions from long-term fertility  
experiments in Sweden. *Geoderma* 241-242, 68-74.

- Gustafsson J.P., Mwamila L.B. & Kergoat K.**  
2012. The pH dependence of phosphate sorption and desorption in Swedish agricultural soils. *Geoderma* 189-190:304-311.
- Joel A., Wesström I., Strock J. & Messing I.**  
2012. Method for in situ measurements of water, sediment and phosphorous transport in the upper soil profile. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B - Soil and Plant Science* 62: 252-259.
- Johannesson K.M., Kynkäänniemi P., Ulén B. Weisner S.E.B. & Tonderski K.S.**  
2014. Phosphorus and particle retention in constructed wetlands – A catchment comparison. *Ecological Engineering* 80: 20-31.
- Johannesson K.M., Lindström G., Heeb A., Milver A., Rönnberg R., Tonderski K.S. & Andersson L.**  
Can spatial and temporal nutrient concentration variability be captured by catchment agro-geographical characteristics and water quality modelling? (inskickat till *Journal of Environmental Quality*).
- Kynkäänniemi P., Ulén B., Torstensson G., Tonderski K.S.**  
2013. Phosphorus retention in a constructed wetlands receiving agricultural drain water. *Journal of Environmental Quality* 42, 596-605.
- Kynkäänniemi P., Johannesson K.M., Ulén B. & Tonderski K.**  
2015. Assessment of particle deposition and accumulation in newly constructed wetlands receiving agricultural runoff. (manuskript i avhandlingen).
- Liu J., Aronsson H., Bergström L. & Sharpley A.**  
2012. Phosphorus leaching from loamy sand and clay loam topsoils after application of pig slurry. *SpringerPlus* 1:53.
- Liu J., Aronsson H., Blombäck K., Persson K. & Bergström L.**  
2012. Long-term measurements and model simulations of phosphorus leaching from a manured sandy soil. *Journal of Soil and Water Conservation* 67:101-110.
- Liu J., Aronsson H., Ulén B., Bergström L.**  
2012. Potential phosphorus leaching from sandy topsoils with different fertilizer histories before and after application of pig slurry. *SoilUse and Management* 28: 457-467.
- Liu J., Khalaf R., Ulén B., Bergkvist G.**  
2013. Potential phosphorus release from catch crops shoots and roots after freezing-thawing. *Plant and Soil* 371: 543-557.
- Liu J., Ulén B., Bergkvist G. & Aronsson H.**  
2014. Freezing-thawing effects on phosphorus leaching from catch crops. *Nutrient Cycling in Agroecosystem* 99: 17-30.
- Liu J., Bergkvist G. & Ulén B.**  
2015. Biomass production and phosphorus retention by catch crops on clayey soils in southern and central Sweden. *Field Crops Research* 171: 130-137.

**Messing I., Wesström I., Joel A. & Strock J.**

2015. In situ method for measuring water fluxes, sediment and phosphorus at high drip infiltrometer intensities in the upper half meter of a tilled clay soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 46: 2139-2151.

**Messing I., Joel A., Wesström I. & Strock J.**

2015. Influence of higher rain intensities on phosphorus movements in the upper half meter of macroporous clay soil. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science* 65: 93-99.

**Milver A., Andersson L., Johannesson K., Lindström G., Rönnberg R. & Tonderski K.S.**

Links between catchment characteristics, flow dynamics and nutrient transport in an agricultural catchment what do we measure and what do we model? (manuskript i lic-avhandling).

**Milver A., Andersson L., Rönnberg R., Johannesson K., Lindström G. & Tonderski K.S.**

Will high resolution information in time and space improve modelling of water and phosphorus flow from a small agricultural catchment? (manuskript i lic-avhandling)

**Mogodiniyai Kasmaei K. & Holtenius K.**

2013. Phosphorus metabolism of dairy cows subjected to abomasal infusion of inorganic phosphorus. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* doi: 10.1111/j.1439-0396.2012.01282.x.

**Nordqvist M., Holtenius K., Spörndly R.**

2014. Methods for assessing phosphorus overfeeding on organic and conventional dairy farms. *ANIMAL* 8: 286-292.

**Nordqvist, M., Spörndly R., Holtenius K.**

2015. Faecal excretion of total and acid extractable phosphorus in dairy cows fed rations with different levels of phosphorus. *Science of Food and Agriculture* wileyonlinelibrary.com DOI 10.1002/jsfa.7235

**Paraskova J, Rydin, E & Sjöberg, P.**

2013. Extraction and quantification of phosphorus derived from DNA and lipids in environmental samples. *Talanta* 115:336–341.

