



NIBIO

NORSK INSTITUTT FOR
BIOØKONOMI

Fosforeffekt av organisk avfall

Revidert utgave

NIBIO RAPPORT | VOL. 7 | NR. 30 | 2021



Eva Brod og Anne Falk Øgaard
Divisjon for miljø- og naturressurser

TITTEL/TITLE

Fosforeffekt av organisk avfall

FORFATTER(E)/AUTHOR(S)

Eva Brod og Anne Falk Øgaard

DATO/DATE:	RAPPORT NR./ REPORT NO.:	TILGJENGELIGHET/AVAILABILITY:	PROSJEKTNR./PROJECT NO.:	SAKSNR./ARCHIVE NO.:
19.03.2021	7/30/2021	Åpen	10569.202	17/03011
ISBN:	ISSN:		ANTALL SIDER/ NO. OF PAGES:	ANTALL VEDLEGG/ NO. OF APPENDICES:
978-82-17-02778-2	2464-1162		59	

OPPDRAKSGIVER/EMPLOYER:

NFR (prosjekt nr. 194051)

NFR (prosjekt nr. 268338)

KONTAKTPERSON/CONTACT PERSON:

Bjørn Langerud (kontaktperson SIS/NIBIO)

Daniel B. Müller (prosjektleder Mind-P/NTNU)

STIKKORD/KEYWORDS:

Fosfor, organisk avfall, resirkulering,
husdyrgjødsel, fiskeslam, biokull, struvittPhosphorus, organic waste, recycling, manure,
fish sludge, biochar, struvite

FAGOMRÅDE/FIELD OF WORK:

Gjødsling

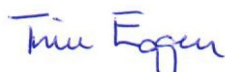
Nutrient application

SAMMENDRAG/SUMMARY:

Fosforkvaliteten i 15 organiske gjødselprodukter ble undersøkt med hjelp av kjemiske analysemetoder, og i potte- og feltforsøk. Husdyrgjødsel viste bedre fosforeffekt enn fiskeslam og biokull. Struvitt viste også god effekt sammenlignet med mineralfosfor. Fosfor i de organiske produktene forelå hovedsakelig som ulike kalsiumfosfater, og det var godt samsvar mellom fosforkvaliteten og opptak i planter. Andelen bikarbonat (NaHCO_3)-løselig fosfor i organiske gjødselprodukter kan brukes som indikator på fosforkvaliteten (lav, medium, høy) men kan ikke brukes for nøyaktig predikering.

The P quality in 15 organic fertilizer products was analysed by chemical analysis and by growth experiments. Manure showed better P effects than fish sludge and biochar. Struvite also showed good effects compared with mineral fertilizer. Phosphorus in the organic products was mainly present as calcium phosphates of various solubility, and there was good agreement between the P quality and plant offtake. The fraction of bicarbonate (NaHCO_3)-soluble P in organic fertilizer products can be used as indicator for P quality but fails to precisely predict P fertilization effects.

GODKJENT /APPROVED



TRINE EGGEN

PROSJEKTLEDER /PROJECT LEADER



ANNE FALK ØGAARD



NIBIO

NORSK INSTITUTT FOR
BIOØKONOMI

Forord

Både matproduksjon og -forbruk gir store mengder organiske avfallsressurser som inneholder verdifulle plantenæringsstoffer, inkludert fosfor. I NIBIO's strategiske instituttsatsing Kretsløp SIS jobber vi med å øke kunnskapen om hvordan disse organiske avfallsressursene kan utnyttes bedre ved å bruke dem som gjødsel. I prosjektet Mind-P, finansiert av Norges forskningsråd, undersøker vi muligheter for å bedre utnyttelsen av fosfor i husdyrgjødsel og fiskeslam. Denne rapporten viser resultater fra arbeidet vårt på fosforeffekten av organisk avfall innenfor begge prosjekter.

Prosjektet Kretsløp SIS («Bærekraftig resirkulering av organiske avfallsressurser i fremtidens bioøkonomi», 2017-2021) produserer kunnskap i fire arbeidspakker:

- Arbeidspakke 1: Bærekraftig oppkonsentrering/separering av næringsstoffer
- Arbeidspakke 2: Bruk av organiske avfallsressurser som gjødsel
- Arbeidspakke 3: Mikroplast og andre uønskede elementer
- Arbeidspakke 4: Samfunnsøkonomiske hindringer og beslutningsstøtte

Denne rapporten gir en oppdatering på våre forskningsaktiviteter om fosforeffekten av organisk avfall innenfor arbeidspakke 2. Kretsløp SIS er finansiert gjennom midler som har blitt tildelt NIBIO fra Landbruks- og Matdepartementet.

For å lese mer om Kretsløp SIS, se www.nibio.no/kretsløp-sis.

Mind-P prosjektet («Nutrients in a Circular Bioeconomy: Barriers and Opportunities for Mineral Phosphorus Independence in Norway») produserer kunnskap i tre arbeidspakker:

- Arbeidspakke 2: Fosforbalanse for Norge
- Arbeidspakke 3: Hindringer og muligheter for fosforresirkulering i Norge
- Arbeidspakke 4: Scenarier for fosforresirkulering og veikart for bedre utnyttelse

Undersøkelsene som presenteres her inngår i arbeidspakke 3.1 («Secondary Resourceses for Agriculture Use»). Mind-P er et samarbeid mellom NTNU, NIBIO, DTU (Danmarks Tekniske Universitet) og en referansegruppe med representanter fra offentlig forvaltning, industri og interesseorganisasjoner. Prosjektet er finansiert av BIONÆR programmet til Norges forskningsråd.

For å lese mer om Mind-P prosjektet, se www.mindp.indecol.no.

Ås, 19.03.21

Eva Brod

Innhold

1	Innledning.....	6
2	Material og metode.....	7
2.1	Organiske gjødselprodukter	7
2.2	Karakterisering av fosforkvaliteten i gjødselproduktene	10
2.2.1	Uorganisk og organisk fosfor.....	10
2.2.2	Fraksjonering av fosforforbindelser	10
2.2.3	Fosforekstraksjoner.....	10
2.3	Veksthusforsøk	11
2.3.1	Førsteårseffekt	11
2.3.2	Ettervirkningseffekt.....	13
2.3.3	Databehandling veksthusforsøk.....	14
2.4	Feltforsøk.....	15
2.4.1	2-årig feltforsøk på Øsaker (2018-2019)	15
2.4.2	1-årig feltforsøk på Sparbu (2018)	18
2.5	Statistisk databehandling	19
2.6	Metaanalyse: Sammenheng mellom fosforeffekt og bikarbonatløselig fosfor	19
2.6.1	Organiske gjødselprodukter og andelen bikarbonatløselig fosfor	20
2.6.2	Relativ fosforeffekt (MFE)	20
3	Resultater	23
3.1	Kjemisk karakterisering av gjødselproduktene.....	23
3.2	Klassifisering av produktene etter Gjødselvereforskrift	26
3.3	Karakterisering av fosfor i gjødselproduktene	27
3.3.1	Uorganisk og organisk fosfor.....	27
3.3.2	Fraksjonering av fosforforbindelser	28
3.3.3	Fosforekstraksjoner.....	31
3.4	Plantetilgjengelighet av fosfor i veksthusforsøket	32
3.5	Plantetilgjengelighet av fosfor i feltforsøkene	38
3.5.1	2-årig feltforsøk på Øsaker (2018-2019)	38
3.5.2	1-årig feltforsøk på Sparbu (2018)	42
3.6	Estimering av fosforeffekten til gjødselproduktene	44
3.7	Metaanalyse: Sammenheng mellom bikarbonatløselig fosfor og fosforeffekt	48
4	Diskusjon.....	49
4.1	Organiske gjødselprodukter og fosforkvalitet	49
4.1.1	Produkter basert på husdyrgjødsel	49
4.1.2	Produkter basert på fiskeslam	49
4.1.3	Biokull.....	50
4.1.4	Struvitt.....	50
4.2	Estimering av fosforeffekten til nye produkter	51
4.3	Tungmetallkonsentrasjon og Gjødselvereforskrift	53
4.3.1	Produkter basert på fiskeslam	53
4.3.2	Biokull.....	53

4.4 Veien til fullverdige gjødselprodukter	54
5 Konklusjoner	55
Litteraturreferanse	56

1 Innledning

Selv om matproduksjon og -forbruk gir store mengder organiske avfallsressurser som potensielt kan gjenvinnes som gjødsel, tilføres næringsstoffer i matproduksjonen i dag hovedsakelig i form av mineralgjødsel. Det ble tilført cirka 107.000 tonn mineralnitrogen og 8900 tonn mineralfosfor til norsk jordbruk i 2019. Fosfor er av spesiell betydning, fordi fosfatstein som brukes til produksjon av mineralgjødsel er en begrenset ressurs. I tillegg til kvantiteten av fosfatstein er også kvaliteten en bekymring. Flere kilder er forurenset med både kadmium og radioaktive stoffer. Resirkulering av fosfor er derfor spesielt viktig for å opprettholde matproduksjonen i framtiden.

Den totale mengden fosfor i organiske avfallsressurser i Norge utgjør cirka 28.000 tonn per år, mer enn nok til å dekke det totale fosforbehovet i jordbruket (Hamilton et al. 2017). Av dette utgjør husdyrgjødsel cirka 11.000 tonn fosfor, fiskeslam cirka 9000 tonn (hvorav det meste tapes til havet fra fiskemerder), matavfall cirka 2600 tonn og avløpslam cirka 1900 tonn.

Effektiv resirkulering av fosfor i organiske ressurser møter imidlertid en rekke utfordringer. En av disse er den store geografiske avstanden mellom områdene der fosfor akkumuleres, og jordbruksareal med behov for fosfortilførsel utenfra. Mens Norges kornproduksjon hovedsakelig foregår på Østlandet, foregår det mest husdyrproduksjon på Vestlandet, Trøndelag og i Nord-Norge. Fosfor hopper seg opp i husdyrområdene på grunn av fosfor i fôrimport fra kornområdene og utlandet. Vannmiljøet i noen husdyrområder er negativt påvirket av fosforoverskuddet, fordi fosfor kan renne av fra jordbruksarealene og bidra til algevekst i vassdragene. Fiskeslam samles opp i akkurat de områdene som allerede har et overskudd av husdyrgjødsel og fosfor. Den forventede nye Gjødselvereforskriften vil antageligvis sette sterkere begrensninger for fosforgjødsling. Det betyr at ressurseffektiv utnyttelse av fosfor i organiske avfallsressurser vil kreve transport. Det høye vanninnholdet i mange organiske avfallsressurser gjør imidlertid transporten kostbar og lite bærekraftig, med mindre avfallsressurser som husdyrgjødsel og fiskeslam blir avvannet. Mekanisk separering, filtrering og termisk behandling er eksempler på lavteknologiske behandlingsprosesser som kan redusere vanninnholdet i organiske avfallsressurser og dermed tilrettelegge for transport.

