

Bioforsk Rapport

Bioforsk Report

Vol. 7 Nr. 147 2012

Fosforgjødsling - betydning for fosforkonsentrasjon i jord og tap til vann

Anne Falk Øgaard, Annbjørg Øverli Kristoffersen, Rikard Pedersen

Bioforsk Jord og miljø og Bioforsk Øst

www.bioforsk.no



| |
|--|
| <i>Titel/Title:</i> Fosforgjødsling - betydning for fosforkonsentrasjon i jord og tap til vann |
| <i>Forfatter(e)/Author(s):</i> Anne Falk Øgaard, Annbjørg Øverli Kristoffersen og Rikard Pedersen |

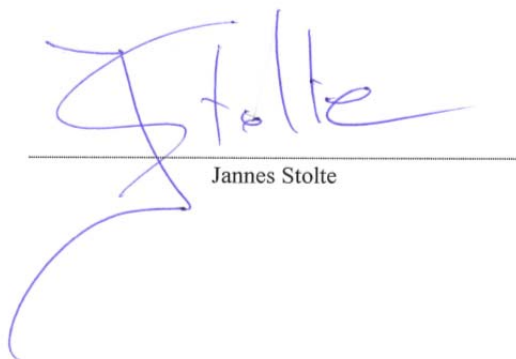
| | | | |
|---|---|--|---|
| <i>Dato/Date:</i> 01.12.2012 | <i>Tilgjengelighet/Availability:</i> Åpen | <i>Prosjekt nr./Project No.:</i> 8428 | <i>Saksnr./Archive No.:</i> |
| <i>Rapport nr./Report No.:</i> 7(147) 2012 | <i>ISBN-nr./ISBN-no:</i> 978-82-17-01002-9 | <i>Antall sider/Number of pages:</i> 47 | <i>Antall vedlegg/Number of appendices:</i> |

| | |
|--|---|
| <i>Oppdragsgiver/Employer:</i> Klif – Klima- og forurensningsdirektoratet | <i>Kontaktperson/Contact person:</i> Ingunn Lindeman |
|--|---|

| | |
|---|---|
| <i>Stikkord:</i> Fosfor, miljøtiltak, gjødsling, fosforavrenning | <i>Fagområde:</i> Miljøtiltak i landbruket |
|---|---|

| |
|--|
| <i>Sammendrag:</i> På oppdrag fra Klima- og forurensningsdirektoratet (Klif) er det utredet hvordan fosforgjødsling, påvirker fosforkonsentrasjonen i jord og fosfortapene fra dyrka jord under ulike jordforhold (P-AL, jordtype) og over tid. Utredningen bygger hovedsakelig på kunnskap fra Norge og Sverige, men resultater fra andre land er også trukket inn. Økt innhold av P-AL gir økt innhold av vannløselig fosfor i jorda og økt risiko for å tape fosfor. Sammenhengen mellom vannløselig fosfor og P-AL er avhengig av jordas bindingsegenskaper for fosfor. Reduksjon av unødvendig høye P-AL tall ved redusert fosforgjødsling er et langsiktig tiltak for reduserte fosfortap fra jordbruksarealer. |
|--|

Godkjent / Approved



Jannes Stolte

Prosjektleder / Project leader



Anne Falk Øgaard

Forord

Denne utredningen er gjennomført på oppdrag fra Klima- og forurensningsdirektoratet (Klif). Oppdraget var å utrede hvordan fosforgjødsling, påvirker fosfortapene fra dyrka jord under ulike forhold (P-AL, jordtype, annet), og over tid. Utredningen bygger hovedsakelig på kunnskap fra Norge og Sverige, men resultater fra andre land som kan belyse temaet er også trukket inn.

Oppdraget har også inkludert innhenting av nye data. Lagrede jordprøver fra flerårige fosforgjødslingsforsøk (gjennomført av Bioforsk Øst, Apelsvoll) har blitt analysert for vannløselig fosfor for å undersøke effekten av redusert fosforgjødsling på den lettest tilgjengelige fosforfraksjonen. Videre har jordprøver fra ulike dyp i jordprofiler på Jæren blitt analysert for fosfor for å undersøke om store tilførsler av husdyrgjødsel gir nedvasking av fosfor.

Anne Falk Øgaard har vært prosjektleder og har utført arbeidet i samarbeid med Rikard Pedersen og Annbjørg Øverli Kristoffersen.

Innhold

| | |
|--|----|
| Sammendrag | 7 |
| 1. Innledning | 8 |
| 2. Fosfor i jord..... | 9 |
| 3. Sammenhenger mellom fosforgjødsling, jordas fosforstatus og risiko for fosfortap | 10 |
| 3.1 Fordeling av gjødsel fosfor på ulike partikkelstørrelses-fraksjoner | 10 |
| 3.2 Sammenheng mellom fosforgjødsling og jordas P-AL tall..... | 11 |
| 3.3 Sammenheng mellom fosforgjødsling og jordas innhold av vannløselig fosfor | 12 |
| 3.4 Effekt av fosforgjødsling og P-AL i jord på fosfortap - noen norske resultater..... | 16 |
| 3.5 Sammenheng mellom jordbruksdrift og vannkvalitet i bekker - resultater fra Bioforsk program for jord- og vannovervåking (JOVA) | 18 |
| 3.6 Profilstudier i områder med svært høye P-AL tall | 20 |
| 4. Effekt av redusert fosforgjødsling..... | 27 |
| 4.1 Endring i jordas P-AL tall ved redusert fosforgjødsling | 27 |
| 4.1.1 Resultater fra norske forsøk | 28 |
| 4.1.2 Resultater fra svenske forsøk..... | 32 |
| 4.2 Endring i jordas innhold av vannløselig fosfor ved redusert gjødsling | 34 |
| 4.3 Effekt av redusert fosforgjødsling ved vestre Vansjø | 35 |
| 5. Potensialet for ytterligere målretting av generell gjødslingspraksis | 40 |
| 6. Konklusjon | 43 |
| 7. Referanser | 45 |

Sammendrag

På oppdrag fra Klima- og forurensningsdirektoratet (Klif) er det utredet hvordan fosforgjødsling påvirker fosfortapene fra dyrka jord under ulike jordforhold (konsentrasjon av plantetilgjengelig fosfor (P-AL) og jordtype) og over tid. Utredningen bygger hovedsakelig på kunnskap fra Norge og Sverige, men resultater fra andre land er også trukket inn. I tillegg har oppdraget inkludert innhenting av nye data for å undersøke endring av vannløselig fosfor ved redusert fosforgjødsling og nedvasking av fosfor på arealer som har mottatt store mengder husdyrgjødsel.

Fosfor i jorda er fordelt på en rekke ulike fraksjoner med ulik grad av bindingsstyrke. Fosfor bindes generelt sterkt i mineraljord, slik at bare anslagsvis 20-35 % av overskuddet i tilført fosfor gjenfinnes i P-AL fraksjonen. Ved overflateavrenning vil en del partikkelbundet fosforet frigjøres fra jordpartiklene. Frigjøringen av fosfor øker med økende P-AL. Graden av økning varierer mellom ulike jordtyper, avhengig av jordas fosforbindingsevne. Overskuddet av gjødsel fosfor konsentreres på de små partiklene. Dette har betydning for fosfortapene, fordi små partikler eroderes i større grad enn de større partiklene. Effekten av overskuddsgjødsling på fosfortapet med eroderte partikler blir derfor større enn det økningen av hele jordas fosforkonsentrasjon skulle tilsi.

Profilundersøkelsene på Jæren viser at i enkelte tilfeller kan store tilførsler av husdyrgjødsel over mange år gi en akkumulering av tilgjengelig fosfor også i undergrunnsjorda. Det var imidlertid stor variasjon, slik at det ikke var alle steder med høye P-AL tall i topplaget som viste indikasjoner på nedvasking av fosfor.

Redusert fosforgjødsling er et langsiktig tiltak for å redusere P-AL tallene der de er unødvendige høye. Fosfornivået i jorda er blitt bygd opp over mange år, og tilsvarende vil det ta mange år å redusere nivået til et miljøoptimalt nivå. P-AL fraksjonen bufres av tyngre tilgjengelige fosforfraksjoner, slik at ofte gjenfinnes bare en mindre del av fosforunderskuddet som en nedgang i P-AL. Hvor raskt P-AL reduseres varierer fra sted til sted og er sannsynligvis avhengig av jordas bindingsegenskaper for fosfor.

P-AL fraksjonen er en relativt stor fosforfraksjon som består av fosfor med ulik bindingsstyrke til jorda. Antagelsen om at den lettest løselige fraksjonen (vannløselig fosfor) tappes først ved redusert fosforgjødsling, ble ikke bekreftet ved analyser av jordprøver fra flerårige norske fosforgjødslingsforsøk. En årsak kan være at metoden vi valgte ikke er sensitiv nok, fordi bare en del av det fosforet som faktisk er vannløselig blir løst ut med denne metoden, eller at også denne fraksjonen bufres av andre fosforfraksjoner, slik at nivået opprettholdes flere år etter opphør av fosforgjødsling. Data fra overvåking av bekker ved vestre Vansjø i Østfold hvor fosforgjødslingen ble redusert med cirka 75 % fra 2004 til 2008, viser en tendens til redusert totalfosfor (TP)/partikkel (SS) forhold og konsentrasjon av løst fosfat. Redusert TP/SS indikerer at ved samme jordtap følger det mindre fosfor. Dette kan delvis tilskrives den kraftige reduksjonen i fosforgjødsling, men renovering av avløp fra spredt bebyggelse bidrar også til redusert TP/SS forhold i bekkene.

1. Innledning

Fosfortap fra et areal er bestemt av jordas fosforinnhold og faktorer som bestemmer risikoen for transport av fosfor til vassdrag (erosjonsrisiko, jordarbeiding, avstand til vassdrag m.m.). Redusert jordarbeiding om høsten som tiltak mot fosfortap har hatt fokus i mange år. I tillegg er det mange steder etablert fangdammer og vegetasjonssoner mot vassdrag for å stoppe en del av fosforet som tapes fra arealet. Disse tiltakene har vist seg å være utilstrekkelig for å oppnå målene i EU's Vanddirektiv. Det er derfor i tillegg nødvendig å fokusere på hva jordas fosforstatus og fosforgjødsling betyr for tapsrisikoen. Etter flere tiår med tilførsel av mer fosfor enn det som tas ut med avlingene er nå innholdet av tilgjengelig fosfor i jorda mange steder unødvendig høyt i forhold til å sikre gode avlinger.

Mange av tiltakene for å redusere fosfortap fra jordbruksarealer er fokusert på å redusere tap ved overflateavrenning. Grøfteavrenning har tradisjonelt blitt ansett som en mindre viktig tapsvei for gjødsel fosfor, men i områder med svært høye P-AL tall (tilgjengelig fosfor i jord ekstrahert med en ammonium-acetat-laktat løsning (Egnér et al. 1960) i matjordlaget har det lenge vært spørsmål om transport av fosfor ned igjennom profilet og ut grøftene er en viktig prosess. Dette har spesielt hvert et spørsmål på Jæren hvor høy husdyrtetthet medfører store fosfortilførsler. Med store fosfortilførsler bindes fosforet svakere til jorda, slik at utvasking ned gjennom jordprofilet blir mer sannsynlig. I tillegg kan makroporer i undergrunnsjorda (sprekker, meitemarkganger, rotkanaler) gi transportveier for fosforrike jordpartikler fra matjordlaget.

I denne rapporten vil sammenhenger mellom fosforgjødsling, jordas fosforstatus og risiko for fosfortap belyses ved sammenstilling av resultater fra norske og internasjonale undersøkelser som inkluderer både laboratorieforsøk, feltforsøk og data fra norske overvåkingsprogram (Program for Jord og vannovervåking i landbruket (JOVA) og bekkeovervåkingen ved vestre Vansjø).

Denne utredningen hadde tre hovedmål:

1. Belyse sammenhengen mellom fosforgjødsling, jordas fosforstatus og risiko for fosfortap.
2. Belyse hvordan redusert fosforgjødsling påvirker jordas P-AL tall og vannløselig fosfor over tid.
3. Belyse potensialet for ytterligere målretting av generell gjødslingspraksis.

2. Fosfor i jord

Fosfor i jord inngår i en rekke ulike fraksjoner med ulik bindingsstyrke. Totalt fosforinnhold i dyrka jorda er i middel 0,1 % av jorda. Dette tilsvarer 200-240 kg P/daa i jordas øvre 20 cm. Variasjonen er imidlertid stor. Avhengig av jordtype og gjødslingshistorie kan fosforinnholdet variere fra 0,02 til 0,3 %. P-AL-metoden som brukes i jordbruket i Norge for å vurdere behovet for fosforgjødsling ekstraherer omkring 10-20 % av totalfosforet i jorda. Fosfor i jord består av både organisk og uorganisk bundet fosfor. Andelen organisk fosfor er ofte i området 20-50 %. Det aller meste av fosforet i jorda er bundet til jordpartiklene. Ved lav pH bindes fosforet hovedsakelig til jern- og aluminiumforbindelser. Ved pH over 7 øker binding til kalsium, og det dannes tungt oppløselige kalsiumfosfater. Fosfor er mest tilgjengelig for plantene ved pH rundt 6.

Bare 0,01 til 0,1 kg P/daa finnes løst i jordvæska i mineraljord. Den lave konsentrasjonen av fosfor i jordvæska er årsak til at løst fosfor i liten grad blir vasket ut gjennom jordprofilet, og til at det meste av akkumuleres i jordarbeidingsjiktet. Erosjon av fosforrike jordpartikler er den viktigste transportprosessen for fosfor fra jordbruksarealer på mineraljord. Jordas totale fosforinnhold har dermed betydning for hvor mye fosfor som tapes med den eroderte jorda. Ved overflateavrenning kommer jorda i kontakt med vann som har en lavere fosforkonsentrasjon enn jordas likevektskonsentrasjon for fosfor. Dette fører til at fosfor frigjøres fra jordpartiklene, og jord som ikke følger med vannstrømmen kan dermed avgi løst fosfor til overflateavrenningen. Hvor mye fosfor som frigjøres er avhengig av jordas innhold av lettløselig fosfor.

Fosforet er ikke jevnt fordelt i jorda. Partiklenes fosforkonsentrasjon øker med avtagende partikkelstørrelse, slik at f.eks. leirpartikler har mye høyere fosforkonsentrasjon enn sandpartikler. Dette har betydning for fosfortapene, fordi erosjon er en selektiv prosess med hensyn til partikkelstørrelse. Det betyr at jordas minste og mest fosforrike partikler blir erodert og transportert i større grad enn de større. Ofte vil det aller meste av de suspenderte partiklene i vassdragene være <20 µm, det vil si bestå av leire og middels og fin silt (Dorich et al., 1984).

I mineralfattig organisk jord bindes tilført fosfor mye svakere enn i mineraljord. Overskuddet i fosfortilførselene akkumuleres derfor i mindre grad i organisk jord enn i mineraljord. I organisk jord er derfor utvasking av fosforoverskuddet gjennom jordprofilet og ut grøftene en viktig tapsvei (Uhlen & Østerud, (1992).

3. Sammenhenger mellom fosforgjødsling, jordas fosforstatus og risiko for fosfortap

3.1 Fordeling av gjødsel fosfor på ulike partikkelstørrelsesfraksjoner

Siden erosjon er en selektiv prosess med hensyn til partikkelstørrelse, har det betydning hvilke partikkelstørrelser gjødsel fosforet bindes til. Ved partikkelfraksjonering av jordprøver fra to fosforgjødslingsforsøk i Ås og Tune ble det funnet at gjødsel fosforet hovedsakelig ble bundet til leirpartiklene (Tabell 3.1) (Øgaard, 1996). Mens forskjellen i konsentrasjonen av totalfosfor i hele jorda mellom ledd som ble gjødslet med 4,8 kg P/daa/år og ledd som ble gjødslet 1,6 kg P/daa/år var 126 mg P/kg i feltforsøket i Tune etter 21 år, var forskjellen i leirfraksjonen 521 mg P/kg. I siltfraksjonen ble det ikke påvist forskjell i fosforkonsentrasjonen (den tilsynelatende nedgangen i fosforkonsentrasjon for hele jorda i Ås skyldes en underliggende jordvariasjon på feltet).

Tabell 3.1. Forskjell i konsentrasjon av totalfosfor i ulike partikkelfraksjoner mellom ledd som ble gjødslet med 1,6 kg P/daa/år og 4,8 kg P/daa/år etter 21 år.

| Partikkelfraksjon | Tune | Ås |
|----------------------------|---------|-----|
| | mg P/kg | |
| Hele jorda | 126 | -21 |
| Middels/fin silt (2-20 µm) | 0 | 50 |
| Leirfraksjonen (< 2 µm) | 521 | 621 |

Tilsvarende har fosforanalyser av ulike partikkelfraksjoner i jord med ulikt P-AL tall vist at det er spesielt i leirfraksjonen en finner økt konsentrasjon av totalfosfor med økende P-AL konsentrasjon i jorda (Pedersen 2008).

Kun en del av partiklenes totale fosforinnhold er tilgjengelig for algevekst. Krogstad og Løvstad (1991) har vist at fosfor ekstrahert etter metoden for totalt reaktivt fosfor (TRP) samsvarer godt med mengden fosfor som unyttes av blågrønnalger under optimale laboratoriebetingelser. De ulike partikkelfraksjonene i jorda fra fosforgjødslingsforsøkene ble også analysert for TRP, og anrikningsforholdet (forholdet mellom fosforkonsentrasjonen i leirfraksjonen og i hele jorda) ble beregnet for både totalfosfor og TRP. Resultatene viste at anrikningsforholdet var større for TRP enn for totalfosfor på de gjødslingsleddene hvor fosfor var tilført i overskudd (3,2 og 4,8 kg P/daa/år) (Tabell 3.2). Dette betyr at gjødsel fosforet, som bindes i størst grad til de minste partiklene, er i større grad ekstraherbart ved TRP-ekstraksjonen enn jordas opprinnelige fosforinnhold.

