

# Bioforsk Rapport

Bioforsk Report

Vol. 8 Nr. 34 2013

## Plantetilgjengelig fosfor i avløpsslam

Testing av analysemetodikk for tilgjengelig fosfor

Anne Falk Øgaard

Bioforsk Jord og miljø

[www.bioforsk.no](http://www.bioforsk.no)



<i>Titel/Title:</i> Plantetilgjengelig fosfor i avløpsslam – testing av analysemetodikk for tilgjengelig fosfor
<i>Forfatter(e)/Author(s):</i> Anne Falk Øgaard

<i>Dato/Date:</i> 27.02.2013	<i>Tilgjengelighet/Availability:</i> Åpen	<i>Prosjekt nr./Project No.:</i> 2110818	<i>Saksnr./Archive No.:</i>
<i>Rapport nr./Report No.:</i> 34/2013	<i>ISBN-nr./ISBN-no:</i> 978-82-17-01063-0	<i>Antall sider/Number of pages:</i> 23	<i>Antall vedlegg/Number of appendices:</i>

<i>Oppdragsgiver/Employer:</i> Norsk Vann	<i>Kontaktperson/Contact person:</i> Steinar Nybruket og Arne Haarr
--	--

<i>Stikkord/Keywords:</i> Fosfor, avløpsslam, fosforanalyser, plantetilgjengelighet	<i>Fagområde/Field of work:</i> Avfallsbaserte gjødselvarer
--	--

*Sammendrag:*

Planteopptak av fosfor fra 12 ulike slamtyper er testet i pottforsøk og sammenlignet med fosforopptak fra mineralfosfor. Effektiviteten av fosfor i de ulike slamtypene varierte fra 12 til 39 % av mineralfosfor, beregnet fra sum fosforopptak i 6 høstinger av raigras.

Sju ulike fosforekstraksjoner er testet mot fosforopptaket i raigras (P-AL, to ulike modifikasjoner av P-AL, oksalatløselig fosfor, Olsen P, vannløselig fosfor og fosfor ekstrahert med ionebytter (Fe-strips)). Standard P-AL metode viste dårlig sammenheng med fosforopptaket. Best sammenheng med fosforopptaket i plantene ga ekstraksjon med ionebytter (Fe-strips). Uten slammet med pH >11, forklarte fosfor ekstrahert med Fe-strips 67 % av variasjonen i fosforopptak.

Fosforopptaket fra slammet hadde nær sammenheng med konsentrasjonen av fellingskemikalier i slammet. Summen av jern og aluminium på molbasis, med halv vekt på jern forklarte 83 % av fosforopptaket i raigras.

Godkjent / Approved



Jannes Stolte

Prosjektleder / Project leader



Anne Falk Øgaard

## Forord

---

Denne rapporten viser resultater fra et pottforsøk som ble initiert og delvis finansiert av Norsk Vann for å få testet analysemetodikk for tilgjengelig fosfor i avløpsslam. I tillegg bidro Bioenergy Innovation Centre (CenBio) og prosjektet «Avløpsslam til landbruksarealer - resirkulering av fosfor og mattrygghet» (finansiert fra Matfondet, Jordbruksavtalemidler og en rekke samarbeidspartnere, [www.bioforsk.no/slam](http://www.bioforsk.no/slam)) til finansieringen av pottforsøket.

Analysene av slammet har blitt gjennomført ved Institutt for plante- og miljøvitenskap, Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB).

# Innhold

---

Sammendrag.....	7
1. Innledning.....	8
2. Materiale og metoder .....	9
3. Resultat.....	13
3.1 Fosforopptak.....	13
3.2 Sammenheng mellom ulike fosforanalyser og fosforopptak.....	17
3.3 Sammenheng mellom jern og aluminium i slammet og fosforopptak .....	21
4. Konklusjon .....	22
5. Referanser.....	23

## Sammendrag

---

Planteopptak av fosfor fra 12 ulike slamtyper er testet i potteforsøk og sammenlignet med fosforopptak fra mineralfosfor. Resultatene fra potteforsøket er brukt til å teste analysemetodikk for tilgjengelig fosfor i avløpsslam. I potteforsøket ble avløpsslam tilsatt i mengder tilsvarende 3 og 9 kg P/daa ved etablering. Fosforopptak fra slammet ble sammenlignet med fosforopptak fra 0, 3, 6 og 9 kg P/daa med mineralfosfor. Det ble dyrket raigras i pottene med 6 månedlige høstinger av gaset, og deretter ble det dyrket bygg. Slammet ble ekstrahert for tilgjengelig fosfor med følgende metoder: P-AL, to ulike modifikasjoner av P-AL, oksalatløselig fosfor, Olsen P, vannløselig fosfor og fosfor ekstrahert med ionebytter (Fe-strips).

Sammenlignet med pottene uten fosfortilførsel ga alle slamtypene økt fosforopptak, og fosforopptaket ble høyere med 9 kg P/daa med slam enn med slamtilførsel på 3 kg P/daa. Sammenlignet med tilsvarende mengde fosfor tilført som mineralfosfor var fosforopptaket imidlertid betydelig lavere. Ved tilførsel av 9 kg P/daa varierte effektiviteten av fosfor i slammet fra 12 til 39 % av mineralfosfor, beregnet fra sum fosforopptak i 6 høstinger av raigras.

Resultatene for bygg som ble dyrket etter gaset, viste at det for flere av slamtypene fortsatt var en fosforeffekt av slammet som ble tilført ved begynnelsen av forsøket.

Hverken standard P-AL metode eller modifikasjoner av denne viste god sammenheng med fosforopptak i gaset. Ved modifisert P-AL metode og Olsen P fikk begge de to slamtypene som ga størst fosforopptak tydelig høyere analyseverdi enn de øvrige slamtypene. For de andre slamtypene var det imidlertid dårlig sammenheng mellom analyseverdien og fosforopptaket. Oksalatløselig fosfor viste ingen sammenheng med fosforopptaket i plantene. Vannløselig fosfor P fungerte ikke for slammet med 25 % kalsium og  $\text{pH} > 11$ , men for de andre slamtypene viste metoden en ganske god sammenheng med fosforopptaket, selv om den ekstraherte svært lite fosfor sammenlignet med fosforopptaket. Best sammenheng med fosforopptaket i plantene ga ionebyttermetoden med Fe-strips. Uten slammet med  $\text{pH} > 11$  forklarte fosfor ekstrahert med Fe-strips 67 % av variasjonen i fosforopptaket i 1. og 2. høsting av raigraset.

Fosforopptaket hadde nær sammenheng med konsentrasjonen av fellingskjemikalier i slammet, og da spesielt totalkonsentrasjonen av aluminium. Summen av jern og aluminium på molbasis og med halv vekt på jern forklarte 83 % av fosforopptaket i 1. og 2. høsting av raigraset.