En annen utfordring er at gjødslingseffekten til organiske avfallsressurser ofte er ukjent. For å realisere resirkulering i praksis, trenger vi enkle analysemetoder som kan beskrive kvaliteten i nye gjødselprodukter, og som kan erstatte tidskrevende og kostbare vekstforsøk. Dagens Gjødselvereforskrift pålegger ekstraksjon av fosfor med ammoniumlaktat (P-AL) for å vurdere fosforkvaliteten i resirkuleringsgjødsel, men våre tidligere forsøk tydet på at det ikke er noen god sammenheng mellom fosforeffekter og P-AL-fraksjonen i organiske avfallsressurser (Brod et al. 2015b; Øgaard og Brod 2016).

Formålet med forsøkene som vi har gjennomført i prosjektene Kretsløp SIS og Mind-P og som vi viser her, var:

- å kartlegge fosforkvaliteten i ulike organiske avfallsressurser med vekt på husdyrgjødsel og fiskeslam som har gjennomgått ulike avvanningsbehandlinger, og
- å finne enkle kjemiske analysemetoder som kan brukes til å beskrive fosforgjødslingseffekten til organiske gjødselprodukter.

2 Material og metode

2.1 Organiske gjødselprodukter

Vi har gjennomført forsøk med 15 ulike organiske gjødselprodukter. Utvalget har vekt på produkter basert på husdyrgjødsel og fiskeslam som har gjennomgått ulike avvanningsbehandlinger:

- 5 produkter av mekanisk separert storfe- eller svinegjødsel; derav 3 produkter med opprinnelse i Nederland hvor det er vanligere å separere og flytte på avvannet husdyrgjødsel enn i Norge
- 1 kompostert hestegjødsel
- 1 flytende biorest basert på husdyrgjødsel og matavfall
- 5 fiskeslamprodukter
- 2 biokullprodukter basert på svinegjødsel eller fiskeslam
- 1 struvitt, et mineralisk fosforprodukt ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

Tabell 1 beskriver gjødselproduktene som er tatt med i forsøk og deres opprinnelse.

Tabell 1. Beskrivelse av de organiske gjødselproduktene

Nr.	Gjødselprodukt	Beskrivelse
1	Storfegj., separert trinn 1	Fast fraksjon etter mekanisk separering av bløtgjødsel med skruepresse. For mer informasjon se trinn 2 under.
2	Storfegj., separert trinn 2	Granuler produsert fra våt fraksjon etter separeringstrinn 1 som ble viderebehandlet med anaerob nedbryting (utråtning) i en biogassreaktor, nitrifisering og filtrering før lufttørrking. Prosessen er utviklet av og prøvene tatt hos Knut Vasdal, Skien.
3	Storfegj., utråtnet og separert	Produktet kommer fra en melkegård i Nederland. Bløtgjødselen ble utråtnet i et biogassanlegg på gården, før bioresten ble separert med skruepresse (1000 μm sil). Det er den faste fraksjonen som ble brukt i forsøk.
4	Grisegj., separert	Produktet er basert på grisegjødsel fra 55 gårder i regionen Achterhoek, Nederland. Gjødselen ble avvannet med skruepresse (500 μm sil), og den faste fraksjonen ble brukt i forsøk.
5	Grisegj., utråtnet og separert	Produktet er produsert i regionen Achterhoek, Nederland. Grisegjødselen ble samutråtnet med storfegjødsel, myse og annet avfall fra matvare- og fôrindustrien i et biogassanlegg. Bioresten ble avvannet med en dekantercentrifuge, og den faste fraksjonen ble brukt i forsøk.
6	Hestegj., kompostert	Kompostert hestegjødsel med flis.
7	Biorest, matavfall/husdyrgj.	Produktet kommer fra GREVE Biogass, et interkommunalt biogassanlegg ved Tønsberg som produserer biogass på en blanding av storfe- og svinegjødsel (ca. 25 % på tørrstoffbasis) og matavfall fra husholdninger, storkjøkken og næringsmiddelindustri (ca. 75% på tørrstoffbasis).

8	Fiskeslam, kompostert og tørket	Produktet er basert på avvannet fiskeslam fra fire ferskvannsbaserte settefiskanlegg med resirkulering av vannet (RAS) (Mowi, Lerøy midt og SalMar). Fiskeslammet ble blandet med kvernet rivningstrevirke og kompostert i trommel. Komposteringstiden var ca. 14 dager, temperaturen under komposteringen varierte mellom 45-65 °C. En del av treflisene ble frasiktet, før produktet ble brukt i forsøk. Teknologien er utviklet av Global Green Energy AS (GGE).
9	Fiskeslam 1, tørket	Fra ferskvannsbasert gjennomstrømningsanlegg til Flatanger Settefisk. Vannet ble renset med trommelfilter før gravimetrisk sedimentering, flokkulering og polymertilsetting. Fiskeslammet er avvannet med skruepresse før tørking med beltetørke (ca. 50 °C). Teknologien er utviklet av Sterner Aquatek AS.
10	Fiskeslam 2, tørket	Fra settefiskanlegg (RAS) til Mowi Steinsvik. Vannet ble renset med trommelfilter. Polymer er tilsatt før videre avvanning med båndfilter og sentrifuge. Fiskeslammet er tørket ved 70 °C i > 2 timer. Teknologien er utviklet av Scanship.
11	Fiskeslam 3, tørket	Fra settefiskanlegg til Sævareid Fiskeanlegg (både gjennomstrømning og RAS). Vannet fra gjennomstrømningsanlegg er renset med trommelfilter før avvanning med båndfilter sammen med RAS spylevannet. Fiskeslammet er tørket med friksjonstørke ved ca. 100 °C. Tørketeknologien er utviklet av Bioretur.
12	Fiskeslam, filtrert	Fra settefiskanlegget (RAS) til Lerøy Midt, Belsvik. Polymer ble tilsatt før filtrering med beltefilter.
13	Grisegj., biokull	Den faste fraksjonen av nederlandsk grisekjøtsel ble tørket før pyrolyse ved 650-750 °C i 10-20 minutter (Gollenbeek et al. 2018). Produktet blir markedsført under navnet Ecochar av Mavitec, Nederland.
14	Fiskeslam, biokull	Fra gjennomstrømningsanlegg Nordlaks Smolt, Innhavet. Vannet er renset med trommelfilter før videre avvanning med båndfilter med vakuumsug. Fiskeslammet ble så damptørket ved 170 °C og pyrolysert ved 600-650 °C med en oppholdstid rundt 20-30 minutter. Behandlingsteknologien er utviklet av AquaGreen.
15	Struvitt	Produsert fra kommunalt avløpsvann ved HIAS IKS på Hamar: Etter biologisk fosforrensing gjennom Hias-prosessen [®] , ble fosfor utvunnet som struvitt (NH ₄ MgPO ₄ ·6H ₂ O) både fra rejekevannet fra slambehandlingen og fra bioresten etter råtnetanken.

Alle produktene ble sendt til Eurofins Agro Testing for en grunnkarakterisering av den kjemiske sammensetningen. Tørrstoff i produktene ble bestemt ved tørking på 105 °C. Totalnitrogen (N) ble bestemt ved modifisert Kjeldahl metode (EN 13654-1 2001), og ammonium (NH₄-N) etter ekstraksjon i destillert vann eller direkte i det flytende produktet. Fosfor og alle andre næringsstoffer og tungmetaller ble målt på ICP-MS etter opplutning i konge vann (HNO₃ + HCl). Fosforkonsentrasjonen ble dessuten målt spektrofotometrisk etter forbrenning og opplutning i svovelsyre (H₂SO₄) (nærmere beskrivelse av metoden i kapittel 2.2.1). Dessuten ble fosforkonsentrasjonen i et utvalg av prøvene analysert ved jord- og vannkemilaboratoriet til MINA/NMBU på ICP-OES etter opplutning i konsentrert salpetersyre (HNO₃) i ultraklav, eller HNO₃ + HF i ultraklav. pH ble målt i deionisert vann (prøve:væske forhold 1:10) ved konduktometri. Karbon (C)- innholdet ble beregnet ut fra glødetap etter gløding ved 550 °C.

Bilde 1 viser 14 av de 15 produktene som ble brukt i forsøk.



Bilde 1. Organiske gjødselprodukter som ble brukt i forsøk. Biorest, matavfall/husdyrgj. (produkt 7) mangler.

2.2 Karakterisering av fosforkvaliteten i gjødselproduktene

2.2.1 Uorganisk og organisk fosfor

Andelen organisk og uorganisk fosfor i produktene ble analysert på jord- og vannkjemilaboratoriet til MINA/NMBU ved metoden til Møberg og Petersen (1982). For å bestemme konsentrasjonen av totalfosfor, ble tørkete (55 °C) og malte prøver brent ved 550 °C før oppløsning i 6 M H₂SO₄. For å bestemme konsentrasjonen av uorganisk fosfor, ble et parallelt sett med prøver oppløst i 6 M H₂SO₄ uten forutgående forbrenning. Fosfat i begge ekstraktene ble målt spektrofotometrisk ved molybdatblått-metoden til Murphy og Riley (1962). Organisk fosfor ble deretter beregnet som differansen mellom totalfosfor og uorganisk fosfor.

2.2.2 Fraksjonering av fosforforbindelser

En sekvensiell fraksjonering av fosfor i alle de organiske gjødselproduktene ble utført ved jord- og vannkjemilaboratoriet til MINA/NMBU, basert på en modifikasjon (Sharpley og Moyer 2000) av originalmetoden utviklet av Hedley et al. (1982) for jord. Vi brukte en forenklet versjon av metoden til Sharpley og Moyer (2000). Formålet med denne analysen er at man stegvis ekstraherer uorganiske og organiske fosforfraksjoner av ulik løselighet. En slik fraksjonering har tidligere vist seg å være verdifull for å vurdere det organiske produktets kvalitet som fosforgjødsel (Brød et al. 2015a; Øgaard og Brød 2016; Alvarenga et al. 2017).

Fraksjoneringen er definert til å gi følgende fosforfraksjoner:

- Løst bundet uorganisk og organisk fosfor ekstrahert med H₂O,
- lett plantetilgjengelig uorganisk fosfor og organisk fosfor ekstrahert med 0,5 M NaHCO₃,
- uorganisk fosfor bundet til jern- og aluminium(hydr)oksider eller i jern- og aluminiumfosfater, og organisk fosfor ekstrahert med 0,1 M NaOH,
- stabile kalsiumfosfater og organisk fosfor ekstrahert med 1 M HCl,
- relativt uløselig fosfor etter oppløsning av restprøven.

Fraksjoneringen ble gjennomført med duplikater. Prøvene ble tørket ved 55 °C og malt, før 1 g prøve ble ekstrahert i 200 mL deionisert vann i 1 time, før ekstraksjoner i 200 mL av først 0,5 M NaHCO₃, deretter 0,1 M NaOH og til slutt 1 M HCl i 16 timer for hver ekstraksjon. Etter hver ekstraksjon ble prøvene sentrifugert ved 1160 relativ sentrifugalkraft i 20 minutter før dekantering og tilsetning av ny ekstraksjonsvæske. Ortho-fosfat i ekstraktene ble analysert spektrofotometrisk ved molybdenblått-metoden etter Murphy og Riley (1962). Konsentrasjonen av totalfosfor i ekstraktene ble analysert på ICP-OES. Organisk fosfor i ekstraktene ble beregnet som differanse mellom totalfosfor og ortho-fosfat. På grunn av usikkerheten knyttet til denne metoden for å bestemme organisk fosfor, ble organisk fosfor i noen tilfeller beregnet til å være <0. I disse tilfellene ble organisk fosfor i fraksjonen antatt å være lik null. Restfosfor i prøvene etter de fire ekstraksjonene ble bestemt på ICP-OES etter oppløsning i konsentrert HNO₃ i ultraklav. Gjenvinningsgraden av fosfor ble beregnet som forholdet mellom summen av ekstrahert fosfor i alle fraksjonene og totalfosfor bestemt på ICP-MS etter oppløsning av hele prøven i kongevann (Eurofins). For å kartlegge hvor mye prøvemateriale som ble tapt eller løst opp i løpet av fraksjoneringen, ble prøven tørket ved 105 °C og veid etter det siste ekstraksjonssteget (1 M HCl).