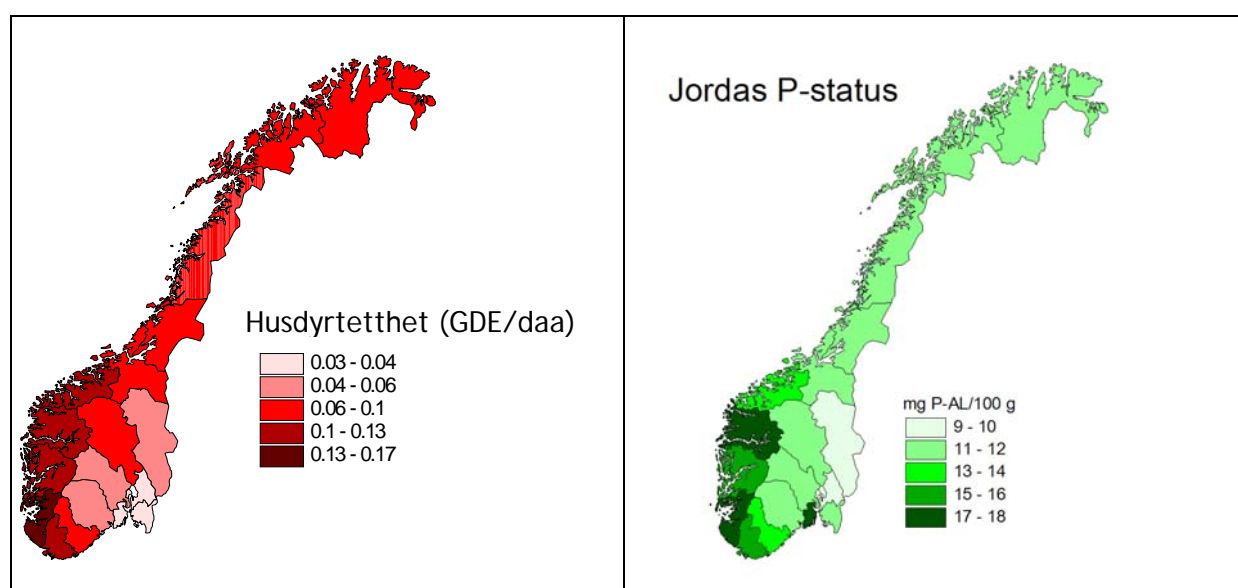
Tabell 3.2. Anrikningsforhold (ER) for totalfosfor og totalt reaktivt fosfor (TRP) for leirfraksjonen i jord på Ås etter ulike gjødslingsnivå i 21 år.

| Gjødsling kg P/daa/år | ER for totalfosfor | Er for TRP |
|--------------------------|--------------------|------------|
| 0 | 1,7 | 1,6 |
| 1,6 | 1,9 | 1,8 |
| 3,2 | 1,9 | 2,3 |
| 4,8 | 2,4 | 3,0 |

Konklusjon: De potensielle miljøkonsekvensene av overflødig fosforgjødsling er sannsynligvis større enn det økningen i jordas totale fosforinnhold skulle tilsi, fordi overskuddet av gjødsel fosfor konsentreres på de små partiklene som eroderes i større grad enn de større partiklene.

3.2 Sammenheng mellom fosforgjødsling og jordas P-AL tall

I flere tiår har det blitt tilført mer fosfor enn det som fjernes med avlingene og jordas innhold av lett tilgjengelig fosfor (P-AL) har økt (Krogstad, 1987). Oppbyggingen av jordas fosforinnhold har vært spesielt stor i områdene med mye husdyr. Fylkesvise gjennomsnitt for husdyrtetthet samsvarer med gjennomsnitt for P-AL i dyrka jord (Figur 3.1). Fylker med høy husdyrtetthet har også et høyt gjennomsnittlig P-AL tall i jorda. Et unntak er Vestfold hvor stort omfang av dyrking av fosforkrevende vekster (grønnsaker og poteter) har gitt høye P-AL tall i jorda. Kraftfôret til husdyra inneholder mye fosfor, og en del av dette gjenfinnes i husdyrgjødsel. Kraftfôret blir som oftest kjøpt inn til gården og utgjør dermed en fosfortilførsel i tillegg til innkjøpt mineralgjødsel med fosfor. Figur 3.1 viser at de fleste Vestlandsfylkene har gjennomsnittlig P-AL tall >14. P-AL >14 karakteriseres som meget høyt, mens P-AL 5-7 anses som tilstrekkelig for å sikre gode avlinger.



Figur 3.1. Middell husdyrtetthet (gjødseldyrenheter (GDE)/daa) og P-AL i dyrka jord per fylke (Bechmann, 2005).

To langvarige feltforsøk på leirjord i Ås (Akershus) og Tune (Østfold) som startet opp i 1966 på arealer med lave P-AL tall, kan illustrere hvordan ulike fosforbalanser (fosfor tilført med gjødsel minus fosfor fjernet med avlingen) påvirker jordas P-AL tall. Det var fire nivåer av fosforgjødsling; 0, 1,6, 3,2 og 4,8 kg fosfor/daa/år. Etter 21 år ble fosforbalansen for hele perioden beregnet (Øgaard, 1995). Gjødsling med 1,6 kg P/daa ga et svakt underskudd på fosforbalansen, mens gjødsling med 3,2 og 4,8 kg P/daa ga et betydelig overskudd (Tabell 3.3). På Ås kunne 33-37 % av fosforoverskuddet gjenfinnes i P-AL fraksjonen, mens i Tune ble bare 14-17 % av fosforoverskuddet gjenfunnet i P-AL fraksjonen. Høyere leirinnhold og lavere startverdi for P-AL på feltet i Tune kan forklare lavere gjenfinning av fosforoverskuddet i P-AL fraksjonen. Generelt øker jordas bindingsevne for fosfor med økende leirinnhold (Øgaard, 1994) og med avtagende P-AL nivå.

Tabell 3.3. Fosfor(P) balanse, endring i jordas P-AL tall og endring i P-AL som en andel av fosforbalansen i to langvarige fosforgjødslingsforsøk på leirjord (Tune og Ås).

| | P balanse Sum 21 år kg/daa | P balanse kg/daa/år | P-AL1966 mg/100g | P-AL 1986 mg/100g | P-AL Endring kg/daa* | Endring P-AL/P bal. % |
|----------|----------------------------------|------------------------|---------------------|----------------------|----------------------------|--------------------------|
| Tune 3,2 | 32 | 1,5 | 3,3 | 5,6 | 5,5 | 17 |
| Tune 4,8 | 64 | 3,0 | 3,3 | 6,9 | 8,6 | 14 |
| Ås 3,2 | 24 | 1,2 | 5 | 8,7 | 8,9 | 37 |
| Ås 4,8 | 58 | 2,8 | 5 | 13 | 19,2 | 33 |

*) Beregnet med jordtetthet 1,2 kg/L

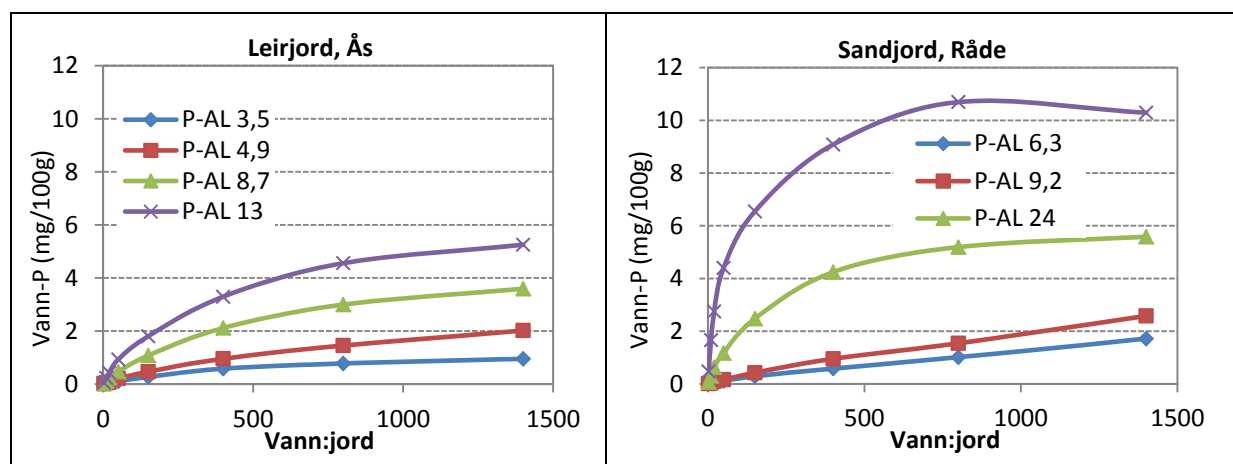
Uhlen (1989a) fant i et annet feltforsøk på Ås at 25-30 % av fosforoverskuddet kunne gjenfinnes i P-AL fraksjonen etter 8 år, og dermed litt lavere gjenfinning enn i det langvarige fosforgjødslingsforsøket på Ås.

Konklusjon: Det meste av overskuddet i fosforgjødslingen blir bundet så sterkt til jorda at det ikke blir ekstrahert med P-AL analysen. Dette betyr at oppbyggingen av fosforinnholdet i jorda er større enn det som reflekteres i P-AL analysen.

3.3 Sammenheng mellom fosforgjødsling og jordas innhold av vannløselig fosfor

En rekke internasjonale undersøkelser har vist at løst fosfor i avrenning er relatert til plantetilgjengelig fosfor i jord (f.eks. Sharpley, 1995, Pote et al., 1996 og Yli-Halla et al., 1995). Som nevnt, er fosforkonsentrasjonen i jordvæska lav, bare ca 0,1% av fosforet finnes i jordvæska. I en avrenningssituasjon hvor jorda kommer i kontakt med vann som har en lavere fosforkonsentrasjon en jordas likevektskonsentrasjon, kan imidlertid en betydelig mengde partikkelbundet fosfor frigis. Figur 3.2 viser økningen i vannløselig fosfor når jorda fortynnes med

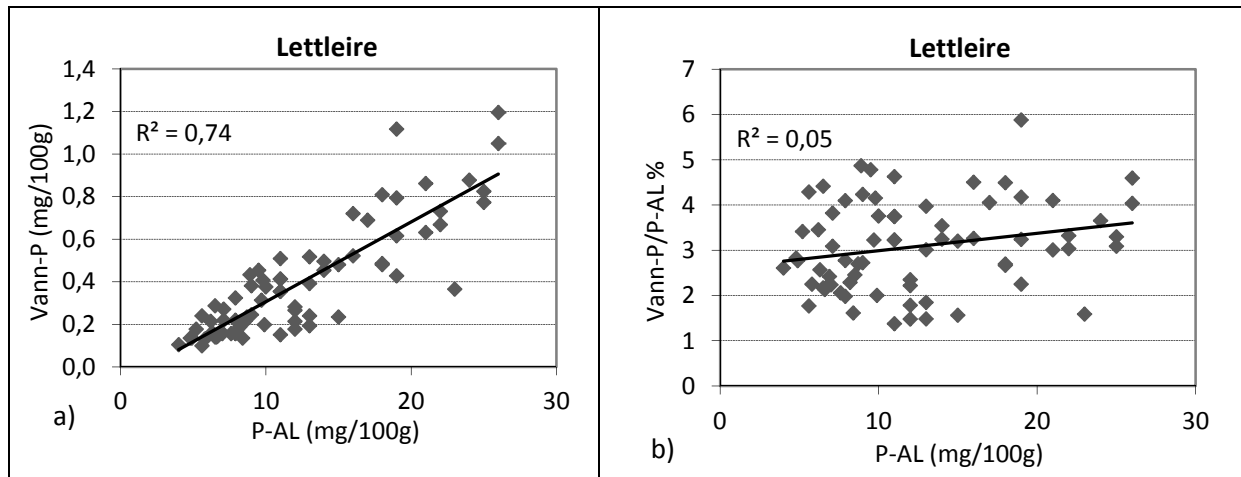
økende mengde vann for to ulike jordtyper. Figuren viser også at jo høyere P-AL, jo høyere er konsentrasjonen av vannløselig fosfor. Dette er også illustrert i figur 3.3a som viser sammenhengen mellom vannløselig fosfor og P-AL for et stort antall jordprøver på lettleire fra ulike regioner i Norge (upublisererte data). I dette datamaterialet er vannløselig fosfor analysert ved standard jord:vann forhold (1:20). Tabell 3.4 viser data fra et forsøksmateriale hvor opptil 10 % av totalfosfor (TP) var vannløselig når jorda ble fortynnet med vann i forholdet 1:1400 (Øgaard, 1995). I tabell 3.4 er det også verdt å merke at innenfor de enkelte jordtypene øker andelen av totalfosfor som er vannløselig (Vann-P/TP) med økende P-AL tall. Forholdet Vann-P/P-AL viser ikke samme tydelige trend (Tabell 3.4 og Figur 3.3b). Dette siste er i motsetning til flere internasjonale undersøkelser som viser en ikke-lineær sammenheng mellom vannløselig fosfor og plantetilgjengelig fosfor i jord, dvs. at vannløselige fosfor øker raskere når innholdet av plantetilgjengelig fosfor overskrider en kritisk terskel ("Change point") (F.eks. Mc Dowell & Sharpley 2001, vist i fig. 3.4).



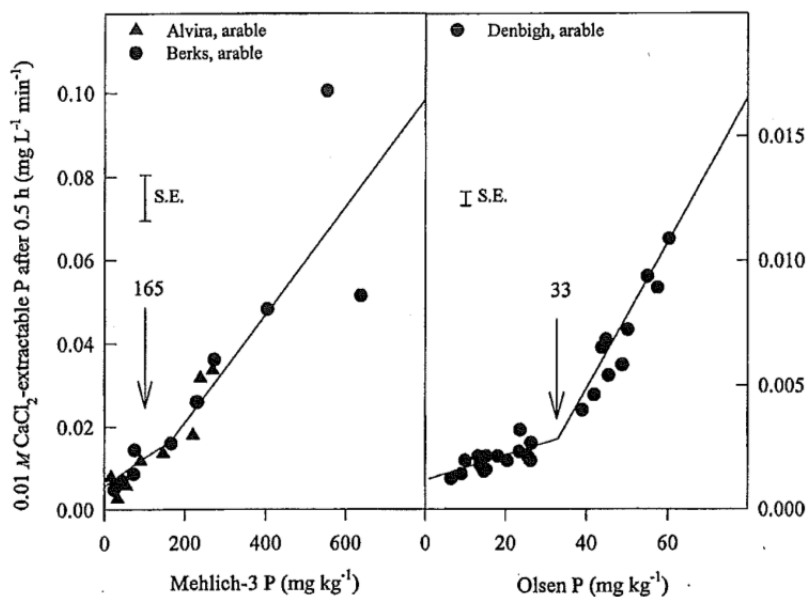
Figur 3.2. Vannløselig fosfor ved økende vann:jord forhold (Data fra Øgaard, 1995).

Tabell 3.4. Vannløselig fosfor (Vann-P) ved fortynning 1:1400 i ulike jordtyper og ved ulikt P-AL tall. Vannløselig fosfor som andel av P-AL og totalfosfor (TP) (Data fra Øgaard, 1995).

| | Tot P | P-AL | Vann-P | Vann-P/P-AL | Vann-P/TP |
|------------|-------|-----------|----------|-------------|-----------|
| | | | (1:1400) | % | |
| | | mg P/100g | | | |
| Ås, leire | 130,1 | 3,5 | 0,95 | 27,1 | 0,7 |
| Ås, leire | 125,9 | 4,9 | 2,02 | 41,2 | 1,6 |
| Ås, leire | 151,2 | 8,7 | 3,59 | 41,3 | 2,4 |
| Ås, leire | 123,8 | 13 | 5,25 | 40,4 | 4,2 |
| Råde, sand | 30,8 | 6,3 | 1,72 | 27,3 | 5,6 |
| Råde, sand | 51,3 | 9,2 | 2,58 | 28,0 | 5,0 |
| Råde, sand | 82,5 | 24 | 5,59 | 23,3 | 6,8 |
| Råde, sand | 112,3 | 38 | 10,29 | 27,1 | 9,2 |
| Nes, silt | 47,1 | 7,2 | 1,94 | 26,9 | 4,1 |
| Nes, silt | 58,4 | 13 | 2,83 | 21,8 | 4,8 |
| Nes, silt | 86,3 | 23 | 8,20 | 35,7 | 9,5 |

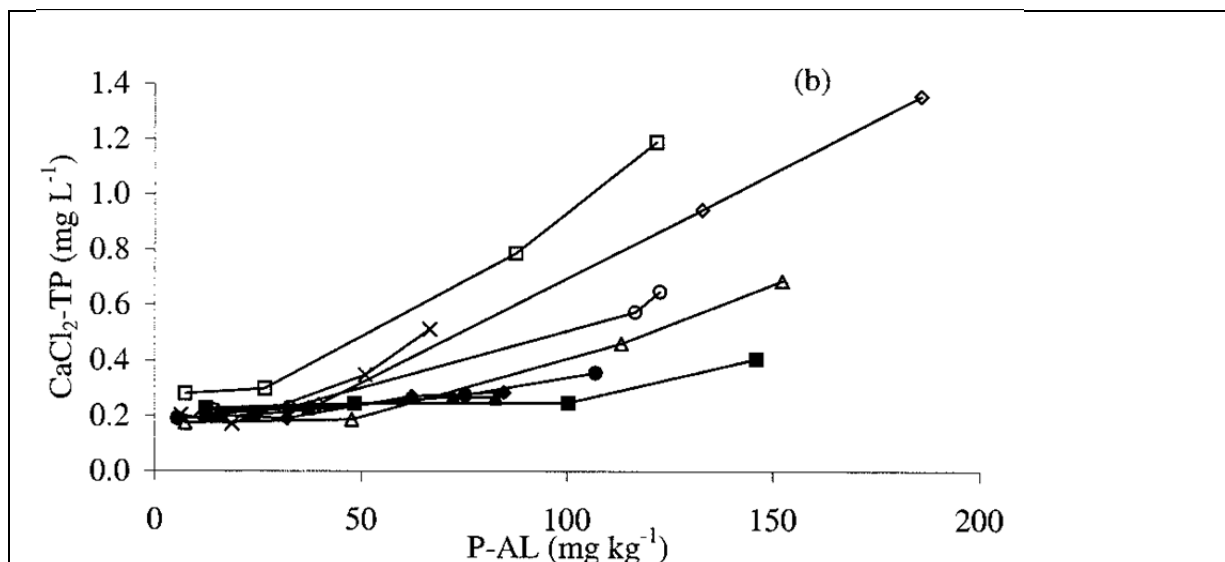


Figur 3.3. Sammenheng mellom vannløselig fosfor (Vann-P) og P-AL for lettleire fra ulike regioner i Norge (a) og forholdet vann-P/P-AL som en funksjon av P-AL (b).