# 1. Innledning

---

Økonomisk drivverdige reserver av mineralsk fosfor (P) er begrenset, og effektiv resirkulering av fosforet er nødvendig for å sikre nok fosfor i fremtiden (Cordell et al., 2009). Fosfor i avløpsslam er en betydelig fosforressurs. Cirka 1800 tonn fosfor blir årlig rensset fra norsk avløp (Bøen & Bechmann, 2010). Cirka 50-60 % av dette tilføres jordbruksarealer. Til sammenligning er årlig forbruk i Norge av fosfor i mineralgjødning 8-9000 tonn.

De fleste renseanleggene i Norge bruker jern og/eller aluminium til å felle og fjerne fosfor fra avløpsvannet. På grunn av usikkerhet om plantetilgjengelighet av fosforet i denne type slam, gir tilførsel av slam i svært liten grad reduksjon i forbruket av mineralsk fosfor, til tross for at dagens regelverk for tilførsel av slam gir store fosfortilførsler. Vanlig tilførsel er 2 tonn tørrstoff per dekar. Med denne mengden som kan gis en gang per 10 år, tilføres 10-30 ganger mer fosfor enn det en kornavling fjerner. Dette gir dårlig utnyttelse av fosforet i slammet og jordas fosforreserver bygges opp, noe som kan være negativt med hensyn til risiko for fosfortap til vassdrag. På grunn av variasjon mellom renseanlegg både når det gjelder bruk av fellingskjemikalier i avløpsrensingen og i metoder for slambehandling, forventes det også variasjon i plantetilgjengelighet av fosforet i slam fra ulike renseanlegg. Blant annet er det vist at bruk av kalk i slambehandlingen kan bedre fosfortilgjengeligheten i jern/aluminiumsfelt slam (Maguire et al., 2001).

I dag brukes P-AL analysen til å estimere konsentrasjonen av plantetilgjengelig fosfor i avløpsslam. P-AL analysen er utviklet for jord for å vurdere gjødslingsbehovet for fosfor i jordbruket. Slam er imidlertid svært forskjellig fra jord, og det har derfor vært spørsmål om dette er en egnet metode for slam. Økt kunnskap om plantetilgjengelig fosfor i avløpsslam og gode analysemetoder for å estimere dette er viktig for riktig tilpassing av øvrig fosforgjødsling der det er brukt slam.

I denne rapporten presenteres resultater fra et pottforsøk hvor plantetilgjengelighet av fosforet i en rekke slamtyper er undersøkt, og fosfor ekstrahert fra slammet med en rekke ulike ekstraksjonsmetoder er testet mot fosforopptak i plantene.

## 2. Materiale og metoder

---

### *Jord*

For å teste plantetilgjengelig fosfor i avløpsslam må det brukes et fosforfattig vekstmedium, fordi vanlig dyrka jord inneholder så mye fosfor at det vil maskere en del av effekten av fosfor i avløpsslammet. For å sikre et fosforfattig vekstmedium ble det brukt en jord som var laget av næringsfattig sand fra Elverum med 10 % torvinnblanding. Jordblandingen var blitt brukt i et tidligere potteforsøk, slik at det antagelig var mikrobielt liv i jorda. Tabell 2.1 og 2.2 viser karakteristikk av jorda. Tallene viser at dette er en svært næringsfattig jord med liten fosforbindingsevne sammenlignet med vanlig dyrkingsjord. For eksempel karakteriseres P-AL 3 som lavt i gjødslingsplanleggingen.

*Tabell 2.1. Tekstur og noen jordkjemiske parametere for jorda brukt i potteforsøket (Oks. = oksalatløselig).*

Sand %	Silt %	Leire %	Tot C %	pH	Oks. Fe g/kg	Oks. Al g/kg	K-AL mg/100g	Mg-AL mg/100g	Ca-AL mg/100g
97	2	1	0,26	7,2	0,27	0,11	2,8	2,2	31

*Tabell 2.2. Fosforfraksjoner i jorda brukt i potteforsøket.*

Tot P mg/kg	Org. P mg/kg	P-AL mg/100g	Vann-P mg/kg
219	34	3,0	0,47

### *Avløpsslam*

Avløpsslam fra 12 renseanlegg var inkludert i potteforsøket. Følgende avløpsselskap leverte slam til forsøket: VEAS (Vestfjorden Avløpsselskap), TAU (Tønsbergfjordens avløpsutvalg IKS), Larvik kommune, Sandefjord kommune, HIAS IKS, Ullensaker kommune, Gjøvik kommune, Movar IKS, IVAR IKS, Bekkelaget Vann AS, NRA (Nedre Romerike avløpsselskap IKS), FREVAR (Fredrikstad vann-, avløp- og renovasjon). Tabell 2.3 viser karakteristikk av slammet.

Slammet som ble levert fra TAU var på grunn av en misforståelse råslam og ikke ferdig slamprodukt. Dette slammet ble inkludert i vekstforsøket, men ikke i analyseprogrammet.

Tabell 2.3. Total fosfor (P), organisk P, total kalsium (Ca), jern (Fe) og aluminium (Al) i avløpsslammet som ble brukt i potteforsøket.

	Total P	Organisk P	Ca	Fe	Al	Fe+Al
	kg/tonn TS	% av TP	g/kg	g/kg	g/kg	mol/kg
Bekkelaget	31	9	24	78	59	3,6
FREVAR	11	0	10	220	18	4,6
Gjøvik	22	12	17	17	99	4,0
HIAS	31	8	29	16	84	3,4
IVAR IKS	24	0	21	140	10	2,9
Lillevik	18	9	16	80	100	5,1
MOVAR	23	13	22	34	99	4,3
NRA	7	26	250	5,2	33	1,3
Sandefjord	30	11	14	58	91	4,4
TAU (råslam)	11	-	08	120	8,3	2,5
Ullensaker	37	6	19	7,9	110	4,2
VEAS	16	9	170	28	25	1,4

#### Potteforsøk

Det ble brukt 5 liters tette bøtter som ble fylt opp med 6 kg tørr jord.

Hver av pottene ble sådd med 0,65 g frø av Italiensk raigras av sorten «Macho». Graset ble høstet totalt 6 ganger, første gang 6 uker etter såing og deretter hver 4. uke. Etter 6. høsting ble grasstubbene fjernet og bygg av sorten «Heder» ble sådd med 18 korn per potte som ble tynnet til 16 planter per potte. Byggplantene ble høstet når aksene begynte å bli synlig (Zadoks 52). På dette stadiet er det meste av næringsopptaket ferdig.

Alle næringsstoffer unntatt fosfor ble tilsatt i mengder som sikret at disse ikke begrenset veksten.