2.2.3 Fosforekstraksjoner

De organiske gjødselproduktene ble analysert med fire forskjellige ekstraksjonsmetoder som opprinnelig ble utviklet for å estimere plantetilgjengelig fosfor enten i jord eller i mineralgjødsel.

Vannløselig-løselig (H₂O-løselig) og bikarbonat-løselig (NaHCO₃-løselig) fosfor ble valgt som aktuelle metoder for å beskrive fosforkvaliteten i de organiske gjødselproduktene basert på tidligere resultater presentert i Brod et al. (2015b) og Christiansen et al. (2020). Ammoniumsitratt-løselig (NH₄-sitratt-løselig) fosfor ble valgt basert på resultater presentert i Brod et al. (2015b) som tydet på at metoden kan være aktuell til å beskrive ettervirkningseffekten til organiske gjødselprodukter. AL-løselig fosfor (P-AL) er ekstraksjonsmetoden som dagens Gjødselvareforskrift pålegger for å vurdere fosforkvaliteten i organiske gjødselprodukter.

Ekstraksjonene ble gjennomført som beskrevet i standard protokoll (Tabell 2). I tillegg ble tre av metodene (H₂O-løselig P, P-AL og NaHCO₃-løselig P) gjennomført med et større væske:gjødsel forhold under ekstraksjonen enn standard. Gjødselproduktene er mer fosforrike enn jord, og det kan derfor være fornuftig å bruke en større væskemengde når gjødselprodukter skal analyseres. På den måten får en ekstrahert mer av fosforet i produktet.

Ekstraksjonene ble gjennomført med duplikater. Gjødselproduktene var tørket ved 55 °C og malt før ekstraksjon. Ekstraktene ble analysert spektrofotometrisk for ortho-fosfat ved molybdenblått-metoden etter Murphy og Riley (1962).

Tabell 2. Oversikt over ekstraksjonsmetodene som ble brukt for å beskrive fosforkvaliteten i de organiske gjødselproduktene

Metode	Beskrivelse	Tid (timer)	Forhold (ml/g)	Referanse
H ₂ O-løselig P	Ekstraksjon i deionisert vann	1	20:1 100:1	-
P-AL	0,1 M ammoniumlaktat og 0,4 M eddiksyre justert til pH 3,75	1,5	20:1 100:1	Egnér et al. (1960)
NaHCO ₃ -løselig P	Ekstraksjon med 0,5 M NaHCO ₃ justert til pH 8,5. Aktivt kull ble tilført hver prøve før ekstraksjon for å redusere bakgrunnsfarge i ekstraktet.	0,5	20:1 200:1	Olsen et al. (1954)
NH ₄ -sitrattløselig P	Ekstraksjon ved 65 °C med ammoniumsitratt justert til pH 7	1	100:1	European Union (2003), metode 3.1.4

2.3 Veksthusforsøk

2.3.1 Førsteårseffekt

På høsten 2018 gjennomførte vi et pottforsøk, for å klarlegge plantetilgjengeligheten av fosfor i de organiske gjødselproduktene.

Vi brukte 3 L pottes, og hadde tre pottes (gjentak) av hver gjødselbehandling (15 gjødseltyper og tre kontrollbehandlinger) og to jordtyper (Tabell 3). Jordtypene var et næringsfattig vekstmedium (Elverumsand med 20 vol % torvinnblanding, 3 kg sand og 0,3 kg torv/potte) og leirjord fra Øsaker (3 kg jord/potte). Sand/torv blandingen ble kalket med 0,67 g CaCO₃ per L for å oppnå cirka pH 6. Sand/torv blandingen ble valgt basert på resultater fra tidligere forsøk med det samme vekstmediet der planter viste respons på fosforgjødsling. Leirjorda ble valgt for å inkludere en naturlig dyrkingsjord i forsøket, og på grunn av jordas lave innhold av lett tilgjengelig fosfor (P-AL) som tilsier behov for fosforgjødsling. Leirjorda ble hentet på det samme areal hvor det 2-årige feltforsøket (2018-2019) var lokalisert (jf. kapittel 2.4.1.).

Tabell 3. Beskrivelse av de to jordtypene som ble brukt i potteforsøket.

Jordart	Kornfordeling ¹			Org. Materiale	pH	Total P	P-AL ²	CaCl ₂ -P ³	Vann-holdnings-kapasitet
	Sand %	Silt %	Leire %						
Sand/torv ⁴	97	2	1	0,3	-	219	30	0,47	238
Mellom-leire ⁵	-	-	-	2,6 ⁶	6,1	-	54	1,92	522

¹ Sand = 0,06–2 mm, silt = 0,002–0,06 mm, leire = < 0,002 mm

² AL = ekstraksjon med 0,1 M ammoniumlaktat og 0,4 M eddiksyre justert til pH 3,75 (Egnér et al. 1960)

³ CaCl₂ = ekstraksjon med 0,0025 M CaCl₂ i prøvevæske forhold 1:20 (vekt:volum)

⁴ jf. Øgaard og Brod (2016) der samme jord ble brukt

⁵ Basert på skjønnsmessig bestemmelse av jordart

⁶ Estimert basert på glødetap og leirinnhold etter Riley (1996)

Alle organiske gjødselprodukter ble blandet inn i hele jordvolumet, i en mengde som tilsvarer 3 kg P/daa (45 mg P/potte). Fosforeffekten til de organiske gjødselproduktene ble sammenlignet med ingen fosforgjødsling og med mineralfosfor. Mineralfosfor ble tilsatt som Ca(H₂PO₄)₂ tilsvarende 1,5 og 3 kg P/daa.

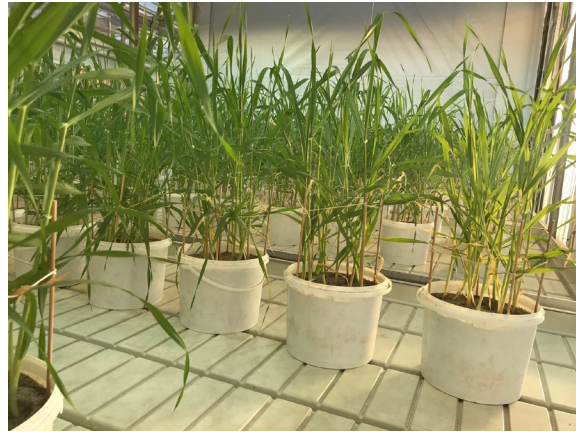
På grunn av en analysefeil ble Storfegj. separert trinn 1 (produkt 1), overdosert og tilført tilsvarende 5 kg P/daa (75 mg P/potte) istedenfor 3 kg P/daa (45 mg P/potte). I databehandlingen justerte vi for fosforkonsentrasjonen i produkt 1 basert på en antagelse om at fosforresponskurven for avlingen var linear, også utover gjødsling med 45 mg fosfor/potte.

Alle andre næringsstoffer enn fosfor ble gitt som næringsløsning for å sikre at det var kun fosfortilgangen som begrenset planteveksten: Nitrogen tilsvarende 21 kg N/daa som Ca(NO₃)₂, kalium tilsvarende 21 kg K/daa som K₂SO₄, magnesium tilsvarende 2,0 kg Mg/daa som MgSO₄, jern tilsvarende 3,6 mg Fe/L jord som FeSO₄, molybden tilsvarende 0,1 mg Mo/L jord som (NH₄)₆Mo₇O₂₄, mangan tilsvarende 2 mg Mn/L jord som MnSO₄, kobber tilsvarende 2,7 mg Co/L jord som CuSO₄, bor tilsvarende 0,1 mg B/L jord som Na₂B₄O₇ og sink tilsvarende 1,1 mg Zn/L jord som ZnSO₄. For produkter med betydelig innhold av NH₄-N, ble tilførselen av mineralnitrogen redusert tilsvarende forventet nitrogeneffekt av produktet, i.e. tilførsel av mineralnitrogen til pottene med biorest basert på matavfall/husdyrgjødsel (produkt 7) ble redusert fra 21 til 8 kg nitrogen/daa. Vi antok at mineralnitrogen i biorest hadde en virkningsgrad på 85 %, jf. gylle nedmoldet innen 3 timer (Gjødslingshåndbok 2020).

Vi sådde bygg (*Hordeum vulgare* var. Heder), 15 frø i hver potte som vi tynnet til 12 planter ved cirka 2-blad stadiet. Plantene ble vannet tre ganger i uken til 60 og seinere til 70 % av jordas vannholdende evne (vannkapasitet). Lyset var stilt inn til 16 timer dag og 8 timer natt, og temperaturen var satt til 18 °C på dagtid og 12 °C på natten.

Vi høstet hele planten cirka 2 cm over jorden når aksene begynte å bli synlig etter cirka 6 uker (cirka Zadoks 50). Plantene har gjort unna det meste av næringsopptaket når de kommer til dette vekststadiet. Plantematerialet ble tørket ved 60 °C og veid, deretter malt og analysert pottevis for konsentrasjon av nitrogen og fosfor. Nitrogenkonsentrasjonen ble analysert på C/N analysator, og fosforkonsentrasjonen på ICP-MS etter dekomponering med konsentrert salpetersyre i mikrobølgeovn.

Etter avslutning av det første veksthusforsøket, lagret vi pottene med sand/torv-blandingen ved 4 °C, til sammen 54 potter, til påfølgende høst.



Bilde 2. Potteforsøket cirka 1 uke etter såing (Foto: Anne Falk Øgaard, 8/11-2018) og cirka 5 uker etter såing (Foto: Kirsti Anker-Nilsen, 5/12-2018)

2.3.2 Ettervirkningseffekt

På høsten 2019 brukte vi disse 54 pottene med sand/torv-blandingen i et nytt veksthusforsøk for å klarlegge ettervirkningen av fosfor i de organiske gjødselproduktene sammenlignet med mineralfosfor.

Før oppstart av ettervirkningsforsøket tok vi pottevis jordprøver. Jordprøvene ble tørket ved 40 °C og siktet, og pH i jordprøvene ble målt i deionisert vann (prøve:væske forhold 1:2,5, volum:volum). For bestemmelse av P-AL ble prøvene ekstrahert i 1,5 timer i en blanding av 0,1 M ammoniumlaktat og 0,4 M eddiksyre justert til pH 3,75 (Egnér et al. 1960). P-AL i ekstraktet ble analysert på ICP-OES.