Figur 3.4. Sammenheng mellom vannløselig fosfor ($0,01M CaCl_2$ -P) og «plantetilgjengelig» fosfor (Mehlich-3 P og Olsen P) (McDowell & Sharpley, 2001).

I en svensk undersøkelse er det funnet at graden av økning av vannløselig fosfor med økende P-AL varierte mellom ulike jordtyper (Figur 3.5) (Börling et al., 2004). Ved samme P-AL nivå var mer fosfor vannløselig i jord med lav fosforbindingsevne enn i jord med en høyere fosforbindingsevne. Jordtypespesifikk sammenheng mellom plantetilgjengelig og vannløselig fosfor på grunn av ulike fosforbindingsevner har også blitt funnet i flere internasjonale undersøkelser (f.eks. Sharpley 1995; Pote 1999).

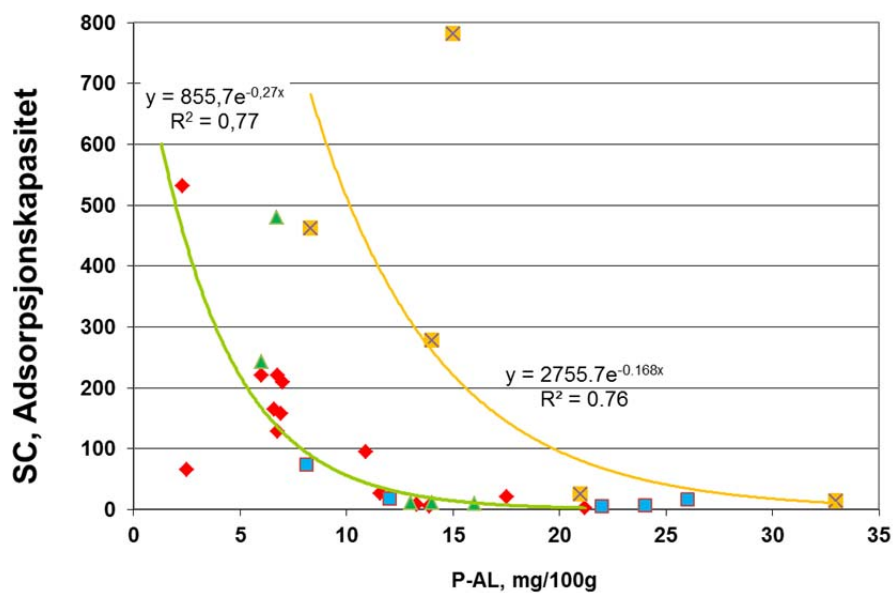


Figur 3.5. Sammenheng mellom vannløselig fosfor ($\text{CaCl}_2\text{-TP}$) og P-AL for ulike jordtyper (Börling et al., 2004).

Det er flere forhold som påvirker jordas fosforbindingsevne. Jordas pH påvirker bindingskapasiteten i stor grad, sammen med innholdet av jern og aluminium i jorda. En jord med høyt innhold av jern og aluminium og lav pH vil binde mye fosfor. Hvordan ei jord reagerer ved tapping eller tilføring av fosfor kan uttrykkes ved jordas bufferkapasitet. Ved økende P-AL nivå, reduseres jordas evne til å binde tilført fosfor. Det skyldes at bindingsplassene for fosfat-ionene brukes opp etter hvert. Risikoen for fosfortap øker derfor ved økende P-AL-nivå.

Sammenhengen mellom jordas P-AL-nivå og dens adsorpsjonsevne for fosfor undersøkes for tiden i et prosjekt finansiert av Statens Landbruksforvaltning. Foreløpige resultater fra disse undersøkelsene viser at ved P-AL over 12-13 mg P/100 g har jordtypene som er undersøkt så langt, en lav adsorpsjonskapasitet (figur 3.6). P-AL >14 karakteriseres som meget høyt, og det anbefales ingen fosforgjødsling til korn, oljevekster og gras. Ved P-AL under 10-11 øker adsorpsjonskapasiteten med synkende P-AL-nivå. Figuren viser også at i P-AL-intervallet 5-7, som vi regner som et optimalt nivå, er det store forskjeller mellom ulike jordarters adsorpsjonskapasitet. Det betyr at to jordarter med samme P-AL-nivå vil kunne ha svært ulik evne til å binde fosfor som tilføres med gjødsel. Det har betydning for plantetilgjengeligheten av det tilførte fosforet, og også selvfølgelig hvor lett fosforet tapes fra jorda.

En jordtype skiller seg ut (gule punkt) i forhold til sammenhengen mellom P-AL og adsorpsjonskapasitet. De gule punktene representerer siltig mellomsand fra Aust-Agder. Denne jordtypen viser en mye større bindingskapasitet ved høye P-AL-verdier sammenlignet med andre jordtyper.



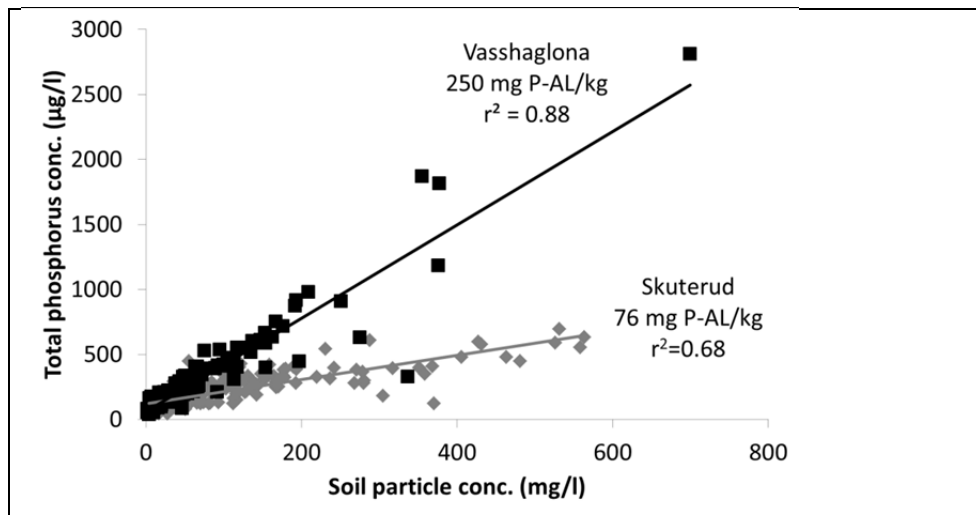
Figur 3.6. Sammenheng mellom jordas adsorpsjonskoeffisient (SC) for fosfor og jordas P-AL-status, målt på en rekke ulike jordarter i Norge (A. Ø. Kristoffersen, upublisert).

Konklusjon: Jordas innhold av vannløselig fosfor øker med økende P-AL, men graden av økning varierer mellom ulike jordtyper, avhengig jordas fosforbindingsevne. Innen norske jordartsgrupper ser det ikke ut til at andelen av P-AL som er vannløselig øker med økende P-AL. Dette betyr at P-AL og vannløselig fosfor øker parallelt ved økende fosforstatus i jorda.

Foreløpige resultater antyder at ved P-AL>12-13 er jordas adsorpsjonskapasitet for fosfor lav.

3.4 Effekt av fosforgjødsling og P-AL i jord på fosfortap - noen norske resultater

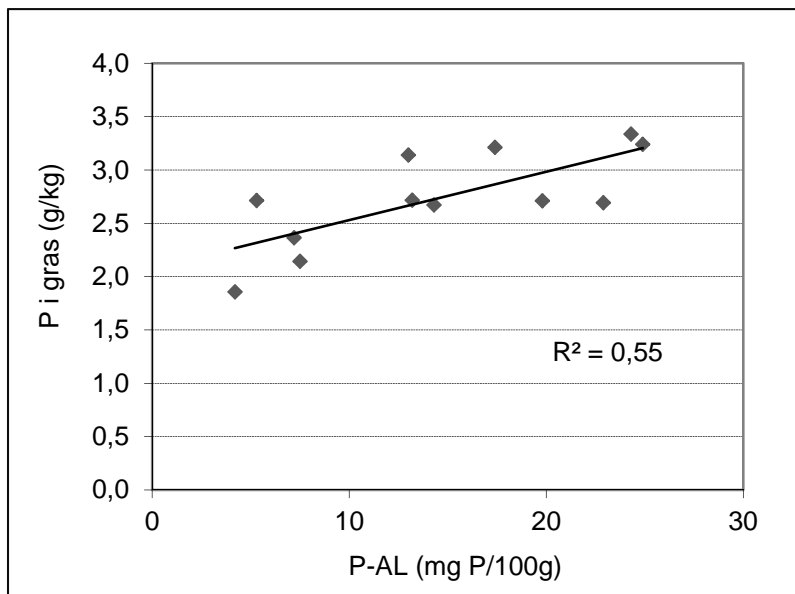
Data fra Bioforsks program for jord- og vannovervåking (JOVA) kan illustrere den samlede effekten av høye P-AL tall i jord og høy fosforgjødsling på avrenning av fosfor. Ett av nedbørfeltene i JOVA (Vasshaglona) er dominert av fosforkrevende produksjoner (potet og grønnsaker). Dette har ført til meget høye P-AL tall i jorda, i gjennomsnitt 25 mg P/100g. Dette feltet kan sammenlignes med et annet felt (Skuterud) som er dominert av kornproduksjon og som har et gjennomsnittlig P-AL tall på ca 8. Figur 3.7 illustrerer at ved samme partikkelkonsentrasjon i avrenningen er totalfosforkonsentrasjonen i Vasshaglona høyere enn i Skuterud. Dette betyr at jorda som tapes i Vasshaglona bidrar til større fosfortap enn en tilsvarende mengde jord i Skuterud.



Figur 3.7. Sammenheng mellom partikkel- og fosforkonsentrasjon i avrenning fra to JOVA-felt med ulike gjennomsnittlig P-AL nivå. (P-AL er her oppgitt i mg/kg og ikke mg/100g som er vanlig) (Bechmann et al., under publisering).

Ved avrenningsmålinger i to feltlysimetre på Ås, Akershus fant Uhlen (1989b) at fosfortapene i overflateavrenning fra eng under snøsmeltingen økte med økende mengde fosfor i planterestene og med økende fosforgjødsling i foregående år. Fosfor i planterester har betydning for fosfortap etter frost, fordi fosfor i plantecellene frigis når plantecellene fryser i stykker. Ved påfølgende overflateavrenning vil løst fosfor vaskes ut. Fosfor utvasket fra plantemateriale har en høy biologisk tilgjengelighet sammenlignet med partikkelbundet fosfor. Effekten av P-AL tallet i toppjorda var ikke signifikant i dette forsøket. Det var heller ikke effekt av fosforgjødsling på avrenning fra ruter med kornproduksjon.

Siden mengde fosfor i planterestene har betydning for fosfortap fra eng, har fosforkonsentrasjonen i graset betydning. Økende fosforgjødsling øker fosforkonsentrasjonen, men også jordas P-AL tall påvirker fosforkonsentrasjonen i graset. Figur 3.8 viser data fra en serie feltforsøk i eng med lik fosforgjødsling, men med ulikt P-AL tall i jorda. Ved økende P-AL i jorda økte fosforkonsentrasjonen i graset.



Figur 3.8. Sammenheng mellom P-AL i jord og fosforkonsentrasjon i graset ved lik fosforgjødsling (Øgaard, upubliserte data).

3.5 Sammenheng mellom jordbruksdrift og vannkvalitet i bekker - resultater fra Bioforsk program for jord- og vannovervåking (JOVA)

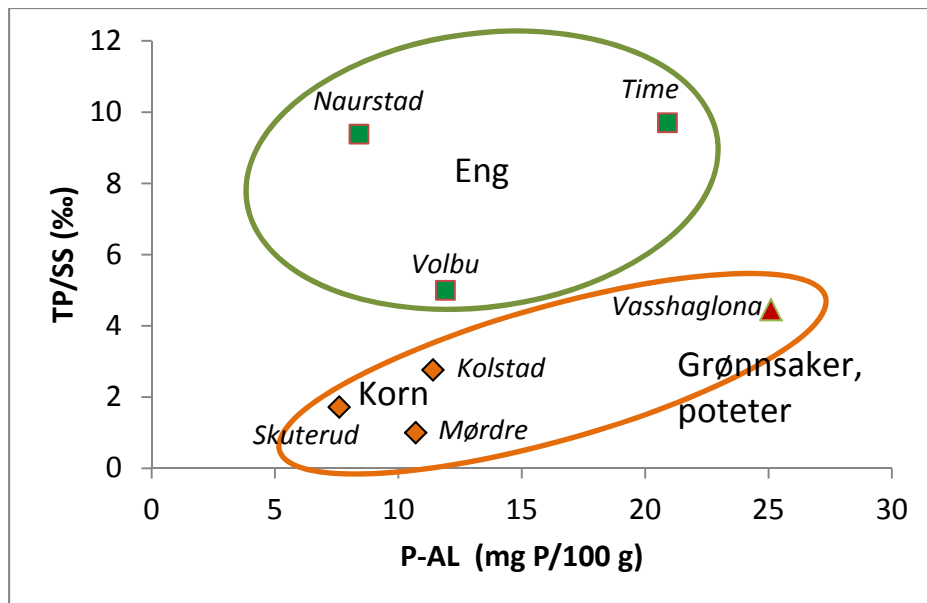
I JOVA overvåkes små nedbørfelt dominert av jordbruk som representerer de viktigste jordbruksområdene i landet med hensyn til klima, jordsmonn og driftspraksis. Ved utløpet av nedbørfeltet tas vannprøver fra bekken som analyseres for partikler og næringsstoffer. Det samles også inn jordanalysetall og driftsdata for jordbruksarealene. JOVA-programmet har pågått i 20 år, slik at det nå er en omfattende mengde data angående næringsstoffavrenning fra jordbruksdominerte nedbørfelt. Disse dataene kan brukes til å vurdere effekten av fosforgjødsling og jordas P-AL nivå på fosfortapene. Det totale fosfortapet er imidlertid også påvirket av erosjon og type drift. Forholdet mellom totalfosfor (TP) og partikler (SS) er derfor den beste parameteren å se på når effekt av P-AL og fosforgjødsling skal vurderes, fordi dette forholdet sier noe om hvor mye fosfor som transporteres med en gitt mengde partikler. Avrenning fra eng forventes å gi høyere TP/SS forhold enn avrenning fra åpenåkerproduksjon, fordi jordtapet fra eng er lavt, gjødsel fosfor konsentreres i overflaten og planterester kan gi fosfortap når plantecellene fryser i stykker. Eng og åpenåkerproduksjoner (korn, oljevekster, grønnsaker og poteter) må derfor vurderes hver for seg. Tabell 3.5 viser middel fosforgjødsling, fosforbalanse (tilført fosfor minus fosfor fjernet med avling) og P-AL i jorda for sju av JOVA feltene.

Tabell 3.5. Andel jordbruksareal, middel fosforgjødsling og fosforbalanse (tilført fosfor minus fosfor fjernet med avling) for overvåkingsperioden. P-AL er angitt som arealveid median. (Etter Bechmann et al., under publisering).

| Produksjons- system | Felt | Andel jordbr. areal | P gjødsling | P balanse | P-AL |
|--------------------------|-------------|------------------------|-------------|-----------|------------|
| | | % | kg P/daa/år | | mg P/100 g |
| Korn | Skuterud | 61 | 2,4 | 0,2 | 7,6 |
| Korn | Mørdre | 65 | 2,3 | 0,5 | 10,7 |
| Korn, gris | Kolstad | 68 | 2,9 | 0,9 | 11,4 |
| Poteter og grønnsaker | Vasshaglona | 62 | 5,3 | 2,6 | 25,1 |
| Gras, storfe | Time | 94 | 4,5 | 1,3 | 20,9 |
| Gras, storfe | Naurstad | 35 | 2,3 | 1,0 | 8,4 |
| Gras, storfe/sau | Volbu | 41 | 2,1 | 0,4 | 11,9 |

Innenfor åpenåkerproduksjonene har grønnsaks-/potetfeltet (Vasshaglona) med middel P-AL tall på 25 mg P/100 g tydelig høyere TP/SS forhold enn kornfeltene som har middel P-AL tall på 8-11 (Figur 3.9). Vasshaglona har også det høyeste overskuddet på fosforbalansen. Disse feltene er sammenlignbare med hensyn til andel jordbruksareal i nedbørfeltet, men forskjeller i jordart mellom feltene og utslipp fra spredt avløp kan også påvirke sammenhengen mellom P-AL og TP/SS forholdet i avrenningen. Grønnsaks-/potetfeltet har sandjord mens det er leirjord i kornfeltene.

Når det gjelder engfeltene har Naurstadfeltet høyt TP/SS forhold til tross for et moderat P-AL nivå i jorda (Figur 3.9). Dette skyldes at feltet delvis består av organisk jord som har dårligere bindingsevne for fosfor enn mineraljord. Overskuddet på fosforbalansen er relativt høyt i dette feltet (Tabell 3.5), og på grunn av organisk jord er det stor risiko for utvasking av deler av fosforoverskuddet i stedet for at det akkumuleres i jorda. Dette samsvarer med høy andel løst fosfor/totalfosfor i avrenningen (~50 %). Feltene i Time og Volbu ligger begge på siltig sandjord. Høye P-AL tall og relativt stort fosforoverskudd i Time er med på å forklare et høyt TP/SS forhold sammenlignet med Volbu, men høy andel jordbruksareal i Timefeltet (94 %) sammenlignet med Volbu (41 %) er også med på å forklare et høyt TP/SS forhold i Time.



