

## Plantetilgjengelig fosfor i kalkfelt avløpslam

Av Anne Falk Øgaard, Lasse Vråle og Martin Mengede

Anne Falk Øgaard er dr.scient i jordfag og seniorforsker i NIBIO.

Lasse Vråle er pensjonert sivilingeniør og tidligere førsteamanuensis ved NMBU. Driver eget firma: Siv.ing. Lasse Vråle AS.

Martin Mengede er Dipl.-Ing. i materiale og prosesssteknologi og utviklingssjef i Miljøkalk AS.

### Summary

Sewage sludge is a significant phosphorus resource that should be better utilized in the plant production than today. However, phosphorus in sludge produced after precipitation with aluminium and iron coagulants have low plant availability. This article presents results from plant growth experiments where plant available phosphorus in lime precipitated sewage sludge from Bokerøya and Skådevika wastewater treatment plants was studied. Both wastewater treatment plants normally use iron as coagulant aid, but Skådevika produced in addition a sludge to the experiments without using iron. The growth experiments included a pot experiment in greenhouse with three harvests of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) and a two-year field experiment in cereals in Southeast Norway. The results showed that precipitation with lime gives a sludge with higher plant availability of phosphorus than what is earlier found for aluminium/iron precipitated sludge. This was special the case with moderate use of iron as coagulant aid.

### Sammendrag

Avløpslam utgjør en betydelig fosforressurs som bør utnyttes bedre i planteproduksjonen enn i dag. Fosfor i aluminium- og jernfelt avløpslam har imidlertid lav plantetilgjengelighet. Denne artikkelen viser resultater fra plantevekstforsøk hvor plantetilgjengelig fosfor i kalkfelt avløps-

slam fra Bokerøya og Skådevika renseanlegg ble undersøkt. Begge renseanleggene bruker til vanlig jern som hjelpekoagulant i vannrensingen, men Skådevika produserte i tillegg et slam til forsøkene uten tilsetning av jern. Vekstforsøkene inkluderte et pottforsøk i veksthus med tre høstinger av italiensk raigras (*Lolium multiflorum*) og et to-årig feltforsøk med korn på forsøksgården Øsaker i Sarpsborg kommune. Resultatene viste at kalkfelling gir slam med høyere fosfortilgjengelighet enn det som tidligere er funnet for aluminium/jern-felt slam. Fosfortilgjengeligheten i kalkfelt slam ble høyest ved moderat bruk av jern som hjelpekoagulant.

### Innledning

Økonomisk drivverdige reserver av mineralisk fosfor (P) er begrenset, og effektiv resirkulering av fosforet er nødvendig for å sikre nok fosfor i framtiden. Fosfor i slam fra norske renseanlegg utgjør en betydelig fosforressurs. Cirka 1900 tonn fosfor samles årlig i norsk avløpslam, og cirka 60 % av dette tilføres jordbruksarealer som jordforbedringsmiddel (Hanserud m.fl. 2015). Til sammenligning er årlig forbruk i Norge av fosfor i mineralgjødsel mellom 8500 og 9000 tonn.

De fleste renseanleggene i Norge bruker kjemisk felling med aluminium (Al) og/eller jern (Fe) til å fjerne fosforet i avløpsvannet. Etter stor