Til graset ble næringsstoffene tilsatt i følgende mengder, beregnet som tilsvarende mengde på dekarbasis:

- Nitrogen (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>): 20 kg N/daa ved start + 10 kg N/daa etter hver høsting
- Kalium (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>): 20 kg K/daa ved start + 10 kg K/daa etter hver høsting
- Magnesium (MgSO<sub>4</sub>): 2,5 kg Mg/daa ved start
- Svovel: 4,3 kg S/daa ved start og 1,8 kg S/daa etter hver høsting
- Mikronæring: B, Cu, Mn, Mo og Zn ved start

Slammet ble dosert etter totalfosfor med to ulike nivåer; 3 og 9 kg P/daa

Kontroll-ledd uten slam ble tilført mineralfosfor (Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>) i 4 nivåer; 0, 3, 6 og 9 kg P/daa



Til bygg ble næringsstoffene tilsatt i følgende mengder:

- Nitrogen ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ): 10 kg N/daa
- Kalium ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ): 10 kg K/daa
- Magnesium ( $\text{MgSO}_4$ ): 2,5 kg Mg/daa
- Svovel: 2,5 kg S/daa
- Mikronæring: Fe, Cu, Mn, og Zn

Forsøket ble gjennomført med tre gjentak for hvert forsøksledd.

Pottene stod i veksthus med regulerte temperatur- og lysforhold, slik at de hadde lys i 16 timer per døgn og minimum dag- og natt-temperatur på henholdsvis 18 og 12 °C. Pottene ble vannet tre ganger per uke opp til 60 % av vannkapasitet. Avlingene fra hver av pottene ble tørket ved 60 °C og veid.

### *Analyser*

Planter: Avlingene fra to av gjentakene for hvert forsøksledd ble analysert for totalfosfor. På basis av avlingsmengde og fosforkonsentrasjon i avlingen ble fosforopptaket beregnet.

Jord: Jorda som ble brukt i forsøket ble analysert med standard jordanalysepakke (pH, AL-løselig P, K, Mg og Ca) som brukes for å bestemme lett tilgjengelige næringsstoffer i jordprøver fra landbruket. pH bestemmes i vann med jord:væske forhold på 1:2,5. AL-løselige elementer bestemmes etter metoden til Egnér et al. (1960), hvor jorda blir ekstrahert med en løsning som består av 0,1 M ammoniumlaktat og 0,4 M eddiksyre. Ekstraksjonsløsningen er sur (pH 3,75). De AL-løselige næringsstoffene forkortes til P-AL, K-AL osv. I tillegg ble jorda analysert for totalfosfor, organisk fosfor, vannløselig fosfor (fosfor ekstrahert med en svak saltløsning (0,0025 M  $\text{CaCl}_2$ ) i et jord:væske forhold på 1:20) og oksalatløselig jern, aluminium og fosfor (ekstrahert med en oksalatløsning med pH 3). Oksalatløselig jern og aluminium er et mål på jordas innhold av amorf jern- og aluminiumoksider, som igjen er et mål på jordas bindingsevne for fosfor.

Slam: For å karakterisere slammet ble det analysert for organisk fosfor og totalinnhold av en rekke elementer, deriblant fosfor, jern, aluminium og kalsium.

Slammet har blitt ekstrahert for tilgjengelig fosfor med følgende metoder:

- P-AL, standard metode med slam:væske forhold på 1:20
- P-AL, modifisert metode med slam:væske forhold på 1:50
- P-AL, modifisert metode med slam:væske forhold på 1:100
- Vannløselig fosfor ekstrahert med en svak saltløsning (0,0025 M  $\text{CaCl}_2$ ) i et jord:væske forhold på 1:20
- Olsen-P, standard metode ekstrahert med 0,5 M  $\text{NaHCO}_3$ , pH 8,5 (Olsen et al., 1954)
- Oksalatløselig fosfor (ekstrahert med oksalatløsning, pH 3) (Van Reeuwijk, 1995)
- Fosfor ekstrahert med ionebytter (jernimpregnert filterpapir) (Kuo, 1996)

### *Beregninger*

Effektivitet for fosfor i slammet ble beregnet som forholdet mellom fosforopptak fra slammet og fosforopptak fra kontroll-leddet med tilsvarende mengde mineralfosfor. Fosforopptak i 0-leddet ble trukket fra ved beregningene. For forsøksledd som ble tilført 9 kg P/daa ble beregning av fosforeffektivitet for slammet som følger:

$$P \text{ effektivitet } \% = ((\text{Slam-9} - \text{Kontroll-0}) / (\text{Kontroll-9} - \text{Kontroll-0})) * 100$$



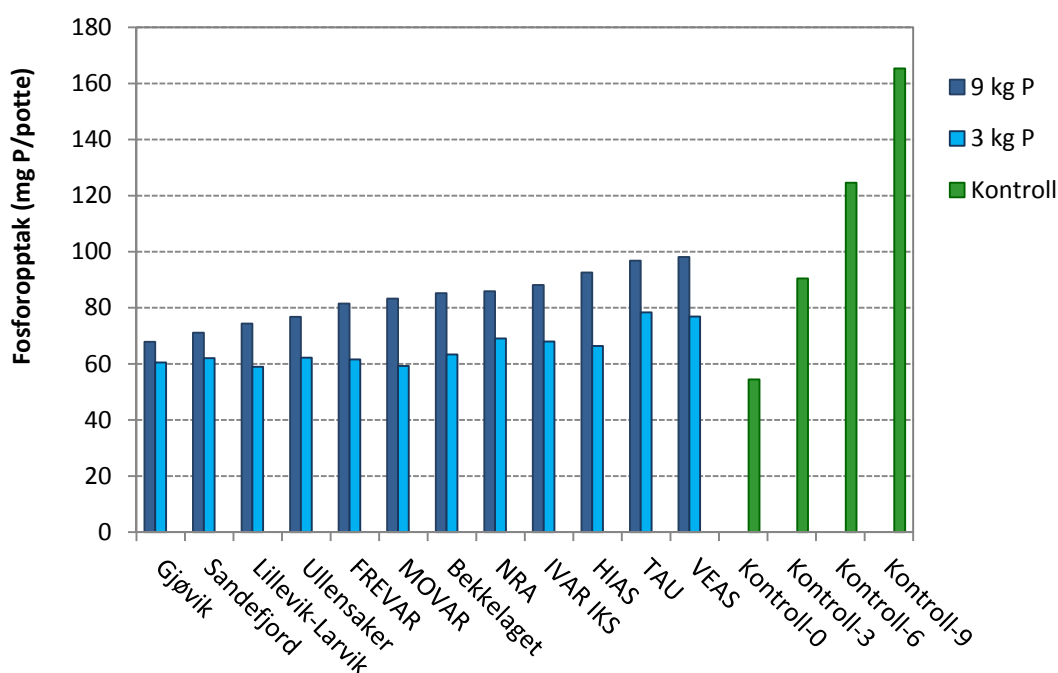
*Etablering og høsting av potteforsøket.*

## 3. Resultat

### 3.1 Fosforopptak

Fosfortilførslene med slam i dette pottforsøket var betydelig mindre enn det som tilføres med en vanlig slamtilførsel i jordbruket. Tilførsel av 2 tonn tørrstoff/daa av de slamtypene som er med i dette forsøket, ville ifølge tabell 2.3, gi 14 til 74 kg P/daa avhengig av slamtype. I pottforsøket ble det brukt mindre fosfortilførsler enn i praksis, fordi det da er lettere å se eventuelle forskjeller i de enkelte slamtypenes evne til å frigi fosfor til plantene.