Figur 3.9. Effekt av jords P-AL tall og driftssystem på forholdet mellom tap av totalfosfor (TP) og jordpartikler (SS) for 7 JOVA-felt (Bechmann et al., under publisering).

3.6 Profilstudier i områder med svært høye P-AL tall

De fleste tiltak mot fosfortap har til nå vært fokusert på fosfortap ved overflateavrenning. I mineraljord er fosforkonsentrasjonen i jordvæska lav, og derfor er utvasking av løst fosfor gjennom jordprofilen og ut i grøftene som regel lav. Det er imidlertid vist at spesielt i leirjord kan sprekker, meitemarkganger og rotkanaler i undergrunnsjorda fungerer som transportveier for fosforrike partikler fra matjordlaget og ned mot grøftene (Djodjic et al., 1999 og 2004). I områder med svært høye P-AL tall i matjordlaget har det lenge vært spørsmål om utvasking av løst fosfor ned igjennom profilen og ut grøftene likevel er en viktig prosess. Dette har spesielt vært et spørsmål på Jæren hvor høy husdyrtetthet medfører store fosfortilførsler. Med store fosfortilførsler bindes fosforet svakere til jorda (jfr. Figur 3.6), noe som gir økt risiko for utvasking ned gjennom jordprofilen. Prøvetaking av grøftevann på Jæren på oppdrag fra Jæren Vannområde viste til dels høye fosforkonsentrasjoner i grøftevannet, men det er stor variasjon i fosforkonsentrasjon fra grøft til grøft (Øgaard, 2012). Forklaring på høye fosforkonsentrasjoner i enkeltgrøfter ble ikke funnet.

Kunnskap om de viktigste transportveiene for fosfor er viktig for å målrette tiltakene. I Norge har det vært tradisjon for å legge grøftene relativt tett for blant annet å sikre rask opptørring om våren. Anbefalt avstand mellom grøftene har vært 6-8 m på leirjord og 8-10 m på sandjord. Denne praksisen kan resultere i en betydelig risiko for fosfortap gjennom grøftene. Redusert jordarbeiding reduserer jordtapet også gjennom grøftene, fordi en da ikke får løs jord i topplaget som kan finne veien til makroporene i undergrunnsjorda. Men effekten av redusert jordarbeiding på grøftetap er mindre enn reduksjonen i jordtap på overflaten.

For å undersøke om nedvasking av fosfor er en viktig prosess i områder med høye P-AL tall og store fosfortilførsler med husdyrgjødsel, ble det i dette prosjektet tatt ut jordprøver fra ulike dyp på jord med ulik P-AL i matjordlaget (0-20 cm). Det ble tatt ut jordprøver fra hver 10 cm dybde fra 8 profiler. Figur 3.10 viser bilder fra ett av prøvetakingsstedene og ett av profilene.



Figur 3.10. Arbeid med prøvetaking av jordprofil på Jæren og jordprofil nr.3

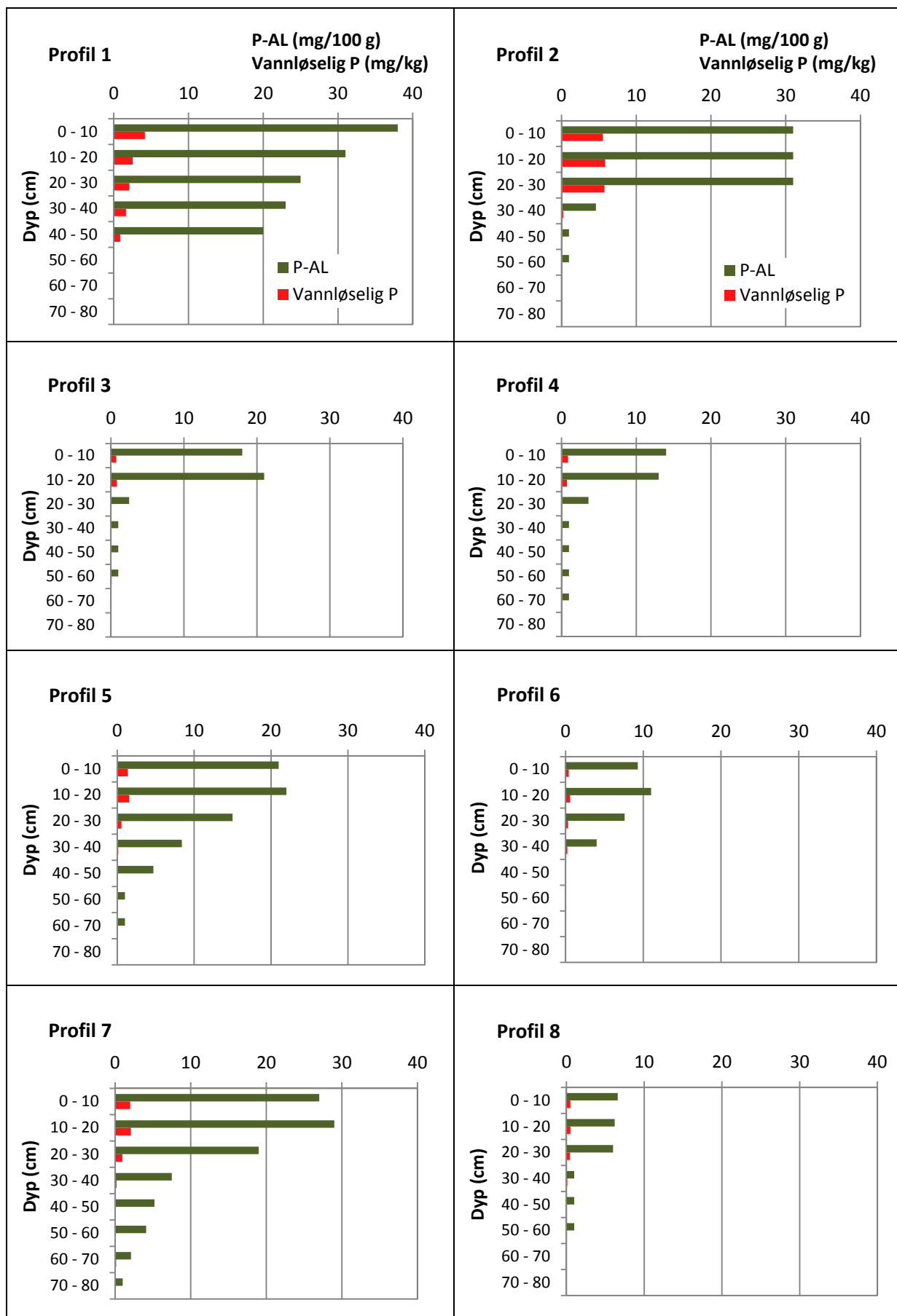
Stein og høy grunnvannstand førte til at det var varierende hvor dypt en kom ned i de enkelte profilene. Jordprøvene ble analysert for ulike fosforfraksjoner (vannløselig fosfor (ekstrahert med 0,0025 M CaCl₂), P-AL, totalfosfor og organisk fosfor) og oksalatløselig jern, aluminium og fosfor. Oksalatløselig jern og aluminium representerer amorfe jern- og aluminiumsforbindelser i jorda som utgjør de viktigste bindingsplassene for fosfor i våre sure jordtyper. Jordas fosforbindingskapasitet kan derfor estimeres ut i fra summen av oksalatløselig jern og aluminium (Brookes et al. 1997). Fosformetningsgrad estimeres som forholdet mellom oksalatløselig fosfor og oksalatløselig jern + aluminium.

Figur 3.11 viser P-AL og vannløselig fosfor i ulike dyp for hvert profil, mens tabell 3.6 viser alle analyseresultatene. Profil 8 hadde P-AL 6,2 - 6,6 i de øvre 20 cm, og er dermed innenfor det P-AL området som klassifiseres som middels/optimalt (P-AL 5-7). Undergrunnsjorda i dette profilet hadde P-AL verdier <2 og konsentrasjonen av vannløselig fosfor var også meget lav. Det andre ytterpunktet er profil 1 som hadde P-AL 31 - 38 i de øvre 20 cm. Her er P-AL tallet meget høyt (P-AL 20) også ved 50 cm dyp, noe som viser at det har foregått en transport av betydelige mengder fosfor nedover i profilet. Vann og stein gjorde det dessverre umulig å komme dypere i dette profilet. Gårdbruker

opplyste at dette arealet hadde fått store mengder husdyrgjødsel opp igjennom årene. Profilene 5 og 7 har også P-AL nivåer i undergrunnsjorda som viser en nedvasking av fosfor fra matjordlaget, mens profil 2 som har P-AL 31 i matjordlaget ikke viser tydelig tegn på nedvasking av fosfor. Jordegenskaper og grunnvannstand kan være årsaker til forskjeller i nedvasking av fosfor.

Økt P-AL tall i undergrunnsjorda førte til økning i forholdet organisk fosfor/totalfosfor, noe som antyder at nedvasking av organisk fosfor i husdyrgjødsel bidrar til økning av P-AL tallene i undergrunnsjorda. Dette samsvarer med undersøkelsene til Chardon et al. (1997) som viste at organisk fosfor dominerte i sigevannet fra jord som hadde blitt tilført husdyrgjødsel.

Jordas fosformetningsgrad (DPS) er i flere av profilene høy i den øvre delen av profilet (Tabell 3.6). Nederlandske undersøkelser har vist at fosformetningsgrad over 35 % gir fosfatkonsentrasjoner i avrenningen som er høyere enn miljømålet (Brookes et al., 1997). Schoumans & Groenendijk, (2000) fant en eksponentiell økning i fosfor frigitt fra jord til løsning med økende DPS. Tabell 3.6 viser at 4 av de undersøkte profilene på Jæren har fosformetningsgrad over 35 % i de øvre delene av profilet.



Figur 3.11. P-AL og vannløselig fosfor i ulike dyp i 8 profiler på Jæren.

Tabell 3.6. Jordartskarakterisering og ulike fosforfraksjoner og fosformetningsgrad (DPS) i ulike dyp i 8 profiler på Jæren. Org.m. = organisk materiale, org. P = organisk bundet fosfor, Si.m.sand = Siltig mellomsand, Si.f.sand = siltig finsand, M.sand = mellomsand, Sa.silt = sandig silt. Jordart merket med * er bestemt ved kornfordelingsanalyse, mens de øvrige er skjønnsmessig bedømt.

| Lokalitet | Dyp cm | Jordart | OM % | P-AL mg/100g | TP mg/kg | Org.P/TP % | Vann-P mg/kg | DPS % |
|-----------|-----------|------------|---------|-----------------|-------------|---------------|-----------------|----------|
| 1 | 0 - 10 | Si.m.sand | 9,8 | 38 | 1855 | 37 | 4,2 | 55 |
| | 10 - 20 | Si.m.sand* | 7,1 | 31 | 1635 | 35 | 2,5 | 47 |
| | 20 - 30 | Si.m.sand | 6,1 | 25 | 1408 | 39 | 2,1 | 39 |
| | 30 - 40 | Si.m.sand | 5,6 | 23 | 1261 | 38 | 1,6 | 37 |
| | 40 - 50 | Si.m.sand* | 4,2 | 20 | 1193 | 33 | 0,9 | 29 |
| 2 | 0 - 10 | M.sand | 3,6 | 31 | 1024 | 17 | 5,5 | 60 |
| | 10 - 20 | M.sand* | 3,4 | 31 | 1001 | 16 | 5,8 | 62 |
| | 20 - 30 | M.sand | 3,6 | 31 | 956 | 15 | 5,7 | 61 |
| | 30 - 40 | M.sand | 0 | 4,6 | 192 | 15 | 0,2 | 11 |
| | 40 - 50 | M.sand | 0 | <2.0 | 136 | 8 | 0,0 | 8 |
| | 50 - 60 | M.sand* | 0 | <2.0 | 164 | 0 | 0,0 | 8 |
| 3 | 0 - 10 | Si.m.sand | 6,8 | 18 | 990 | 35 | 0,7 | 30 |
| | 10 - 20 | Si.m.sand* | 6,5 | 21 | 1114 | 33 | 0,8 | 33 |
| | 20 - 30 | M.sand | 1,0 | 2,5 | 554 | 9 | 0,0 | 5 |
| | 30 - 40 | M.sand | 0,8 | <2.0 | 532 | 5 | 0,0 | 5 |
| | 40 - 50 | M.sand | 0,4 | <2.0 | 385 | 0 | 0,0 | 4 |
| | 50 - 60 | M.sand* | 0,4 | <2.0 | 430 | 6 | 0,1 | 4 |
| 4 | 0 - 10 | M.sand | 9,7 | 14 | 769 | 45 | 0,9 | 20 |
| | 10 - 20 | Si.m.sand* | 8,6 | 13 | 764 | 44 | 0,7 | 19 |
| | 20 - 30 | M.sand | 3,8 | 3,6 | 322 | 47 | 0,0 | 5 |
| | 30 - 40 | Si.f.sand | 1,9 | <2.0 | 419 | 21 | 0,0 | 5 |
| | 40 - 50 | Si.f.sand | 0,8 | <2.0 | 498 | 7 | 0,1 | 6 |
| | 50 - 60 | Si.m.sand* | 0,3 | <2.0 | 447 | 0 | 0,1 | 8 |
| | 60 - 70 | Sa.silt | 0,2 | <2.0 | 464 | 0 | 0,0 | 9 |
| 5 | 0 - 10 | M.sand | 10 | 21 | 1233 | 42 | 1,4 | 37 |
| | 10 - 20 | Si.m.sand* | 8,7 | 22 | 1267 | 41 | 1,5 | 40 |
| | 20 - 30 | M.sand | 5,1 | 15 | 718 | 45 | 0,5 | 27 |
| | 30 - 40 | Si.m.sand | 3,2 | 8,4 | 452 | 41 | 0,1 | 12 |
| | 40 - 50 | Si.m.sand | 2,6 | 4,7 | 447 | 26 | 0,1 | 6 |
| | 50 - 60 | Si.m.sand* | 0,8 | <2.0 | 526 | 5 | 0,0 | 6 |
| | 60 - 70 | Si.m.sand | 0,3 | <2.0 | 537 | 2 | 0,0 | 8 |
| 6 | 0 - 10 | Si.m.sand | 9,0 | 9,3 | 600 | 38 | 0,4 | 18 |
| | 10 - 20 | Si.m.sand* | 9,7 | 11 | 662 | 37 | 0,6 | 19 |
| | 20 - 30 | Si.m.sand | 9,8 | 7,6 | 503 | 39 | 0,3 | 14 |
| | 30 - 40 | Si.m.sand* | 9,1 | 4,0 | 305 | 48 | 0,2 | 6 |

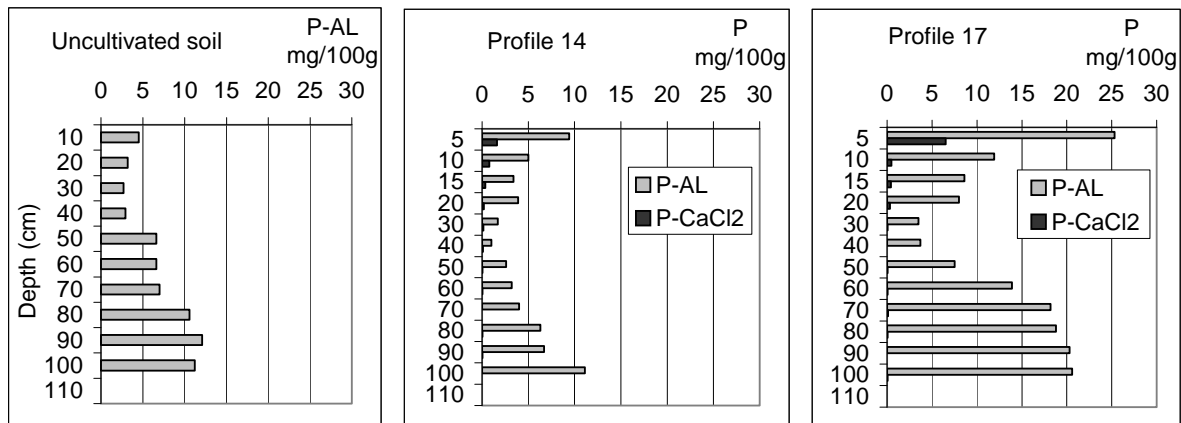
Tabell 3.6. Forts.

| Lokalitet | Dyp cm | Jordart | OM % | P-AL mg/100g | TP mg/kg | Org.P/TP % | Vann-P mg/kg | DPS % |
|-----------|-----------|------------|---------|-----------------|-------------|---------------|-----------------|----------|
| 7 | 0 - 10 | Si.m.sand | 7,6 | 27 | 1906 | 35 | 2,0 | 40 |
| | 10 - 20 | Si.m.sand* | 8,4 | 29 | 1855 | 35 | 2,1 | 39 |
| | 20 - 30 | M.sand | 6,6 | 19 | 1408 | 40 | 1,0 | 29 |
| | 30 - 40 | M.sand | 4,6 | 7,5 | 814 | 59 | 0,2 | 15 |
| | 40 - 50 | M.sand | 3,8 | 5,2 | 639 | 68 | 0,1 | 17 |
| | 50 - 60 | Si.m.sand* | 2,2 | 4,1 | 407 | 65 | 0,0 | 16 |
| | 60 - 70 | M.sand | 0,6 | 2,1 | 260 | 52 | 0,1 | 14 |
| | 70 - 80 | M.sand | 0,7 | <2.0 | 373 | 29 | 0,0 | 8 |
| 8 | 0 - 10 | M.sand | 5 | 6,6 | 956 | 30 | 0,5 | 16 |
| | 10 - 20 | Si.m.sand* | 4,8 | 6,2 | 962 | 29 | 0,5 | 16 |
| | 20 - 30 | M.sand | 4,2 | 6,0 | 882 | 29 | 0,5 | 14 |
| | 30 - 40 | M.sand | 0,9 | <2.0 | 583 | 16 | 0,1 | 11 |
| | 40 - 50 | M.sand | 0,1 | <2.0 | 662 | 7 | 0,0 | 13 |
| | 50 - 60 | Si.m.sand* | 0,1 | <2.0 | 781 | 0 | 0,0 | 13 |

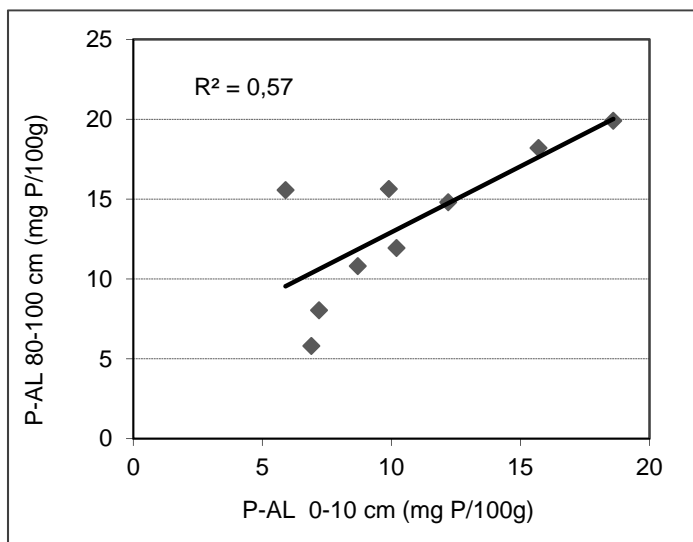
Resultatene fra profilundersøkelsen på Jæren kan sammenlignes med tilsvarende profilundersøkelser på leirjord i Ås i Akershus (12 profiler) og sandjord ved vestre Vansjø i Østfold (12 profiler), hvor målet også var å undersøke om det er en sammenheng mellom P-AL tall i matjordlaget og P-AL tall ned mot grøftedyp (Øgaard og Krogstad, 2007). I denne undersøkelsen ble det også inkludert prøver fra profiler på udyrka jord.