forskningsinnsats i 1960- og tidlig 70-årene, ble det slått fast at kjemisk felling var den mest effektive og billigste metoden for å fjerne fosfor og derved forhindre eutrofiering og algevekst i elver, innsjøer og fjorder. Det ble også klarlagt at når 90 % av fosforet ble fjernet med kjemisk felling, ble samtidig ca. 80 % av det organiske stoffet, målt som biokjemisk oksygenforbruk (BOF), fjernet fra vannet. Kjemisk felt slam lot seg også effektivt avvanne i sentrifuger og slampresser til et høyt tørrstoffinnhold (20-50 % tørrstoff). Da kjemisk rensing for alvor startet på tidlig 70-tall, var kalkfelling med lesket kalk ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) vanlig ved siden av felling med aluminium- og/eller jernsalter. Ved kalkfelling ble magnesium fra sjøvann ofte brukt som hjelpekoagulant siden dette reduserte kalkdosen til det halve uten at rensesgraden ble redusert (Vråle 1978). I 1995 var det ca. 30 kjemiske renseanlegg som brukte kalk alene, eller i kombinasjon med magnesium. I dag er det bare noen få renseanlegg som bruker kalkfelling som rensemetode. Anlegg som benyttet aluminium- og/eller jernsalter til felling, fikk etter hvert flytende konsentrerte kjemikalier som var enkle å håndtere og dosere. Kalken derimot, kommer som pulver som kan støve med utilstrekkelig utstyr, og det må løses opp til en suspensjon. Dessuten gir kalkfelling en høyere slamproduksjon, blant annet fordi ikke all kalken løses opp. Kalkfelling gir imidlertid en fordel med svært enkel slambehandling, siden det produserte slammet er hygienisert og stabilt, forutsatt tilstrekkelig kalkdosering. Etter 1995 har det vært krav om slamhygienisering, og slam som er produsert ved bruk av aluminium- eller jernkoagulanter må behandles for å bli hygienisert og stabilt. Behandlingsmetode kan være anaerob utråtning hvor det samtidig produseres biogass eller tilsetting av lesket eller brent kalk ( $\text{CaO}$ ). Brent kalk gir en sikker hygienisering av slammet ved at det utvikler både varme og høy pH (Orsa metoden). Slambehandling med anaerob utråtning har nå blitt mer vanlig på større renseanlegg. Dette reduserer også den organiske stoffmengden med 50 % i gjennomsnitt. Samtidig skjer det en oppkonsentrering av fosfor i slammet siden tørr-

stoffmengden reduseres. Dette betyr at ved tilførsel av utråtnet slam til jordbruksarealer etter dagens regelverk med vanlig tillatt dosering på 2 tonn tørrstoff/dekar/10 år, kan slammet gi en meget stor fosfortilførsel.

For å klare rensekravene er doseringen av Al/Fe høy i mange renseanlegg. En medvirkende årsak til høy dosering er at Al/Fe-koagulantene, som er sure, også brukes for å bringe pH-verdien i avløpsvannet ned til et område hvor utfellingen med Al/Fe er optimal, vanligvis mellom pH 5,0 og 6,5, avhengig av vannkjemi og type koagulant. I tillegg har etablering av biologisk rensesetning og anaerob utråtning av slammet bidratt til høyere dosering av Al/Fe-salter, fordi returvannet fra slamavvanningen får høyere pH og alkalitet etter en anaerob slambehandlingsprosess. Koagulantdosen må økes for å komme ned i optimalt pH-område når returvannet som sendes tilbake til innløpet har økt pH og alkalitet (Dahl 2013).

Flere tidligere forsøk har vist at høy dosering med aluminium og/eller jern gir et slam med lav plantetilgjengelighet av fosforet (Krogstad m.fl. 2004, Øgaard 2013, Øgaard & Brod 2016). Dette fører til at fosfor i slam tilført jordbruket utnyttes dårlig og gir bare en liten reduksjon i forbruket av mineralsk fosfor. Forsøkene viser imidlertid også at kalking av Al/Fe-felt slam bidrar til at en del av fosforet som er bundet til aluminium eller jern frigjøres og i stedet bindes til kalsium (Ca) (Øgaard & Brod 2016, Alvarenga m.fl. 2017). Plantevekstforsøk har vist at dette gir en høyere plantetilgjengelighet av fosforet i slammet. Siden det ser ut til at kalsiumbundet fosfor i slam er mer plantetilgjengelig enn Al/Fe-bundet fosfor, er bruk av kalkfelling i rensesprosessen i stedet for Al/Fe-salter interessant når målet er en mest mulig effektiv resirkulering av fosfor i slamdisponeringen. Det er sannsynlig at bruk av kalk til rensing av avløpsvann i stedet for Al/Fe-salter vil gi mer plantetilgjengelig fosfor.

Formålet med forsøkene som presenteres i denne artikkelen er å dokumentere plantetilgjengelighet av fosforet i kalkfelt slam, og deretter sammenligne dette med tidligere plante-

vekstforsøk med aluminium- og/eller jernfelt slam. Slam fra to renseanlegg med kalkfelling (Bokerøya og Skådevika) ble testet både i potteforsøk under kontrollerte forhold i veksthus og i feltforsøk hvor vi kunne studere effektene av kalkfelt slam under naturlige jordbruksforhold.