Sammenlignet med pottene uten fosfortilførsel ga alle slamtypene økt fosforopptak i raigras, og fosforopptaket ble høyere med 9 kg P/daa med slam enn med slamtilførsel på 3 kg P/daa. Sammenlignet med tilsvarende mengde fosfor tilført som mineralfosfor var fosforopptaket imidlertid betydelig lavere (Figur 3.1). Figuren viser sum fosforopptak for alle 6 grashøstingene. Som figur 3.1 viser, var det også betydelige forskjeller mellom de ulike slamtypenes evne til å bidra med fosfor til plantene. Statistisk analyse viste at forskjellene i fosforopptak mellom de slamtypene som ga mest fosfor og de som ga minst fosfor var statistisk signifikant (Tabell 3.1).

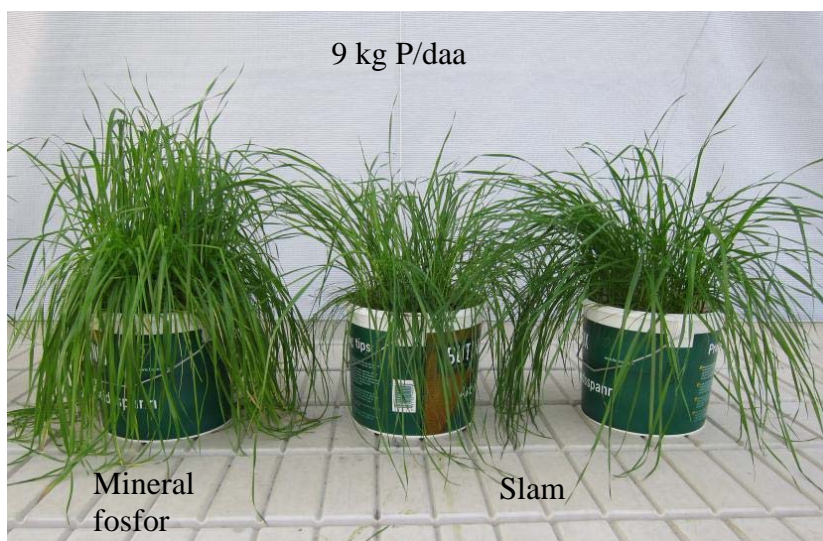


Figur 3.1. Middelt fosforopptak i raigras fra ulike slamtyper ved tilførsel av henholdsvis 3 og 9 kg P/daa (75 og 225 mg P/potte) med slam og fra 0, 3, 6 og 9 kg P/daa med mineralfosfor. Sum av 6 høstinger.

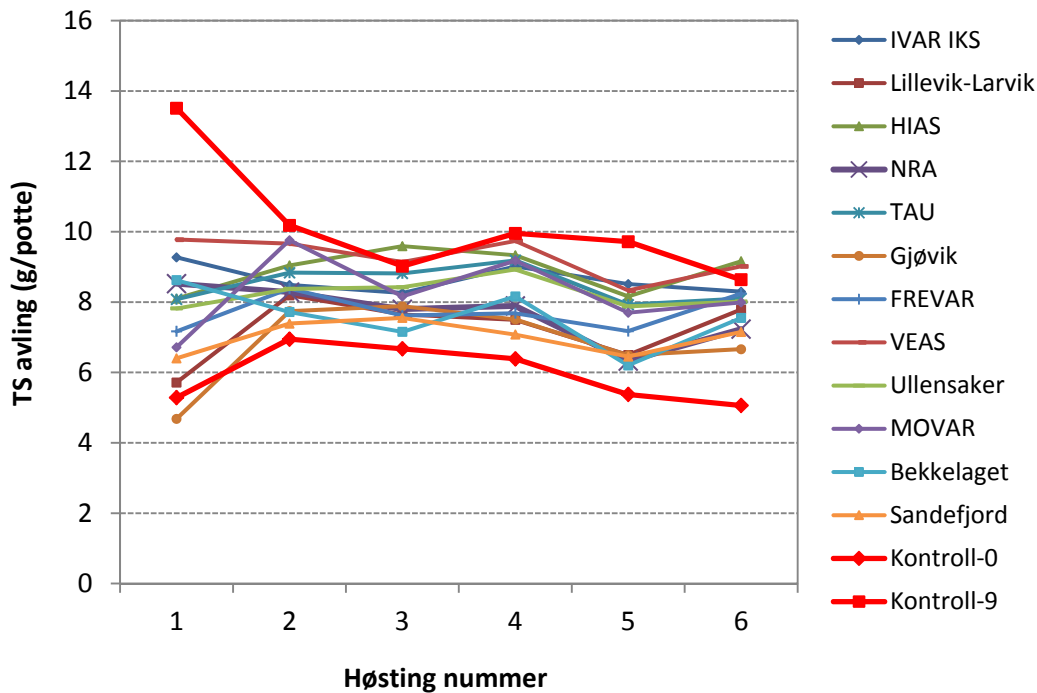
Tabell 3.1. Middelerverdier for fosforopptak i raigras (sum av 6 høstinger) sammen med bokstaver som indikerer signifikans for forskjellene mellom ulike slamtyper ved tilførsel av 9 kg P/daa med slam. Middelerverdier som ikke er forbundet med samme bokstav er signifikant forskjellige.

Slamtype	Middel fosforopptak mg P/potte
VEAS	98,1 a
TAU	96,8 ab
HIAS	92,6 abc
IVAR IKS	88,2 abcd
NRA	85,9 abcde
Bekkelaget	85,2 abcde
MOVAR	83,3 bcdef
FREVAR	81,5 cdefg
Ullensaker	76,8 defg
Lillevik-Larvik	74,4 efg
Sandefjord	71,2 fg
Gjøvik	67,9 g