**Paraskova J, Sjöberg, P & Rydin, E.**

2014 Turnover of DNA-P and phospholipid-P in lake sediments. *Biogeochemistry* 119: 361-370

**Paraskova J, Jørgensen, C; Reitzel, K; Pettersson, J; Rydin, E & Sjöberg, P.**

2015. Speciation of inositol phosphates in lake sediments by ion-exchange chromatography coupled with mass spectrometry, ICP-AES and <sup>31</sup>P NMR spectroscopy. *Analytical chemistry* 87:2672-7

**Parvage M.M., Kirchmann H., Kynkäänniemi P. & Ulén B.**

2011. Impact of horse grazing and feeding on phosphorus concentrations in soil and drainage water. *Soil Use and Management* 27: 367-375.



- Parvage M.M., Ulén B., Eriksson J., Strock J. & Kirchman H.**  
2013. Phosphorus availability in soils amended with wheat residue char. *Biology and Fertility of Soils* 49: 245-250.
- Parvage M.M., Ulén B. & Kirchmann H. 2013.**  
A survey of soil phosphorus (P) and nitrogen (N) in Swedish horse paddocks. *Agriculture Ecosystem and Environment* 178: 1-9.
- Parvage M.M., Ulén B. & Kirchmann H.**  
2015. Are horse paddocks threatening water quality through excess loading of nutrients? *Journal of Environmental Management* 147: 306-313.
- Parvage M.M., Ulén B. & Kirchmann H.**  
2015. Nutrient retention and leaching potential from three contrasting agricultural top soils in Sweden amended with composted horse manure. Accepted av Geoderma Regional.
- Parvage M.M., Ulén B. & Kirchmann H.**  
Wood chips, peat and wheat straw as manure phosphorus binding agent to reduce leaching losses from horse paddocks. (manuskript i avhandlingen).
- Schoumans O.F., Chardon W.J., Bechmann M.E., Gascuel-Odoux C., Hofman G., Kronvang B., Rubaek G.H., Ulén B. & Dorioz J-M.**  
2014. Mitigation Options to reduce phosphorus losses from the agricultural sector and improve surface water quality: A review. *Science of the Total Environment* 468-469: 1255-1266.
- Stenberg M., Ulén B., Söderström M., Roland B., Delin K. & Helander C-A.**  
2012. Tile drain losses of nitrogen and phosphorus from fields under integrated and organic crop rotations. A four-year study on a clay soil in southwest Sweden. *Science of the Total Environment* 434: 79-89.
- Svanbäck A., Ulén B., Etana A., Bergström L., Kleinman P. J. A. & Mattsson, L.**  
2013. Influence of soil phosphorus and manure on phosphorus leaching in Swedish topsoils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 96: 133-147.
- Svanbäck A., Ulén B., Bergström L., Kleinman P.J.A.**  
2014. Long-term trends in phosphorus leaching with 'phytomining'. *Journal of Soil and Water Conservation* 70: 121-132.
- Svanbäck A., Ulén B. & Etana A.**  
2014. Mitigation of phosphorus leaching losses via subsurface drains from a cracking marine clay soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 184:124-134.
- Tonderski, K., S., Andersson, L., Rönnberg, R., Schönberg, R. & Taubald, H.**  
Using  $\delta^{18}\text{O}$  in phosphate as a tracer for catchment phosphorus sources – a hydrological perspective (manuskript).
- Ulén B., Djodjic F., Etana A., Johansson G. & Lindström J.**  
2011. The need for an improved risk index for phosphorus losses to waters from tile-drained arable land. *Journal of Hydrology* 400: 234-243.

**Ulén B., Alex G., Kreuger J., Svanbäck A. & Etana A.**

2012. Particle-facilitated leaching of glyphosate and phosphorus from a marine clay soil via tile drains. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil and Plant Science* 62: 241-51.

**Ulén B., Bechmann M., Øygarden L. & Kyllmar K.**

2012. Soil Erosion in Nordic countries – future challenges and research needs. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil and Plant Science* 62: 176-184.