## Materiale og metoder

Tre typer kalkfelt avløpslam ble inkludert i plantevekstforsøkene:

1. Bokerøya: Kalkfelling med jern som hjelpekoagulant
2. Skådevika m/Fe: Kalkfelling med magnesium (Mg) fra sjøvann og jern som hjelpekoagulanter
3. Skådevika u/Fe: Kalkfelling med magnesium fra sjøvann, men uten jern som hjelpekoagulant

Bokerøya renseanlegg i Svelvik er et flota-sjonsanlegg, og bruker jernklorid som hjelpekoagulant med relativt høye doser for å sikre rensekravene. Skådevika renseanlegg i Flekkefjord er et vanlig kjemisk kalkfellingsanlegg med magnesium fra sjøvann og mindre doser jernklorid som hjelpekoagulanter. Dette renseanlegget kjørte en kortere periode uten jerntilsetning, slik at vi også fikk et rent kalk/Mg-felt slam til forsøkene.

### Potteforsøk

Kjemisk karakteristikk av slammet som ble brukt i potteforsøket i veksthus er presentert i Tabell 1. Jern, aluminium og kalsium er alle elementer som har betydning for bindingen av fosfor. Forholdet mellom jern+aluminium og fosfor ((Fe+Al)/P) gir en indikasjon på tilgjengeligheten av fosforet. Forholdet er oppgitt på

molbasis. Et høyt molforhold indikerer en lavere fosfortilgjengelighet enn et lavt molforhold.

Vi brukte et fosforfattig vekstmedium bestående av sand med litt torv, fordi vanlig dyrka jord inneholder ofte så mye fosfor at det maskerer en del av effekten av fosfor i avløpslammet.

Slammet ble dosert etter totalfosfor i en mengde tilsvarende 6 kg P/dekar. Kontrollbehandlinger uten slam ble tilført lettøselig mineralfosfor i to nivåer tilsvarende 3 og 6 kg P/dekar (3 P og 6 P). I tillegg var det en kontrollbehandling uten fosfortilførsel (0 P). Alle andre næringsstoffer ble tilsatt i mengder som skulle sikre at disse ikke begrenset veksten. Forsøket ble gjennomført med tre gjentak for hver forsøksbehandling. Det ble dyrket italiensk raigras (*Lolium multiflorum*) som ble høstet tre ganger. Tørrstoffavling ble målt og avlingen ble analysert for fosfor. Fosforopptaket i plantene (mg P/potte) ble beregnet ved å multiplisere tørrstoffavling (g/potte) med fosforkonsentrasjonen i avlingen. For mer detaljer om forsøksopplegget se Øgaard (2017).

### Feltforsøk

Våren 2015 ble det anlagt et to-årig feltforsøk med de samme tre slamtypene på Norsk Landbruksrådgiving Øst sine arealer på Øsaker i Sarpsborg kommune. Jorda på forsøksfeltet var en mellomleire med ca. 5 % organisk materiale. Ved etablering av forsøket var jordas pH 6,1 og konsentrasjonen av lett tilgjengelig fosfor, målt som P-AL, var middels høy (7,2-8,0 g P/100 g jord). Slammet til feltforsøket ble hentet på et annet tidspunkt enn til potteforsøket. Sammenlignet med slammet til potteforsøket, hadde slammet fra Skådevika til feltforsøket et høyere jerninnhold, mens slammet fra Bokerøya hadde

Tabell 1. Kjemisk karakteristikk av de ulike slamtypene som ble brukt i potteforsøket. (TS = tørrstoff)

Slam	pH	Ledn.evne µS/cm	Fe g/kg TS	Al g/kg TS	Ca g/kg TS	P g/kg TS	(Fe+Al)/P molforhold
Bokerøya	7,2	1900	56	1,8	89	9,9	3,3
Skådevika m/Fe	8,8	2000	14	2,6	120	6,2	1,7
Skådevika u/Fe	>11	3300	5,3	3,8	110	7,3	1,0

Tabell 2. Kjemisk karakteristikk av de ulike slamtypene som ble brukt i feltforsøket. (TS = tørrstoff)

Slam	pH	Ledn.evne µS/cm	Fe g/kg TS	Al g/kg TS	Ca g/kg TS	P g/kg TS	Fe+Al/P molforhold
Bokerøya	7,5	2600	52	2,6	106	14,7	2,2
Skådevika m/Fe	>11	1100	21	1	109	5,4	2,4
Skådevika u/Fe	>11	2900	12	0,8	153	5,3	1,4

Tabell 3. Fosfortilførsel til de ulike forsøksleddene.