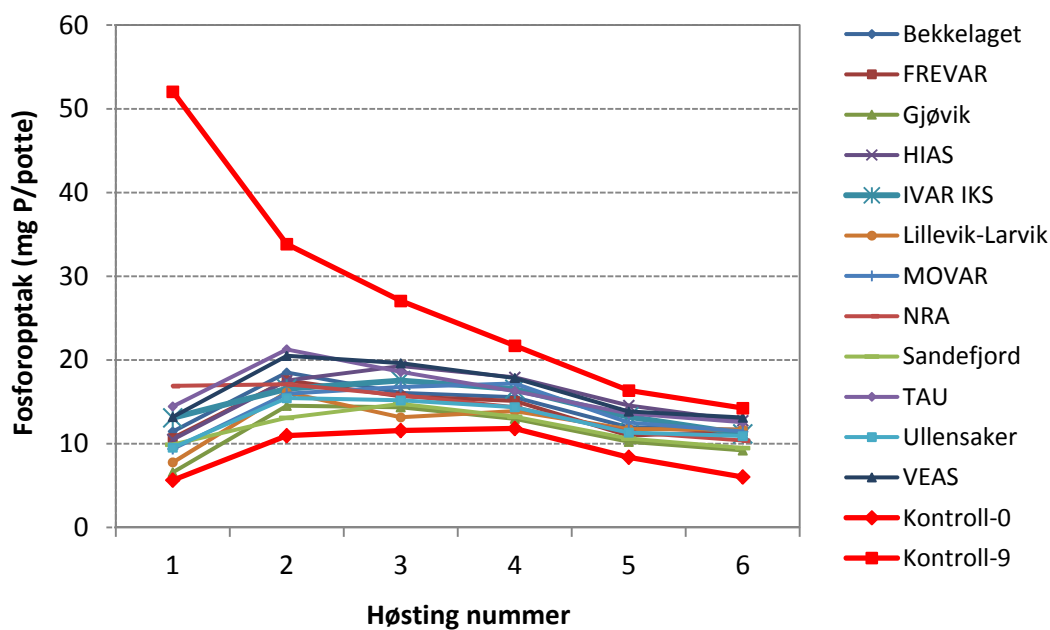
Resultater for enkelthøstinger viste at forskjellen i avling og fosforopptak mellom slam og mineralfosfor var størst for første høsting som inkluderte etableringsperioden for graset (Figur 3.2, 3.3 og 3.4). Med et etablert og utviklet rotsystem ble forskjellene mellom mineralfosfor og slamfosfor mindre. Avling for flere av slamtypene var på høyde eller nesten på høyde med avling med mineralfosfor for 2. til 6. høsting (Figur 3.3). Mineralfosfor ga imidlertid høyere fosforkonsentrasjon i graset, slik at forskjellene i fosforopptak ble større enn forskjellene i avling (Figur 3.4). Også mellom slamtypene var det størst forskjeller i fosforopptak for den første høstingen. Etter 3. høsting var det få eller ingen statistisk signifikante forskjeller mellom de ulike slamtypene.



Figur 3.2. Vekst ved første høsting. Mineralfosfor til venstre og to ulike slamtyper til høyre. Alle har fått 9 kg P/daa.



Figur 3.3. Tørrstoff (TS) avling for hver av grashøstingene for de ulike slamtypene ved tilførsel av 9 kg P/daa, sammenlignet med kontroll-leddene med henholdsvis 0 og 9 kg P/daa med mineralfosfor.



Figur 3.4. Fosforopptak i hver av grasavlingene for de ulike slamtypene ved tilførsel av 9 kg P/daa, sammenlignet med kontroll-leddene med henholdsvis 0 og 9 kg P/daa med mineralfosfor.

Effektiviteten av fosfor i slammet var betydelig lavere enn fosfor i mineralgjødsel. For totalt fosforopptak i 6 høstinger av raigras ved tilførsel av 9 kg P/daa varierte effektiviteten for slamfosfor fra 12 til 39 % av mineralfosfor (Tabell 3.2).

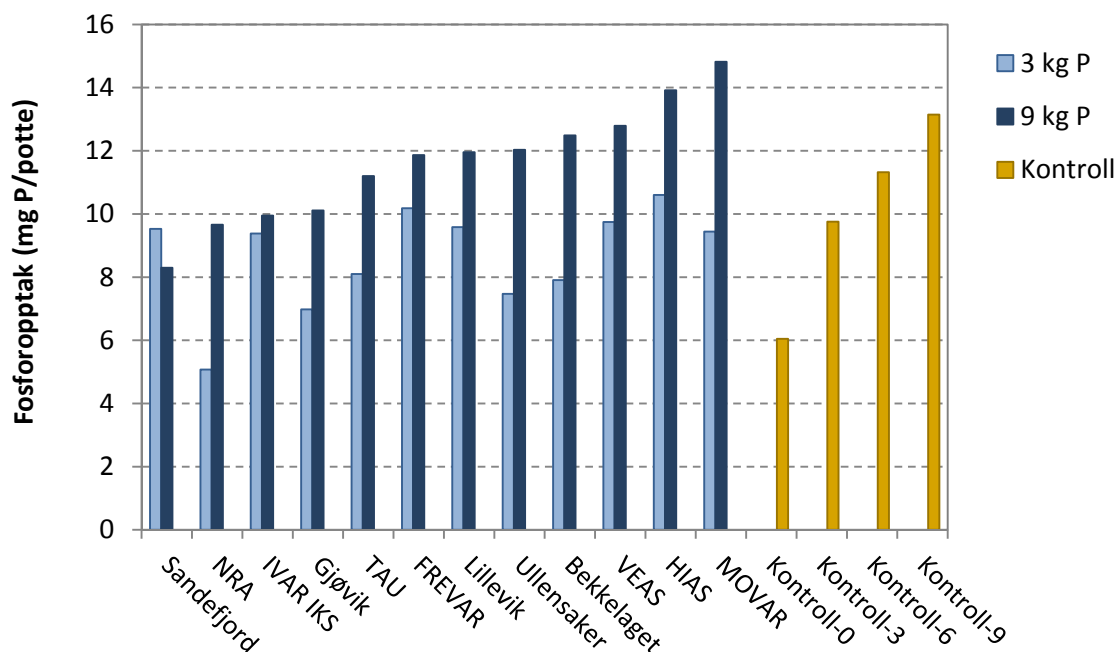
Tabell 3.2. Effektivitet for slamfosfor relativt til mineralfosfor ved tilførsel av 9 kg P/daa (P effektivitet % = ((Slam-9 - Kontroll-0)/(Kontroll-9 - Kontroll-0))\*100). Beregnet for totalt fosforopptak i 6 høstinger av raigras.

Slamtype	P effektivitet % av Kontroll-9
Gjøvik	12
Sandefjord	15
Lillevik	18
Ullensaker	20
FREVAR	24
MOVAR	26
Bekkelaget	28
NRA	28
IVAR IKS	30
HIAS	34
TAU, råslam	38
VEAS	39

#### Ettervirkning av slamtilførsel på bygg

Med et etablert og godt utviklet rotsystem holdt grasavlingene seg på et relativt jevnt nivå fra høsting til høsting. For å undersøke ettervirkningen av slamtilførselen på nyetablert vekst, ble graset fjernet og bygg sådd. Det ble ikke tilført ny mineralfosfor til kontroll-leddene, slik at disse også viser ettervirkning av tidligere tilført fosfor. På grunn av større uttapping av fosfor i løpet av grasperioden i pottene som fikk mineralfosfor, er det her mindre fosfor igjen til byggplantene. I kontroll-leddet med 3 kg P/daa tok graset totalt ut litt mer fosfor enn det som ble tilført, mens for kontroll-leddet med 6 kg P/daa var det igjen et lite overskudd med fosfor etter grasperioden. For kontroll-leddet med 9 kg P/daa var det igjen et overskudd tilsvarende cirka 2,4 kg P/daa.

