



Bioforsk Rapport

Bioforsk Report

Vol. 7 Nr. 104 2012

Effekt av avløpslam på risiko for fosfortap

Anne Falk Øgaard og Anne Bøen

Bioforsk Jord og miljø, Ås

www.bioforsk.no



<i>Tittel/Title:</i> Effekt av avløpsslam på risiko for fosfortap
<i>Forfatter(e)/Author(s):</i> Anne Falk Øgaard og Anne Bøen

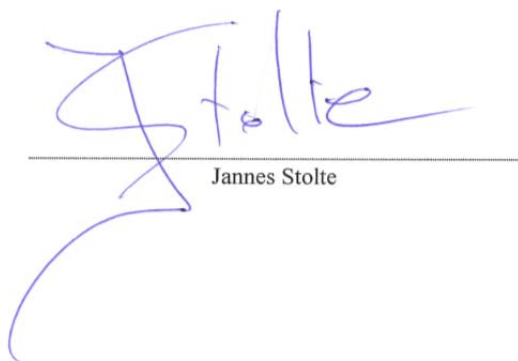
<i>Dato/Date:</i> 07.08.2012	<i>Tilgjengelighet/Availability:</i> Åpen	<i>Prosjekt nr./Project No.:</i> 8252	<i>Saksnr./Archive No.:</i>
<i>Rapport nr./Report No.:</i> 104/2012	<i>ISBN-nr./ISBN-no:</i> 978-82-17-00962-7	<i>Antall sider/Number of pages:</i> 23	<i>Antall vedlegg/Number of appendices:</i>

<i>Oppdragsgiver/Employer:</i> Klif	<i>Kontaktperson/Contact person:</i> Terje Farestveit
--	--

<i>Stikkord/Keywords:</i> Avløpsslam, miljøeffekter, fosfor, jordstruktur	<i>Fagområde/Field of work:</i> Vannkvalitet og arealbruk
--	--

<i>Sammendrag:</i> Tilførsel av avløpsslam til jordbruksarealer etter dagens regelverk gir store fosfortilførsler, i mange tilfeller en større mengde fosfor enn det avlingene tar ut i løpet av 10 år. Jordas totale fosforinnhold, fosforets løselighet/tilgjengelighet og jordstruktur er viktige faktorer som påvirker fosfortapet fra jordbruksarealer. Denne rapporten gir en oversikt over kunnskapsstatus og kunnskapsbehov når det gjelder effekt av tilført avløpsslam på disse faktorene og dermed på risiko for fosfortap.

Godkjent / Approved



Jannes Stolte

Prosjektleder / Project leader



Anne Falk Øgaard

Forord

Denne rapporten er basert på en utredning utført på oppdrag fra Klima- og forurensningsdirektoratet (Klif) høsten 2011. Utredningen er omarbeidet for å tilpasses en åpen publisering.

Fokus i utredningen var risiko for avrenning av fosfor ved bruk av avløpsslam i jordbruket og betydningen av avløpsslam som kilde til næringsstoff/organisk materiale til jord. Utredningen hadde følgende formål:

- Presentere kunnskap så langt som dette foreligger på de gitte temaene
- Presentere problemstillinger hvor det er behov for mer data eller dokumentasjon

Innhold

Sammendrag.....	5
1. Innledning.....	6
2. Effekt av tilførsel av avløpsslam på ulike fosfor-fraksjoner i jord – betydning for risiko for fosfortap.....	7
3. Algetilgjengelighet av partikkelbundet fosfor.....	13
4. Avløpsslam som jordforbedringsmiddel	15
5. Effekt av slamtilførsel på risiko for fosfortap – nettoeffekt av jordas fosforstatus og jordstruktur	18
6. Miljørisiko ved bruk av slam på grøntarealer	20
7. Konklusjon	22
8. Referanser.....	23

Sammendrag

Tilførsel av avløpslam etter dagens regelverk gir stor økning i jordas totale fosforinnhold. I mange tilfeller er fosfortilførselen større enn den mengde fosfor avlingene tar ut i løpet av 10 år. Effekt av avløpsslam på jordas konsentrasjon av lett tilgjengelig fosfor varierer mye mellom ulike slamtyper, fra en reduksjon til stor økning i lett tilgjengelig fosfor.

Ved uendret jordtap etter en slamtilførsel må en anta at tapet av partikkelbundet fosfor øker, fordi jordas totale fosforkonsentrasjon øker. Effekten av slamtilførsel på tapet av løst fosfor varierer antagelig fra en reduksjon til en økning avhengig slamtype.

Avløpsslam har en positiv effekt på jordstrukturen i leirjord som har blitt drevet med ensidig korndyrking med lite eller ingen tilførsel av husdyrgjødsel. Med bedret jordstruktur minsker risikoen for fosfortap ved jorderosjon.

Nettoeffekten på fosfortap av at slammet øker jordas fosforstatus, men bedrer jordstrukturen er usikker. Den varierer sannsynligvis både med slamtype og egenskaper til jorda som får tilført slam. En positiv struktureffekt er imidlertid tidsbegrenset, og den kan avta raskere enn fosforinnholdet i jorda.

I grøntanlegg er det tillatt med større mengder avløpsslam enn i jordbruket. Selv om grøntanlegg er vegetasjonsdekket og i liten grad utsatt for erosjon, kan en ikke utelukke økt fosfortap fra grøntanlegg som har blitt anlagt med store mengder avløpsslam.

Det er en del kunnskapsmangel når det gjelder effekter av ulike typer avløpsslam på både jordkjemiske og jordfysiske forhold, spesielt langsiktige effekter har vi lite kunnskaper om.

1. Innledning

I Norge blir rundt 60 % av avløpsslammet tilført jordbruksarealer. Det er jordbruksområdene i Akershus, Østfold, Buskerud og Vestfold som mottar mest slam, men tilførsel av slam til jordbruksarealer foregår i nesten alle fylker fra Nord-Trøndelag og sørover. Rundt 30 % av slammet brukes i grøntområder (inkl. toppdekke på avfallsdeponier). Denne typen bruk er utbredt i hele landet.

I jordbruket brukes avløpsslam først og fremst som et jordforbedringsmiddel. På jordbruksarealer tillates brukt opp til 2 tonn tørrstoff (TS)/daa/10 år hvis slammet tilfredsstiller kravene til kvalitetsklasse II. Slam i kvalitetsklasse I tillates brukt i opp til 4 tonn TS/daa/10 år. Kvalitetsklassene er satt ut i fra innholdet av tungmetaller. Den tillatte mengden for en 10-års periode kan tilføres i en dose. Med maksimalt tillatt mengde slam tilføres det mye organisk materiale og næringsstoffer. To tonn slamtørrstoff per dekar gir en tilførsel av fosfor (P) varierende fra cirka 15-60 kg P/dekar avhengig av hvilken slamtype som brukes. Totalt fosforinnhold i dyrka jord ligger ofte mellom 100 og 300 kg P/dekar i matjordlaget. Tilførsel av maksimalt tillatt mengde slam kan dermed gi en betydelig økning i jordas totale fosforinnhold. Dette kan være negativt med hensyn til risiko for fosfortap.

Fosfortap fra jordbruksarealer er en betydelig årsak til eutrofiering i landbrukspåvirkede innsjøer. Redusert fosforgjødsling er en av strategiene for å redusere fosfortapene fra jordbruket, slik at god økologisk status, ifølge kravene i EU's vannrammedirektiv, kan oppnås i vassdragene. I dagens regelverk er tilførselsmengden av avløpsslam bare regulert i forhold til innhold av tungmetaller. Tilførsel av fosfor med avløpsslam er ikke regulert, og bruk av avløpsslam gir derfor ofte en meget stor fosfortilførsel sammenlignet med anbefalt fosforgjødsling.

Tilførsel av organisk materiale med 2 tonn slam TS/dekar er i størrelsesorden 600 -1100 kg/dekar, avhengig av slamtype. Den store mengden organisk materiale som tilføres med slammet kan ha en midlertidig positiv effekt på jordstrukturen. God jordstruktur gir lavere erosjonsrisiko og kan kompensere for den økte risikoen for fosfortap som skyldes de store fosfortilførselene med slam.