Forsøksledd	2015 kg P/dekar	2016 kg P/dekar
Bokerøya	14,7	0
Skådevika u/Fe	5,3	0
Skådevika m/Fe	5,4	0
NPK (22-3-10)	1,3	1,3
Opti-NK (22-0-12)	0	0
Opti-NK (22-0-12) + kalk	0	0

omtrent likt jerninnhold som i pottforsøket (Tabell 2). Avlingsrespons på fosforgjødsling er ofte lav i norsk jordbruk, fordi det mange steder er tilført et overskudd av fosfor over flere tiår. Hovedfokuset i feltforsøket var derfor på effekten av slamtilførselen på tilgjengelig fosfor i jorda.

Etter dagens reguleringer i gjødselvarsforskriften blir slam ofte tilført i en mengde på 2 tonn tørrstoff (TS)/dekar. Vi valgte å tilføre bare 1 tonn TS/dekar i feltforsøket, fordi dette er mer i samsvar med forventede endringer i gjødselvarsforskriften. Det er forventet at revidert forskrift vil gi en begrensning på fosformengden som kan tilføres med slammet, mens det i dag er ingen slik begrensning.

Forsøksrutene med slam fikk i tillegg tilført fosforfri mineralgjødsel for å sikre tilstrekkelig tilførsel av nitrogen (N) og kalium (K). Kontrollbehandlinger uten slam bestod av fosforholdig mineralgjødsel (NPK (22-3-10)) og fosforfri mineralgjødsel (Opti-NK (22-0-12)) med og uten kalk i tillegg (Tabell 3). Forsøket hadde tre gjentak. Siden alle slamtypene ble tilført i samme mengde slamtørrstoff, ble fosfortilførselen ulik (Tabell 3). Slammet fra Bokerøya hadde mye høyere fosforkonsentrasjon enn slammet

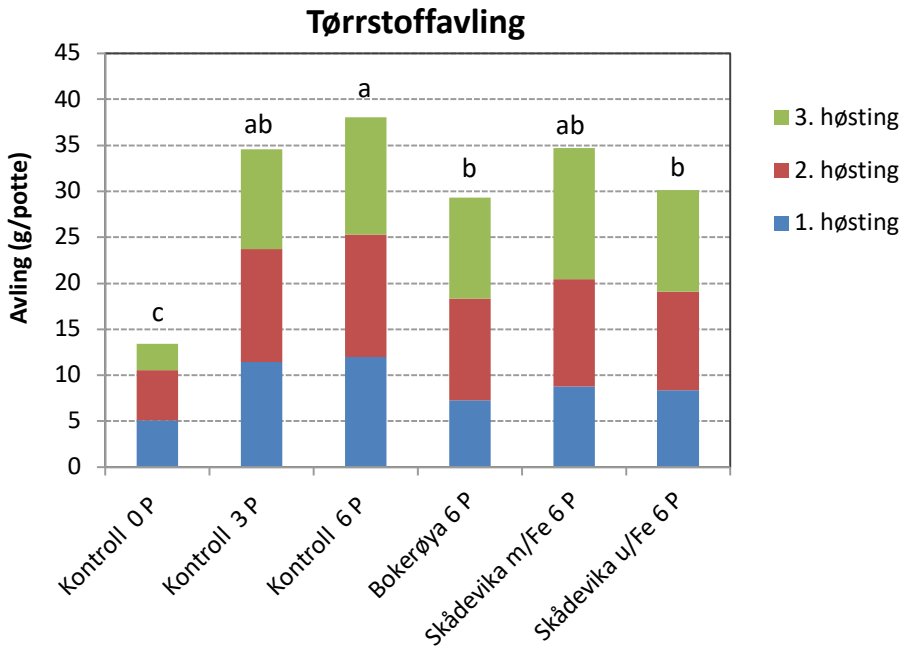
fra Skådevika og ga dermed betydelig høyere fosfortilførsel. I andre forsøksår fikk alle forsøksleddene, unntatt NPK-leddet, lik gjødsling med fosforfri mineralgjødsel.