**Ulén B., Etana A. & Lindström B.**

2012. Effects of aluminum water treatment residuals, used as a soil amendment to control phosphorus mobility in agricultural soils. *Water Science and Technology* 65: 1903-1911.

**Ulén B., von Brömssen C., Kyllmar K., Djodjic F., Stjernman Forsberg L. & Andersson S.,**

2012. Long-term temporal dynamics and trends of particle-bound phosphorus and nitrate in agricultural stream waters. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil and Plant Science* 62: 217-228.

**Ulén B., Eriksson A-K. & Etana A.**

2013. Nutrient leaching from clay soil monoliths with variable past manure inputs. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 176: 883-891.

**Ulén B & Etana A.**

2014. Phosphorus leaching from clay soils can be counteracted by structure liming. *Acta Agriculturae Scandinavica B, Soil and Plant Science* 64: 425-433.

**Ulén B., Larsbo M., Kreuger J. & Svanbäck A.**

2014. Spatial variation in herbicide leaching from a marine clay soil via subsurface drains. *Pest Management Science* 70: 405-414.

**Ulén B., Wesström I., Johansson G. & Stjernman Forsberg L.**

2014. Recession of phosphorus and nitrogen concentrations in tile drainage after high poultry manure applications in two consecutive years. *Agricultural Water Management* 146: 208-217.

**Villa A., Djodjic F. & Bergström L.**

2014. Soil dispersion tests combined with topographical information can describe field-scale sediment and phosphorus losses. *Soil Use and Management* 30: 342-350.

**Villa A., Djodjic F., Bergström L. & Wallin M.**

2012. Assessing soil erodibility and mobilization of phosphorus from Swedish clay soils – Comparison of two simple soil dispersion methods. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science* 62: 260-269.

**Villa A., Djodjic F., Bergström L. & Kyllmar K.**

2015. Screening risk areas for sediment and phosphorus losses to improve placement of mitigation measures. *Ambio* 44: 612-623.

**Ögren G., Holtenius K. & Jansson A.**

2013. Phosphorus balance and fecal losses in growing Standardbred horses in training fed forage-only diets. *Journal of Animal Science* 91:2749-55.

### 8.3 Bokkapitel

**Piikki K., Söderström M., Wetterlind J., Stenberg B.**

2013. Three layered soil maps based on sensor measurements.

In: Stafford J V (ed.). Precision Agriculture '13. Wageningen Academic Publishers. 33-40.

### 8.4 Rapporter

**Kynkäänniemi P. & Johannesson K.M.**

2012. Fånga fosfor – Dammar, filter och tvåstegsdiken. Hushållningssällskapet Östergötland. <http://hushallningssallskapet.se/wp-content/uploads/2014/10/fanga-fosfor-dammar-filter-och-tvastegsdiken.pdf>

**Mingot Soriano, A.M.**

2013. Estimating water and sediment transport through the soil at field and laboratory. Degree project in Environmental Science. Examensarbeten, Institutionen för mark och miljö, SLU. 2013:01. [http://stud.epsilon.slu.se/5202/1/mingot\\_a\\_130117.pdf](http://stud.epsilon.slu.se/5202/1/mingot_a_130117.pdf)

**Rydberg A., Djodjic F. & Adolfsson N.**

2014. Obemannat flygplanssystem för insamling av höjddata till fosformodeller. Rapport 424, Lantbruk & Industri. JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Uppsala.

**Rönnberg R.**

2012. Identifiering av fosfatförsörjnings käll- och flödesfördelning i ett litet jordbruksområde. Examensarbete, Institutionen för Geovetenskaper, luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala universitet. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:534571/FULLTEXT01.pdf>

**Sandin M.**

2012. Effects of simulated rainfall intensity on water flow through soil in two tillage systems. Master's Thesis in Soil Science, Agriculture Programme – Soil and Plant Sciences. Examensarbeten, Institutionen för mark och miljö, SLU. 2012:16. [http://stud.epsilon.slu.se/4970/1/sandin\\_m\\_121016.pdf](http://stud.epsilon.slu.se/4970/1/sandin_m_121016.pdf)

**Wesström I., Joel A. & Messing, I.**

2014. Effekter av jordbearbetningssystem på vatten-, sediment- och fosfortransport i övre delen av marken vid olika regnintensitet. Slutrapport SLF, Mark-/växtodling Projektnummer H0970242. 10 s.