Fosfor i slam er ikke bare en potensiell forurensningskilde, det er også en betydelig fosforressurs. Reserver av mineralisk fosfor er begrenset, og effektiv resirkulering av fosforet bør ha et større fokus enn det har i dag. SSB estimerte i 1999 at cirka 2000 tonn fosfor ble rensset fra norsk avløp. Dette havner hovedsakelig i avløpsslam. Til sammenlikning er årlig norsk forbruk av fosfor i mineralgjødsel 8-9000 tonn. Plantetilgjengeligheten av fosfor i norsk avløpsslam er usikker og ofte betydelig lavere enn fosfor i mineralgjødsel (Krogstad et al. 2004). Med tanke på resirkulering av fosfor er det ønskelig å bedre plantetilgjengeligheten av fosforet i avløpsslam, men økt tilgjengelighet vil kreve reduserte tilførselsmengder hvis ikke risikoen for fosfortap skal øke.

2. Effekt av tilførsel av avløpsslam på ulike fosforfraksjoner i jord - betydning for risiko for fosfortap

Problemstilling

Tilførsel av maksimalt tillatt mengde avløpsslam gir en stor fosfortilførsel, men det meste av fosforet i jern- og/eller aluminiumsfelt avløpsslam er sterkt bundet. Det er derfor spørsmål om i hvilken grad tilførsel av avløpsslam påvirker tilgjengeligheten av fosfor i jorda og om risikoen for fosfortap øker. Det er også spørsmål om varigheten av eventuelle fosforeffekter.

Hva vi vet

Fosfortap fra jordbruksareal

Den viktigste transportmekanismen for fosfor fra jordbruksareal til vassdrag er overflateavrenning og erosjon av fosforrike jordpartikler. Utvasking av løst fosfor gjennom jordprofilen og ut i grøftene er lav, fordi det aller meste av fosforet er bundet til jordpartiklene. En del av fosforet på eroderte jordpartikler vil imidlertid frigjøres når jorda kommer i kontakt med vann som har en lav fosforkonsentrasjon. Ved overflateavrenning kan i tillegg fosfor løses ut fra overflatejorda. Mengden fosfor som frigjøres til vannet øker med jordas innhold av lett tilgjengelig fosfor (Øgaard, 1995). Jordas og slammets innhold av lettløselig fosfor i tillegg til det totale fosforinnholdet har derfor betydning for fosfortapet. Med økende konsentrasjon av P-AL i jorda avtar bindingsstyrken for nytt tilført fosfor. Risiko for økt fosfortap ved slamtilførsel kan derfor bli større for jord med høyt P-AL tall enn for jord med lavere P-AL tall.

Totalfosfor i slam

Tilførsel av avløpsslam kan gi en betydelig økning i jordas totale fosforinnhold. Med utgangspunkt i en jord med 200 kg P/dekar i matjordlaget vil en slamtilførsel på 2 tonn TS/dekar som inneholder 20-60 kg fosfor, øke jordas totale fosforinnhold med 10-30 %.

En kornavling fjerner vanligvis 1,5-2 kg P/dekar. Det betyr at selv uten annen fosforgjødsling vil en ofte ikke kunne ta ut alt fosforet som er tilført med slammene i løpet av en 10-års periode. Det er derfor stor sannsynlighet for at en får akkumulering av fosfor der det tilføres maksimalt tillatt mengde avløpsslam. Med høyere fosforkonsentrasjon i jorda blir fosfortapet større hvis jordtapet er uendret.

Plantetilgjengelig fosfor i slam

Ulike metoder for rensing av avløpsvann og slambehandling gir ulik tilgjengelighet av fosfor i slammene. Bøen (2010) har i en sammenstilling av norske (f.eks. Krogstad et al., 2004) og internasjonale undersøkelser konkludert med følgende når det gjelder effekt av ulike rense- og slambehandlingsmetoder på plantetilgjengelighet av fosfor i slammene:

Avløpsrensing

- Biologisk fosforfjerning: Plantetilgjengelighet = fosfor i mineralgjødsel
- Felling med jern (Fe) og/eller aluminium (Al): Plantetilgjengelighet avtar med økende innhold av Fe og Al i slammene
- Felling med Ca: Reduserer plantetilgjengelighet mindre enn Fe og Al

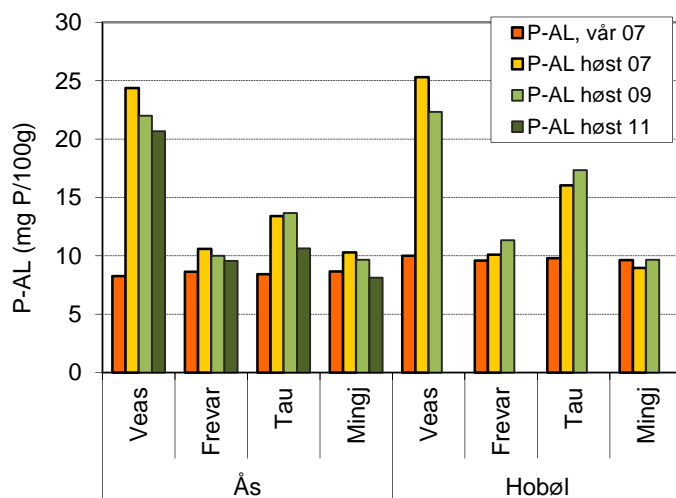
Slambehandling

- Kalk reduserer plantetilgjengelighet der det ikke er brukt Fe og/eller Al til felling
- Kalk øker plantetilgjengelighet der det er brukt Fe og/eller Al til felling
- Biologiske stabiliseringsmetoder har gitt varierende utslag på plantetilgjengelighet av fosfor
- Tørking reduserer plantetilgjengelighet av fosfor

Flere av undersøkelsene konkluderer med at jern- og aluminiumsbaserte fellingskjemikalier har relativt lik effekt på plantetilgjengelig fosfor i avløpsslam, i alle fall på kortsiktig plantetilgjengelighet av fosfor. De fleste undersøkelsene er gjort på ferdige slamprodukter. Det betyr at observert fosfortilgjengelighet er en "sumeffekt" av alle prosessstrinn i avløpsanlegget. Dette gjør undersøkelsene lite egnet til å synliggjøre om det er mindre, men likevel signifikante, forskjeller mellom jern- og aluminiumsbaserte fellingskjemikalier. Langsiktige forskjeller i fosfortilgjengelighet i jord tilført jern- eller aluminiumsfelt slam er lite undersøkt, men Maguire et al. (2000) fant at aluminiumsbundet fosfor i jord korrelerer bedre mot fosfordesorpsjon enn jernbundet fosfor og antyder at aluminiumsbundet fosfor er viktigere for utløsning av fosfor til jordvæska enn jernbundet fosfor.

I de fleste renseanleggene for avløpssvann i Norge brukes jern og/eller aluminium til felling av fosforet. Mengden fellingskjemikalier i slammet varierer imidlertid mye mellom de ulike avløpsanleggene. Noen avløpsanlegg bruker kalk i slambehandlingen. Store forskjeller i mengden fellingskjemikalier og forskjeller i slambehandling medfører store forskjeller i plantetilgjengelighet av fosforet mellom ulike slamtyper.