Det ble dyrket korn på forsøksfeltet begge årene, henholdsvis bygg og vårhvete. For mer detaljer om forsøksopplegget se Øgaard (2017).

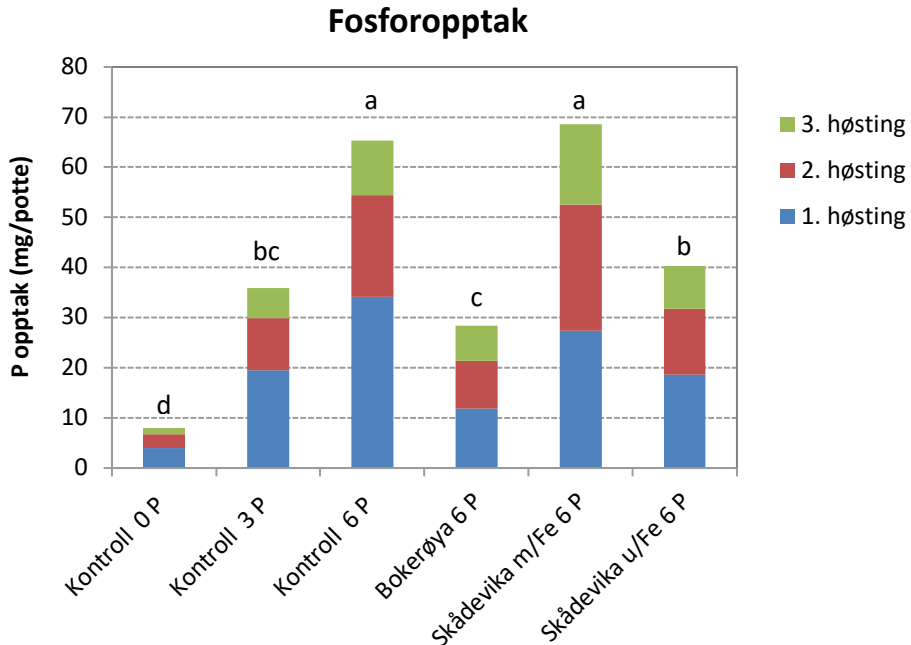
Jordprøver til kjemiske jordanalyser ble tatt ut fra hver av forsøksrutene våren 2015 før gjødsling og slamtilførsel og hver høst etter høsting av kornet. Alle jordprøvene ble analysert med standard jordanalysepakke for jordbruket (pH, ammoniumlaktat(AL)-løselig P, K, Mg og Ca) hos Eurofins. AL-løselige elementer ekstraheres etter metoden i Egnér et al. (1960), betegnes som P-AL, K-AL etc. og brukes som et mål på jordas innhold av plantetilgjengelig næring.

### Statistiske analyser

Variansanalyse (ANOVA) ble brukt for å undersøke effekten av de ulike slamtypene på avling og fosforopptak. Tukey's multiple sammenligningstest ble brukt for å undersøke statistisk signifikante forskjeller mellom hver av de enkelte forsøksbehandlingene.



Figur 1. Gjennomsnittlig tørrstoffavling (g/potte) for tre høstinger av raigras ved tilførsel av en fosformengde tilsvarende 6 kg P/dekar med tre ulike kalkfelte slamtyper eller 0, 3 og 6 kg P/dekar med mineralfosfor. Bokstavene over søylene viser om forsøksbehandlingene er signifikant forskjellige. Søylene uten en felles bokstav viser signifikante forskjeller, mens søylene med en felles bokstav ikke er signifikant forskjellige.



Figur 2. Gjennomsnittlig fosforopptak for tre høstinger av raigras ved tilførsel av 6 kg P/dekar (120 mg P/potte) med tre ulike kalkfelte slamtyper eller 0, 3 og 6 kg P/dekar med mineralfosfor. Bokstavene over søylene viser om forsøksbehandlingene er signifikant forskjellige. Søylene uten en felles bokstav viser signifikante forskjeller, mens søylene med en felles bokstav ikke er signifikant forskjellige.