Resultatene viser at det fortsatt var en fosforeffekt av flere av slamtypene, illustrert både ved at den største slamdoseringen på 9 kg P/daa ga høyere fosforopptak enn slamdoseringen på 3 kg P/daa, og ved at doseringen på 9 kg P/daa med slam ga høyere fosforopptak enn kontroll-leddene med 3 og 6 kg P/daa (Figur 3.5). Disse kontroll-leddene kan her betraktes som null-kontrollen, fordi det var nær balanse i tilført og fjernet fosfor i grasperioden.



Figur 3.5. Etturvirkning på fosforopptak i bygg av gjenværende fosfor etter 6 høstinger av gras som hadde fått tilført henholdsvis 3 og 9 kg P/daa med slam og 0, 3, 6 og 9 kg P/daa med mineralfosfor ved etablering.

### 3.2 Sammenheng mellom ulike fosforanalyser og fosforopptak

Bare en mindre andel av totalfosfor i slam er umiddelbart tilgjengelig for plantene, og som det er vist ovenfor, varierer plantetilgjengeligheten av fosforet mellom ulike slamtyper. Til nå er jordanalysemetoden P-AL (Egnér et al., 1960), som brukes til å vurdere gjødslingsbehovet for fosfor i jordbruket også brukt til å vurdere plantetilgjengeligheten av fosfor i avløpsslam. Ved denne metoden blir jorda/slammet ekstrahert med en sur løsning (pH 3,75) som består av 0,1 M ammoniumlaktat og 0,4 M eddiksyre. Analysemetoden er opprinnelig utviklet for sure jordsmonntyper, som også er det som er mest vanlig i Norge. Erfaring har vist at den er mindre egnet til kalkholdige jordtyper med høy pH. Slam er en helt annen og mer «konsentrert» matriks enn jord, og det er derfor grunn til å stille spørsmål om standard analysemetode for jord er egnet for slam.

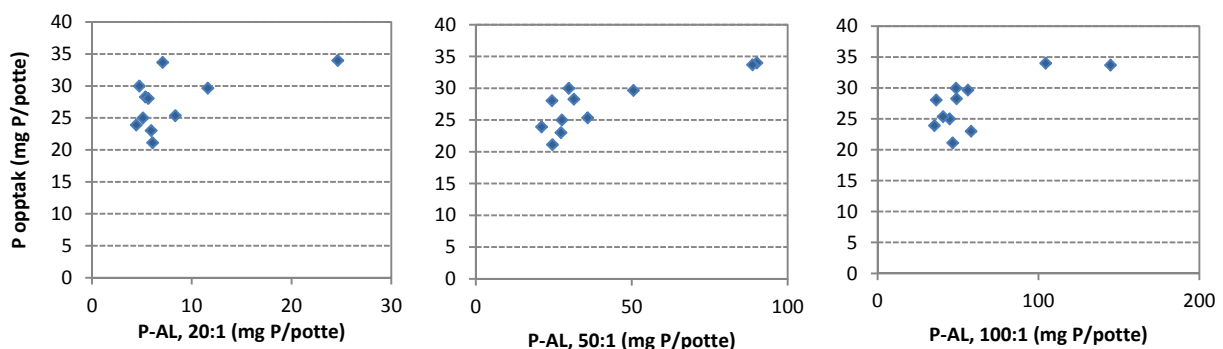
I denne undersøkelsen har vi testet standard P-AL metode, modifikasjoner av AL-metoden (større væske:slam forhold under ekstraksjonen) i tillegg til flere andre typer fosforekstraksjoner (se beskrivelsen i kapittel 2) mot fosforopptak i plantene. I korrelasjonsberegningene er analyseverdiene korrigeret for mengde slam som ble tilsatt pottene, fordi de ulike slamtypene ble tilsatt i ulike mengder avhengig av slammets totale fosforkonsentrasjon. Tilsatt mengde ekstrahert fosforfraksjon per potte ble beregnet og brukt i korrelasjonsberegningene i stedet for konsentrasjonen i slammets. Det betyr at verdiene som er brukt i korrelasjonsberegningene reflekterer andelen av totalfosfor som ble ekstrahert for de ulike slamtypene. Når det gjelder

fosforopptaket ble det valgt å bruke data for sum fosforopptak i avling ved 1. og 2. høsting, fordi forskjellene mellom slamtypene var størst i starten av forsøket. Videre ble det valgt å bruke data fra pottene som fikk størst slamtilførsel (9 kg P/daa).

#### *P-AL med modifikasjoner*

Ved å bruke større væske:slam forhold enn i standard metoden frigis mer fosfor, men hverken standard P-AL metode eller modifikasjonene viste god sammenheng med fosforopptak i pottforsøket (Figur 3.6). Ved de modifiserte metodene skilte imidlertid begge de to slamtypene som ga størst fosforopptak seg ut ved å gi betydelig høyere P-AL verdi enn de øvrige slamtypene, mens ved standard P-AL metode var det bare en av disse som skilte seg ut. Disse var begge kalkbehandlede slamtyper. For de andre slamtypene var det dårlig sammenheng mellom analyseverdien og fosforopptaket i alle variantene.

Ekstraksjonsløsningen som brukes ved P-AL analysen er en bufferløsning med pH 3,75. Ved standard P-AL ekstraksjon av de kalkbehandlede slamtypene ble pH i ekstraksjonsløsningen 5,4 og 5,8 for henholdsvis VEAS og NRA, mens for de ukalkede slamtypene var pH i området 4,0 til 4,3. En høyere pH under ekstraksjonen forventes å redusere mengden ekstrahert fosfor. Ved å øke væske:slam forhold til 50:1 ble pH i ekstraksjonsløsningen redusert til 4,4 for de kalkbehandlede slamtypene. Dette økte mengde ekstrahert fosfor for NRA slammet relativt til de andre slamtypene.