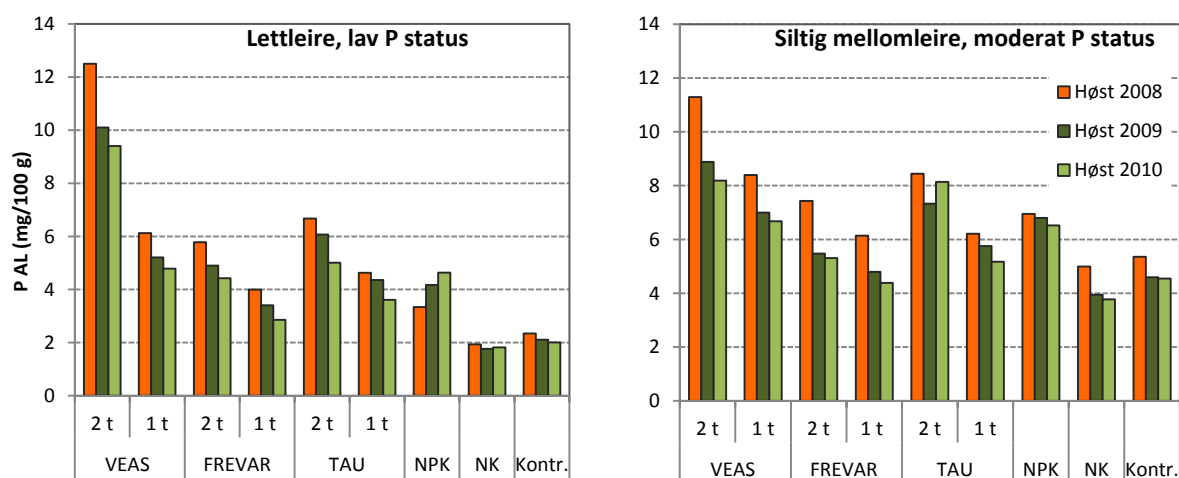
I Norge angis jordas innhold av lett tilgjengelig/plantetilgjengelig fosfor som Ammonium-Acetat-Laktat-ekstraherbart fosfor (P-AL). I norske feltforsøk utført i perioden 1977-1990 ble det funnet at avløpsslam felt med aluminium- og/eller jernsalter i liten grad påvirket P-AL tallet i jorda der det var tilført 2 tonn TS/daa, mens tilførsel av kalkbehandlet slam økte P-AL i jorda (Ekeberg 1991). Tilsvarende resultat er funnet i pågående feltforsøk med tre slamtyper ved to lokaliteter (Ås og Hobøl) som ble etablert i 2007 i regi av Bioforsk (Øgaard et al., 2008). Alle tre slamtypene som er med i forsøket er felt med jern og aluminium. To av dem (VEAS og TAU) er tilsatt kalk i slambehandlingen, mens den tredje (FREVAR) er anaerobt stabilisert uten kalktilsetning. Slammet ble tilført i mengder på 2 tonn TS/daa og innblandet til bare 10 cm dybde. Fosfortilførslene med slammet var 30, 14 og 27 kg P/daa for henholdsvis VEAS, TAU og FREVAR slammet. De kalkbehandlede slamtypene, og da spesielt VEAS-slammet ga stor økning i jordas P-AL tall (Fig.1). FREVAR-slammet ga også noe økning i jordas P-AL tall. Ved innblanding av slammet til 20 cm, som er mest vanlig, kan en anta at økningen i P-AL ville vært cirka det halve. Dette ville fortsatt vært en uønsket stor økning i P-AL. For korn og engvekster regnes P-AL 5-7 som et optimalt nivå for å sikre både gode avlinger og minst mulig miljøbelastning. Ved P-AL > 14 anbefales det ingen fosforgjødsling til korn, oljevekster og gras. P-AL nivået på rutene som fikk tilført kalkbehandlet slam var fortsatt høyt fire år etter tilførselen.



Figur 1. Virkning av tre ulike typer avløpsslam og mineralgjødning på jordas konsentrasjon av P-AL. Vår 07 viser P-AL tall i jorda før slamtilførsel.

Liknende resultater er også funnet i et pottforsøk gjennomført ved Bioforsk med to jordtyper (siltig mellomleire og lettleire) og de samme slamtypene som i feltforsøket (figur 2). Resultatene viser at de kalkede slamtypene (VEAS, TAU) ga en større økning i P-AL i jorda enn den ikke-kalkete slamtypen (FREVAR). Økningen i P-AL økte med stigende dosering av slam. I de fleste tilfellene sank P-AL tallet hvert år etter slamtilførselen, men særlig der det var brukt 2 tonn kalkbehandlet slam var P-AL-tallet fortsatt tydelig høyere enn kontrollleddene etter 3 sesonger. I pottforsøk blir det en mer intensiv utnyttelse av næringsstoffene enn i felt, og dette er nok årsaken til at det ble en tydeligere nedgang i P-AL årene etter tilførsel enn det som kunne observeres i felt.

Responseren i P-AL var forskjellig for de to jordtypene, noe som viser at jordas bindingsegenskaper for fosfor også er viktig for tilgjengeligheten av fosfor i det tilførte slammet.

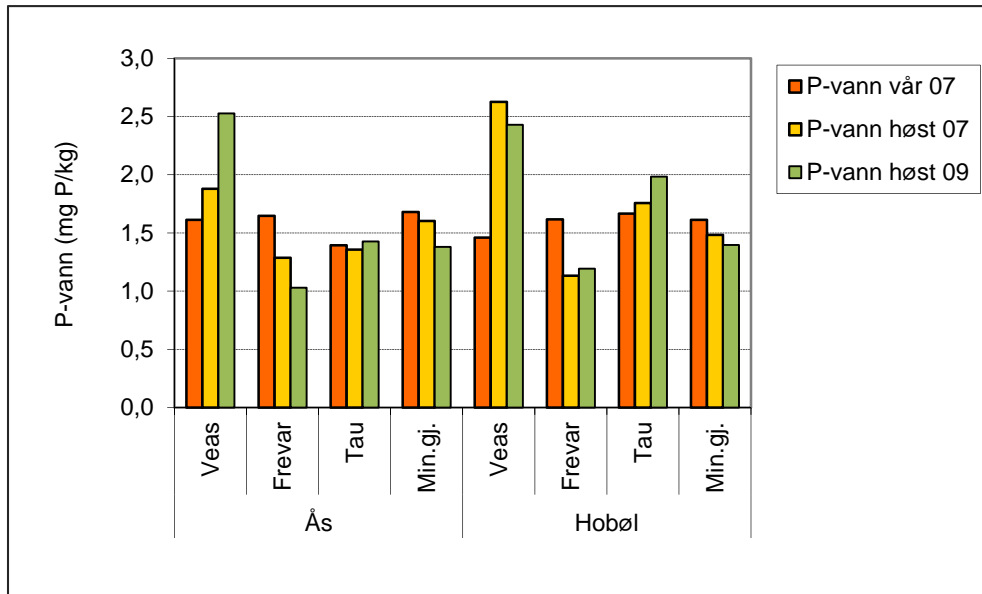


Figur 2. Virkning av 3 typer avløpslam og mineralgjødning på P-AL tallet i jorda. Resultatene er fra et pottforsøk med raigras startet våren 2008. Slam ble tilført i 2 mengder tilsvarende 1 eller 2 tonn TS per dekar. Kontr. = kontroll uten gjødning.

I et svensk langvarig forsøk med to slamtyper som var produsert med en kombinasjon av biologisk felling og jernfelling er det også dokumentert betydelig økning i jordas P-AL tall ved tilførsel av 400 kg TS/dekar hvert 4. år (Andersson, 2009). På den ene lokaliteten hvor det ble tilført slam med et fosforinnhold på 3,3-5,7 %, økte P-AL fra 9 til 25 mg P/100 g i løpet av 25 år. På den andre lokaliteten som ble tilført slam med et fosforinnhold på 2,7-3,5 % økte P-AL fra 11 til 16 mg P/100 g i samme periode.

Vannløselig fosfor

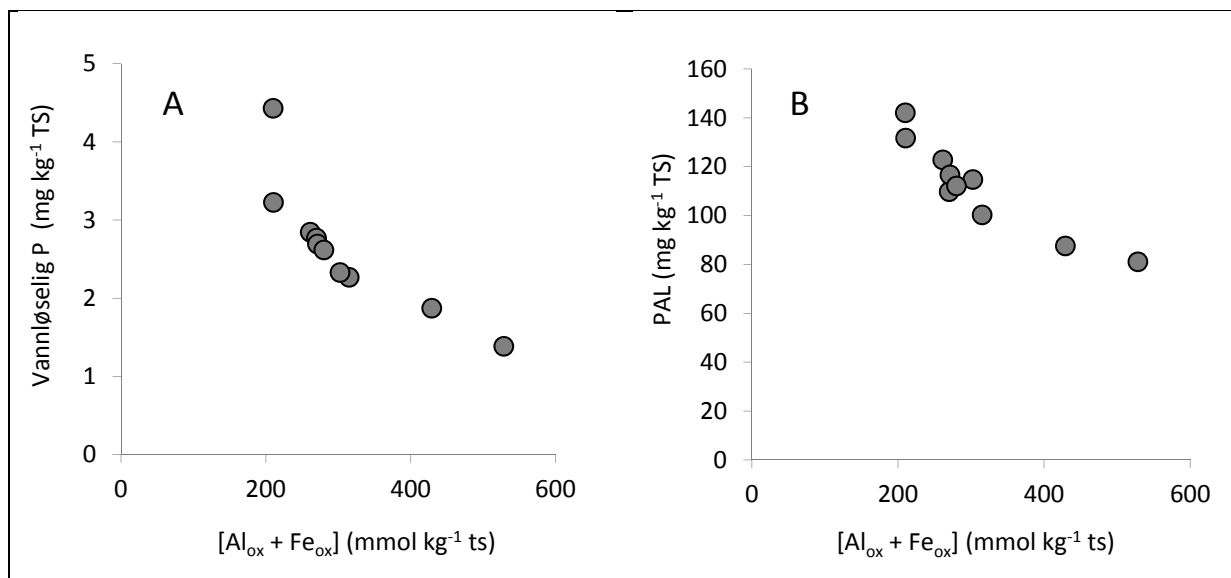
I de pågående feltforsøkene i Ås og Hobøl er det også analysert for vannløselig fosfor i jorda før og etter slamtilførsel. Konsentrasjonen av vannløselig fosfor i jorda er lav sammenlignet med konsentrasjonen av P-AL, men denne fraksjonen kan si noe om hvor lett fosfor løses ut til overflateavrenning. VEAS-slammet økte jordas konsentrasjon av vannløselig fosfor (Fig.3). For TAU-slammet var det ingen effekt på vannløselig fosfor i feltet i Ås, mens det var en liten økning i feltet i Hobøl. FREVAR-slammet ga en nedgang i jordas konsentrasjon av vannløselig fosfor. FREVAR-slammet hadde en høy konsentrasjon av jern og aluminium, noe som bidrar til å binde deler av jordas innhold av lett løselig fosfor. Tilførsel av FREVAR-slam kan dermed gi mindre løst fosfor i avrenningen.