## Resultater og diskusjon

Slammet fra Skådevika hadde lavere fosforkonsentrasjon enn slammet fra Bokerøya. Dette skyldes blant annet større fortykning av fosforet i slammet fra Skådevika med høyere kalkdoser og med utfelt magnesiumhydroksid ved sjøvanntilsetning. Utelatelse av jern som hjelpekoagulant ved Skådevika reduserte molforholdet Al+Fe/P fra 1,7 til 1,0 for slammet som ble brukt i pottforsøket, mens for slammet til feltforsøket ble molforholdet redusert fra 2,4 til 1,4. Ved Bokerøya var doseringen av jernklorid høyere enn ved Skådevika og dermed fikk dette slammet et høyere jerninnhold og et høyere molforhold Al+Fe/P. Det var 3,3 og 2,2 for henholdsvis pottforsøket og feltforsøket.

### Pottforsøk

Skådevika m/Fe ga en total tørrstoffavling på nivå med mineralfosfor, mens Skådevika u/Fe og Bokerøya ga signifikant lavere avling enn ved samme mengde fosfor tilført som mineralfosfor (Figur 1). Fosforopptaket i plantene ga større forskjeller mellom de ulike gjødseltypene enn tørrstoffavlingen, fordi fosforkonsentrasjonen i graset påvirkes av fosfortilgangen og kan øke uten at avlingen øker (Figur 1 og 2). Fosforopptaket i graset ved 1. høsting var signifikant høyest for Kontroll 6 P, mens ved 2. og 3. høsting var det Skådevika m/Fe som ga høyest fosforopptak. I sum for alle høstingene var fosforopptaket fra Skådevika m/Fe og Kontroll 6 P på samme nivå. Skådevika u/Fe ga et overaskende resultat med signifikant lavere fosforopptak enn for Skådevika m/Fe, men ga likevel betydelig høyere fosforopptak enn Bokerøya.

Slammet fra Bokerøya ga en fosforeffekt tilsvarende det som tidligere er funnet for Al/Fe-felt slam som er etterbehandlet med kalk (Øgaard, 2013, Øgaard & Brod, 2016). Dette er bedre enn fosforeffekten som er funnet for Al/Fe-felt slam uten kalkbehandling (Øgaard 2013, Øgaard & Brod 2016). Jerninnholdet i slammet fra Bokerøya var ganske høyt på grunn av høy jerdosering, og molforholdet Al+Fe /P på 3,3 var på nivå med det en kan finne i Al/Fe-felte slamtyper (Øgaard 2013, Øgaard & Brod 2016).

Skådevika m/Fe hadde Al+Fe /P-molforhold på 1,7, mens for slammet uten jerntilførsel var forholdet 1,0. Den høye fosfortilgjengeligheten for Skådevika m/Fe tyder på at en moderat jerntilsetning gir liten eller ingen negativ effekt på tilgjengeligheten av fosforet. Det var bare i plantenes etableringsfase at vi fant et lavere fosforopptak enn fra mineralfosfor. Dette er i tråd med en finsk undersøkelse hvor det ble konkludert med at fosfor i slam med Fe/P-molforhold på 1,6 var mer tilgjengelig enn fosfor i mineralgjødsel (Kahiluoto m.fl. 2015).

Siden plantetilgjengeligheten av fosforet var mye bedre for Skådevika m/Fe enn for Skådevika u/Fe, må det ha vært også andre faktorer enn jerninnholdet som påvirket fosfortilgjengeligheten. Hvilke andre faktorer dette er har vi ikke klart å finne et sikkert svar på i det eksisterende datamaterialet. En mulig forklaring kunne være ulik pH, siden jordas pH påvirker tilgjengeligheten av fosforet. Skådevika u/Fe hadde høy pH (>11) på analysetidspunktet, antagelig fordi slammet var ferskt og pH ikke hadde rukket å gå ned igjen ved reaksjon mellom lesket kalk og CO<sub>2</sub> fra lufta. Jordanalysene etter 1. høsting viste imidlertid lavere pH (pH 6,9) i pottene med dette slammet enn i pottene med Skådevika m/Fe (pH 7,7). Disse verdiene ga grunn til å mistenke forbyting av prøver i forsøket, men dette ble utelukket ved en kontrollkjøring av forsøket. Tilgjengelighet av jernbundet fosfor øker med økende pH, mens tilgjengeligheten av kalsiumbundet fosfor avtar med økende pH. Optimal pH i jorda med tanke på fosfortilgjengelighet er rundt pH 6,5. Jordas pH kan derfor ikke gi forklaring på de uventede resultatene for de to slamtypene fra Skådevika. Avløpsslam er et komplekst materiale, og det er derfor ikke alltid mulig å stadfeste hvilke faktorer som har påvirket tilgjengeligheten av fosforet.