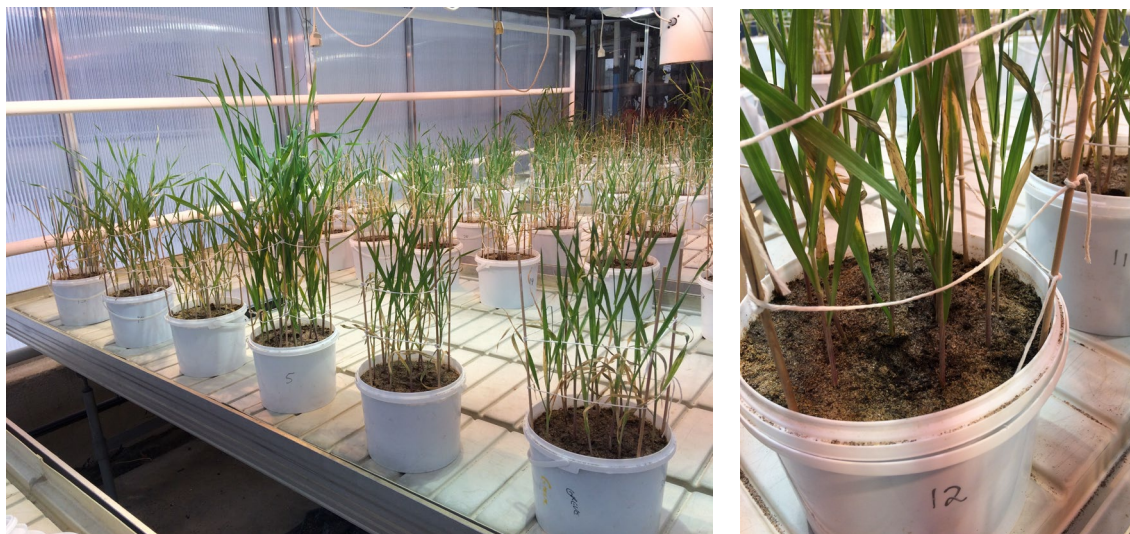
Før vi anla ettervirkningsforsøket, fjernet vi stubben fra alle pottene og delte opp røttene. Deretter ble alle næringsstoffene unntatt fosfor igjen gitt som næringsløsning, tilsvarende som i 2018. Dette sikret at det var kun fosfortilgangen som begrenset planteveksten. De organiske gjødselproduktene ble ikke tilført på nytt.

Ettervirkningseffekten til de organiske gjødselproduktene ble sammenlignet med kontrollbehandlinger som nå var som følgende:

- ettervirkning av fjorårets ledd uten fosforgjødsling (2018: 0 kg mineralfosfor/daa, 2019: 0 kg mineralfosfor/daa)
- ettervirkning av fjorårets høyeste mineralfosfor dose (2018: 3 kg mineralfosfor/daa; 2019: 0 kg mineralfosfor/daa)
- optimal fosforsyning i pottene som fikk halv dose mineralfosfor det foregående året (2018: 1,5 kg mineralfosfor/daa, 2019: 3 kg mineralfosfor som OPTI-P/daa)

Som i 2018 sådde vi bygg (var. Heder), 15 frø tynnet til 12 planter, og høstet hele planten etter cirka 6 uker. Plantematerialet ble analysert for nitrogen- og fosforkonsentrasjon som beskrevet over.

Storfegj. separert trinn 1 (produkt 1), ble ikke tatt med i databehandlingen for fosforopptak og P-AL, da det ikke var mulig å korrigere for analysefeilen og overdoseringen ved forsøksoppstart i 2018.



Bilde 3. Ettervirkningsforsøket cirka 5 uker etter såing: Det er store forskjeller mellom behandlingene og noen planter viser tydelige tegn på fosformangel, i.e. lilla stilker og nekrose (Foto: Anne Falk Øgaard, 28/11-2019)

2.3.3 Databehandling veksthusforsøk

Fosforopptak i overjordisk plantemateriale per potte ble beregnet som produkt av potteavling og fosforkonsentrasjon.

Vi beregnet mineralgjødselekvivalenter (mineral fertiliser equivalents, MFE) for de enkelte organiske gjødselproduktene basert på fosforopptaket som ble målt i potteforsøket i 2018.

Mineralgjødselekvivalenter er et hjelpemiddel for å vurdere gjødslingseffekten til organiske gjødselprodukter, og er definert som den relative fosforeffekten sammenlignet med mineralgjødsel.

MFE ble beregnet som:

$$\text{MFE} = 100 \times \frac{X_1}{P \text{ tilført}}$$

$$X_1 = \frac{(Y_1 - b)}{a}$$

Med:

P tilført = Total fosformengde tilført med organisk gjødselprodukt (mg P/potte)

Y_1 = Fosforopptak i biomassen etter fosforgjødsling med organisk gjødselprodukt

X_1 = Mengden mineralfosfor som gir like stort fosforopptak i biomassen som ved fosforgjødsling med organisk gjødselprodukt (45 mg P/potte)

a og b = Henholdsvis stigningstall og krysningspunkt med y-aksen fra den lineare regresjonslinjen med Y = fosforopptak i biomassen som effekt av X = gjødselrate med mineralfosfor (her tilsvarende 0, 22,5 og 45 mg P/potte, Figur 4)

Fosforutnyttelsesgrad (P use efficiency, PUE) viser andelen fosfor i gjødselproduktene som ble tatt opp i plantene. Vi beregnet PUE for begge potteforsøkene hver for seg og for summen av fosforopptaket i begge forsøkene.

PUE ble beregnet som:

$$PUE = \frac{P \text{ opptak (P +)} - P \text{ opptak (Null P)}}{P \text{ tilført}} \times 100$$

Med:

P opptak (P+) = P opptak i høstet plantemateriale av planter tilført fosforgjødsel (mg P/potte)

P opptak (Null P) = P opptak i høstet plantemateriale av planter som ikke fikk tilført fosforgjødsel (mg P/potte), gjennomsnitt av tre gjentak

P tilført = For 2018: Total fosformengde tilført med gjødsel i 2018. For 2019: Total fosformengde tilført med gjødsel i 2018 minus fosformengde fjernet med biomassen i 2018. For sum av 2018 og 2019: Total fosformengde tilført med gjødsel i 2018 og 2019 (mg P/potte)

Fosforbalanser ble beregnet for alle gjødselbehandlingene og som sum av begge årene som:

$$P \text{ balanse} = P \text{ tilført} - P \text{ fjernet}$$

Med:

P tilført = Summen P tilført med organisk gjødsel eller mineralgjødsel i 2018, og P tilført med mineralgjødsel i 2019

P fjernet = P tatt opp i plantemateriale i 2018 og 2019

2.4 Feltforsøk

2.4.1 2-årig feltforsøk på Øsaker (2018-2019)

Effekten av fosfor i et utvalg bestående av seks organiske gjødselprodukter (Tabell 5) ble testet i et 2-årig feltforsøk som ble anlagt og gjennomført av NLR Øst på Øsaker (Sandtagen 200, 1712 Grålum). Forsøket ble anlagt våren 2018 og avsluttet på høsten 2019.

Forsøket ble etablert på leirjord, den samme jorden som ble brukt i veksthusforsøket (Tabell 3; Tabell 4). Arealet ble valgt på grunn av lavt innhold av lett tilgjengelig fosfor (P-AL).

Tabell 4. Jordart og middelveier for moldinnhold, pH, P-AL og CaCl₂-P i jorden ved start av 2-årig feltforsøk på Øsaker.

Jordart	Organisk materiale ¹	pH	P-AL ²	CaCl ₂ -P ³
	%		mg/100 g	mg/kg
Mellomleire	2,6	6,1	5,3-5,9	1,9

¹ Estimert basert på glødetap og leirinnhold etter Riley (1996)

² AL = ekstraksjon med 0,1 M ammoniumlaktat og 0,4 M eddiksyre justert til pH 3,75 (Egnér et al. 1960)

³ CaCl₂ = ekstraksjon med 0,0025 M CaCl₂ i prøve:væske forhold 1:20 (vekt:volum)

Arealet lå i stubb på vinteren og ble vårharvet, samt harvet to dager før etablering. Forsøksrutene var 3,0 m x 8,0 m med høsterute 1,5 m x 6,5 m.

Alle gjødselproduktene ble tilført i en mengde tilsvarende 3 kg fosfor/daa både i 2018 og 2019. Fosforeffekten til de organiske gjødselproduktene ble sammenlignet med ingen fosforgjødsling og med to mengder mineralfosfor (OPTI-P), 1,5 og 3 kg fosfor/daa. Det var tre gjentak av hver gjødselbehandling. I 2018 ble Storfegj. separert trinn 1 (produkt 1) overdosert på grunn av feil i den første analysen, tilsvarende som i pottforsøket. Det ble tilført 5 kg fosfor/dekar istedenfor 3 kg fosfor/dekar.

Nitrogen ble tilført med OPTI-NK gjødsel tilsvarende 12 kg nitrogen/daa begge årene. For produkter med en betydelig nitrogeneffekt, ble tilførselen av mineralnitrogen redusert tilsvarende forventet nitrogeneffekt av produktet som vist i Tabell 5. Gjødselen ble harvet inn innen 2 timer etter tilførsel.

Tabell 5 viser en oversikt over forsøksleddene og nitrogentilførselen.

Tabell 5. Forsøksledd på øsaker og antatt virkningsgrad (%) av mineralisk og organisk nitrogen i de organiske gjødselproduktene

Behandling	P tilførsel kg/daa	Antatt virkningsgrad N		OPTI-NK kg/daa
		mineralisk (%)	organisk (%)	
Null P	0			12
OPTI-P, ½ mengde	1,5			12
OPTI-P, full mengde	3			12
1 Storfegj. separert trinn 1 (skruepresse)	3 (5)	85 ¹	15 ¹	12
2 Storfegj. separert trinn 2 (filtrering)	3	85 ¹	15 ¹	9,6
9 Fiskeslam 1, tørket	3	85 ¹	45 ³	7,7
14 Fiskeslam, biokull	3	85 ¹	15 ¹	12
15 Struvitt	3	60 ²	-	11,2
7 Biorest, matavfall/husdyrgj.	3	85 ¹	15 ¹	-

¹ tilsvarende gylle, nedmoldning innen 3 timer (Gjødslingshåndbok 2020)

² tilsvarende mineralgjødselekvivalent (MFE) målt i pottforsøket beskrevet i Henriksen et al. (2019)

³ gjennomsnitt av mineralgjødselekvivalentene (MFE) beskrevet i Brod et al. (2017) og Henriksen et al. (2019)

Vårhvete (*Triticum aestivum* L. var. Mirakel) ble sådd henholdsvis 18. mai 2018, og 8. mai 2019.

Det ble tatt planteprøver fra hver rute ved å klippe hele planten fra 4 rader x 0,5 m for å måle opptaksforløp av fosfor i løpet av vekstsesongen. I 2018 ble planteprøvene tatt rett før skyting (stadium 39), og i 2019 under strekking (stadium 37) og begynnende skyting (stadium 45).

Feltet ble tresket 7. august 2018 og 16. september 2019. For 2019 mangler registrering av rute 109 (Null P), 209 (Struvitt) og 309 (Storfegj. separert trinn 1), fordi reimen til korntransporten i forsøkstreskeren røk. Halmen ble liggende igjen på rutene.