Figur 3. Virkning av ulike typer avløpsslam og mineralgjødsel på jordas konsentrasjon av vannløselig fosfor. Vår 07 viser konsentrasjonene av vannløselig fosfor i jorda før slamtilførsel.

I svakt sure jordsmonn som er typisk for Norge, vil jordas innhold av aktive jern- og aluminiumsoksider spille en avgjørende rolle for jordas fosforbindingskapasitet. Slam produsert ved kjemisk felling inneholder også aktive jern- og aluminiumsforbindelser. Når slikt slam blandes i jord, vil det derfor kunne endre jordas fosforbindingsevne. Dette er vist i et potteforsøk som er gjennomført ved Bioforsk. Aktive jern- og aluminiumsoksider ble her målt som oksalatekstraherbart jern og aluminium (Fe_{ox} og Al_{ox}). I potteforsøket ble det funnet at konsentrasjonen av $[Fe_{ox} + Al_{ox}]$ i jorda to år etter tilførsel av slam og kompost var mellom 62 og 189 % av kontrollvedet. Den største økningen ble funnet i jord tilført utrånnet slam med svært høyt jerninnhold (11 %). Det viste seg også at innholdet av vannløselig fosfor og P-AL var godt korrelert mot innholdet av $[Fe_{ox} + Al_{ox}]$ (figur 4). Med økende innhold av aktive jern- og aluminiumsforbindelser sank konsentrasjonen av vannløselig fosfor og P-AL. Tilsvarende resultater er også funnet i amerikanske forsøk (Maguire et al. 2000; Maguire et al. 2001). De fant at vannløselig og desorberbart fosfor i jorda ofte ble høyere etter tilførsel av slam, men tilgjengeligheten sank i følgende rekkefølge etter slamtype: slam produsert uten Al og Fe tilsetning > slam produsert med tilsetning av Fe eller Al og kalk > slam kun produsert med Fe og Al tilsetninger.

I en fransk undersøkelse med fire typer jernfelt slam ble det funnet at alle slamtypene økte jordas konsentrasjon av raskt utbyttbart fosfor, men økningen var mindre enn ved tilførsel av samme mengde fosfor som mineralgjødsel (Frossard et al., 1996). Konsentrasjonen av raskt utbyttbart fosfor har antagelig betydning for hvor mye fosfor som løses ut fra jorda ved overflateavrenning. Tilført mengde fosfor i dette forsøket tilsvarte cirka 19 kg P/dekar.



Figur 4. Sammenheng mellom jordas innhold av oksalatekstraherbart jern og aluminium (Fe_{ox} + Al_{ox}) og vannløselig fosfor (A) og P-AL (B).

Varighet av effekt av slamtilførsel på tilgjengelig fosfor i jord

Fosforet i en slamtilførsel på 2 tonn TS/daa tilsvarer 10-40 kornavlinger. Effektiv utnyttelse av fosfor i jorda etter slamtilførsel krever at slamfosforet har en god nok virkning til å kunne erstatte fosfor i mineralgjødning i årene etter tilførsel. Anbefalt fosforgjødsling bestemmes av jordas P-AL tall. Det betyr at hvis ikke slamtilførselen påvirker jordas P-AL tall, blir fosforgjødslingen i liten grad redusert, og det vil ta svært mange år før jordas totale fosforinnhold er redusert til nivået før slamtilførsel. På den annen side, hvis ikke jordas P-AL tall øker med slamtilførselen, blir effekten på fosfortap mindre enn hvis slamtilførselen også fører til økning i jordas P-AL nivå.

En P-AL enhet tilsvarer 2-2,5 kg P/dekar, det vil si litt mer enn det en vanlig kornavling tar ut. Det betyr at teoretisk tar det 1-2 år å redusere P-AL med en enhet. I praksis tar det enda lenger tid å tappe P-AL fraksjonen, fordi de ulike fosforfraksjonene i jorda står i likevekt med hverandre, slik at P-AL fraksjonen blir delvis påfylt fra tyngre tilgjengelig fosforfraksjoner.

I et potteforsøk gjennomført ved Bioforsk undersøkte vi tredje års fosforvirkning av VEAS- og FREVAR-slammet. Sammenlignet med kontrollen uten fosforgjødsling ga VEAS-slammet høyere fosforopptak i plantene også det tredje året etter tilførsel, og rundt 25 % av fosforoverskuddet som fortsatt lå i jorda etter 3 vekstsesonger var i P-AL fraksjonen. Fosforoverskuddet fra FREVAR-slammet bidro ikke til økt plantevekst det tredje året, det hadde også liten påvirkning på P-AL tallet i jorda. Konklusjonen i dette forsøket var at fosfor i FREVAR-slammet ikke ble mer tilgjengelig over tid. Dette fosforet vil derfor bidra til økning av totalt fosforinnhold i jorda, men i liten grad til økning av tilgjengelig fosfor i jorda. VEAS-slammet hadde en flerårig virkning på plantetilgjengelig fosfor i jorda som kan hentes ut i avling i flere år etter slammet var tilført.

Kunnskapsbehov

Effekten av tilført avløps slam på ulike fosforfraksjoner i jord er en samspillseffekt av både slammets og jordas kjemiske egenskaper. Ulike jordtyper har ulike bindingsegenskaper for fosfor, slik at responsen av en fosfortilførsel på tilgjengelig fosfor kan variere mellom jordtyper. Samtidig er det stor variasjon i konsentrasjonen av fellingskjemikalier i slam fra ulike leverandører. Bruk av kalk i slambehandlingen påvirker også fosforeffekten i jord. Det er derfor behov for mer kunnskap både om hvordan de ulike komponentene i slammet påvirker tilgjengeligheten av fosforet i jorda, og

om hvordan jordas kjemiske egenskaper som pH, P-AL, adsorpsjonskapasitet for fosfor og fosformetningsgrad påvirker tilgjengeligheten av fosfor i slammet.

For effektiv utnyttelse av fosforet i avløpsslammet, er det viktig med kunnskap om den faktiske plantetilgjengeligheten av fosfor i avløpsslam, både på kort og lang sikt. Ved usikkerhet vil gårdbrukeren gjerne være på den sikre siden ved å tilføre fosfor også med mineralgjødning. Slamtilførselen vil i de tilfellene innebære en deponering av fosfor i jord framfor en resirkulering.

3. Algetilgjengelighet av partikkelbundet fosfor

Problemstilling

Tilførsel av avløpslam øker jordpartiklenes konsentrasjon av fosfor. Bare en del av det partikkelbundne fosforet er tilgjengelig for algene ute i vassdraget. Ved sammenligning av jordbrukets fosforbidrag med bidrag fra andre kilder (for eksempel kloakk) og ved spørsmål om jord tilført avløpslam gir et ekstra bidrag til algevekst, er det viktig å vurdere algetilgjengeligheten av partikkelbundet fosfor.