Eksempler på fordeling av P-AL og vannløselig fosfor (P-CaCl₂) i tre utvalgte profiler på leirjord er vist i figur 3.12. I profilet på udyrka jord er P-AL ganske lav ned til 40 cm dybde. Lenger ned i profilet økte P-AL med dybden fordi uforvitret leire inneholder kalsiumfosfater som løses ut med AL-analysen. Profilene fra dyrka jord viste samme mønster bortsett fra at de øvre jordlagene hadde høyere P-AL verdier på grunn av fosforgjødsling. Det var en tendens til økt P-AL i 80-100 cm dybde med økt P-AL i toppjorda (0-10 cm) (Figur 3.13). Analyser fra udyrka jord viser at P-AL verdier på 10-12 mg/100 g i dybden for dreneringsgrøftene er av naturlig opprinnelse. P-AL verdier høyere enn dette som ble funnet ved grøftedyp på dyrka jord (15-20 mg P/100 g), kan være et resultat av transport av fosforrike partikler fra matjorda gjennom makroporer.

For vannløselig fosfor var det ingen slik sammenheng. Konsentrasjonen av vannløselig fosfor i undergrunnen var null eller nær null for alle profilene. I sandjorda ved vestre Vansjø var det ingen sammenheng mellom P-AL i toppjorda og P-AL i undergrunnen.



Figur 3.12. Fordeling av P-AL og vannløselig fosfor (P-CaCl₂) i tre utvalgte profiler på leirjord (Øgaard og Krogstad, 2007).



Figur 3.13. Sammenheng mellom P-AL i toppsjiktet (0-10 cm) og P-AL ved 80-10 cm dyp.

Konklusjon: I enkelte tilfeller kan store tilførsler av fosfor over mange år gi en akkumulering av tilgjengelig fosfor også i undergrunnsjorda. Det var imidlertid stor variasjon, slik at det ikke var alle steder med høye P-AL tall i topplaget som viste indikasjoner på nedvasking av fosfor.

4. Effekt av redusert fosforgjødsling

4.1 Endring i jordas P-AL tall ved redusert fosforgjødsling

Etter den siste endringen i anbefalt fosforgjødsling til korn, oljevekster og gras som ble foretatt i 2008, skal fosforgjødslingen tilpasses jordas P-AL nivå slik at på sikt skal jordas P-AL tall bevege seg mot området 5-7 mg P/100 g jord. Dette P-AL nivået regnes som optimalt i forhold til både å sikre gode avlinger og minimere risikoen for fosfortap til vassdrag. P-AL 5-7 er tilstrekkelig for å oppnå optimal avling når det gjødsles med like mye fosfor som det som fjernes med avlingen. Ved høyere P-AL tall anbefales det å gjødsle med mindre fosfor enn det som fjernes med avlingene for at unødvendig høye P-AL tall skal reduseres. Jo høyere P-AL tall, jo større underskudd på fosforbalansen anbefales. Klassifiseringen av jordas P-AL tall er nå som følger:

| P-AL verdi mg P/100 g | Klasse | Anbefalt gjødsling |
|--------------------------|------------------|---|
| 1-5 | Lavt | Anbefalt fosforgjødsling > enn fosfor fjernet med avlingen |
| 5-7 | Middels/optimalt | Anbefalt fosforgjødsling = enn fosfor fjernet med avlingen |
| 7-10 | Moderat høyt | Anbefalt fosforgjødsling < enn fosfor fjernet med avlingen. Lineær reduksjon med økende P-AL tall. |
| 10-14 | Høyt | Lineær reduksjon i fosforgjødsling med økende P-AL tall |
| >14 | Meget høyt | Anbefalt fosforgjødsling = 0 |

En del grønnsaksvekster krever antagelig høyere P-AL tall enn 5-7 i jorda for å gi optimal avling og kvalitet.

Redusert fosforgjødsling er et langsiktig tiltak for å redusere P-AL tallene der de er unødvendige høye. Fosfornivået i jorda er blitt bygd opp over mange år, og tilsvarende vil det ta mange år å redusere nivået til et miljøoptimalt nivå. Tabell 4.1 indikerer hvor lang tid det tar å redusere P-AL nivået hvis en tar ut en avling på 400 kg korn/daa uten å gjødsle med fosfor. Forutsetningen for beregningene er at alt fosforet tappes fra P-AL fraksjonen. I praksis vil fosfor også tappes fra tyngre tilgjengelig fosfor, slik at det tar enda lenger tid å redusere P-AL tallene enn det tabell 4.1 viser.

Tabell 4.1. Teoretisk antall år for å redusere P-AL ned til 7 ved ulike P-AL nivå. Eks. med 400 kg kornavling som fjerner 1,4 kg P/daa/år (Etter T. Krogstad).

| P-AL (mg/100g) | P i P-AL fraksjonen (kg P/daa) *) | Teoretisk antall år for å redusere P-AL ned til 7 **) |
|-------------------|--------------------------------------|--|
| 7 | 16,8 | ----- |
| 10 | 24 | ~ 5 |
| 15 | 36 | 14 |
| 20 | 48 | 22 |
| 25 | 60 | 31 |

*) Beregnet med jordtetthet 1.20 kg/L

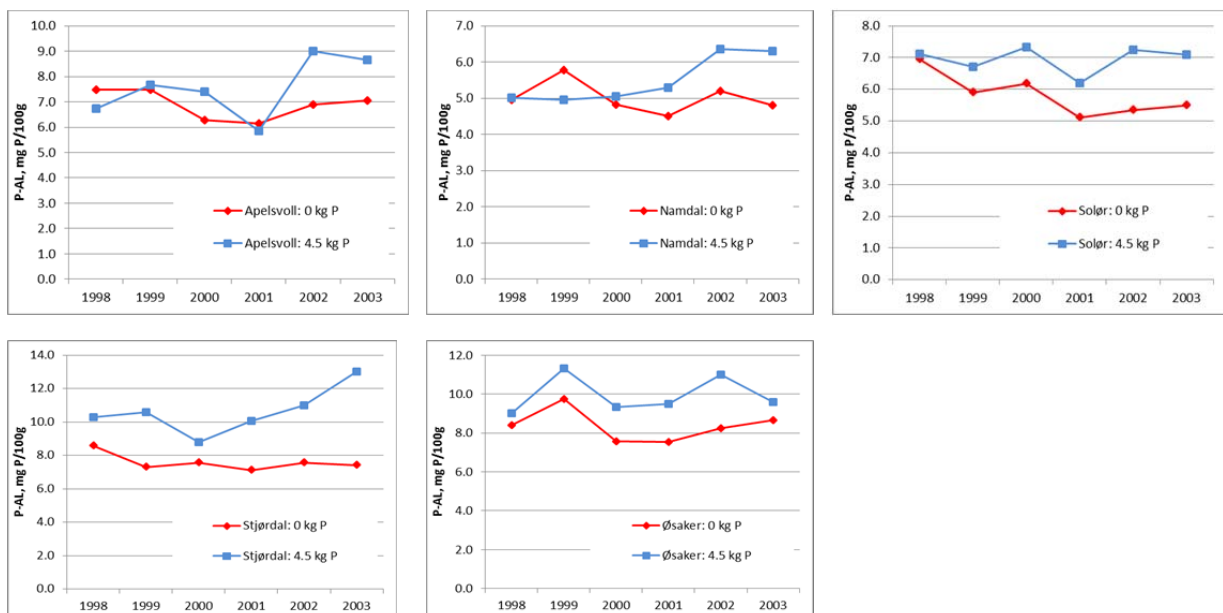
***) Nedgang tilsvarende P-avling (-0.58 enheter pr år).

4.1.1 Resultater fra norske forsøk

I to serier med flerårige fosforgjødslingsforsøk i korn har det blitt tatt ut årlige jordprøver slik at endringen i P-AL ved ulikt gjødslingsnivå kan følges. Den ene serien pågikk i årene 1998-2003 og inkluderte fosforgjødslingsnivå varierende fra 0 til 4,5 kg P/daa. Denne andre serien ble anlagt i 2006 og 2008 med gjødslingsnivåer varierende fra 0 til 2,5 kg P/daa. Denne serien pågikk fram til 2011.

Utvikling av P-AL over år

Som tabell 4.1. viser er teoretisk nedgang i P-AL ved et underskudd på fosforbalansen på 1,4 kg P/daa/år ca 0,6 enheter pr år. Figur 4.1 viser de faktiske endringene i P-AL over tid ved ingen fosforgjødsling og ved en årlig fosfortilførsel på 4,5 kg P/daa for den første forsøksserien.



Figur 4.1. Årlige verdier av P-AL på leddet som ikke fikk fosfor (0 kg) og leddet som ble gjødslet med 4,5 kg P/daa/år (A.Ø. Kristoffersen, upublisert).

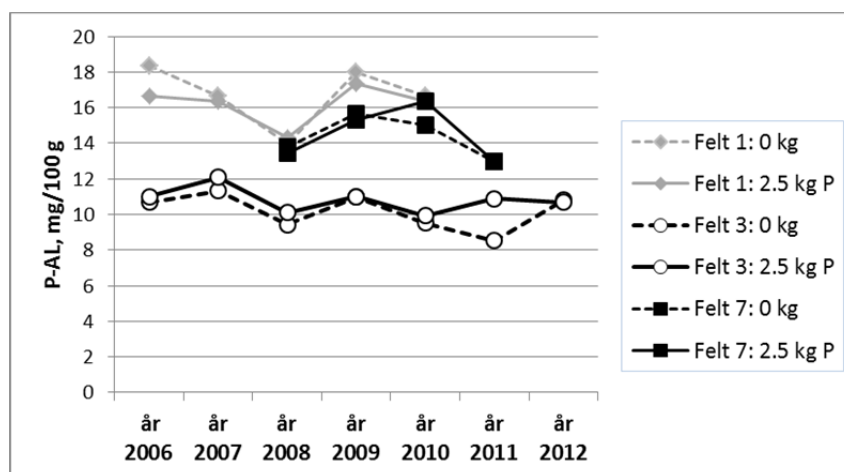
Det ble målt en del svingninger i P-AL mellom år. Disse svingningene har vi ikke forklaring på. Alle disse feltene hadde moderate P-AL verdier ved oppstart av forsøkene, og for fire av feltene var P-AL verdiene etter 5 år uten fosforgjødsling på nivå eller bare litt under startverdiene. I feltet i Solør gikk P-AL ned med ca 1,5 mg/100 g. Feltet i Solør opprettholdt P-AL verdien ved årlig gjødsling med 4,5 kg P/daa, en gjødsling som ga et overskudd på fosforbalansen på anslagsvis 2,5 kg P/daa/år. Dette tyder på at denne jorda har høy fosforbindingsevne.

Tabell 4.2 viser en oversikt over lokalisering og karakteristikk av jorda i feltene i den andre forsøksserien.

Tabell 4.2. Oversikt over feltenes lokalisering, jordart samt middelvei for pH, P-AL og K-AL (mg pr/100 g jord) ved anlegg av feltene.

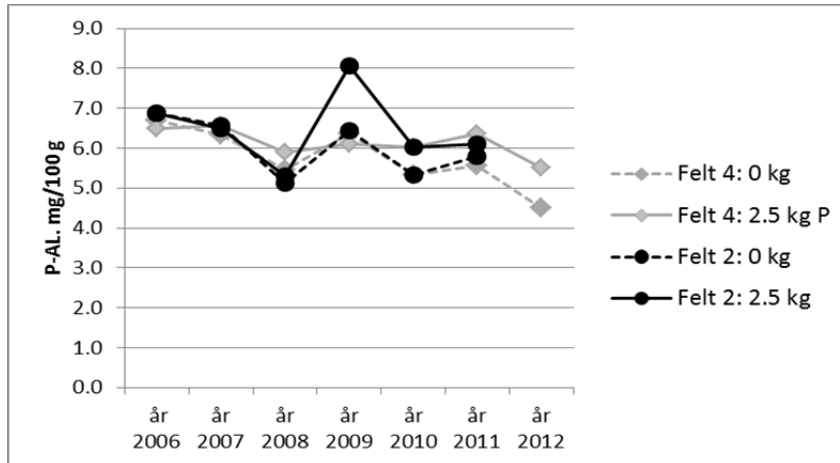
| Feltnr | Sted | Anlagt | Jordart | pH | P-AL | K-AL |
|--------|------------|--------|--------------------|-----|------|------|
| 1 | Østfold 1 | 2006 | Siltig mellomleire | 6,3 | 18 | 25 |
| 2 | Romerike 1 | 2006 | Siltig mellomleire | 6,2 | 7 | 28 |
| 3 | Romerike 2 | 2006 | Silt | 6,1 | 11 | 12 |
| 4 | Ringsaker | 2006 | Lettleire | 6,0 | 7 | 9 |
| 5 | Solør | 2006 | Sandig silt | 6,2 | 7 | 17 |
| 6 | Østfold 2 | 2008 | Lettleire | 6,6 | 5 | 15 |
| 7 | Vestfold | 2008 | Siltig lettleire | 5,7 | 14 | 18 |

Figur 4.2 - 4.4 viser endringene i P-AL over tid for den andre forsøksserien fra forsøkene ble anlagt og frem til våren etter siste forsøksår. Det ble også her målt en del svingninger i P-AL mellom år som vi ikke kan forklare. I 2008 lå P-AL-nivået generelt lavt for samtlige felt og ledd. Det er ingen store forskjeller i endring i P-AL tall mellom ledd som ikke har fått fosforgjødsel og ledd som har fått 2,5 kg P/daa/år, og dermed heller ingen tydelig nedgang i P-AL etter flere år uten fosforgjødsling. For felt 4 og 5 var det imidlertid en tendens til nedgang den siste delen av forsøksperioden. Dette er begge felt med et moderat P-AL nivå (P-AL 7). Dette kan tyde at bufriing av fosfor fra tyngre tilgjengelig fosfor kan bidra til å opprettholde P-AL nivået enn viss tid etter at fosfortilførselen stoppet, men når så bufferkapasiteten blir redusert, reduseres P-AL tallene. Tilsvarende er det i systemforsøkene på Apelsvoll, Toten funnet at der det har vært underskuddsgjødsling med fosfor, var en periode på syv år for kort til å registrere endringer i P-AL, men etter ytterligere 13 år var det mulig å måle endringer i P-AL-fraksjonen i jorda (Korsæth, 2012). I feltene med høye P-AL tall i utgangspunktet (felt 1, 3 og 7) var det ingen tydelig reduksjon i P-AL tallene etter 3-6 år uten fosforgjødsling. Her har jorda tydeligvis stor kapasitet til å bufre P-AL fraksjonen, slik at nivået opprettholdes selv uten fosforgjødsling.

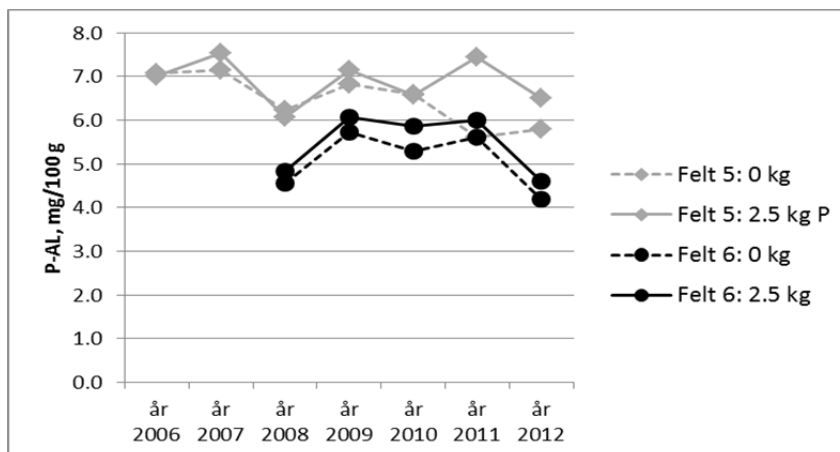


Figur 4.2. Årlige verdier av P-AL for felt 1, 3 og 7 på leddet som ikke fikk fosfor (0 kg) og leddet

som ble gjødslet med 2,5 kg P/daa (A.Ø. Kristoffersen, upublisert).



Figur 4.3. Årlige verdier av P-AL for felt 2 og 4 på leddet som ikke fikk fosfor (0 kg) og leddet som ble gjødslet med 2,5 kg P/daa (A.Ø. Kristoffersen, upublisert).