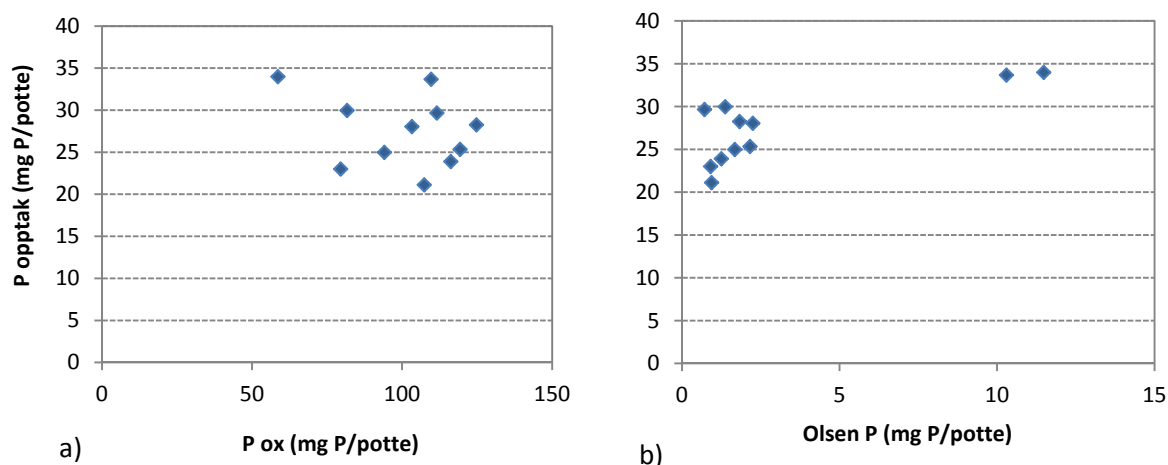


Figur 3.6. Sammenheng mellom P-AL i tilsatt slam og sum fosforopptak i 1. og 2. høsting av raigras ved ulike væske:slam forhold (20:1, 50:1 og 100:1) under ekstraksjonen.

#### *Andre analysemetoder*

Ekstraksjon av fosfor med oksalatløsning med pH 3 (P ox) er en relativt kraftig ekstraksjon. Denne ekstraksjonen viste ingen sammenheng med fosforopptaket i plantene (Figur 3.7a). Olsen P (ekstraksjon med 0,5 M NaHCO<sub>3</sub>, pH 8,5) brukes i en rekke land for å vurdere gjødslingsbehovet for fosfor i jordbruket. Den gir brukbar sammenheng med fosforopptak på både sure og basiske jordtyper og fungerer dermed mer universelt enn det P-AL gjør. De to kalkbehandlede slamtypene som også ga størst fosforopptak, skilte seg ut ved å gi betydelig høyere verdi for Olsen P enn de øvrige slamtypene (Figur 3.7b). For de andre slamtypene var det imidlertid ingen sammenheng mellom analyseverdien og fosforopptaket.





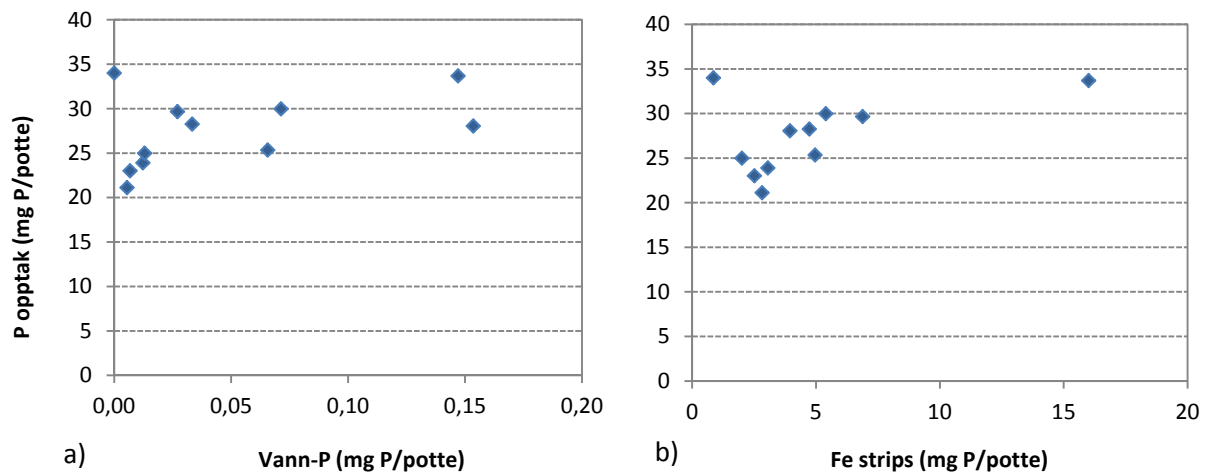
Figur 3.7. Sammenheng mellom henholdsvis oksalatløselig fosfor (*P ox*)(a) og Olsen P (b) i tilsatt slam og sum fosforopptak i 1. og 2. høsting av raigras.

Den svakestefosforekstraksjonen vi testet var fosforekstrahert med en svak saltløsning, 0,0025 M  $\text{CaCl}_2$  (Vann-P). Metoden fungerte ikke for slammet fra NRA som inneholdt 25 % kalsium og hele 26 % organisk fosfor. For dette slammet ble det ikke ekstrahert detekterbare fosformengder til tross for at vekstforsøket viste relativt god tilgjengelighet av fosforet. For de andre slamtypene viste metoden en ganske god sammenheng med fosforopptaket selv om den ekstraherte svært lite fosfor sammenlignet med fosforopptaket (Figur 3.8a). Dette siste tyder på at konsentrasjonen av vannløselig fosfor delvis reflekterer mengden lett tilgjengelig fosfor i slammet. Slamtypene med fosforopptak på 28-30 mg P/potte viste imidlertid stor variasjon i konsentrasjon av vannløselig fosfor til tross for nesten likt fosforopptak i avlingen.

Ekstraksjon med ionebytter (Fe-strips) etterligner til en viss grad prosessene ved planteopptak. Ved planteopptak av fosfor reduseres fosforkonsentrasjonen i jordvæska og fosfor frigjøres fra jord og slam ved likevektsprosesser. På samme måte sørger ionebytteren for å holde fosforkonsentrasjonen i ekstraksjonsløsningen nede, slik at fosfor som kan frigjøres ved likevektsprosesser blir ekstrahert. Tilsvarende som for vannløselig fosfor, fungerte ionebyttermetoden ikke for NRA slammet, men for de andre slamtypene var denne ekstraksjonsmetoden rimelig god (Figur 3.8b). Uten NRA slammet forklarte fosforekstrahert med Fe-strips 67 % av variasjonen i fosforopptaket.

NRA og VEAS slammet er begge kalkbehandlede og ga høyest og ganske likt fosforopptak i de to første avlingene. De ga imidlertid vidt forskjellig resultat for ekstrahert mengde fosfor med vann- og ionebytter-ekstraksjon. VEAS slammet inneholdt mindre kalsium (17 %) enn NRA slammet og hadde også betydelig lavere pH. VEAS slammet hadde pH 8,2 mens NRA slammet hadde pH >11. Den høye pH verdien for NRA slammet er sannsynligvis årsak til liten frigjøring av fosfor ved vann- og ionebytter-ekstraksjon. Ved innblanding i jord ble imidlertid pH i pottene med NRA- og VEAS slam ganske lik, og frigjøring av fosfor til plantene også ganske lik. NRA slammet hadde også en høy andel

organisk fosfor som ikke ble reflektert i disse analysene, men som ved nedbrytning i jord kan ha bidratt til plantetilgjengelig fosfor.



Figur 3.8. Sammenheng mellom henholdsvis vannløselig fosfor (Vann-P)(a) og fosfor ekstrahert med ionebytter (Fe-strips)(b) i tilsatt slam og sum fosforopptak i 1. og 2. høsting av raigras.