Hva vi vet

Totalfosfor i jordbruksavrenning er ikke et godt mål for jordbrukets bidrag til algevekst i vassdrag. Fosfor i jord er fordelt på fraksjoner med ulik bindingsstyrke, og bare deler av fosforet frigjøres når jorda kommer ut i vann. 20-50 % av fosforet i jord er organisk bundet og må frigjøres ved mikrobiell nedbrytning før det kan bli tilgjengelig for algene. Noe organisk fosfor kan imidlertid frigjøres ved hjelp av enzymet fosfatase som kan produseres av enkelte algetyper.

Ved vurdering av om slam påvirker mengden algetilgjengelig fosfor i jorda er det to komponenter som er viktig. Den ene er i hvilken grad slammet påvirker mengden fosfor som raskt løses ut til vann ved overflateavrenning. Den andre er i hvilken grad algene klarer å utnytte det partikkelbundne fosforet ute i vassdraget.

Når jord kommer i kontakt med vann som har lav konsentrasjon av løst fosfat, vil likevektsreaksjoner føre til at fosfor frigjøres. Hvor stor andel av jordas totale fosforinnhold som kan frigjøres på denne måten varierer med jordtype og jordas P-AL nivå (Øgaard, 1995). Økende P-AL nivå gir økende andel vannløselig fosfor.

Det er vist at algetilgjengelighet av partikkelbundet fosfor kan være større enn det som kan forklares ved likevektsreaksjoner (Grobbelaar, 1983). Grobbelaar (1983) mente at organiske forbindelser utskilt av algene kan bidra til å øke frigjøringen av partikkelbundet fosfor. I sterkt eutrofe innsjøer med høy pH (pH>9), kan en også få økt frigjøring av fosfor ved at bindingen av fosfor til jern- og aluminiumforbindelser avtar med økende pH.

Det er utført en rekke laboratorieforsøk med testalger for å studere algetilgjengelighet av fosfor i jordbruksavrenning. I disse forsøkene varierte algetilgjengeligheten av fosfor i jordbruksavrenning fra 6-59 % av totalfosfor (Berge & Källqvist, 1990; Persson, 2001; Ekholm & Krogerus, 2003). Krogstad og Løvstad (1991) brukte en naturlig algepopulasjon fra en eutrof innsjø, og fant at opptil 75 % av uorganisk fosfor i jord kan være tilgjengelig for algene under forhold hvor hverken lys eller andre næringsstoffer begrenser veksten. Organisk bundet fosfor var ikke algetilgjengelig i laboratorieforsøkene.

Berge & Källqvist (1990) utførte også algetester i 4 meter dype bassenger, og fant betydelig lavere biotilgjengelighet av partikkelbundet fosfor sammenlignet med resultater fra algetester i laboratoriet. Årsaken er at det blir en betydelig lysbegrensning for algevekst i partikkelbelastet vann.

En del av det partikkelbundne fosforet fra jordbruksavrenning kan havne i innsjøenes bunnsedimenter hvor det kan være betingelser for at jernbundet fosfor frigjøres. I dype innsjøer kan det oppstå oksygenfattige og reduserende forhold i bunnsedimentene som fører til at jernet

reduseres og jernbundet fosfor frigjøres. Jern binder fosfor når det er i tre-verdig (oksidert) form, mens to-verdig jern (reduisert) ikke binder fosfor. Fosfor som blir frigjort i bunnsedimentene kan ved sirkulering av vannmassene komme opp i produksjonssonen og bidra til algevekst. Aluminium binder fosfor også under reduserende forhold, og risikoen for remobilisering av fosfor i vassdraget er derfor lavere. Kalkfelling av fosfor i avløpsvann er lite brukt i Norge i dag, men kalkfelt slam vil heller ikke remobilisere fosforet under oksygenfattige forhold.

Kunnskapsbehov

Vi mangler kunnskap om hvordan tilførsel av ulike typer avløpsslam påvirker algetilgjengeligheten av fosfor i jord. Det trengs kunnskap om hvordan ulike slamtyper påvirker både konsentrasjonen av vannløselig fosfor og andelen partikkelbundet fosfor som er algetilgjengelig i ulike jordtyper med ulik fosforstatus.

Det er behov for en helhetlig vurdering i forhold til valg av fellingskjemikalier. Løselighet/algetilgjengelighet av jernbundet fosfor kontra aluminiumsbundet (eller kalsiumbundet) fosfor må vurderes både under oksygenholdige og oksygenfattige forhold. I tillegg må plantetilgjengelighet av fosfor etter felling med ulike fellingskjemikalier vurderes, fordi god resirkulering av fosforet også er et mål.

4. Avløpsslam som jordforbedringsmiddel

Problemstilling

God jordstruktur i form av god aggregatstabilitet er viktig for å minimere erosjonsrisikoen ved nedbørsepisoder. Ekstra tilførsel av organisk materiale og kalk kan forbedre jordas aggregatstabilitet og dermed redusere erosjon og fosfortap. Det er gjerne leirjord med ensidig korndyrking som kan ha behov for strukturforbedrende tiltak. Dette gjelder spesielt for områder med bakkeplanert leirjord som ofte har et lavt innhold av organisk materiale, dårlig jordstruktur og derfor ekstra høy erosjonsrisiko. I korndistriktene er det lite husdyrgjødsel, og avløpsslam er da en aktuell kilde til organisk materiale.

Hva vi vet

Effekt på jordas innhold av organisk materiale

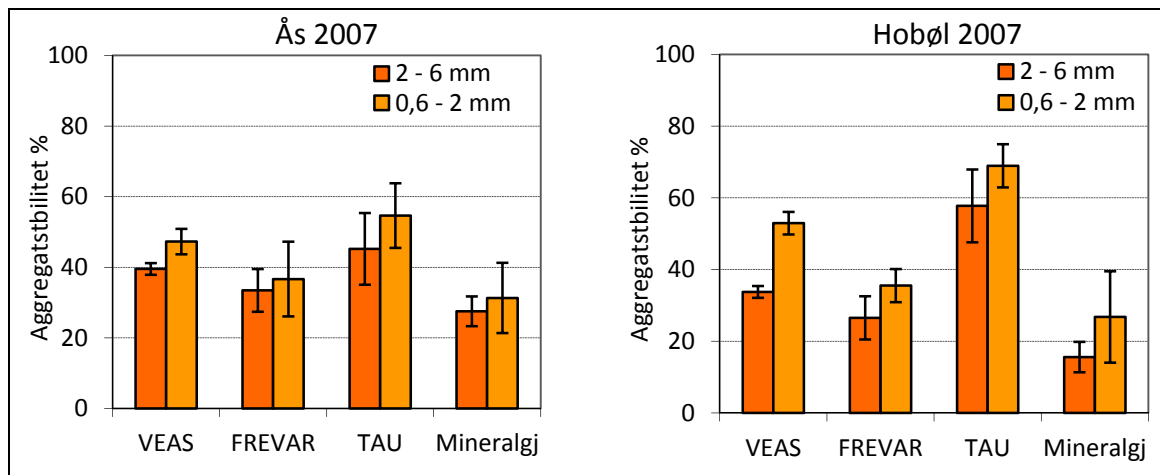
Tilførselen av organisk materiale med 2 tonn slam TS/dekar er i størrelsesorden 600 -1100 kg/dekar avhengig av slamtype. Innblandet i jordas øvre 20 cm tilsvarer dette 0,3-0,5 % organisk materiale i jorda. For jord med lavt innhold av organisk materiale (<3 %) gir dermed en slamtilførsel etter dagens regelverk en betydelig økning i jordas innhold av organisk materiale. Tilført organisk materiale brytes ned over tid. Ekeberg (1991) fant i sine feltforsøk at 3 år etter slamtilførsel var fortsatt 70 % av tilført organisk materiale intakt, etter 5 år var 60 % intakt og etter 9 år var 40 % intakt. Dette viser at slammene kan gi et langsiktig bidrag til jordas innhold av organisk materiale.

Effekt på aggregatstabilitet

Aggregatstabilitet sier noe om jordaggregatenes evne til å motstå ytre påvirkning. Ved god aggregatstabilitet blir de minste partiklene holdt sammen i større aggregater. Dette gir jorda bedre infiltrasjonsevne for vann og det blir dermed mindre overflateavrenning. God aggregatstabilitet reduserer også erosjonen ved eventuell overflateavrenning. Aggregatstabiliteten avhenger av mange faktorer: Jordteksturen, de fysiske og kjemiske egenskapene til jorda, jordas innhold av organisk materiale samt effekten av planterøtter, sopphyfer og jordorganismer. Kalking kan også bidra til økt aggregatstabilitet.