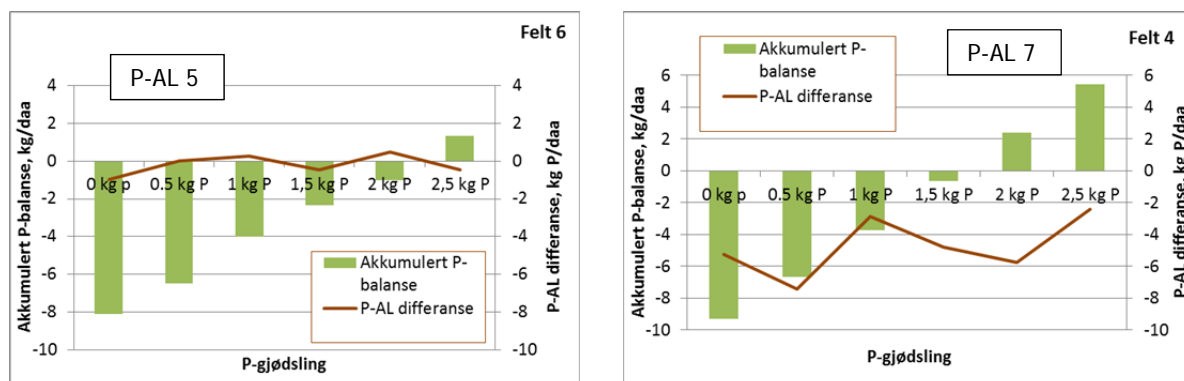
Figur 4.4. Årlige verdier av P-AL for felt 5 og 6 på leddet som ikke fikk fosfor (0 kg) og leddet som ble gjødslet med 2,5 kg P/daa (A.Ø. Kristoffersen, upublisert).

Sammenheng mellom endring i P-AL og fosforbalanse

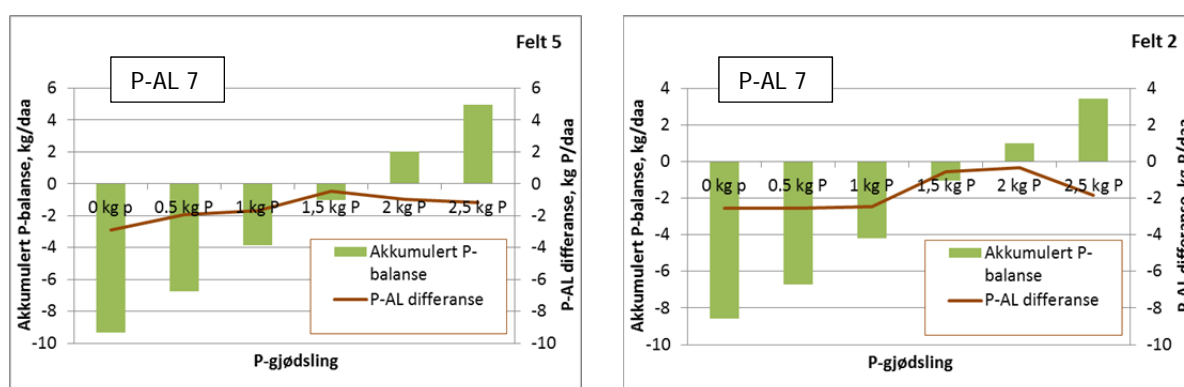
For forsøksserien som gikk fra 2006-2011 er fosforbalansen beregnet og sammenholdt med endring i P-AL omregnet til kg P/daa (Figur 4.5 - 4.8). Linjene i figurene viser differansen i P-AL målt ved start av forsøket og igjen etter avslutning på samtlige fosforgjødslingsnivå. Søylene viser akkumulert balanse gjennom hele forsøksperioden for det enkelte gjødselledd. Bortførelsen av fosfor i balanseregnskapet er beregnet ut fra tørrstoffavling og målt fosforkonsentrasjon i kornet. Videre er det beregnet en halmavling og en fosformengde i halmen. Tilførsel er den årlige mengden fosfor gitt som gjødsel.

Sammenhengen mellom fosforbalanse og endring i P-AL er ikke entydig. Underskudd på fosforbalansen gir generelt en nedgang i P-AL, men overskudd i fosforbalansen har også til dels gitt nedgang i P-AL. Uten fosforgjødsling varierte nedgangen i P-AL fra felt til felt og er antagelig påvirket av jordas fosforstatus ved start av forsøket og av jordas bindingsegenskaper for fosfor.

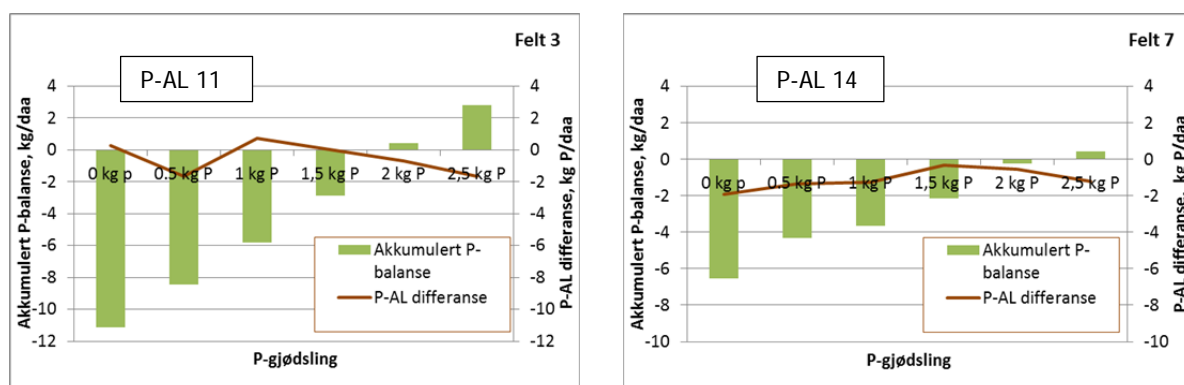
Andel av fosforunderskuddet som kunne gjenfinnes som en nedgang i P-AL fraksjonen varierte fra cirka 0 til 55 % for forsøksleddet uten fosforgjødsling.



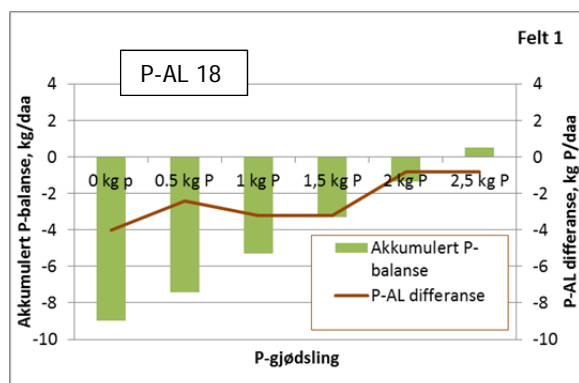
Figur 4.5. Akkumulert fosforbalanse (kg P/daa) for felt 6 og 4 med henholdsvis P-AL 5 og 7, og P-AL-differanse i kg P/daa mellom våren etter avsluttet forsøksperiode og ved start (A.Ø.Kristoffersen, upublisert).



Figur 4.6. Akkumulert fosforbalanse (kg P/daa) for felt 5 og 2 med P-AL 7, og P-AL-differanse i kg P/daa mellom våren etter avsluttet forsøksperiode og ved start. (A.Ø.Kristoffersen, upublisert).



Figur 4.7. Akkumulert fosforbalanse (kg P/daa) for felt 3 og 7 med henholdsvis P-AL 11 og 14, og P-AL-differanse i kg P/daa mellom våren etter avsluttet forsøksperiode og ved start. (A.Ø.Kristoffersen, upublisert).

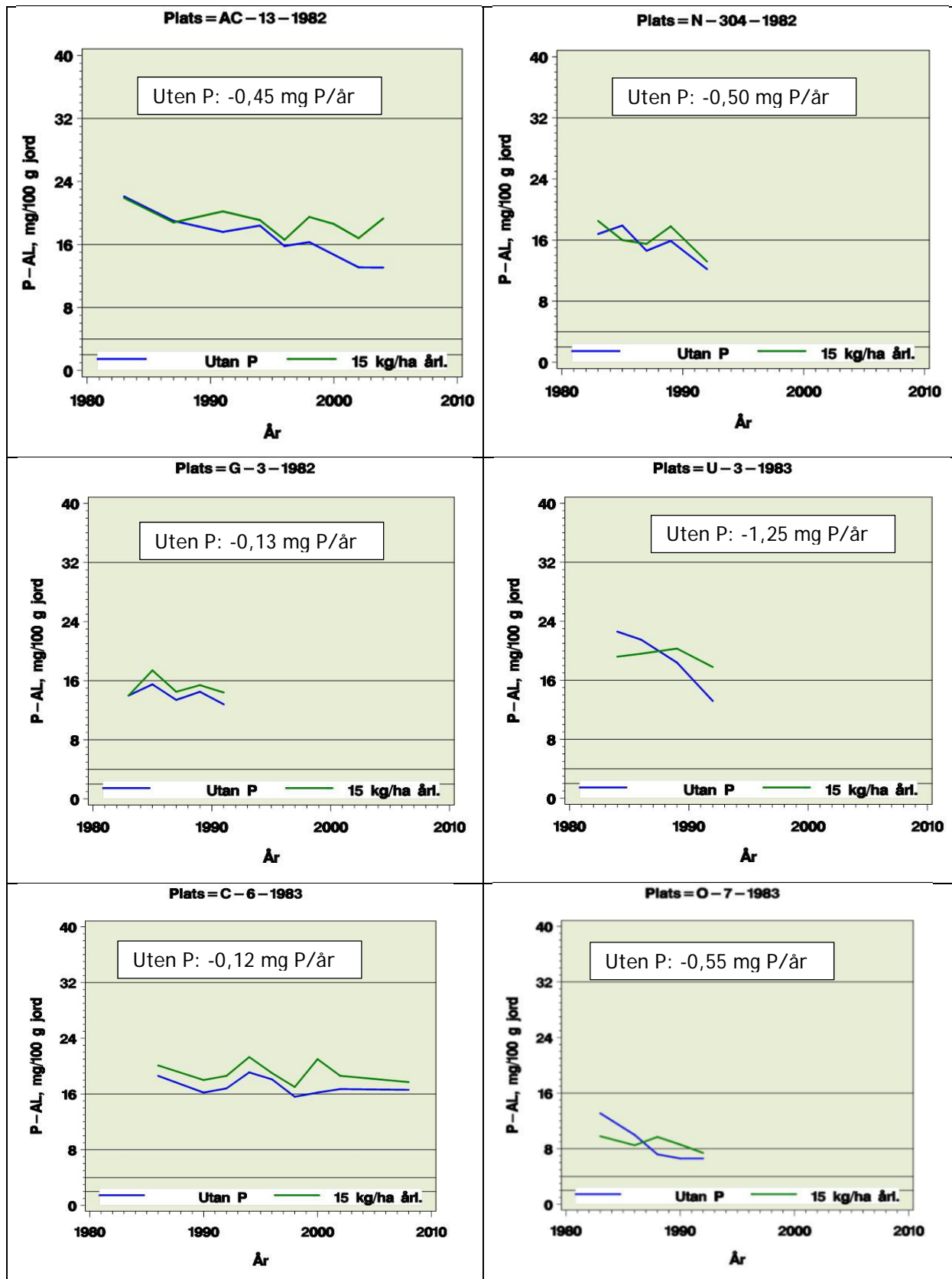


Figur 4.8. Akkumulert fosforbalanse (kg P/daa) for felt 1 med P-AL 18, og P-AL-differanse i kg P/daa mellom våren etter avsluttet forsøksperiode og ved start. (A.Ø.Kristoffersen, upublisert).

4.1.2 Resultater fra svenske forsøk

I Sverige ble det anlagt 17 forsøk i forsøksserien «Exploatering av fosfor på jordar med høga P-AL tal» tidlig på 1980-tallet. Forsøkene gikk over mange år, og noen går fortsatt. Gjennomsnittlig P-AL ved start av forsøkene var 19,6. Disse forsøkene har gått i lenger tid enn de norske, og her viser flere av feltene en tydelig nedgang i P-AL over tid når det ikke gjødsles med fosfor (Mattsson 2012). Figur 4.9 viser resultater for 6 av feltene, og nedgangen for disse varierte fra 0,12 til 1,25 mg P/år. Uten fosforgjødsling avtok P-AL 0,5 mg P/år i gjennomsnitt for alle forsøkene i serien, men som figur 4.9 viser var det stor variasjon mellom feltene. Nedgangen i P-AL var større for felt med pH >6,2 (-0,67 mg P/år) enn for felt med pH <6,2 (-0,18 mg P/år) (Mattson 2002).

Konklusjon: P-AL reduseres som regel langsomt etter opphør av fosforgjødsling. P-AL fraksjonen bufres av tyngre tilgjengelige P-fraksjoner, slik at til dels bare en mindre del av fosforunderskuddet gjenfinnes som en nedgang i P-AL. Hvor raskt P-AL reduseres varierer fra sted til sted og er sannsynligvis avhengig av jordas bindingsegenskaper for fosfor.



Figur 4.9. Endring av P-AL på leddet som ikke fikk fosfor (0 kg) og leddet som ble gjødslet med 1,5 kg P/daa (Mattsson, 2012).

4.2 Endring i jordas innhold av vannløselig fosfor ved redusert gjødsling

P-AL er en ganske stor fosforfraksjon som inneholder fosfor med ulik bindingsstyrke til jorda. En kan anta at opphør av fosforgjødsling reflekteres først i den lettest løselige andelen av P-AL fraksjonen. Hvis det er tilfelle, vil en også kunne forvente en raskere nedgang i fosfortapene etter redusert fosforgjødsling enn det endringene i P-AL tilsier. Som nevnt, vil konsentrasjonen av vannløselig fosfor i jorda ha betydning for hvor mye fosfor som løses ut til en overflateavrenning.

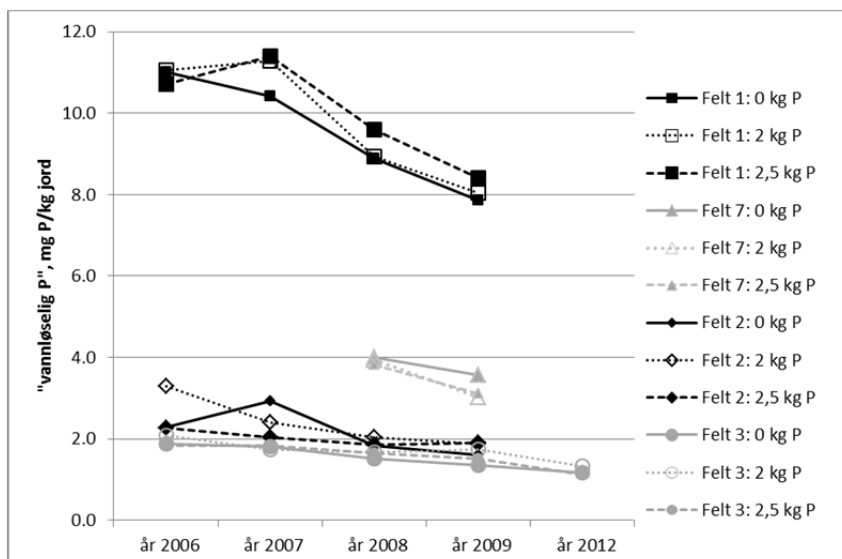
For å undersøke effekten av redusert fosforgjødsling på jordas konsentrasjon av vannløselig fosfor, ble det for denne utredningen analysert vannløselig fosfor i et utvalg av lagrede jordprøver fra forsøksserien med ulik fosforgjødsling som pågikk i perioden 2006-2011. Vannløselig fosfor ble ekstrahert med en svak saltløsning (0,0025 M CaCl₂) for å tilsvare saltkonsentrasjonen i jordvæska. Jord:væske forholdet ved ekstraksjonen var 1:20. Det mest fremtredende resultatet er nivåforskjellene mellom feltene (figur 4.10). Felt 1, med P-AL 18 hadde klart høyest innhold av vannløselig fosfor i forhold til de andre feltene. Nivået lå på ca. 11 mg P/kg jord, og var i underkant 1/10-del i forhold til fosformengden målt med P-AL ekstraksjon. Innholdet av vannløselig fosfor sank i løpet av forsøksperioden, ned til 8 mg P/kg jord i 2009. Det var små forskjeller mellom null-leddet og leddene som ble gjødslet med 2 eller 2,5 kg P årlig.

På felt 7 med P-AL 14, lå innholdet av vannløselig fosfor på 4 mg P/kg jord, og sank ned til 3 mg P/kg jord året etter. Også her var det små forskjeller mellom gjødsel-leddene.

Felt 2 og 3 hadde omtrent likt innhold av vannløselig fosfor, selv om P-AL-nivået ikke var likt. Overraskende var det felt 3, med P-AL 11 som hadde det aller laveste innholdet av vannløselig fosfor. Men som for de andre feltene var det ingen store forskjeller mellom null-leddet og gjødsel-leddene.

Det lave innholdet av vannløselig fosfor på felt 3 kan være med å forklare den årvisse responsen for fosfor som har blitt vist for dette feltet. Det kan tyde på at P-AL-målingen på dette feltet overestimerer den reelle tilgangen på fosfor.

I en studie på New Zealand ga ekstraksjon med 0,01 M CaCl₂ (1:20 i jordvæske forhold), dvs. nesten tilsvarende ekstraksjon som det vi gjorde i denne norske forsøksserien, mindre respons på redusert fosforgjødsling enn ekstraksjon med rent vann i et jord:væske forhold på 1:300 (Dodd et al. 2012). Dette kan tyde på at en ekstraksjon med et jord:væske forhold på 1:20 ikke er sensitiv nok for å registrere eventuell endring i den lettest løselige fraksjonen ved redusert fosforgjødsling. Gjentatt ekstraksjon av vannløselig fosfor viser at jorda fortsatt kan frigi vannløselig fosfor etter en første ekstraksjon (Jarosch, 2012).



Figur 4.10. Vannløselig fosfor (mg P/kg jord), for feltene 1, 2, 3 og 7, og leddene 0, 2 og 2,5 kg P/daa i årene 2006, 2007, 2008, 2009 og 2012.