### 8.5 Presentationer

**Djodjic F., Wallin M. & Kyllmar K.**

2011. Phosphorus content in drainage ditch sediments from four agricultural catchments in southern and central Sweden. Muntlig presentation. Catchment science 2011, Dublin, Irland.

**Djodjic F. Drainage**

Ditches – the forgotten link between agricultural fields and receiving water. Agriculture and water – in the light of climate change and eutrophication. Muntlig presentation. Conference organized by Swedish Agency for Marine and Water Management 2012, Göteborg.

**Etana A., Ulén B., Torstensson G., Lindström J. & Blomberg M.**  
Soil & solute transport through buffer strips: Field trial 2011-2015.  
Muntlig presentation. Regional växtodlings- och växtskyddskonferens 2015, Uddevalla, Sverige.

**Etana A., Ulén B., Torstensson G., Lindström J. & Blomberg M.**  
Jord- & fosfortransport i fält med skyddszoner. Muntlig presentation. "20th International Soil Tillage Research Organization (ISTRO) Conference 2015, Nanjing, Kina.

**Joel, A., Messing, I. & Wesström, I.**  
2011. Method for in situ measurements of water and sediment transport in the upper soil profile. In the proceedings of NJF seminar 444 "Soil erosion in the Nordic countries - Processes, mapping and mitigation", 2-4 November 2011, Oslo, Norway. [http://www.njf.nu/filebank/files/20111222\\$203933\\$fil\\$j4WV270p60I7TITa7j4T.pdf](http://www.njf.nu/filebank/files/20111222$203933$fil$j4WV270p60I7TITa7j4T.pdf)

**Johannesson K.M., Kynkäänniemi P., Ulén B. & Tonderski K.S.**  
2013. Poster. Phosphorus and particle retention in wetlands constructed on arable land – a catchment comparison. 7th International Phosphorus Workshop, IPW7 2013, Uppsala.

**Johannesson K.M., Kynkäänniemi P., Ulén B. & Tonderski K.S.**  
Phosphorus and particle retention in constructed wetlands – a catchment comparison. Muntlig presentation. WETPOL 2013, Nantes, Frankrike.

**Johannesson K.M. & Kynkäänniemi P.**  
Muntliga presentationer. Phosphorus retention in Swedish constructed wetlands. Constructed Wetlands Workshop 2011. Lancaster Environment Centre, UK.

**Kynkäänniemi P., Johannesson, K., Tonderski, K & Ulén, B.**  
Constructed wetland to mitigate P losses from hotspots in agricultural areas. Muntlig presentation. Novel methods for reducing agricultural nutrient loading and eutrophication 2010, Jokioinen, Finland.

**Kynkäänniemi P.**  
Våtmarker för minskning av P förluster i jordbruksområden. Muntlig presentation. Utbildningen av nya ersättningar inom utvald miljö 2010, Jordbruksverket, Södertälje.

**Kynkäänniemi P., Ulén B. & Parvage M.M.**  
Horse paddock as a hot spot for P leaching in a small Swedish catchment. Muntlig presentation. 6th International Phosphorus Workshop 2010, Sevilla, Spanien.

**Kynkäänniemi P., Johannesson K.M., Tonderski K.S. & Ulén B.**  
Constructed wetlands for mitigating P losses from hot-spots in agricultural areas. Muntlig presentation. 12th IWA International Conference, Wetland Systems for Water Pollution Control 2010, Venice, Italien.

**Kynkäänniemi P., Johannesson K.M., Tonderski K.S. & Ulén B.**

Constructed Wetland to mitigate P losses from a small Agricultural area in central Sweden. Muntlig presentation. Joint Meeting of Society of Wetland Scientists, Wetpol and Wetland Biochemistry Symposium 2011, Prague, Tjeckien.

**Kynkäänniemi P.**

Constructed Wetlands to mitigate P losses from small agricultural catchments. Muntlig presentation. Workshop inom projektet "Ecological Engineering for Sustainable Development (EcoSuD)" 2012, Warsaw Agricultural University, Poland.

**Kynkäänniemi P.**

Muntlig presentation. Två utbildningsdag Fånga Fosfor – Dammar, filter och tvåstegsdiken 2012, Hushållningssällskapet ÖG, SLU och Linköpings-universitet, Jönåker och Anderslöv.