### Oppsummering

På grunn av svært ulike kjemiske egenskaper mellom slam fra ulike leverandører, illustrert ved totalfosforekstraktene av de ulike slamtypene (figur 3.9), kan det være vanskelig å finne en universell ekstraksjonsmetode som reflekterer mengden plantetilgjengelig fosfor i alle slamtyper. En fortynnet AL ekstraksjon (50:1) og Olsen P reflekterte den relativt gode fosfortilgjengeligheten i begge de kalkbehandlede slamtypene, men disse analysene skilte dårlig mellom alle de andre slamtypene og ga for stor forskjell i analyseverdier mellom kalket og ukalket slam. På den annen side, ionebyttermetoden som skilte brukbart mellom de ukalkede slamtypene, ga verdier for de to kalkede slamtypene som ble outliers i hver sin retning. Arbeidet med slamanalyser er ikke helt avsluttet, og flere ekstraksjonsmetoder vil bli testet mot fosforopptaket i pottforsøket.

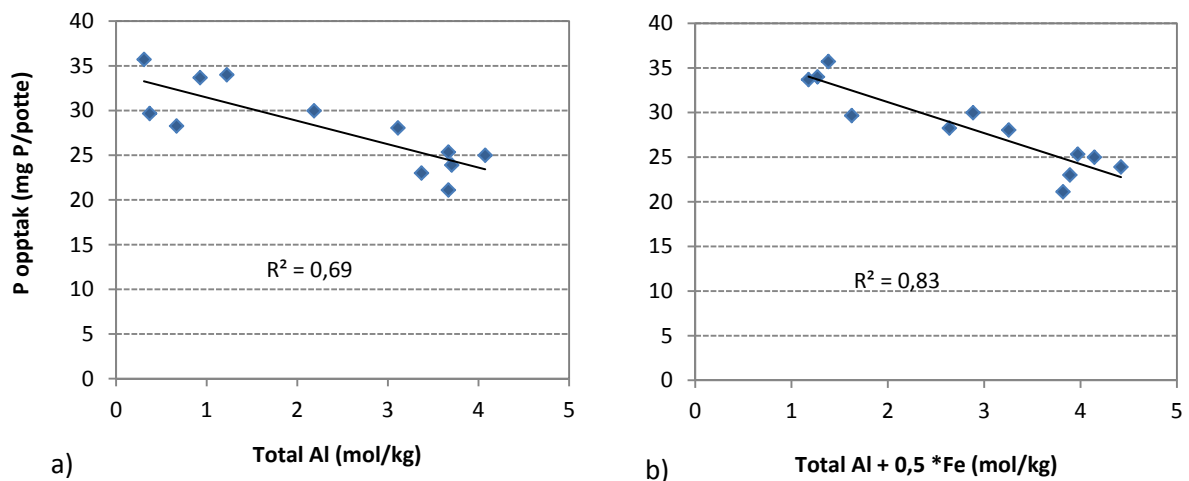


Figur 3.9. Totalfosforekstraktene av de ulike slamtypene illustrerer store forskjeller i kjemiske egenskaper mellom de ulike slamtypene.

### 3.3 Sammenheng mellom jern og aluminium i slammet og fosforopptak

Fosforopptaket hadde nær sammenheng med konsentrasjonen av fellingskjemikalier i slammet, og da spesielt totalkonsentrasjonen av aluminium (Figur 3.10a). Jernkonsentrasjonen alene viste liten sammenheng med fosforopptaket, antagelig fordi effekten ble overskygget av aluminiumkonsentrasjonen. Summen av jern og aluminium på molbasis og med halv vekt på jern, forklarte 83 % av variasjonen i fosforopptaket i 1. og 2. høsting av raigraset (Figur 3.10b). Konsentrasjonen av fellingskjemikalier hadde størst effekt på fosforopptaket i 1. høsting, og effekten avtok så gradvis utover i vekstperioden.

Ut i fra dette ser det ut til at for slam hvor jern og/eller aluminium er brukt til felling, er konsentrasjonen av jern og aluminium i slammet en vel så god indikator for innholdet av plantetilgjengelig fosfor som egne fosforekstraksjoner.



Figur 3.10. Sammenheng mellom henholdsvis slamets konsentrasjon av aluminium (Al) (a) og sum Al + 0,5\*Fe (b) og sum fosforopptak i 1. og 2. høsting av raigras.

## 4. Konklusjon

---

- Sammenlignet med vekst uten fosfortilførsel ga alle slamtypene økt fosforopptak, men sammenlignet med tilsvarende mengde fosfor tilført som mineralfosfor var fosforopptaket betydelig lavere. Effektivitet av fosfor i slammet varierte fra 12 til 39 % av mineralfosfor, beregnet fra sum fosforopptak i 6 høstinger av raigras ved tilførsel av 9 kg P/daa.
- På grunn av svært ulike kjemiske egenskaper mellom slam fra ulike leverandører, er det vanskelig å finne en universell ekstraksjonsmetode som reflekterer mengden plantetilgjengelig fosfor i alle slamtyper. En fortynnet AL-ekstraksjon (50:1) og Olsen P reflekterte den relativt gode fosfortilgjengeligheten i begge de kalkede slamtypene, men disse analysene skilte dårlig mellom alle de andre slamtypene og ga også for stor forskjell i analyseverdier mellom kalket og ukalket slam. På den annen side, ionebyttermetoden som skilte brukbart mellom de ukalkede slamtypene, ga verdier for de to kalkede slamtypene som ble outliers i hver sin retning. Det er sannsynlig at en bør velge ulike analysemetoder avhengig av om slammet er kalket eller ukalket. Arbeidet med slamanalyser er ikke helt avsluttet, og flere ekstraksjonsmetoder vil bli testet mot fosforopptaket i pottforsøket.
- Økende innhold av aluminium og jern i slammet ga avtagende fosforopptak. For jern- og/eller aluminiumsfelt slam, var konsentrasjonen av jern og aluminium i slammet en vel så god indikator for innholdet av plantetilgjengelig fosfor som de testede fosforekstraksjonene.

## 5. Referanser

---

- Bøen, A. & Bechmann, M. 2010. Fosfor i matkjeden - hvor forsvinner fosforet? VANN 45 (2): 244-250.
- Cordell, D., Drangert, J.O. & White, S. 2009. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environ. Chang.* 19: 292-305.
- 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.
- Kuo, S. (1996). Phosphorus. I: Sparks, D.L. et al. (ed). *Methods of soil analysis. Part 3 - Chemical methods*, SSSA Book Series:5. Madison, Wisconsin, USA. S. 899-901.
- 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.
- Olsen, S.R., C.V. Cole, F.S. Watanabe, and L.A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *USDA Circular 939*. U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Van Reeuwijk, L.P. (1995). *Procedures for soil analysis. 12-2. Acid oxalate extractable Fe, Al, Si*. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, The Netherlands. ISBN 90-6672-052-2.