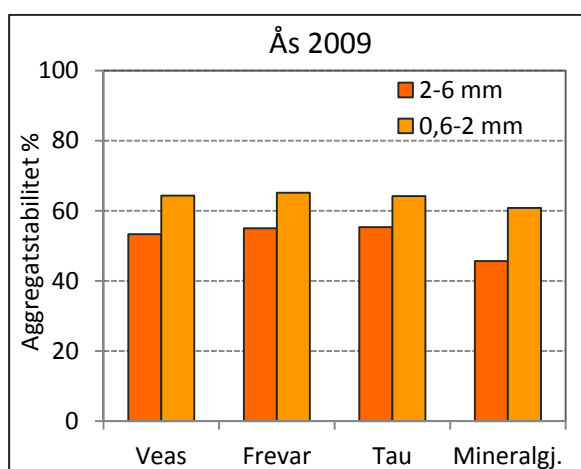
Ulike typer organisk materiale har ulik effekt på aggregatstabilitet. Lett nedbrytbare materialer som grønnmasse fra grønn gjødsling har en rask og stor effekt på aggregatstabilitet, men effekten er kortvarig, bare noen uker (Abiven et al. 2009). Tyngre nedbrytbare materialer som kompostert husdyrgjødsel har en tregere effekt på aggregatstabiliteten, men effekten kan vare over flere år. Ekeberg (1991) viste at det organiske materiale i slammene ble nedbrutt ganske sakte, og ut i fra dette kan en forvente at struktureffekten av avløpsslam kan vare i flere år.

Det finnes imidlertid få undersøkelser som viser effekt av tilførsel av avløpsslam på aggregatstabilitet over lenger tid, og som er relevant for våre forhold. I de pågående feltforsøkene i Ås (ikke bakkeplanert leirjord) og Hobøl (bakkeplanert leirjord) med tre slamtyper er effekten på aggregatstabilitet undersøkt 0,5 og 2,5 år etter slamtilførsel. Her hadde de kalkbehandlede slamtypene (VEAS og TAU) tydeligst effekt på aggregatstabiliteten et halvt år etter slamtilførselen (Figur 5). Utslagene var størst på den bakkeplanerte leirjorda i Hobøl, som også hadde lavest aggregatstabilitet uten tilførsel av slam. FREVAR-slammene som ikke er kalkbehandlet ga bare en liten økning i aggregatstabilitet. For de kalkbehandlede slamtypene gir både kalk og organisk materiale positiv effekt på jordstrukturen.



Figur 5. Virkning av ulike typer avløpsslam og mineralgjødning på aggregatstabilitet for to aggregatstørrelsesfraksjoner (2-6 mm og 0,6-2 mm) et halvt år etter slamtilførsel.

To år senere kunne en fortsatt se en positiv effekt av slamtilførsel på aggregatstabilitet, men utslagene var nå mindre og alle slamtypene kom likt ut på Ås-feltet (Figur 6). I Hobøl var det ingen tydelige trender i resultatene. Det er en del usikkerheter ved måling av aggregatstabilitet, slik at reelle forskjeller ikke alltid blir avdekket i analysen. Feltene blir imidlertid fulgt opp videre med nye analyser av aggregatstabilitet.



Figur 6. Virkning av ulike typer avløpsslam og mineralgjødning på aggregatstabilitet for to aggregatstørrelsesfraksjoner (2-6 mm og 0,6-2 mm) 2,5 år etter slamtilførsel.

Alternative materialer til jordforbedringsmiddel

Dersom slam ikke skal brukes i landbruket, er det få alternative materialer som kan erstatte slam som jordforbedringsmiddel i Østlandsområdet. Matavfallskompost er et mulig alternativ som brukes som jordforbedringsmiddel i landbruket i en rekke europeiske land. Det produseres matavfallskompost i mange av kornområdene hvor man i dag bruker slam, men denne avsettes i dag i stor grad som en næringsrik torverstatning i urban jord. Tabell 1 viser estimater på organisk materiale i produsert biokompost (basert på matavfall) sammenlignet med hvor mye organisk

materiale som tilføres med slam i de Østlandsfylkene hvor bruk av slam er mest utbredt. I Akershus og Vestfold utgjør organisk materiale i biokompost bare en liten andel av det som er tilgjengelig med avløpsslam. Det er også lite som tyder på at bønder per i dag ønsker å betale for matavfallskompost, derfor er bruk i landbruket neppe aktuelt i særlig større omfang enn i dag.

Tabell 1. Estimater for hvor mye organisk materiale (tonn) som tilføres med slam i Østlandsfylkene hvor bruk av slam er mest utbredt. I tillegg viser figuren estimater på organisk materiale i biokompost (basert på matavfall) i de samme fylkene.

Fylke	Organisk materiale tilbakeført til jordbruket med slam (tonn/år)	Organisk materiale i produsert matavfallskompost (tonn/år)
Østfold	1857	2940
Akershus	8350	630
Buskerud	2080	1890
Vestfold	6019	210

Kunnskapsbehov

Det er behov for mer kunnskap om varigheten av den positive effekten av avløpsslam på jordstruktur. Den positive struktureffekten kan avta raskere enn fosforinnholdet i jorda. Det er også behov for mer kunnskap om hvordan ulike slambehandlingsmetoder påvirker slammets strukturforbedrende egenskaper og effekten ved ulike tilførte mengder.

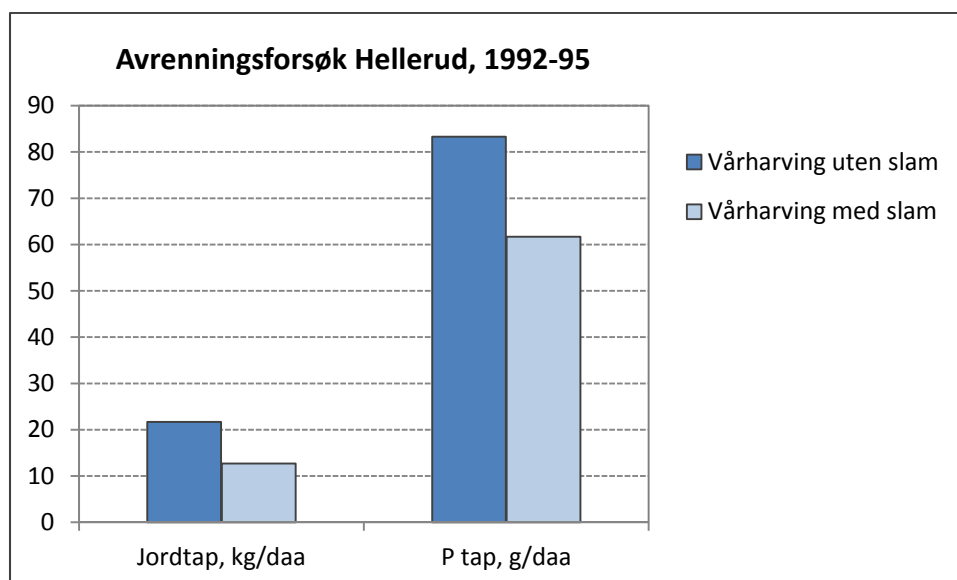
5. Effekt av slamtilførsel på risiko for fosfortap - nettoeffekt av jordas fosforstatus og jordstruktur

Problemstilling

Tilførsel av avløpsslam etter dagens forskrift medfører en betydelig økning av jordas fosforinnhold, og dermed økt fosforkonsentrasjon i jordpartikler som tapes ved erosjon. Samtidig vil tilførsel av slam gi en bedret og mer stabil jordstruktur, noe som vil redusere erosjonstapet. Mindre jordtap som følge av bedret jordstruktur kan oppveie effekten av høyere fosforkonsentrasjon i jorda, slik at fosfortapet ikke blir høyere fra arealer som har fått tilført avløpsslam.

Hva vi vet

I et avrenningsforsøk på Romerike på 90-tallet ble det inkludert slamtilførsel i anleggsåret på ett av forsøksleddene. Forsøket ble utført på ruter uten jordarbeiding om høsten, slik at jordtapet var lavt. Resultatene viser at slamtilførsel ga redusert partikkel- og fosfortap i forhold til ruter uten slamtilførsel (Fig. 7). Den relative reduksjonen i fosfortap var mindre enn reduksjonen i jordtap. Vi har dessverre ikke funnet opplysninger om slammene som ble brukt.