**Kynkäänniemi P.**

Fosfordammar – så funkar dem. Muntlig presentation. Odlarträff Saltå Kvarn 2013, Järna.

**Kynkäänniemi P.**

Design and location of constructed wetlands for optimal phosphorus retention. Muntlig presentation. A Greener Agriculture for a Bluer Baltic Sea conference 2013, Helsingfors, Finland.

**Kynkäänniemi P., Johannesson K.M., Tonderski K.S. & Ulén B.**

Kort poster presentation. Phosphorus retention and particle resuspension in constructed wetlands – a method comparison. WETPOL 2013, Nantes, Frankrike.

**Kynkäänniemi P., Johannesson K.M., Tonderski K.S. & Ulén B. Poster.**

Phosphorus retention and particle resuspension in constructed wetlands – a method comparison. 7th International Phosphorus Workshop, IPW7 2013, Uppsala.

**Kynkäänniemi P.**

Sedimentationsdammar och filter för fosfor. Muntlig presentation. Workshop Maten och Havet 2014, SLU, Uppsala.

**Kynkäänniemi P.**

Sedimentationsdammar och filter för fosfor. Muntlig presentation & fältvandring. Kurs om fosfordammar 2015, Länsstyrelsen i Stockholms län, Ingarö.

**Milver A., Johannesson K., Rönnberg R., Lindström G., Heeb A., Tonderski K.S. & Andersson L.**

Poster. Catchment modelling in two agricultural catchments – do local indata improve modelling and what dynamic and spatial processes can be estimated by modelling? 7th International Phosphorus Workshop, IPW7 2013, Uppsala.

**Messing I., Joel A., Wesström I. & Strock J.**

2013. Influence of higher rain intensities on phosphorous movements in the upper 50 cm of macroporous heavy clay. In the proceedings of NJF seminar 462 "Does climate change demand a new approach to drainage design? 2013, Sarpsborg, Norge.



**Piikki K., Söderström M., Wetterlind J., Stenberg B.**

2013. Three layered soil maps based on sensor measurements.

Muntlig presentation. The European Conference on Precision Agriculture 2013, Lleida, Spanien.

**Ulén B.**

Fosforseminarium – hur analysera fosfor i mark för att styra odlingsåtgärder mot högre skörd och lägre läckage? 2011, SLU, Uppsala.

**Ögren G., Holtenius K. & Jansson A.**

2011. Urinary Phosphorus excretion in growing horses in training fed forage ad libitum and two levels of Phosphorus. Nordic Feed Conference, Uppsala Sweden.

**Ögren G., Holtenius K. & Jansson A.**

2012. Inorganic, soluble fecal phosphorus excretion in growing horses fed forage-only diets. European Workshop on Equine Nutrition, Lisbon, Portugal.

## 8.6 Greppa näringen notiser

<http://www.greppa.nu/arkiv/nyhetsarkiv/2012-03-09-minskat-naringslackage-fran-flera-observationsfalt.html>

<http://www.greppa.nu/arkiv/nyhetsarkiv/2012-05-25-nya-metoder-behovs-for-att-mata-effekter-av-atgarder.html>

<http://www.greppa.nu/arkiv/nyhetsarkiv/2012-06-01-lackage-av-glyfosat-minskar-med-strukturkalkning.html>

<http://www.greppa.nu/download/18.37e9ac46144f41921cd1a695/1402315665384/Mj%C3%B6lkor+f%C3%A5r+f%C3%B6r+mycket+fosfor-120621.pdf>

<http://www.greppa.nu/download/18.37e9ac46144f41921cd1968a/1402315642290/Bra+effekt++i+f%C3%B6rsta+svenska+fosfordamm-en-130312.pdf>

<http://www.greppa.nu/download/18.37e9ac46144f41921cd1a598/1402315662050/Fosfor+till+h%C3%A4star+%E2%80%93+risk+f%C3%B6r+utfodring+2013-09-18.pdf>

<http://www.greppa.nu/arkiv/nyhetsarkiv/2014-09-02-starkta-bevis-for-miljonyttan-med-strukturkalkning.html>