I 2018 var vekstsesongen preget av uvanlig varmt og tørt vær (Tabell 6). Gjennomsnittstemperaturen var høyere enn månedsnormalen (1961-1990) for alle måneder, og nedbørmengden var lavere. Kornet ble derfor høstet ca. én måned tidligere enn normalt pga. tvangsmodning forårsaket av tørke. I 2019 var gjennomsnittstemperaturen noe høyere eller lik månedsnormalen (1961-1990), mens nedbørmengden var betydelig høyere sammenlignet med månedsnormalen med unntak av juli.



Bilde 4. Feltforsøket på Øsaker blir anlagt (Foto: Eva Brod, 18/5-2018)

Tabell 6. Temperatur (°C) og nedbør (mm) målt ved LMT's målestasjon på Øsaker (LMT 2020) sammenlignet med månedsnormaler for normalperioden 1961-1990 målt ved målestasjon Kalnes (MET 2020)

	Mai	Juni	Juli	August	September
Temperatur (°C)					
2018	15	16,7	20,3	15,8	12,7
2019	10,4	15,1	17,5	16,7	12
Månedsnormaler	10,4	14,6	16,7	15,6	11,4
Nedbør (mm)					
2018	23	35	14	45	149
2019	141	126	55	173	216
Månedsnormaler	58	72	73	83	94

Prøvene fra planteklippene ble tørket ved 60 °C og malt for analyse av nitrogen og fosfor som beskrevet for veksthusforsøket. Etter høsting og avlingsregistrering ble det tatt rutevise kornprøver for bestemmelse av tørrstoff, proteininnhold og hektolitervekt med NIR-instrumentet InfraTec™ NOVA. Så ble kornet malt for analyse av fosfor som beskrevet for veksthusforsøket, og fosforopptak i korn ble beregnet for hver rute som produkt av ruteavling og fosforkonsentrasjon. Ruteavling og fosforopptak per rute ble regnet om til mengder per dekar.

Det ble tatt rutevise jordprøver før gjødsling på våren 2018 og etter høsting både 2018 og 2019. Jordprøvene ble analysert for pH og P-AL som beskrevet for veksthusforsøket. For bestemmelse av vannløselig P, ble jorden ekstrahert i 0,0025 M CaCl₂ (væske:prøve forhold 20:1) i 1,5 timer før spektrofotometrisk måling av ortho-fosfat ved molybdenblått-metoden etter Murphy og Riley (1962).

2.4.2 1-årig feltforsøk på Sparbu (2018)

Et utvalg bestående av fire fiskeslam produkter ble testet i et feltforsøk som ble anlagt på Ålberg gård (Kringlavegen 534, 7710 Sparbu). Forsøket ble etablert i 2018 og gjennomført av NLR Trøndelag på Steinkjer. Feltet ble anlagt på sandig silt/letteire (Tabell 7).

Forsøksplanen var tilsvarende som for forsøket på Øsaker (Tabell 8). Anleggsrutene var noe mindre med 2,0 x 8,0 m men høsterutene var like store som på Øsaker (9,75 m²). Tabell 8 viser forsøksleddene og antatt virkningsgrad i fiskeslam produktene som ble brukt i feltforsøket på Sparbu.

Feltet ble anlagt 29. mai og det ble sådd 6-rads bygg (*Hordeum vulgare*). Plantepøver ble tatt ved begynnende strekking (Zadoks 31) og under skytingen (Zadoks 57). Feltet ble tresket 20. september.

Som på Øsaker i 2018 var det også på Sparbu betydelig varmere både i mai og juli enn månedsnormalene for den samme perioden (Tabell 9). Mai var dessuten preget av lite nedbør. Juni, august og september var derimot ikke uvanlig varme eller tørre. Både august og september var preget av mye nedbør sammenlignet med månedsnormalene.

Plantepøver og kornprøver ble forbehandlet og analysert for nitrogen og fosfor som beskrevet for veksthusforsøket og feltforsøket på Øsaker. Det ble tatt rutevise jordprøver før gjødsling på våren og etter tresking. Jordprøvene ble forbehandlet og analysert for pH, P-AL og vannløselig fosfor som beskrevet over.

Tabell 7. Jordart og middelverdier for moldinnhold, pH, P-AL og CaCl₂-P i jorden ved start av 1-årig feltforsøk på Sparbu. Variasjonsbredde i parentes.

Jordart	Mold ¹ (%)	pH	P-AL ² (mg/100 g)	CaCl ₂ -P ³ (mg/kg)
Sandig silt/letteire	8,5	6,1	13 (11-17)	0,24

¹Mold = Glødetap korrigert for leirinnhold

²AL = ekstraksjon med 0,1 M ammoniumlaktat og 0,4 M eddiksyre justert til pH 3,75 (Egnér et al. 1960)

³CaCl₂ = ekstraksjon med 0,0025 M CaCl₂ i prøve:væske forhold 1:20 (vekt:volum)

Tabell 8. Forsøksledd på Sparbu og antatt virkningsgrad (%) av mineralisk og organisk nitrogen i de organiske gjødselproduktene

Behandling	P tilførsel	Antatt virkningsgrad N		OPTI-NK
	kg/daa	mineralsk (%)	organisk (%)	kg/daa
NullP	0			12
OPTI-P ½ mengde	1,5			12
OPTI-P full mengde	3			12
9 Fiskeslam 1, tørket	3	85 ¹	45 ²	7,7
10 Fiskeslam 2, tørket	3	85 ¹	45 ²	9,4
8 Fiskeslam, kompostert og tørket	3	85 ¹	45 ²	12
11 Fiskeslam 3, tørket	3	85 ¹	45 ²	11

¹ Tilsvarende gylle, nedmoldning innen 3 timer (Gjødslingshåndbok 2020)

² Gjennomsnitt av mineralgjødsel ekvivalentene bekrevet i Brod et al. (2017) og Henriksen et al. (2019)

Tabell 9. Temperatur (°C) og nedbør (mm) målt ved ved LMT's målestasjon på Mære (LMT 2020) sammenlignet med månedsnormaler for normalperioden 1961-1990 for målestasjon på Mære eller Steinkjer (MET 2020)

	Mai	Juni	Juli	August	September
Temperatur (°C)					
2018	13,3	11,3	17,8	13,5	11,0
Månedsnormaler ¹	9,0	13,0	14,2	13,5	9,4
Nedbør (mm)					
2018	6	42	65	170	229
Månedsnormaler ²	42	53	72	61	98

¹ Normalen er interpolert for målestasjon på Steinkjer, stasjonen har ikke egne målte data

² Målestasjon på Mære

2.5 Statistisk databehandling

Vi brukte enveis variansanalyse (ANOVA) for å klarlegge om fosforkvaliteten (fosforfraksjonering, fosforekstraksjoner) i gjødselproduktene var signifikant forskjellig, og om det var signifikante effekter av gjødselbehandlingene i potte- og feltforsøkene på avling, fosforopptak, fosforkonsentrasjon, N/P forhold i biomassen, PUE, MFE, pH, P-AL og vannløselig fosfor i jorden. Ved signifikante effekter, brukte vi Tukey's post-hoc test (HSD) for multiple sammenligninger mellom gjødselproduktene og mellom gjødselbehandlingene ($\alpha = 0,05$). Der det ikke var signifikante effekter, er det vist feilfelt med standardavvik innen gjentakene (n=3 eller 2).

Vi brukte t-tester for å sammenligne en produktgruppe basert på husdyrgjødsel (produktene 1-7, n=7) med en produktgruppe basert på fiskeslam (produktene 8-12, n=5) for ulike parametere knyttet til fosforkvalitet og fosforeffekt.

For å undersøke sammenhengen mellom fosforkvaliteten (fosforfraksjonering, fosforekstraksjoner) og gjennomsnittlig fosforeffekt i pottforsøket (MFE i 2018 og PUE i 2019), brukte vi enkel lineær regresjon.

2.6 Metaanalyse: Sammenheng mellom fosforeffekt og bikarbonatløselig fosfor

I tillegg til egne eksperimentelle forsøk, gjennomførte vi en metaanalyse basert på data fra flere uavhengige forsøk utført ved ulike institusjoner i både Norge og Danmark.

Ideen til metaanalysen ble til under en workshop arrangert i København i mars 2018. Workshopen ble organisert som en del av avslutningsfasen til det 5-årige prosjektet «Gødningsverdi af fosfor i restprodukter (GØDP)» finansiert av det danske Miljø- og Fødevareministeriet og ledet av Gitte Rubæk ved Aarhus Universitet. Workshopen samlet forskere fra ulike danske, norske og svenske institusjoner som hadde hatt forskningsaktiviteter på resirkulering av fosfor fra organiske gjødselprodukter.

Flere av forsøksresultatene, som ble presentert under workshopen, tydet på at andelen NaHCO_3 -løselig fosfor i organiske gjødselprodukter kan være en god indikator for fosforeffekten til produktene. Det ble derfor satt et mål om å standardisere tilgjengelige forsøksresultater og å sette dem sammen i en og samme regresjonsmodell (metaanalyse). Formålet var å klarlegge om fosforeffekten til fosfor i

organiske gjødselprodukter kan estimeres med hjelp av andelen av totalfosfor som er NaHCO_3 -løselig, også når datasettet er satt sammen av mange observasjoner fra ulike forsøk.

Regresjonsmodellen som presenteres her, har responsvariabel y = relativ fosforeffekt (MFE) til organiske gjødselprodukter og forklaringsvariabel x = andel NaHCO_3 -løselig fosfor.

2.6.1 Organiske gjødselprodukter og andelen bikarbonatløselig fosfor

Til sammen inkluderer metaanalysen resultater fra 10 forsøk med 82 forskjellige organiske gjødselprodukter:

- Produkter der fosfor hovedsakelig er bundet til kalsium, for eksempel husdyrgjødsel, kjøttbeinmel, fiskeslam, treaske, matavfallskompost ($n = 37$)
- Avløpsslam der fosfor har blitt felt med aluminium- og/eller jernsalter, med eller uten etterbehandling med kalk, samt termisk behandlet avløpsslam (forbrenning eller pyrolyse) ($n = 43$)
- Struvitt produsert i forbindelse med rensing av kommunalt avløpsvann ($n = 2$)

Detaljerte beskrivelser av de organiske gjødselproduktene inkludert i metaanalysen finnes i Alvarenga et al. (2017), Brod et al. (2015b), Christiansen et al. (2020), Lemming et al. (2017a og b) og Øgaard og Brod (2016). Dessuten er upubliserte data av D. Müller-Stöver og J. Liu ved København Universitet inkludert i analysen.

Alle produktene ble analysert for innhold av totalfosfor og NaHCO_3 -løselig fosfor i et væske:prøve forhold på cirka 200:1 (volum:vekt), som beskrevet i Tabell 10. Andelen NaHCO_3 -løselig fosfor av totalfosfor ble beregnet i prosent.