I et svensk forsøk hvor utvasking av fosfor gjennom fem jordtyper har blitt målt over tid etter opphør av fosforgjødsling, var det bare i en av disse det ble funnet en signifikant reduksjon i utvasking av løst fosfor i løpet av 8-12 år uten fosforgjødsling (Svanbäck et al., 2012). Denne jorda hadde et moderat P-AL nivå (P-AL 7,7) ved start. De andre jordtypene som hadde høyere P-AL tall viste ikke reduksjon i fosforutvasking i løpet av denne tidsperioden. Dette forsøket kan tyde på at jord med høye P-AL tall bufre jordas konsentrasjon av vannløselig fosfor, slik at konsentrasjonen opprettholdes over mange år.

Konklusjon: Antagelsen om at den lettest løselige fraksjonen (vannløselig fosfor) tappes først ved redusert fosforgjødsling, ble ikke bekreftet ved analyse av vannløselig fosfor av jordprøver fra flere fosforgjødslingsforsøk. En årsak kan være at metoden vi valgte ikke er sensitiv nok, fordi bare en del av det fosforet som faktisk er vannløselig blir løst ut med denne metoden. En annen årsak kan være at også denne fraksjonen bufres av andre fosforfraksjoner, slik at nivået opprettholdes flere år etter opphør av fosforgjødsling.

4.3 Effekt av redusert fosforgjødsling ved vestre Vansjø

Tiltaksgjennomføring

I vestre Vansjø i Østfold har vannkvaliteten vært spesielt dårlig på grunn av høye fosfortilførsler som har gitt vekst av giftige blågrønnalger i sommerhalvåret. Det har blitt vist at jordbruket er en viktig bidragsyter til fosfortilførslene. Vansjø er nå et pilotområde for innføring av EU's vannrammedirektiv, og det har blitt gjennomført et tiltaksprosjekt med innføring av miljøkontrakter for gårdbrukerne i 2008. 73 % av arealet ble omfattet av miljøkontaktene som blant annet innebærer strenge krav til nivå av fosforgjødsling og jordarbeiding. Kontraktene innebærer lavere

fosforgjødsling enn de nasjonale anbefalingene. For korn, oljevekster og gras skal det ikke gjødsles med fosfor når P-AL >10. De nasjonale anbefalingene sier null fosforgjødsling når P-AL >14. Tabell 4.3 viser krav til maksimum fosforgjødsling til ulike radkulturer. Disse kravene er satt ut i fra erfaringene fra feltforsøk som er utført. Som det framgår av tabellen ligger maksimum fosforgjødsling betydelig under norm.

Tabell 4.3. Norm for fosforgjødsling til ulike radkulturer og maksimum fosforgjødsling på arealer med kontrakt i tiltaksprosjektet ved vestre Vansjø.

| Kultur | P-gjødsling, norm kg P/daa | P-gjødsling, kontrakt kg P/daa |
|--------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Potet | 3,5 | 2,5 |
| Kål | 3,0 | 2,1 |
| Gulrot | 5,0 | 3,5 |
| Løk | 6,0 | 4,5 |

Det har blitt samlet inn data over fosforgjødslingen ved vestre Vansjø i 2004 og 2007-2010. Dataene fra 2004 representerer gjødslingen før det ble satt fokus på betydningen av redusert fosforgjødsling for å oppnå bedre vannkvalitet. Tabell 4.4 viser middel fosforgjødsling til ulike kulturer i 2004 og 2007-2010 på registrert areal (ca 75 % av jordbruksarealet i nedbørfeltet).

Tabell 4.4. Middel fosforgjødsling til ulike kulturer i 2004 og 2007 - 2010 på ca 75 % av jordbruksarealet ved vestre Vansjø (www.bioforsk.no/vestrevansjo).

| År | kg P/daa | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 2004 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
| Høstkorn | 2,6 | 1,4 | 0,8 | 0,6 | 0 |
| Vårkorn | 2,1 | 1,2 | 0,65 | 0,5 | 0,65 |
| Grønnsaker/bær | 3,7 | 2,8 | 4,0 | 2,1 | 2,0 |
| Poteter | 4,6 | 4,2 | 1,7 | 2,4 | 2,3 |
| Oljevekster | 2,0 | 2,3 | 2,1 | 0 | - |
| Erter | | 0,6 | 0,01 | 0,01 | 0,35 |
| Eng, gras og beite | 3,9 | 1,2 | 0,03 | 0 | 0 |
| Middel gjødsling hos bønder med miljøkontrakt | 2,2 | 1,1 | 0,6 | 0,4 | 0,5 |

Denne kraftige reduksjonen i fosforgjødsling fra 2004 til 2007 skjedde før de nasjonale gjødslingsanbefalingene til korn og gras ble redusert i 2007/08. I 2007 ble det i middel gjødslet med mindre fosfor til korn og gras enn det som fjernes med avlingene. Dette viser at de fleste bøndene tok ansvar da det ble satt sterkere fokus på fosforgjødslingen etter at bekkemålinger i 2005 og 2006 viste at de lokale fosfortilførslene til vestre Vansjø var store. Tallene fra 2008 - 2010 viser middel gjødsling hos de gårdbrukerne som har miljøkontrakt (ca 73 % av jordbruksarealet ved vestre

Vansjø). Tabell 4.4 viser en ytterligere kraftig reduksjon i fosforgjødslingen i 2008 i forhold til 2007. Gjødselforbruket ble nesten halvert fra 2007 til 2008 og utgjorde i middel kun 0,6 kg fosfor per daa i 2008. Totalt fosforforbruk hos bøndene med kontrakt var cirka 11,6 tonn lavere i 2008 enn i 2004. Fosforgjødslingen i 2009 og 2010 lå enda litt lavere enn gjødslingen i 2008.

Selv om gjødslingen er betydelig redusert, må vi nok vente en stund før vi ser tydelige effekter på fosfortapet. Det ligger store mengder fosfor i matjordlaget, og 11,6 tonn fosfor er lite i forhold til totalmengden i matjordlaget. Gjødselfosforet er imidlertid det lettest tilgjengelige fosforet, og bekkemålingene antyder nå at vi begynner å se redusert fosfortap fra jordbruket.

Effekt av tiltak

Resultatene i dette avsnittet er hentet fra Bechmann & Øgaard (under publisering). Seks av jordbruksbekkene rundt vestre Vansjø har blitt overvåket siden 2006 for å dokumentere eventuelle effekter av tiltak i landbruket. Tre av bekkene er lokalisert i kornområder på leirjord (Augerød, Guthus and Sperrebotn), mens de tre andre bekkene er lokalisert i et område med intensiv grønnsaks- og potetproduksjon på sandjord (Støa, Vaskeberget and Huggenes). Jordbruksarealet rundt bekkene i grønnsaks-/potetområdet har meget høyt nivå av P-AL (Tabell 4.5). Ett av kornområdene har også meget høyt P-AL nivå på grunn av kyllingproduksjon som gir fosforrik husdyrgjødsel. Endring i gjennomsnittlig fosforgjødsling i nedbørfeltene til disse 6 bekkene er vist i tabell 4.6. Gårdbrukerne i grønnsaks-/potetområdet var mindre villig til å inngå miljøkontrakter på grunn av større økonomisk risiko ved redusert fosforgjødsling til grønnsaker og poteter. Det er derfor mindre gjødslingsdata for disse områdene. Det er imidlertid sannsynlig at demonstrasjonsfelt i grønnsaker og fokus på redusert fosforgjødsling har påvirket gjødslingspraksis også her.

Tabell 4.5. Andel jordbruksareal og middel P-AL verdier i nedbørfeltene til hver av bekkene. Minimum and maksimum verdier i parentes (Bechmann & Øgaard, (under publisering).

| Nedbørfelt | Andel | P-AL |
|-------------|----------------|------------|
| | jordbruksareal | |
| | % | mg P/100g |
| Augerød | 20 | 11 (3-25) |
| Guthus | 12 | 21 (2-39) |
| Sperrebotn | 19 | 8 (5-23) |
| Støabekken | 89 | 18 (15-20) |
| Vaskeberget | 91 | 16 (11-20) |
| Huggenes | 85 | 20 (9-38) |

Tabell 4.6. *Middel* fosforgjødsling for arealer under miljøkontrakt i de ulike delnedbørfeltene (- : ingen data) (Bechmann & Øgaard, under publisering).*

| Nedbørfelt | 2004 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|-------------|----------|-------|------|------|------|
| | kg P/daa | | | | |
| Augerød | 1,8 | 1,0 | 0,7 | 0 | 0,7 |
| Guthus | 2,1 | 1,9 | 1,0 | 0,2 | 0,2 |
| Sperrebotn | 2,0** | 1,5** | 0,6 | 0,5 | 0,6 |
| Støa | - | - | 0 | 0 | - |
| Vaskeberget | - | - | - | - | - |
| Huggenes | 2,8 | 1,8 | 1,0 | 1,2 | 0,3 |

* Andel av jordbruksarealet som er inkludert i middelverdiene: Augerød 75%, Guthus 100%, Sperrebotn 92%, Støa 70%, Vaskeberget 0%, Huggenes 46%.

**Estimert fra Augerød og Guthus (det er forventet at gårdbrukerne i Sperrebotn gjødsler tilsvarende som gårdbrukerne i Augerød and Guthus).

Til tross for omfattende tiltak viser overvåkningsdataene fra disse bekkene ingen sikre effekter av tiltakene på partikkel (SS)- og totalfosfor (TP)-konsentrasjonene i bekkene. Det var imidlertid en tendens til redusert TP/SS forhold og konsentrasjon av løst fosfat i løpet av overvåkingsperioden (Tabell 4.7). Redusert TP/SS indikerer at ved samme jordtap følger det mindre fosfor. Dette kan delvis tilskrives den kraftige reduksjonen i fosforgjødsling, men renovering av avløp fra spredt bebyggelse bidrar også til redusert TP/SS forhold i bekkene.

Årlig middel TP/SS forhold var høyest i bekkene med en høy andel jordbruksareal i nedbørfeltet (Huggenes, Støa and Vaskeberget) (Tabell 4.7). Flere faktorer i tillegg til andel jordbruksareal forventes å påvirke TP/SS forholdet, bl.a. jordart, erosjonsnivå, P-AL nivå og fosforgjødsling. I dette datamaterialet sammenfaller høy andel jordbruksareal med høye P-AL tall i jorda. I kornområdene har Guthus høye P-AL tall sammenlignet med Augerød og Sperrebotn, men samtidig den laveste andel jordbruksareal. Det er derfor her ikke mulig å skille ut effekten av høye P-AL tall.

Tabell 4.7. *Årlige middelverdier for TP/SS forholdet for 6 bekker i perioden fra 2006 til 2011. P-verdier <0,05 viser statistisk signifikante endringer i årlig middel TP/SS forhold (Bechmann & Øgaard, under publisering).*

| År | Aug | Gut | Spe | Hug | Stø | Vas |
|---------|---------|-------|------|------|------|------|
| | TP/SS ‰ | | | | | |
| 2006/07 | 5,9 | 7,7 | 9,1 | 10,8 | 20,6 | 15,9 |
| 2007/08 | 5,0 | 4,5 | 6,7 | 9,5 | 34,9 | 13,6 |
| 2008/09 | 3,8 | 4,0 | 5,7 | 9,2 | 20,6 | 8,1 |
| 2009/10 | 3,3 | 4,9 | 4,6 | 7,2 | 17,3 | 9,1 |
| 2010/11 | 2,6 | 3,6 | 4,9 | 5,4 | 22,9 | 9,9 |
| P-verdi | 0,047 | 0,001 | 0,17 | 0,28 | 0,18 | 0,24 |

Alle bekkene unntatt Støa viste en avtagende trend over tid i TP/SS forholdet, men nedgangen var bare signifikant for Augerød og Guthus. I Augerød, Guthus og Sperrebotn var det renovering av flere spredte avløp i løpet av 2007, mens i de øvrige bekkene var renoveringen foretatt før 2006. Reduksjonen i TP/SS forholdet fra 2007 til 2008 i disse bekkene kan sannsynligvis tilskrives denne renoveringen. Videre reduksjon i TP/SS forholdet kan være et resultat av den betydelige reduksjonen i fosforgjødsling (60-90 %).

Konklusjon: Etter reduksjon i fosforgjødsling ved vestre Vansjø på cirka 75 % fra 2004 til 2008 har overvåkingsdata fra bekker i området vist en tendens til redusert totalfosfor (TP)/partikkel (SS) forhold og konsentrasjon av løst fosfat i løpet av overvåkingsperioden. Redusert TP/SS indikerer at ved samme jordtap følger det mindre fosfor. Dette kan delvis tilskrives den kraftige reduksjonen i fosforgjødsling, men renovering av avløp fra spredt bebyggelse bidrar også til redusert TP/SS forhold i bekkene. Det er derfor usikkert hvor stor effekt redusert fosforgjødsling har hatt alene.

5. Potensialet for ytterligere målretting av generell gjødslingspraksis

En stor andel av jordbruksarealene har høyere P-AL tall enn nødvendig for å sikre gode avlinger. Dette er illustrert i figur 3.1 som viser fylkesvise gjennomsnittstall for P-AL i dyrka jord. P-AL tallene er spesielt høye i områder med mye husdyr, men også i områder med stor grønnsaks- og potetproduksjon. Det er godt dokumentert at høyt innhold av «plantetilgjengelig» fosfor (ekstrahert som P-AL eller andre metoder som er relatert til plantetilgjengelig fosfor) gir økt innhold av vannløselig fosfor i jorda, og det er også dokumentert økt tap av fosfor i avrenningsforsøk. I noen internasjonale undersøkelser er det dokumentert en ikke-lineær sammenheng mellom plantetilgjengelig- og vannløselig fosfor i jord, dvs. at vannløselige fosfor øker raskere når innholdet av plantetilgjengelig fosfor overskrider en kritisk terskel ("Change point"). Ut i fra dette blir det da et viktig miljømål at konsentrasjonen av «plantetilgjengelig» fosfor er lavere enn denne terskelen. Vi har imidlertid ikke klart å vise en slik terskelverdi for P-AL i et stort datamateriale med norske jordprøver. Vannløselig fosfor øker her lineært med økende P-AL uten noe knekkpunkt hvor vannløselig fosfor begynner å øke raskere. De nylige norske målingene av jordas evne til å adsorbere fosfor ved ulikt P-AL tall viser imidlertid at denne evnen avtar sterkt når P-AL kommer over ~12, og en kan anta at risikoen for fosfortap til vassdrag, særlig løst fosfat, øker sterkere når P-AL kommer over denne verdien. Det var relativt få jordprøver i denne studien, slik at her trengs flere analyser av jordas adsorpsjonskapasitet for å kunne trekke sikre konklusjoner.

Etter den siste endringen i anbefalt fosforgjødsling til korn, oljevekster og gras som ble foretatt i 2008, skal fosforgjødslingen tilpasses jordas P-AL nivå slik at på sikt skal jordas P-AL tall bevege seg mot området 5-7 mg P/100g jord. Dette P-AL nivået regnes som optimalt i forhold til både å sikre gode avlinger og minimere risikoen for fosfortap til vassdrag. De nye gjødslingsanbefalingene innebærer at det skal gjødsles med mindre fosfor enn det som tas ut med avlingen når P-AL >7. Dokumentasjonen i denne rapporten viser at reduksjon i P-AL er en langsom prosess. Bare en mindre andel av fosforunderskuddet i gjødslingen reflekteres som en nedgang i P-AL. Årsaken til dette er antagelig at ved gjødsling med mer fosfor enn det som tas ut med avlingene, slik det var vanlig i flere ti-år, blir bare en del av overskuddet (anslagsvis 20-35 %) gjenfunnet som P-AL. Konsekvensen er at jorda inneholder mye fosfor som kan bufre P-AL-fraksjonen, slik at denne kan holde seg opp i lang tid selv uten fosforgjødsling. Hvor lenge P-AL fraksjonen kan vedlikeholdes med «mating» fra tyngre tilgjengelige fosforfraksjoner er antagelig avhengig av jordas bindingsegenskaper for fosfor.

P-AL fraksjonen er en relativt stor fosforfraksjon som består av fosfor med ulik bindingsstyrke til jorda, og det er nærliggende å tro at den lettest løselige fraksjonen (vannløselig fosfor) vil tappes først ved redusert fosforgjødsling. Dette klarte vi ikke å vise med analyser av jordprøver fra flere fosforgjødslingsforsøk. En årsak kan være at metoden vi valgte ikke er sensitiv nok, fordi bare en del av det fosforet som faktisk er vannløselig blir løst ut med denne metoden, eller at også denne

fraksjonen bufres av andre fosforfraksjoner, slik at nivået opprettholdes flere år etter opphør av fosforgjødsling.

Det er dokumentert at sammenhengen mellom P-AL og vannløselig fosfor er avhengig av jordas fosforbindingsegenskaper og dermed er jordartsspesifikk. I de fleste norske jordtyper er fosforbindings-evnen bestemt av mengden jern og aluminium på jordpartiklens overflater. Ved samme P-AL kan dermed ulike jordarter frigjøre ulike mengder vannløselig fosfor. For å identifisere risikoarealer er det ønskelig å ha tilleggsinformasjon om jordas fosforbindingsevne. Denne informasjonen mangler i dag, men vil sannsynligvis også være nyttig i forhold til å vurdere effekten av fosforgjødsling på avling. Ved samme P-AL har antagelig en jord med høy fosforbindingsevne et høyere fosforgjødslingsbehov enn en jord med lavere fosforbindingsevne. Börling et al (2004) foreslo en «single point P sorption index» for å karakterisere jorda fosforbindingsevne. Analyse av jordas fosforbindingsevne er imidlertid krevende å få utført i stort omfang på grunn av høye kostnader og manglende laboratoriekapasitet for å få gjennomført en slik spesialanalyse. En annen mulighet er beregning av fosformetningsgrad basert på AL-løselig jern (Fe), aluminium (Al) og fosfor (DPS-AL). Dette vil være en lignende indikator som fosformetningsgrad beregnet fra oksalatløselig jern, aluminium og fosfor, men enklere å gjennomføre fordi det kun trengs å ta ut data for jern og aluminium i tillegg til næringselementene ved måling av AL-ekstraktet av jorda. Ved de store analyselaboratoriene brukes ICP til måling av AL-ekstraktet. Ved den type måling kan konsentrasjoner av en lang rekke elementer måles i en analyse. Resultater fra Sverige viser god sammenheng mellom DPS-AL og løst reaktivt fosfor i avrenning (Ulén, 2006; Stenberg et al., 2012). DPS-AL kan derfor være en enkel og nyttig tilleggskarakteristikk for å identifisere risikoarealer og antagelig også for å estimere behovet for fosforgjødsling. DPS-AL ble beregnet som følgende. $DPS-AL = P-AL / (Al-AL + Fe-AL) * 100$ med konsentrasjonene på molbasis (Ulén, 2006).