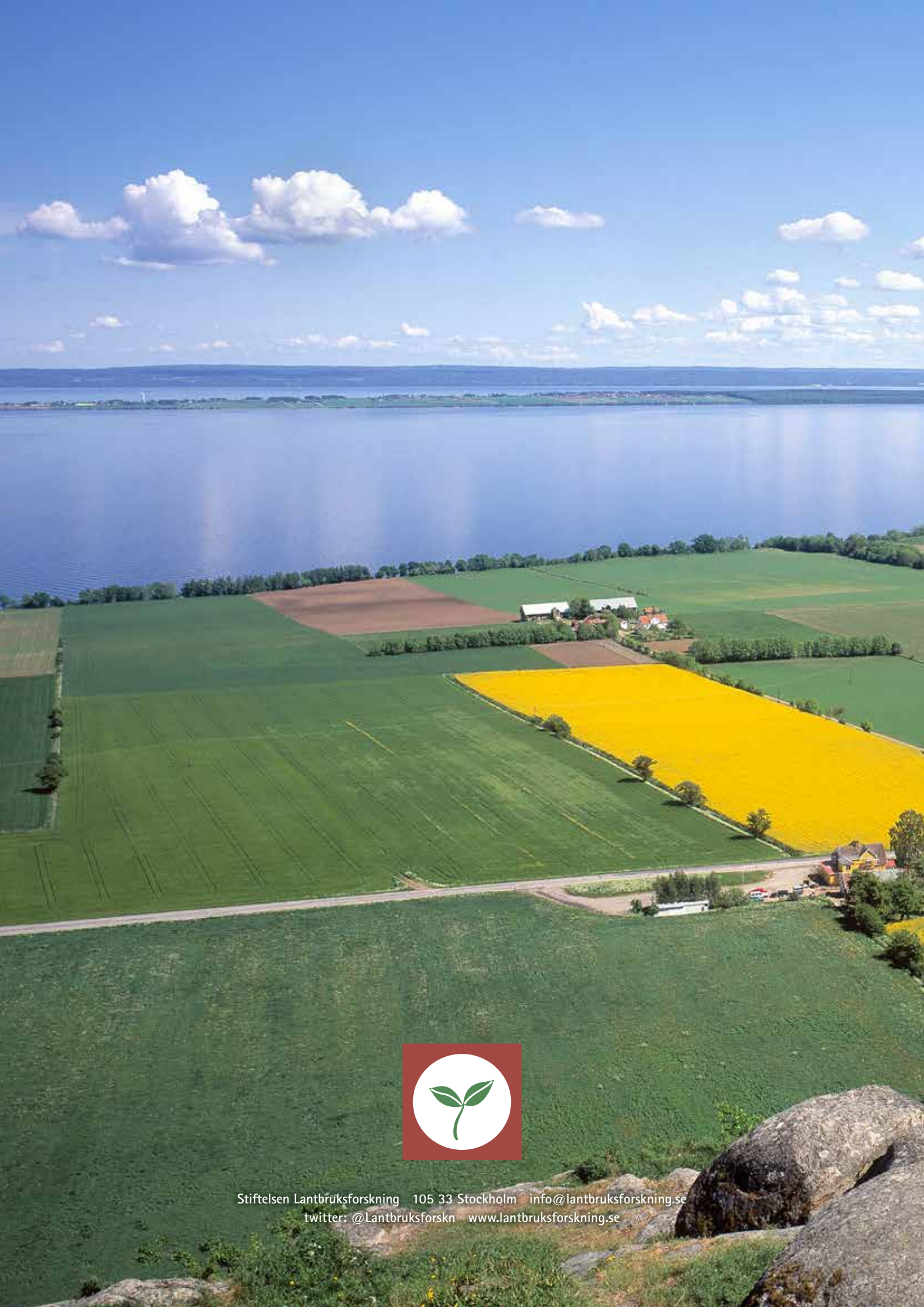
<http://www.greppa.nu/arkiv/nyhetsarkiv/2014-09-30-fosfordamm-ger-onskad-effekt.html>

<http://www.greppa.nu/arkiv/nyhetsarkiv/2015-03-31-vall-i-skyddszonen-minskade-utlakningen-av-fosfor.html>

<http://www.greppa.nu/arkiv/nyhetsarkiv/2015-03-24-undvik-hoga-engangsgivor-av-stallgodsel.html>

<http://www.greppa.nu/arkiv/nyhetsarkiv/2015-05-19-hasthagar-lacker-fosfor.html>





Stiftelsen Lantbruksforskning 105 33 Stockholm info@lantbruksforskning.se  
twitter: @Lantbruksforskning www.lantbruksforskning.se