2.6.2 Relativ fosforeffekt (MFE)

Den relative fosforeffekten til de organiske gjødselproduktene sammenlignet med mineralfosfor ble målt i pottforsøk, til sammen 112 observasjoner. Tabell 11 gir en oversikt over oppsettet til de ulike forsøkene brukt i analysen. For å sikre at planteveksten ble styrt av fosfortilgjengelighet i gjødselproduktene, ble alle andre næringsstoffer enn fosfor gitt som næringsløsning i alle forsøk.

Mineralgjødselekvivalenter (MFE) for de organiske gjødselproduktene ble beregnet på to forskjellige måter:

- Enten som beskrevet under 2.3.3 Databehandling veksthusforsøk (Brod et al. 2015a; Øgaard og Brod 2016), eller
- basert på fosforutnyttelsesgraden (PUE) (Alvarenga et al. 2017; Christiansen et al. 2020; og beregnet basert på data presentert i Lemming et al. 2017a og b, og upublisert data fra Dorette Müller-Stöver og Jingna Liu ved Københavns Universitet):

$$\text{MFE} = \frac{\text{PUE}}{\text{PUE MinP}}$$

Med:

PUE = Fosforutnyttelsesgrad til det organiske gjødselproduktet

PUE MinP = Fosforutnyttelsesgrad til det mineralske kontroll leddet

Tabell 10. Oversikt over bestemmelse av totalfosfor og NaHCO₃-løselig fosfor i de organiske gjødselproduktene ved ulike institusjoner og i ulike forsøk

Referanse	Tørking	Totalfosfor	NaHCO ₃ -løselig fosfor		
	°C	Oppslutning	Analyse	Ekstraksjon	Analyse
NIBIO					
Kretsløp SIS/Mind-P	55	Kongevann (HNO ₃ og HCl)	ICP-MS	Ekstraksjon med 0,5 M NaHCO ₃ justert til pH 8,5, i 0,5 timer. Aktivt kull ble tilført hver prøve før ekstraksjon for å redusere bakgrunnsfarge i ekstraktet. Væske:prøve forhold: 200 ml:1 g. Ekstraktet ble filtrert før analyse.	Spektrofotometer
Brod et al. 2015	55	Forbrenning før oppslutning i H ₂ SO ₄ (Møberg og Petersen 1982)	Spektrofotometer	Sum av de første to stegene i Hedley-fraksjonering, H ₂ O-løselig P (1 time) og 0,5 M NaHCO ₃ -løselig P (16 timer). Væske:prøve forhold: 200 ml:1 g. Ekstraktet ble sentrifugert før analyse.	ICP-OES
Øgaard og Brod 2016	40	7 M HNO ₃ i ultraklav	ICP-OES	Ekstraksjon med 0,5 M NaHCO ₃ i 16 timer. Væske:prøve forhold: 180 ml:1 g. Ekstraktet ble sentrifugert før analyse.	ICP-OES
Alvarenga et al. 2017	105	7 M HNO ₃ i ultraklav	ICP-OES	Sum av de første to stegene i Hedley-fraksjonering, H ₂ O-løselig P (1 time) og 0,5 M NaHCO ₃ -løselig P (16 timer). Væske:prøve forhold: 200 ml:1 g. Ekstraktet ble sentrifugert før analyse.	ICP-OES
Aarhus Universitet					
Christiansen et al. 2020	40	HNO ₃ , H ₂ O ₂ , og HF i mikrobølgeovn	ICP-OES	Ekstraksjon med 0,5 M NaHCO ₃ i 0,5 timer. Væske:prøve forhold: 20 ml:0,1 g. Ekstraktet ble sentrifugert og oppsluttet i H ₂ SO ₄ og HClO ₄ før analyse.	Spektrofotometer
København Universitet					
Lemming et al. 2017a, b upublisert data fra Dorette Müller-Stöver og Jingna Liu	40	HNO ₃ , H ₂ O ₂ , og HF i mikrobølgeovn	ICP-OES	Ekstraksjon med 0,5 M NaHCO ₃ i 0,5 timer. Væske:prøve forhold: 20 ml:0,1 g. Ekstraktet ble sentrifugert og oppsluttet i H ₂ SO ₄ og HClO ₄ før analyse.	Spektrofotometer

Tabell 11. Oversikt over vekstforsøkene utført ved ulike institusjoner og ved ulike forsøk

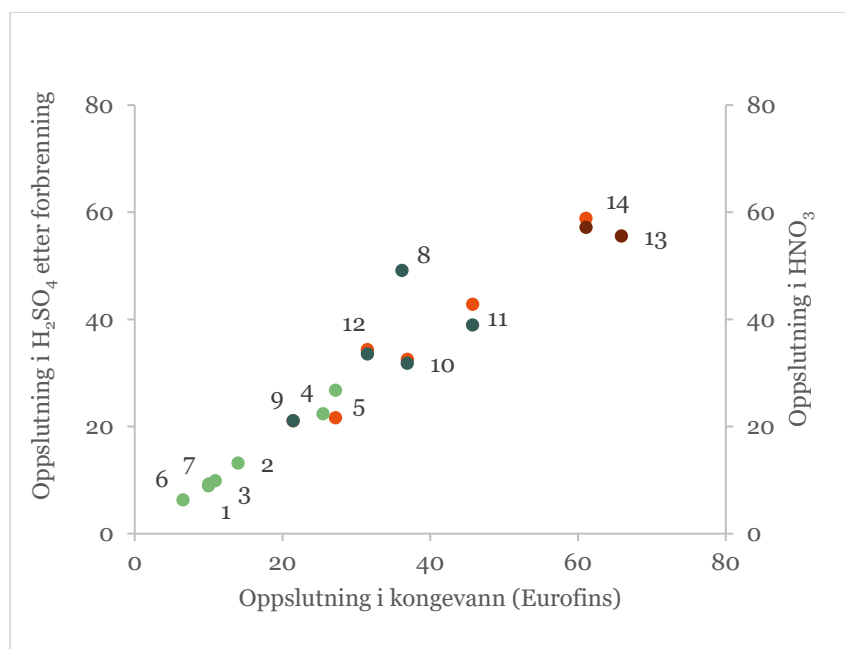
Referanse	Antall gjødsel-produkter	Jord	pH	Potte-størrelse	Gjentak	Gjødsel-rate	Vekst	Kontrollledd som Ca(H ₂ PO ₄) ₂
				L		mg P/kg jord		mg P/kg jord
NIBIO								
Kretsløp SIS/Mind-P	15	sand/torv blanding	6 (etter forsøk)	3	3	15	bygg	0, 7,5, 15
Brod et al. 2015	9	sand/torv blanding	5,5	5	3	12	raigras	0, 6, 12, 18
		sand/torv blanding	6,9					
Øgaard og Brod 2016	11	sand/torv blanding	7	5	3	37,5	raigras	0, 12,5, 25, 37,5
Alvarenga et al. 2017	10	sand/torv blanding	6,5	3	3	25	bygg	0, 12,5, 25
Aarhus Universitet								
Christiansen et al. 2020	10	siltig sand (Årup 1)	5,2	3	3	64	bygg	0, 64
		siltig sand (Årup 2)	5,3					
		sand (Brovst)	5,2					
København Universitet								
Lemming et al. 2017a	3	sandig lettleire/kvarts blanding	6,7	1	4	50	bygg	0, 25, 75, 120
Lemming et al. 2017b	2	sandig lettleire/kvarts blanding	6,7	2	3	80	bygg	0, 80
upublisert data fra Dorette Müller-Stöver	3			2,5		80	høstvetete	
	7			2,5		80	vårhvete	
upublisert data fra Jingna Liu	12						mais	

3 Resultater

3.1 Kjemisk karakterisering av gjødselproduktene

Fosforinnhold i produktene varierte mellom 6,6 og 65,9 g P/kg tørrstoff, unntatt for Struvitt som inneholdt 112 g P/kg (Tabell 12). Produkter basert på fiskeslam (34 ± 9 g P/kg tørrstoff) hadde gjennomsnittlig signifikant høyere fosforinnhold enn produkter basert på husdyrgjødsel (14 ± 8 g P/kg tørrstoff). Begge biokullproduktene hadde betydelig høyere fosforkonsentrasjoner på tørrstoffbasis (61 og 66 mg P/kg tørrstoff) enn produktene som ikke var termisk behandlet.

Det totale fosforinnholdet i produktene ble til dels bestemt etter ulik oppslutningsmetode i ulike forsøk: Oppslutning i kongevann ($\text{HNO}_3 + \text{HCl}$), oppslutning i 6 M H_2SO_4 etter forbrenning (Møberg og Petersen 1982), og oppslutning i konsentrert salpetersyre (HNO_3). Det var generelt godt samsvar mellom analysene og ingen systematiske forskjeller forårsaket av oppslutningsmetode (Figur 1).



Figur 1. Samsvar mellom analysene av totalfosfor i de organiske gjødselproduktene gjennomført hos Eurofins (oppslutning i kongevann) og ved jord- og vannkjemi-laboratoriet til MINA/NMBU (oppslutning i 6 M H_2SO_4 etter forbrenning (Møberg og Petersen 1982), eller oppslutning i konsentrert HNO_3 i ultraklav). Grønne punkter: produkter basert på husdyrgjødsel, blå punkter: produkter basert på fiskeslam, brune punkter: biokull, røde punkter: ulike produkter som ble oppsluttet med HNO_3 . For nummerforklaring se Tabell 12. Struvitt er ikke inkludert i figuren.

Tabell 12. Tørrstoff (TS), pH og innhold av næringsstoffer i organiske gjødselprodukter

Nr.	Gjødselprodukt	Tørrstoff	pH	Total N	Total P	NH ₄ -N	NH ₄ -N	C/N	N/P	K	S	Ca	Mg
		%		g/kg TS	g/kg TS	g/kg TS	% av total N			g/kg TS	g/kg TS	g/kg TS	g/kg TS
1	Storfegj., separert trinn 1	22	8,0	23,9	10,0 (6,0) ¹⁾	2,0	8,4	18	4,0	29	4,0	16	5,1
2	Storfegj., separert trinn 2	84	8,0	52,5	14,0	0,6	1,1	7,2	3,7	39	6,6	32	8,2
3	Storfegj., utrånnet og separert	24	8,4	23,3	10,9	17,4	74,4	18,1	2,1	24	5,0	20	9,7
4	Grisegj., separert	24	8,5	26,9	25,5	16,8	62,5	15,6	1,1	15	6,0	30	16
5	Grisegj., utrånnet og separert	23	7,9	30,1	27,2	17,7	58,8	13,3	1,1	16	11	29	14
6	Hestegj., kompostert	18	7,1	26,8	6,6	1,0	3,6	14,9	4,1	18	3,5	26	6,6
7	Biorest, matavfall/husdyrgj.	5	7,5	83,0	10,0	55,6	67,0	5,1	8,3	50	8,2	22	6,0
8	Fiskeslam, kompostert og tørket	68	6,0	32,5	36,2	1,9	6,0	9,4	0,9	3,7	5,3	73	5,4
9	Fiskeslam 1, tørket	96	5,6	68,2	21,5	0,8	1,2	6,7	3,2	0,7	1,8	46	2,0
10	Fiskeslam 2, tørket	83	5,3	68,6	36,9	3,4	4,9	6,7	1,9	1,1	0,1	84	4,1
11	Fiskeslam 3, tørket	92	5,3	34,2	45,8	0,9	2,6	11,4	0,7	1,1	0,0	77	3,8
12	Fiskeslam, filtrert	7	5,2	74,8	31,5	12,1	16,2	6,8	2,4	2,7	5,5	95	4,1
13	Grisegj., biokull	90	9,4	15,4	65,9	0,5	3,1	21,1	0,2	41	7,9	113	33
14	Fiskeslam, biokull	100	8,8	56,4	61,1	0,2	0,4	7,4	0,9	15	1,8	113	12
15	Struvitt	-	7,6	57 ²⁾	112 ²⁾	48,6 ²⁾	85	-	0,5	0,5 ²⁾	0,13 ²⁾	2,3 ²⁾	46 ²⁾

¹⁾ Analysen ble gjentatt etter at effekten i veksthusforsøket var tilsynelatende bedre enn mineralgjødsel. Den opprinnelige analysen viste 6 g P/kg TS, den gjentatte analysen viste 10 g P/kg TS og er mer sannsynlig.