### Feltforsøk

Det var ingen effekt på avling av tilførsel av slam eller mineralfosfor. Fosforet som allerede var i jorda var tilstrekkelig for plantene.

Tabell 4. Gjennomsnittlig fosforopptak i kornet og gjenværende gjødselstoffor (Rest-P = tilført P minus P i avling) i jorda for hver av forsøksbehandlingene.

Forsøksledd	2015		2016	
	P-opptak kg/dekar	Rest-P kg/dekar	P-opptak kg/dekar	Rest-P kg/dekar
Bokerøya	1,3	13,4	2,0	11,4
Skådevika u/Fe	1,3	4,0	1,9	2,1
Skådevika m/Fe	1,3	4,1	1,8	2,3
NPK	1,2	0,1	1,9	-0,5
NK	1,2	-1,2	1,8	-3,0
NK + kalk	1,2	-1,2	1,9	-3,1

Tabell 5. Gjennomsnittlig P-AL og pH i jordprøver tatt ut om våren før gjødsling og slamspredning og om høsten etter høsting av feltet.

	P-AL (mg/100 g)			pH		
	Vår 2015	Høst 2015	Høst 2016	Vår 2015	Høst 2015	Høst 2016
Bokerøya	7,4	11,8	9,0	6,1	6,3	6,3
Skådevika u/Fe	7,2	9,2	7,5	6,1	6,7	6,7
Skådevika m/Fe	7,3	8,6	7,3	6,1	6,4	6,5
NPK	8,0	8,4	8,2	6,1	6,2	6,1
NK	7,5	8,0	5,9	6,1	6,1	6,1
NK + kalk	7,5	7,5	7,0	6,1	6,3	6,6

### Endring i jordas fosforinnhold

Etter to vekstsesonger var det fortsatt restfosfor i jorda etter slamtilførsel (Tabell 4). Tilførte fosformengder er vist i Tabell 3. For Skådevika-slam vil det meste av fosforet være brukt opp i løpet av tre vekstsesonger, mens for Bokerøya-slam vil det ta flere år uten fosfortilførsel før avlingene har fjernet en fosformengde tilsvarende tilført fosfor.

Jordanalysene viste at en del av overskuddsfosforet etter tilførsel av kalkfelt slam kunne gjenspeiles i en økning av jordas innhold av tilgjengelig fosfor, målt som P-AL (Tabell 5). Økningen i P-AL var størst for Bokerøya hvor det også ble tilført mest fosfor. Andelen av tilført fosfor som kunne gjenfinnes som P-AL første høst etter slamtilførselen var imidlertid størst for Skådevika. For Bokerøya ble denne andelen beregnet til 35 %, mens tilsvarende tall for Skå-

devika u/Fe var 44 % og for Skådevika m/Fe 40 %. Disse tallene viser en sammenheng med slammets jerninnhold. Desto høyere jerninnhold, desto lavere var andelen fosfor som ble gjenfunnet som P-AL. I andre år etter slamtilførselen gikk P-AL-verdiene ned (Tabell 5). Jorda med slam fra Bokerøya hadde fortsatt en noe høyere P-AL-verdi sammenlignet med startverdien, men nå kunne bare 14 % av gjenværende fosfor måles som økning i P-AL, fordi fosforet bindes sterkere i jord over tid.

Disse resultatene kan sammenlignes med tidligere norske feltresultater for andre slamtyper som ble tilført i samme mengde (1 tonn TS per dekar). Her ga ukalket Fe- eller Al/Fe-felt slam ikke tydelig endring i jordas P-AL-verdi, mens ved tilførsel av kalket Al/Fe-felt slam fra VEAS ble 38 % av tilført fosfor gjenfunnet som P-AL første høst etter slamtilførselen, og var

dermed på nivå med kalkfelt slam (Øgaard, upubliserte data).