Identifisering av kritiske arealer

Ulike deler av jordbruksarealene har ulik risiko for å tape fosfor. I tillegg til P-AL nivå har erosjonsrisiko og nærhet til vassdrag betydning for fosfortapene. Ved sårbare vassdrag er det aktuelt med lavere fosforgjødsling enn de nasjonale anbefalingene for å få en raskere uttapping av unødvendig høye nivåer av lett tilgjengelig fosfor. Et slikt tiltak kan gjøres generelt slik det har blitt gjort ved vestre Vansjø i Østfold, men det er sannsynligvis mer kostnadseffektivt hvis det begrenses til de arealene som har stor risiko for å tape fosfor. Bioforsks fosforindeks er et verktøy som kan brukes til å rangere arealer i forhold til risiko for fosfortap (Bechmann, 2005; Øgaard & Krogstad, 2012). Fosforindeks inkluderer både naturgitte forhold og driftspraksis ved beregning av risiko for fosfortap. For å gi informasjon om kun den naturgitte risikoen for å tape fosfor kan en i stedet beregne en *stedsindeks*. Stedsindeksen inkluderer ikke faktorene som angår driftspraksis, og blir beregnet ut i fra de stedsfaste faktorene som er erosjonsrisiko ved høstpløying, flomrisiko, avstand til vassdrag, jordtype, grøfting og jordas P-AL tall. Stedsindeksen kan beregnes ut i fra opplysninger som er tilgjengelige fra jordanalyser, kartkilder samt fra egen kjennskap til arealene. For enkelt å beregne fosforindeks og stedsindeks, er det laget en kalkulator på web (<http://webgis.no/pindeks>).

En beregningsmodul for fosforindeks/stedsindeks blir nå snart tilgjengelig i gjødslingsplanprogrammet «Skifteplan». Det blir da mulig å få ut et kart over fosforindeks og stedsindeks for gårdens arealer i tillegg til gjødslingsplanen.

Profilundersøkelsene på Jæren viser at i enkelte tilfeller kan store tilførsler av husdyrgjødsel over mange år gi en akkumulering av tilgjengelig fosfor også i undergrunnsjorda. Det var imidlertid stor variasjon, slik at det ikke var alle steder med høye P-AL tall i topplaget som viste indikasjoner på nedvasking av fosfor. Tilsvarende viste tidligere grøftevannsundersøkelser på Jæren stor variasjon som ikke kunne forklares ut i fra matjordlagets P-AL tall. Her har vi manglende forståelse av hvilke prosesser som er styrende for utvasking gjennom profilet, og dermed også manglende verktøy for å peke ut risikoarealene.

Redusert fosforgjødsling som tiltak mot fosfortap må også vurderes i forhold til avlingseffekter. Dette er utredet i rapporten «Differensiert fosforgjødsling - betydning for avling, kvalitet og miljø» (Fystro et al. 2012), men vi tar med noen momenter her for å gi en samlet oversikt over effekten av redusert fosforgjødsling. I P-AL-intervallet fra 5 og oppover til 12-14 viser norske forsøk i korn svært variabel effekt av fosforgjødsling, både fra sted til sted og fra år til år. Fosformengder tilsvarende balansejødsling har gitt avlingsøkninger fra 0 og opp til 30 % sammenlignet med ingen fosforgjødsling. Ved P-AL rundt 10 ser det ut til fortsatt være behov for tilførsel av fosfor. Når P-AL-nivået kommer over 12-14, viser de fleste kornforsøk liten respons for fosforgjødsling. Det var en tendens til at under forhold som ikke var optimale for plantevekst (uttrykt ved et lavt avlingsnivå), var responsen for fosforgjødsling sterkere enn under gode vekstbetingelser (høyt avlingsnivå). Om plantene klarer å nyttiggjøre seg fosforet i jorda, avhenger mye av hvordan forholdene i jorda er for rotvekst og fosforopptak. Dette viser at det sannsynligvis også er viktig å fokusere på jordfysiske forhold når en ønsker å bedre utnyttelsen av jordas fosforreserver. Driftspraksis som opprettholder eller bedrer jordstrukturen (f.eks. unngå jordpakking og jordarbeiding under våte forhold) er sannsynligvis viktig for å redusere behovet for fosforgjødsling.

6. Konklusjon

- Fosfortap fra et areal er bestemt av jordas fosforinnhold og faktorer som bestemmer risikoen for transport av fosfor til vassdraget (erosjonsrisiko, jordarbeiding, risiko for overflateavrenning, avstand til vassdrag og flomrisiko). Transport av fosforrike jordpartikler til vassdrag kan reduseres ved redusert eller ingen jordarbeiding om høsten og ved etablering av fangdammer, grasdekte vannveier og vegetasjonssoner mot vassdrag. På grunn av vannoverskuddet som renner av fra arealene, kan imidlertid ikke transportprosessene stoppes, bare reduseres. Det er derfor også viktig å redusere fosforkilden, nemlig jordas fosforinnhold.
- Jordas innhold av lett tilgjengelig fosfor (P-AL) har stor betydning for risikoen for tap fosfor. På grunn av miljøhensyn bør P-AL tallet være ned mot det nivået som er tilstrekkelig for å oppnå gode avlinger. For korn, oljevekster og gras regnes P-AL i området 5-7 mg P/100 g jord som tilstrekkelig når det gjødsles med like mye fosfor som det som fjernes med avlingen. En del grønnsaksvekster krever antagelig høyere fosforinnhold i jorda for å gi optimal avling og kvalitet.
- P-AL er ikke alene tilstrekkelig for å si noe om jordas evne til å frigi fosfor til avrenning. Jordas fosforbindingsevne har også betydning. Ved samme P-AL kan ulike jordarter frigjøre ulike mengder vannløselig fosfor, avhengig av jordas fosforbindingsevne. Vi har mangelfull kunnskap om ulike jordtypers fosforbindingsevne ved ulike P-AL nivå. Analyse av jordas fosforbindingsevne er krevende å få utført i stort omfang på grunn av høye kostnader og manglende laboratoriekapasitet for å få gjennomført en slik spesialanalyse. I de fleste norske jordtyper er fosforbindingsevnen bestemt av mengden jern og aluminium på jordpartiklens overflater. Jordas relative kapasitet til å binde eller frigjøre fosfor kan derfor antagelig enkelt estimeres hvis jern og aluminium måles i tillegg til næringsstoffene når AL-analysen for tilgjengelige næringsstoffer utføres. Det bør imidlertid gjennomføres undersøkelser om sammenhengen mellom ekstrahert jern og aluminium med AL-analysen og jordas fosforbindingsevne for norsk jord, før dette innføres som en metode for å identifisere arealer med stor risiko for å tape fosfor.
- I mineralfattig organisk jord bindes tilført fosfor mye svakere enn i mineraljord. Overskuddet i fosfortilførselene akkumuleres derfor i mindre grad i organisk jord enn i mineraljord, og utvasking av fosforoverskuddet gjennom jordprofilen og ut grøftene er her en viktig tapsvei.
- Profilundersøkelsene på Jæren viste at i enkelte tilfeller kan store tilførsler av husdyrgjødsel over mange år gi en akkumulering av tilgjengelig fosfor også i undergrunnsjorda. Det var imidlertid stor variasjon, slik at det ikke var alle steder med høye

P-AL tall i topplaget som viste indikasjon på nedvasking av fosfor. Vi har mangelfull forståelse av hvilke prosesser som er styrende for utvasking gjennom profilet, og dermed også manglende verktøy for å peke ut risikoarealene. Her er det behov for ytterligere undersøkelser for å kartlegge vilkårene for nedvasking av fosfor. Med mer kunnskap om arealenes risiko for å tape fosfor i husdyrdistriktene, kan en søke å unngå å spre husdyrgjødsel på arealene med størst risiko for tap.

- Reduksjon av fosforgjødsling der jordas P-AL tall er unødvendig høye i jorda er et viktig tiltak for å redusere fosfortapene. Siden jordas fosforstatus er bygd opp over mange år, forventes det at redusert fosforgjødsling er et langsiktig tiltak for å redusere fosfortapene fra jordbruksarealer med mineraljord. Reduksjon i P-AL er en langsom prosess i mineraljord. Bare en mindre andel av fosforunderskuddet i gjødslingen reflekteres som en nedgang i P-AL. Jordas bufferegenskaper har sannsynligvis stor betydning for hvor rask reduksjonen blir. Det kunne ikke dokumenteres at jordas konsentrasjon av vannløselig fosfor reduseres først ved redusert fosforgjødsling. Dette kan tyde på at jord med høye P-AL tall bufferer jordas konsentrasjon av vannløselig fosfor, slik at konsentrasjonen kan opprettholdes over flere år. Ved vestre Vansjø i Østfold er det likevel indikasjon på at 75 % reduksjon i fosforgjødsling har gitt reduksjon i fosfortap.

Vi har mangelfull kunnskap om hvordan ulike fosforfraksjoner påvirkes ved tapping av jordas fosforinnhold, og dermed også mangelfull kunnskap om hvor raskt en kan forvente reduksjon i fosfortapene ved redusert fosforgjødsling.

- Reduksjon av fosforgjødsling på minneralfattig organisk jord forventes å ha en umiddelbar effekt, fordi fosforoverskuddet bindes svakt til jorda og er dermed mer utsatt for utvasking enn fosforoverskudd i mineraljord.
- Bioforsks fosforindeks og stedsindeks kan bidra til å identifisere arealer med stor risiko for å tape fosfor, slik at tiltakene kan målrettes mot arealer hvor effekten er størst.
- I hvor stor grad fosforgjødsling kan reduseres i forhold til dagens anbefalte gjødslingsnivå som tiltak mot fosfortap må vurderes i forhold til avlingseffekter. Dette temaet er behandlet i rapporten «Differensiert fosforgjødsling - betydning for avling, kvalitet og miljø» (Fystro et al., 2012).

7. Referanser

- Bechmann, M. 2005. The phosphorus index tool for assessing phosphorus transfer from agricultural areas in Norway. Dr. Scient. Thesis 2005:24, Norwegian University of Life Sciences, Ås, Norway.
- Bechmann, M., Greipsland, I. & Øgaard, A.F. (Under publisering). Phosphorus use in agriculture. In: Bechmann, M. (Red.): Agriculture and Environment- Long Term Monitoring.
- Bechmann, M. & Øgaard, A.F., Stålnacke, P. & Ulén, B. (Under publisering). Phosphorus concentrations and losses. In: Bechmann, M. (Red.): Agriculture and Environment- Long Term Monitoring.
- Bechmann, M. & Øgaard, A.F. (Under publisering) Water quality changes following intensive focus on mitigation methods to reduce phosphorus losses in the catchment of lake Vansjø, Norway. Agrochemistry and Soil Science Online (ATON).
- Börling, K., Ottabong, E. & Barberis, E. 2004. Soil variables for predicting potential phosphorus release in Swedish noncalcareous soils. *J. Environ. Qual.* 33: 99-106.
- Brookes, P.C., Heckrath, G., De Smet, J., Hofman, G. & Vanderdeelen, J. 1997. Losses of phosphorus in drainage water. In: Tunney, H., Carton, O.T., Brookes, P.C. & Johnston, A.E. (reds.) Phosphorus loss from soil to water. CAB International, pp. 253-271.
- Chardon, W.J., Oenema, O., Castilho, P., Vriesema, R., Japenga, J. & Blaauw, D. 1997. Organic phosphorus in solutions and leachates from soils treated with animal slurries. *J. Environ. Qual.* 26: 372-378.
- Djodjic, F., Bergström, L., Ulén B. & Shirmohammadi, A. 1999. Mode of transport of surface-applied phosphorus-33 through a clay and sandy soil. *J. Environ. Qual.* 28, 1273-1282.
- Djodjic, F., Börling, K. & Bergström, L. 2004. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content. *J. Environ. Qual.* 33:678-684.
- Dodd, R.J., McDowell, R.W. & Condrón, L.M. 2012. Predicting the changes in environmentally and agronomically significant phosphorus forms following the cessation of phosphorus fertilizer applications to grassland. *Soil Use and Management* 28: 135-147.
- Dorich, R.A., Nelson, D.W. & Sommers, L.E. 1984. Algal availability of phosphorus in suspended stream sediments of varying particle size. *J. Environ. Qual.* 13: 82-86.
- Egnér, H., Riehm, H. & Domingo, W.R. 1960. Untersuchungen über die chemische Boden-Analyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Boden. *Kungliga Lantbrukshögskolans Annaler* 26, 199-215.
- Fystro, G., Kristoffersen, A.Ø., Krogstad, T., Løes, A.K. & Lunnan, T. 2012. Differensiert fosforgjødsling - betydning for avling, kvalitet og miljø. *Bioforsk Rapport* 7 (165). 63 s.
- Jarosch, K. 2012. Desorption of water soluble phosphorus from soil - development of a consecutive extraction method. Master Thesis 2012:15, Institutionen för mark och miljö, Sveriges Lantbruksuniversitet. 45 s.
- Korsæth, A. 2012. N, P and K budgets and changes in selected topsoil nutrients over 10 years in a long-term experiment with conventional and organic crop rotations. *Applied and Environmental Soil Science*. Vol 2012, 17 pp.

Krogstad, T. 1987. Utvikling og vurdering av fosfortilstand i dyrka jord i perioden 1960-85 med hovedvekt på Romerike og Jæren. *Jord og myr* 11 (5):153-163.

Krogstad, T. & Løvstad, Ø. 1991. Available soil phosphorus for planktonic blue-green algae in eutrophic lake water samples. *Arch. Hydrobiol.* 122, 117-128.

Mattsson, L. 2002. Exploiting P in heavily P-dressed fields in Sweden. *Arch. of Agr. and soil Sci.* 48: 577-583.

Mattsson, L. 2010. Vikande fosforanvändning - vad händer med bördighet och skördar? Notat, Institutionen för mark och miljö, Sveriges Lantbruksuniversitet. 14 s.

McDowell, R.W. & Sharpley, A.N. 2001. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage. *J. Environ. Qual.* 30: 508-520.

Pedersen, R. 2008. Fosforfraksjoner i jord og sedimenter. Masteroppgave, Inst.for plante- og miljøvitenskap, UMB. 40 s.

Pote, D.H., Daniel, T.C., Nichols, D.J., Sharpley, A.N., Moore, P.A., Miller, D.M., & Edwards, D.R. 1996. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:855-859.

Pote, D.H., Daniel, T.C., Sharpley, A.N., Moore, P.A., Edwards, D.R. & Nichols, D.J. 1999. Relationships between phosphorus levels in three Ultisols and phosphorus concentrations in runoff. *J. Environ. Qual.* 28:170-175.

Schoumans, O.F. & Groenendijk, P. 2000. Modeling soil phosphorus levels and phosphorus leaching from agricultural land in the Netherlands. *J. Environ. Qual.* 29:111-116.

Sharpley, A.N. 1995. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. *J. Environ. Qual.* 24:920-926.

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. *Sci. of Total Environ.* 434: 79-89.

Svanbäck, A., Ulén, B. & Bergström, L. 2012. Phosphorus leaching after mining the soil reserves. Poster.

Ulén, B. 2006. A simplified risk assessment for losses of dissolved reactive phosphorus through drainage pipes from agricultural soils. *Acta Agric. Scand. Sect. B, Soil and Plant Sci.* 56: 307-314.

Uhlen, G. 1989a. Nutrient leaching and surface runoff in field lysimeters on a cultivated soil. *Nutrient balances 1974-81. Norwegian J. Agric. Sci.* 3:33-46.

Uhlen, G. 1989b. Surface runoff losses of phosphorus and other elements from fertilized grassland. *Norwegian J. Agric. Sci.* 3:46-55.

Uhlen, G. & Østerud J.G. 1992. Nitrogen, fosfor og kalium i grøftevannsprøver fra dyrket mark. *Norsk Landbruksforskning*, 6:61-72.

Yli-Halla, M., Hartikainen, H., Ekholm, P., Turtola, E., Puustinen, M. & Kallio, K. 1995. Assessment of soluble phosphorus load in surface runoff by soil analyses. *Agric. Ecosyst. Environ.* 56:53-62.

Øgaard, A.F. 1994. Relationships between the ratio of plant-available phosphorus (P-AL) to total phosphorus and soil properties. *Acta Agric. Scand. Sect. B, Soil and Plant Sci.* 44: 136-141.

Øgaard, A.F. 1995. Effect of phosphorus fertilization and content of plant-available phosphorus (P-AL) on algal-available phosphorus in soils. *Acta Agric. Scand. Sect. B, Soil and Plant Sci.* 45: 242-250.

Øgaard, A.F. 1996. Effect of phosphorus fertilization on the concentration of total and algal-available phosphorus in different particle-size fractions in Norwegian agricultural soils. *Acta Agric. Scand. Sect. B, Soil and Plant Sci.* 46: 24-29.

Øgaard, A.F. 2012. Kartlegging av fosfor og nitrogen i grøftevann i Figgjoelvas nedbørfelt. *Bioforsk Rapport 7(89)*. 24 s.

Øgaard, A.F. og Krogstad, T. 2007. Distribution of extractable phosphorus in soil profiles on heavily fertilized clay and sandy soils in South Eastern Norway. *Proceedings of the 5th International Phosphorus Workshop "Diffuse phosphorus loss"*, DJF Plant Sciences, 130: 345-347.

Øgaard, A.F. og Krogstad, T. 2012. Kalkulator for fosforindeks (P-indeks)-innføring i P-indeks og veiledning i bruk av kalkulatoren. *Håndbok utgitt av PURA vannområde*.