²⁾ elementkonsentrasjon i Struvitt er angitt som g/kg produkt på grunn av usikker tørrstoffbestemmelse

Begge biokullproduktene ble i tillegg oppsluttet i $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ i ultraklav ved jord- og vannkjemi laboratoriet til MINA/NMBU. Dette er en kraftigere oppslutningsmetode enn de andre metodene som ble brukt. Med den ønsket vi å klarlegge om biokull inneholder svært tungt løselig fosforforbindelser som ikke ble løst ut ved de andre oppslutningsmetodene. I strid med våre forventninger, ble den høyeste fosforkonsentrasjonen for begge biokullproduktene målt etter oppslutning i kongevann (Tabell 13). Vi bestemte oss derfor for å bruke analyseresultatene etter oppslutning med kongevann for beregning av gjødseltilførsel for alle forsøk og gjødselprodukter, inkludert biokull. Det ble antatt at analysen som viste den høyeste konsentrasjonen var nærmest sannheten.

Tabell 13. Fosforinnhold som g P/kg tørrstoff i de to biokullproduktene analysert på ICP-OES etter fire forskjellige oppslutningsmetoder

Nr.	Gjødselprodukt	Kongevann	H_2SO_4	HNO_3	$\text{HNO}_3 + \text{HF}$
		Mikrobølgeovn	Forbrenning	Ultraklav	Ultraklav
13	Grisegjødsel, biokull	65,9	55,5	50,2	58,0
14	Fiskeslam, biokull	61,1	57,1	53,0	56,0

Totalt nitrogeninnhold i produktene varierte mellom 15 og 83 g N/kg tørrstoff, og var tydelig høyest i Biorest, matavfall/husdyrgj. (produkt 7). Produkter basert på fiskeslam (56 ± 21 g N/kg tørrstoff) hadde gjennomsnittlig signifikant høyere nitrogeninnhold enn produkter basert på husdyrgjødsel (27 ± 7 g N/kg tørrstoff), når Biorest matavfall/husdyrgj. (produkt 7) ikke ble inkludert i den statistiske testen. Nitrogeninnholdet i Biokull, fiskeslam ($56,4$ g N/kg tørrstoff) var høyere enn i Biokull, grisegj. ($15,4$ g N/kg tørrstoff). Andelen av totalnitrogen som var direkte plantetilgjengelig som ammonium-N varierte mellom 0,4 % i Biokull, fiskeslam og 85 % i Struvitt. I produkter som var behandlet i en biogassreaktor forelå det meste av nitrogenet som ammonium-N (59-74 %, produkt 3, 5 og 7). I tillegg kan produktene inneholde nitrat-N som også er direkte plantetilgjengelig. Dette ble ikke analysert, men det er forventet at verdiene er lave unntatt for Storfegj., separert trinn 2 (produkt 2) hvor det var en forutgående nitrifiseringsprosess. I en annen undersøkelse ble det funnet at nitrat-N-verdien var nesten 5 x verdien av ammonium-N for dette gjødselproduktet.

Forholdet mellom nitrogen og fosfor (N/P) var betydelig lavere enn plantenes behov for alle produktene unntatt Biorest, matavfall/husdyrgj. (produkt 7) med $\text{N/P} = 8,3$. Uten dette biorestproduktet varierte N/P forholdet mellom 0,2 (Biokull fra grisegj., produkt 13) og 4,0 (Storfegj. separert med skruepresse, produkt 1). Gjødslingsnormen til for eksempel 500 kg bygg er 11 kg N/daa og 1,75 kg P/daa, det vil si $\text{N/P} = 6,3$ (Gjødslingshåndbok 2020). Det betyr at man overgjødsler med fosfor hvis gjødseltilførselen beregnes basert på nitrogeninnholdet i de organiske gjødselproduktene, med mindre disse blir supplert med andre fosforfrie nitrogenkilder. Både produkter basert på fiskeslam og på husdyrgjødsel hadde et lavt N/P forhold, og det var ingen statistisk sikker forskjell mellom gjødseltypene.

Gjennomsnittlig kaliuminnhold var betydelig høyere i produkter basert på husdyrgjødsel (27 ± 13 g K/kg tørrstoff) enn i produkter basert på fiskeslam ($1,9 \pm 1,3$ g K/kg tørrstoff). Det lave kaliuminnholdet i fiskeslam vil gi underdekning på kalium når fiskeslam brukes som gjødsel.

Produkter basert på husdyrgjødsel hadde gjennomsnittlig høyere pH ($8,0 \pm 0,5$) enn produkter basert på fiskeslam ($5,5 \pm 0,3$).

3.2 Klassifisering av produktene etter Gjødselforskrift

I Norge reguleres bruken av organisk gjødsel i Forskrift om gjødselfarer mv. av organisk opphav (Gjødselforskriften, Lovdata 2003). For at organiske gjødselprodukter skal kunne brukes som organisk gjødsel, må innholdet av smittestoffer, miljøgifter og tungmetaller være tilstrekkelig lavt. Når det gjelder tungmetaller deler dagens Gjødselforskrift organiske gjødselprodukter inn i fire kvalitetsklasser basert på tungmetallkonsentrasjon på tørrstoffbasis. Produkter i kvalitetsklassene 0, I, og II kan – med økende mengdebegrensninger – nyttes som gjødsel i jordbruket. Produkter i kvalitetsklasse III er ikke tillatt som gjødsel i jordbruket.

Tabell 14 viser innhold av tungmetaller og klassifisering av de ulike gjødselproduktene i henhold til Gjødselforskriften. De fleste produktene basert på husdyrgjødsel var i kvalitetsklasse 0 eller I, og kan dermed tilføres jordbruksareal uten mengdebegrensninger utover plantenes næringsbehov, eller med opp til 4 tonn tørrstoff/daa/10 år. Unntaket var de nederlandske produktene 4 og 5 (Grisegj., separert og Grisegj., utrånnet og separert) som var i kvalitetsklasse II pga. av høye konsentrasjoner av sink og kobber. Bruken som gjødsel på norsk jordbruksareal hadde derfor vært begrenset til 2 tonn tørrstoff/daa/10 år i henhold til gjeldende Gjødselforskrift. Det har tidligere blitt vist at også norsk svinegjødsel ofte kommer i kvalitetsklasse II eller III for sink, og det er dokumentert tilfeller av sinkkonsentrasjoner i svinegjødsel som overstiger nivået i kvalitetsklasse III (Daugstad et al. 2012).

Tabell 14. Innhold av tungmetaller angitt som mg/kg tørrstoff. Kvalitetsklasser i henhold til Forskrift om gjødselfarer mv. av organisk opphav (Lovdata 2003) er angitt slik: Kvalitetsklasse 0 = grønn, I = lys gul, II = mørk gul, III = lys orange og utenfor kvalitetsklasse III = mørk orange

Nr.	Gjødselprodukt	Cd	Pb	Hg	Ni	Zn	Cu	Cr
1	Storfegj., separert trinn 1 (skruepresse)	< 0,1	2,5	0,04	2	98	16	5,3
2	Storfegj., separert trinn 2 (filtrering)	0,68	3	0,033	4,5	260	58	6,6
3	Storfegj., utrånnet og separert	0,15	3,4	< 0,01	4	140	37	7
4	Grisegj., separert	0,18	2	0,017	3,2	450	170	6,3
5	Grisegj., utrånnet og separert	0,2	2,6	0,032	20	460	160	8,5
6	Hestegj., kompostert	0,68	3,1	< 0,01	5,5	240	35	5
7	Biorest, matavfall/husdyrgj.	0,17	3,7	<0,07	9,1	310	84	9,5
8	Fiskeslam, kompostert og tørket	2,4	34	0,26	9,6	1300	2500	61
9	Fiskeslam 1, tørket	0,99	1,9	0,011	<1,5	390	12	9,6
10	Fiskeslam 2, tørket	0,98	2,4	0,14	4,1	560	26	16
11	Fiskeslam 3, tørket	0,47	2,3	0,11	24	540	24	6,7
12	Fiskeslam, filtrert	0,84	2,8	0,098	2,8	470	22	11
13	Grisegj., biokull	0,55	7,6	< 0,01	21	2000	530	38
14	Fiskeslam, biokull	0,75	3	0,074	<1,5	670	34	10
15	Struvitt	0,2	0,99	0,16	<1,5	<10	5,2	7,5

De fleste produktene basert på fiskeslam var i kvalitetsklasse II pga. høye sink og/eller kadmium konsentrasjoner. Fiskeslam, kompostert og tørket (produkt 8) var utenfor kvalitetsklasse III for kobber og i kvalitetsklasse III for både kadmium og sink. Det er derfor ikke lov å bruke dette produktet som gjødsel hverken i landbruket eller på grøntarealer. Fiskeslam, kompostert og tørket (produkt 8) ble blandet med rivningsvirke for å gi fiskeslammet struktur og for å optimalisere C/N-forholdet før behandling i en komposteringsreaktor. Det er sannsynlig at de høye tungmetallkonsentrasjonene i produktet skyldes innblanding av forurenset rivningsvirke.

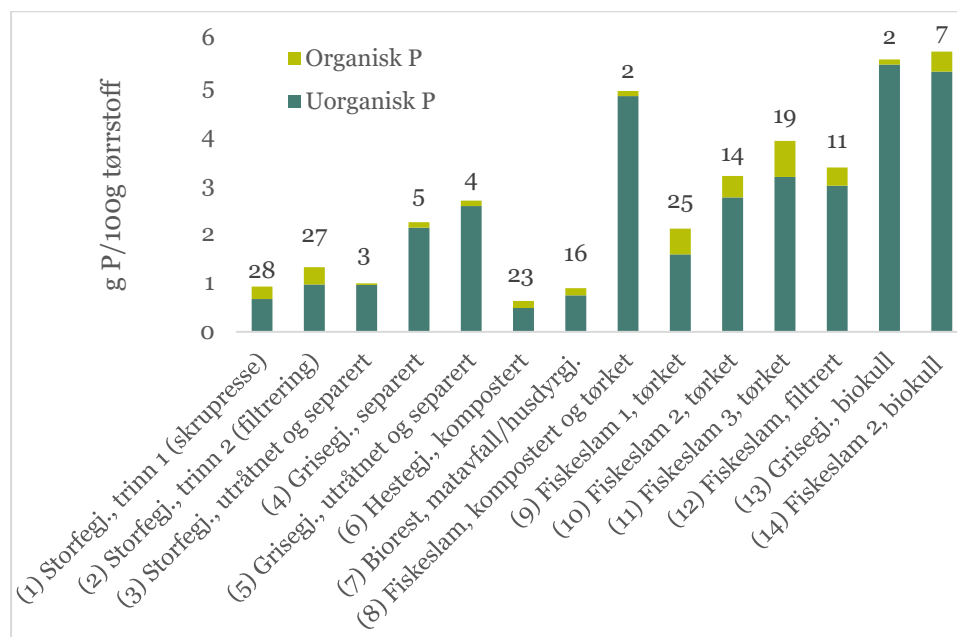
Det nederlandske produktet Grisegj., biokull (produkt 13) var utenfor kvalitetsklasse III, mens Fiskeslam, biokull (produkt 14) var i kvalitetsklasse II.