Ved gjødslingsplanlegging brukes jordas P-AL-verdi til å bestemme mengden fosforgjødsel. Hvis slamtilførselen ikke øker jordas P-AL-verdi, vil derfor reduksjonen i tilført mineralfosfor bli liten i praksis, til tross for tilførsel av en stor fosformengde med slammet. God tilgjengelighet av fosforet i slammet er derfor en forutsetning for utnyttelse i planteproduksjonen. På den annen side, slamtilførsel må ikke føre til økte fosfortap fra jordbruksareal til vassdrag på grunn av tilførsel av en stor mengde lett tilgjengelig fosfor. Høy tilgjengelighet av fosforet i slammet krever større kontroll på fosformengdene som tilføres for å unngå negative miljøeffekter.

### Slammets kalkingseffekt

Slammet ga en raskere pH-effekt i jorda sammenlignet med kalksteinsmel ( $\text{CaCO}_3$ ) som ble tilført i forsøksbehandlingen NK + kalk (Tabell 5). I andre året etter slamtilførselen holdt pH seg på samme nivå som første høst etter tilførselen, mens for kalksteinsmel fortsatte pH-økningen det andre året. Dette kan forklares med lavere løselighet av kalksteinsmel sammenlignet med lesket kalk, som ble tilsatt avløpsvannet i forbindelse med kalkfelling.

### Konklusjon

Kalkfelling har potensial til å gi slam med høyere fosfortilgjengelighet enn Al/Fe-felt slam, og dermed en mer effektiv resirkulering av en begrenset ressurs. Dette forutsetter moderat bruk av jernsolt som hjelpekoagulant.

### Takk

Takk til Norsk Landbruksrådgiving Øst for praktisk gjennomføring av feltforsøket og til Rikard Pedersen, NIBIO for hjelp til gjennomføring av potteforsøket.

### Referanser

Alvarenga, E., Øgaard, A.F. & Vråle, L. 2017. Effect of anaerobic digestion and liming on plant availability of phosphorus in iron- and aluminium-precipitated sewage sludge from primary wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, 75(7): 1743-1752. DOI: 10.2166/wst.2017.056

Dahl, O.S. 2013. Effekter av avvannet rejeaktvann og sjøvannstilsetning på rensegrader ved renseanlegg i Kristiansand. Mastergradsoppgave ved Institutt for matematiske realfag og teknologi, Universitetet for Miljø og Biovitenskap. 81 s.

Egnér, H., Riehm, H. & Domingo, W.R. 1960. Untersuchung über die chemische Boden-Analyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Boden. *Kungliga Lantbrukshögskolans Annaler* 26, 199-215.

Hanserud, O.S., Brod, E., Øgaard, A.F., Müller, D.B. & Brattebø, H. 2015. A multi-regional soil phosphorus balance for exploring secondary fertilizer potentials – the case of Norway. *Nutr. Cycl. Agroecosys*, Open Access, doi: [10.1007/s10705-015-9721-6](https://doi.org/10.1007/s10705-015-9721-6).

Kahiluoto, H., Kuisma, M., Ketoja, E., Salo, T. & Heikkinen, J. 2015. Phosphorus in manure and sewage sludge more recyclable than in soluble inorganic fertiliser. *Environmental Science and Technology* 49: 2115-2122.

Krogstad, T., Sogn, T., Sæbø, A. & Asdal, Å. 2004. Resirkulering av fosfor i slam. *Grønn kunnskap* 8 (7), 41 s.

Vråle, L. 1978. Chemical precipitation of wastewater with lime and seawater. *Progress in Water Technology*. 10(5/6): 645-656.

Øgaard, A.F. 2017. Tilgjengelig fosfor i kalkfelt avløps-slam. NIBIO Rapport 3(116). 27 s.

Øgaard, A.F. 2013. Plantetilgjengelig fosfor i avløps-slam – Testing av analysemetodikk for tilgjengelig fosfor. *Bioforsk RAPPORT* 8(34). 23s.

Øgaard, A.F., & Brod, E. 2016. Efficient phosphorus cycling in food production: Predicting phosphorus fertilization effects of sludge from chemical wastewater treatment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(24): 4821-4829. DOI: 10.1021/acs.jafc.5b05974