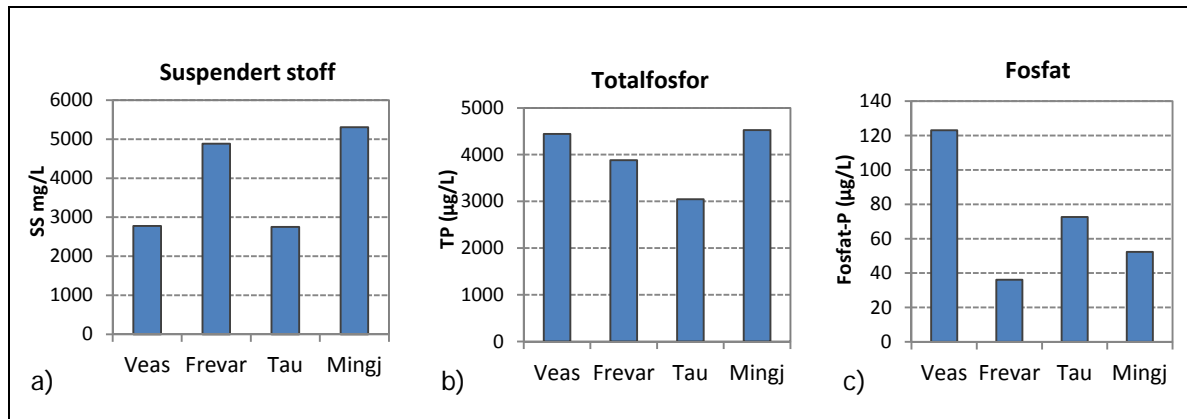
Figur 7. Effekt av slam på tap av jord og fosfor. Etter Helge Lundekvam

I utenlandske studier er det funnet at ved samme fosfortilførsel er det mindre risiko for tap av fosfor i avløpsslam enn for fosfor i husdyrgjødsel og mineralgjødsel (f.eks. Withers et al. 2001). Årsaken er lavere løselighet av fosforet i avløpsslam sammenlignet med husdyrgjødsel og mineralgjødsel.

Laboratorieforsøk

I et laboratorieforsøk, med jordprøver fra de pågående feltforsøkene i Ås og Hobøl, er utvaskingstap av fosfor og jordpartikler fra jord som er tilført avløpsslam sammenlignet med jord som bare har fått mineralgjødsel. Her vises resultater fra forsøksfeltet på Ås. Partikkeltapet ved utvasking viste sammenheng med aggregatstabiliteten (Figur 5 og 8a). Jord som hadde blitt tilført slam fra VEAS og TAU året før hadde minst partikkeltap på grunn av best aggregatstabilitet. Tapet av totalfosfor fra jorda med VEAS-slam var imidlertid like stort som fra jorda med bare mineralgjødsel, til tross for

mindre partikkeltap (Fig. 8b). Det betyr at det er mer fosfor bundet til partiklene der det er tilført VEAS-slam. Det ble tilført mindre fosfor med TAU-slammet enn med de to andre slamtypene, og dette slammet kom derfor totalt gunstigst ut når det gjelder tap av totalfosfor. Tapene av vannløselig fosfor (fosfat) viser at jord som har fått tilført kalkbehandlet slam frigir mer vannløselig fosfor enn jord som har fått tilført fosfor med mineralgjødning i anbefalte mengder (Fig. 8c). Minst tap av vannløselig fosfor ga jorda med FREVAR-slam.



Figur 8. Virkning av ulike typer avløpslam og mineralgjødning på tap av partikler og fosfor. Resultater fra laboratorieforsøk.

Det må understrekes at et laboratorieforsøk bare kan gi en indikasjon på hva en kan forvente når det gjelder den relative risikoen for fosfortap fra jordbruksarealer som har fått tilført ulike slamtyper.

Kunnskapsbehov

Det er behov for mer kunnskap om nettoeffekten på fosfortap over tid etter tilførsel av ulike slamtyper til ulike jordtyper og med ulik fosforstatus i jorda.

6. Miljørisiko ved bruk av slam på grøntarealer

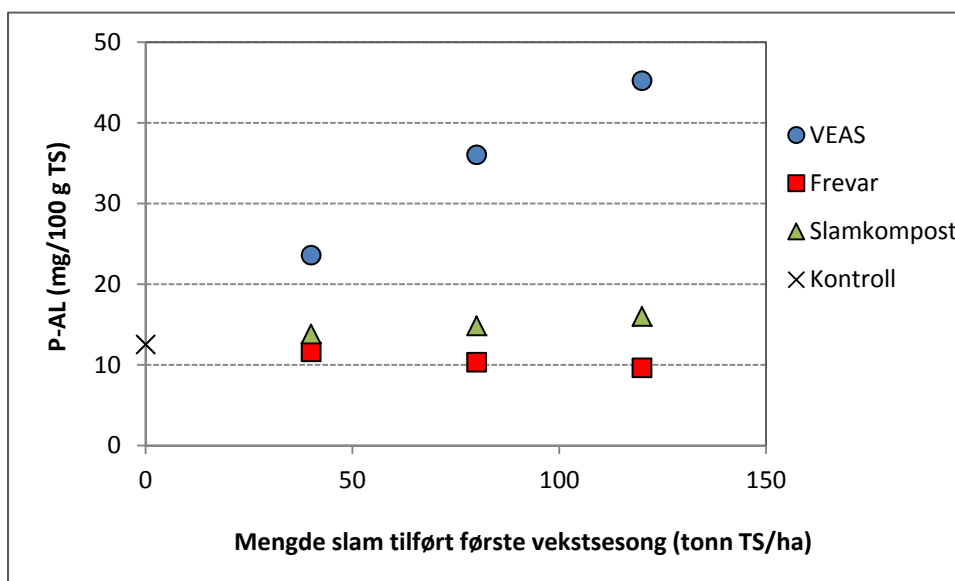
Problemstilling

Regelverket for bruk av avløps slam i grøntanlegg skiller seg fra regelverket for jordbruket ved at det er tillatt å bruke mye større mengder per arealenhet. I jordblandinger til grøntanlegg kan det brukes inntil 30 vol % avløps slam eller det kan tilføres i et lag på 5 cm som blandes inn i jorda på bruksstedet. Selv om grøntanlegg er vegetasjonsdekket og i liten grad utsatt for erosjon, kan en ikke utelukke betydelige fosfortap fra grøntanlegg som har blitt anlagt med store mengder avløps slam. Spesielt der jordblandingen legges på en undergrunn med dårlige fosforadsorberende egenskaper, må en anta at det er stor fare for utvasking av løst fosfor fra jordblandinger med høyt P-AL tall.

Hva vi vet

Haraldsen & Pedersen (2003) fant at innblanding av stigende mengder VEAS-slam i anleggsjord med P-AL 5,5 mg/100 g ga en økning i P-AL til 12,5 mg/100 g ved innblanding av 5 % slam og til 58 mg/100 g ved innblanding av 30 volum % slam. I gjødslingsplanlegging karakteriseres et P-AL nivå >14 som meget høyt.

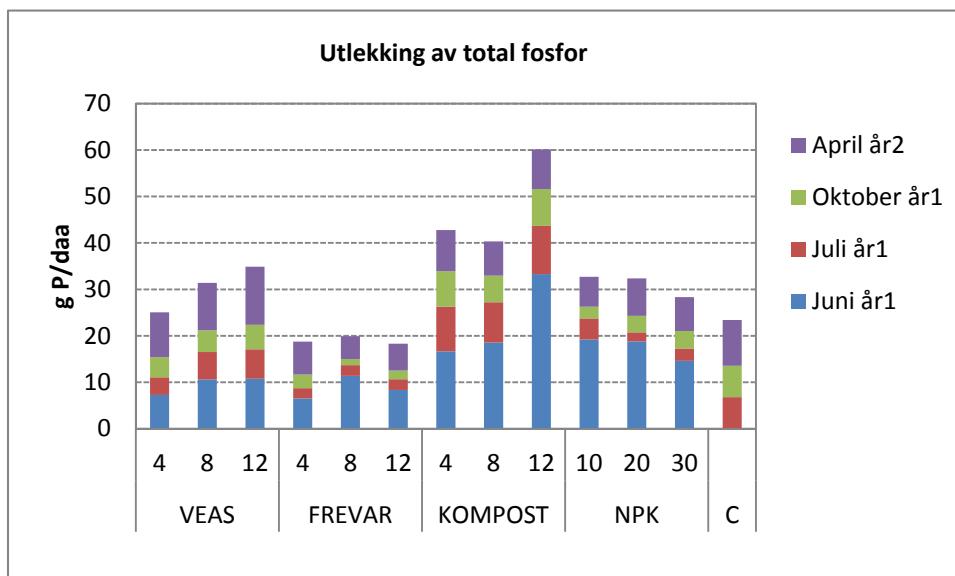
Et pottforsøk, utført ved Bioforsk, med tilførsel av ulike mengder kalkbehandlet slam (VEAS) i jordblandinger ga svært høye P-AL tall i jorda; P-AL >30 mg P/100 g jord ved slamtilførsel på 8 og 12 tonn tørrstoff per dekar (Figur 9). Dette er slammengder det kan være aktuelt å bruke i grøntområder. To andre typer slam (FREVAR og et kompostert slam) hadde mindre betydning for P-AL tallet, selv ved disse høye doseringene.



Figur 9. P-AL tall i jorda ett år etter tilførsel av hhv. 4, 8 og 12 tonn TS/daa av slam eller kompost til jord. (1 tonn/daa = 10 tonn/ha)

I det samme forsøket så vi også på fosforutlekking fra pottene ved 4 simulerte regnepisoder (figur 10). Resultatene fra dette viste at utlekking var størst kort tid etter tilførsel av slammet. FREVAR-slammet gav lavest utlekking, mens det komposterte slammet gav høyest utlekking gjennom alle simuleringsepisodene den første sesongen. Slamkomposten gav liten økning av P-AL tallet i jorda, men graset i pottene etablerte seg svært dårlig ettersom slamkomposten hadde lite tilgjengelig

nitrogen. Rask etablering av plantevekst etter tilførsel av slam ser derfor også ut til å være viktig for å begrense fosforutlekking. Det er derfor viktig at produkter som brukes i grøntanlegg er godt balansert i forhold til plantenes næringsbehov.



Figur 10. Kumulativ utlekking av fosfor ved 4 regnsimuleringsepisoder. Forsøket er gjort i potter med plantevekst. Forsøket ble startet i mai og Juni år 1, Juli år 1 og Oktober år 1 er regnsimuleringsepisoder fra oppstartsåret, mens April år 2 gjelder påfølgende vår. C = kontroll uten gjødsel. Slam: 4, 8 og 12 tonn/daa. NPK-gjødsel (18-3-15): 10, 20 og 30 kg N/daa.

Det er også en risiko for utvasking av fosfor fra plantene i grøntanlegget. Jordblandinger med stor andel slam kan gi en stor biomasse med høyt fosforinnhold. Plantecellene kan fryse i stykker i løpet av vinteren, og ved påfølgende overflateavrenning vil løst fosfor i plantematerialet vaskes ut (f.eks. Uhlen, 1989).

Kunnskapsbehov

Vi har mangelfull kunnskap om de faktiske fosfortapene fra grøntanlegg med stor slamandel i jordblandingen. Det er behov for mer kunnskap om fosfortap både ved overflateavrenning og ved nedvasking der det er undergrunnsmasser med dårlige fosforadsorberende egenskaper.

7. Konklusjon

Tilførsel av avløpsslam etter dagens regelverk gir en betydelig økning i jordas totale fosforinnhold. Økt fosforinnhold i jorda gir økt risiko for å tape fosfor, men i hvilken grad risikoen øker er påvirket av løseligheten av fosforet og slammets effekt på jordstrukturen. Effekten av tilført avløpsslam på lettløselig fosfor i jord er en samspillseffekt av både slammets og jordas kjemiske egenskaper. Ulike jordtyper har ulike bindingsegenskaper for fosfor, slik at responsen av en fosfortilførsel på tilgjengelig fosfor kan variere mellom jordtyper. Mengden fellingskjemikalier og eventuelt kalk i slammet påvirker tilgjengeligheten av fosforet, både i slammet og i jorda som får tilført slam.

God plantetilgjengelighet av fosfor i avløpsslammet er ønskelig ut i fra effektiv resirkulering av fosfor. Tilførsel av avløpsslam med god fosfortilgjengelighet kan imidlertid gi stor økning i jordas P-AL tall, og dermed større fosfortap ved overflateavrenning. Regulering av fosfortilførselen med avløpsslam blir ekstra viktig hvis slammet har høy andel lett tilgjengelig fosfor, slik at man balanserer økt innhold av plantetilgjengelig fosfor i jorda mot risiko for fosfortap til vann.

Avløpsslam har en jordforbedrende effekt ved at det gir en betydelig tilførsel av organisk materiale. Organisk materiale gir en mer stabil jordstruktur som igjen gir lavere erosjonsrisiko. Bedret jordstruktur kan helt eller delvis kompensere for den økte risikoen for fosfortap som skyldes de store fosfortilførslene med slam. Den positive struktureffekten kan imidlertid avta raskere enn fosforinnholdet i jorda.

8. Referanser

- Abiven, S., Menasseri, S. & Chenu, C. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - A literature analysis. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 1-12.
- Andersson, P.G. 2009. Slamspridning på åkermark. Fältforsøk med kommunalt avløpsslam från Malmö och Lund under åren 1981-2008. Hushållningssällskapens rapportserie, nr.15, 53 s.
- Berge, D. & Källqvist, T. 1990. Biotilgjengelighet av fosfor i jordbruksavrenning sammenlignet med andre forurensningskilder. NIVA Rapport, O-87064: 130 s.
- Bøen, A. 2010. Fosfor i avløpsslam - fraksjonering og plantetilgjengelighet. Bioforsk Rapport 5:62. 16 s.
- Ekeberg, E. 1991. Virkningen av kloakkslam brukt i jordbruket - Forsøk i perioden 1977-1990. Norsk Landbruksforskning, Supplement nr. 12. 121 s.
- Ekholm, P. & Krogerus, K. 2003. Determining algal-available phosphorus of differing origin: routine phosphorus analyses versus algal assays. *Hydrobiologia* 492: 29-42.
- Frossard, E., Sinaj, S., Zhang, L.M. & Morel, J.L. 1996. The fate of sludge phosphorus in soil-plant systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1248-1253.
- Grobbelaar, J.U. (1983). Availability to algae of N and P adsorbed on suspended solids in turbid waters of the Amazon River. *Arch. Hydrobiol.* 96: 302-3016.
- Haraldsen, T.K. & Pedersen, P.A. 2003. Mixtures of crushed rock, forest soils, and sewage sludge used as soils for grassed green
- Krogstad, T. & Løvstad, Ø. 1991. Available soil phosphorus for planctonic blue-green algae in eutrophic lake water samples. *Arch. Hydrobiol.* 122, 117-128.
- Krogstad, T., Sogn, T.A. & Asdal, Å. 2004. Resirkulering av fosfor i slam. *Grønn kunnskap*, Vol. 8 Nr. 7. 41 s.
- Maguire, R.O., Sims, J.T., Coale, F.J. 2000. Phosphorus fractionation in biosolids-amended soils: relationship to soluble and desorbable phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:2018-2024
- Maguire, R.O., Sims, J.T., Dentel, S.K., Coale, F.J. & Mah, J.T. 2001. Relationships between biosolids treatment process and soil phosphorus availability. *J Environ. Qual.* 30,1023-1033.
- Persson, G. 2001. Phosphorus in tributaries to Lake Malaren, Sweden: Analytical fractions, anthropogenic contributions and bioavailability. *Ambio*, 30: 486-495.
- Uhlen, G. 1989. Surface runoff losses of phosphorus and other nutrient elements from fertilized grassland. *Norw. J. Agric. Sci.* 3:47-55.
- Withers, P.J.A., Clay, S.D. & Breeze, V.G. 2001. Phosphorus transfer in runoff following application of fertilizer, manure and sewage sludge. *J. Environ. Qual.* 30: 180-188.
- 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., Grønsten, H.A., Sveistrup, T.E., Bøen, A., Kværnø, S.H. & Haraldsen, T.K. 2008. Potensielle miljøeffekter av å tilføre avløpsslam til jordbruksarealer - Resultater frå to feltforsøk i korn, 1. forsøksår 2007. Bioforsk rapport Vol.3, nr. 59. 43 s.