Struvitt var i kvalitetsklasse 0 og kan dermed brukes uten mengdebegrensninger utover plantenes næringsbehov.

3.3 Karakterisering av fosfor i gjødselproduktene

3.3.1 Uorganisk og organisk fosfor

I alle de organiske gjødselproduktene som ble undersøkt her, forelå fosfor hovedsakelig som uorganisk fosfor (Figur 2).



Figur 2. Organisk og uorganisk fosfor (g P/100g tørrstoff) i de organiske gjødselproduktene, analysert ved metoden til Møberg og Petersen (1982). Tallene over kolonnene viser andelen fosfor som er organisk (% av totalfosfor).

Bare mellom 2 og 28 % av totalfosfor forelå som organiske forbindelser. Dette er i samsvar med tidligere undersøkelser som har vist at også fosfor i organiske gjødselprodukter, inkludert husdyrgjødsel, hovedsakelig foreligger som uorganiske forbindelser (f.eks. Kratz et al. 2019). Det var ingen signifikant forskjell mellom produkter basert på fiskeslam og husdyrgjødsel med tanke på andel organisk fosfor. Struvitt ble ikke tatt med i denne undersøkelsen da struvitt er et uorganisk salt ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

3.3.2 Fraksjonering av fosforforbindelser

Tabell 15 viser en oversikt over resultatene fra fosforfraksjoneringen av de 15 produktene.

Trinnvis ekstraksjon av organiske gjødselprodukter for å bestemme fordelingen av fosfor på ulike bindingsformer har noen utfordringer. Vekttap av prøvemateriale under fraksjoneringen var delvis betydelig, mellom 41 % (Hestegjødsel, kompostert, produkt 6) og 101 % (Struvitt, produkt 15) av innveid prøve. Tap av prøvemateriale som måles ved veiing på slutten av fraksjoneringen, vil være en kombinasjon av:

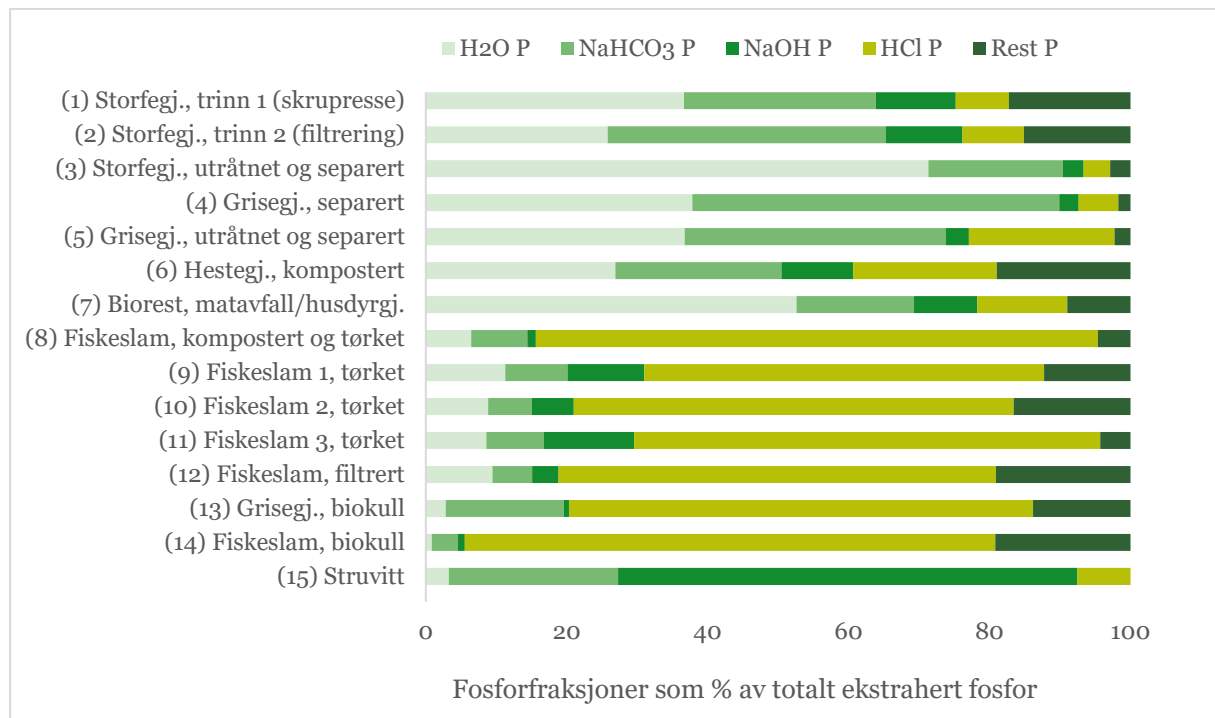
- partikkeltap under dekantering etter hver ekstraksjon og
- oppløsning av mineraler under ekstraksjonene.

Partikkeltap kan korrigeres ved å fordele tapet på alle fraksjonene. Det vil imidlertid variere hvor mye av tapet som skyldes partikkeltap eller oppløsning av mineraler, og den faktiske fordelingen for hvert enkelt produkt vil alltid være ukjent. Vi har derfor valgt å ikke korrigere for partikkeltap. Prøvetapet var signifikant større for fiskeslamproduktene (73 ± 17 %) sammenlignet med husdyrgjødselproduktene (52 ± 7 %). Forskjellen kan skyldes at partikkeltapet var større for fiskeslamproduktene, eller at en større andel av fosfor i fiskeslam forelå som mineraler som ble løst opp under fraksjoneringen.

I alt var gjenvinningsgraden tilfredsstillende (105 % i gjennomsnitt for alle prøvene, Tabell 15). Gjenvinningsraten var signifikant høyere for produkter basert på fiskeslam (119 ± 13 %) sammenlignet med produkter basert på husdyrgjødsel (95 ± 9 %). Forskjellen kan skyldes at partikkeltapet var større for produkter basert på husdyrgjødsel.

Figur 3 viser fordelingen av totalt ekstrahert fosfor (sum av alle alle ekstraksjonssteg) på de ulike fosforfraksjonene.

I gjødselproduktene basert på husdyrgjødsel var fosfor hovedsakelig ekstraherbart i H_2O og $NaHCO_3$ (72 ± 14 %). Dette var signifikant mer enn i produkter basert på fiskeslam (17 ± 2 %). Disse ekstraksjonene er assosiert med løst bundet og lett tilgjengelig fosfor.



Figur 3. Andel (%) av totalfosfor ekstrahert i de ulike ekstraksjonsstegene til den kjemiske fosforfraksjoneringen (n =2).

I produktene basert på fiskeslam var det meste av fosforet i fraksjonen som ble ekstrahert i HCl (66 ± 10 %), en signifikant større andel enn i produktene basert på husdyrgjødsel (11 ± 7 %). Også fosfor i biokullproduktene var hovedsakelig i HCl-fraksjonen, og HCl-fraksjonen var større i biokull basert på fiskeslam (75 ± 2 %) enn i biokull basert på grisegjødsel (66 ± 6 %). HCl-ekstraksjonen er assosiert med tungt løselige kalsiumfosfater.

I Struvitt var det meste av fosforet løselig i NaOH (65 ± 0 %).

Tabell 15. Uorganisk (PO₄-P) og organisk (org P) fosfor (g P/kg tørrstoff) i de enkelte fosforfraksjonene etter kjemisk fosforfraksjonering av de organiske gjødselproduktene, totalt fosfor i restprøven etter ekstraksjonene, og summen av totalt fosfor ekstrahert under fraksjoneringen. Gjenvinning viser summen av totalt ekstrahert fosformengde som andel av totalfosfor i prøven analysert etter oppslutning i konge vann (Tabell 12). Tap er andelen av innveid prøvemateriale som ble tapt eller løst opp under fraksjoneringen.

Nr.	Gjødselprodukt	H ₂ O		NaHCO ₃		NaOH		HCl		Rest P	Sum	Gjenvinning	Tap
		PO ₄ -P	org P	PO ₄ -P	org P	PO ₄ -P	org P	PO ₄ -P	org P	Totalt P	Totalt P	% totalt P	% prøve
1	Storfegj., trinn 1 (skruepresse)	3,2	0,5	2,8	0,0	0,3	0,9	0,4	0,4	1,6	10,0	100	57
2	Storfegj., trinn 2 (filtrering)	3,4	0,3	5,4	0,3	0,3	1,3	0,5	0,8	1,8	14	101	58
3	Storfegj., utrånnet og separert	7,2	0,1	2,0	0,1	0,1	0,2	0,8	-0,4	0,3	10,2	94	44
4	Grisegj., separert	8,2	-0,5	11,2	-0,6	0,4	0,2	0,9	0,3	0,3	20	80	54
5	Grisegj., utrånnet og separert	9,0	-0,2	9,6	-0,8	0,6	0,2	4,2	0,8	0,5	23,6	87	52
6	Hestegj., kompostert	1,8	0,2	1,6	0,1	0,2	0,5	1,1	0,4	1,2	7	107	41
7	Biorest, matavfall/husdyrgj.	4,5	0,6	1,5	0,1	0,4	0,6	0,9	0,4	0,8	9,7	97	55
8	Fiskeslam, kompostert og tørket	2,7	0,3	4,0	-0,2	0,4	0,2	30,4	7,4	2,0	47,0	137	48
9	Fiskeslam 1, tørket	2,0	1,0	1,2	1,2	1,6	1,3	10,9	4,0	2,9	25,9	121	82
10	Fiskeslam 2, tørket	2,5	1,2	2,0	0,9	1,5	1,1	19,2	7,2	6,3	41,4	112	89
11	Fiskeslam 3, tørket	3,2	1,0	3,1	0,7	4,3	1,8	22,0	9,6	1,9	47,6	104	65
12	Fiskeslam, filtrert	3,4	0,6	2,0	0,3	0,8	0,8	24,5	1,6	5,2	39,2	125	84
13	Grisegj., biokull	1,8	0,0	16,2	-5,5	0,5	0,1	36,7	5,3	8,5	63,3	96	46
14	Fiskeslam, biokull	0,5	0,1	2,0	0,6	0,6	0,2	44,9	7,2	12,8	68,7	113	42
15	Struvitt	4,5	-0,7	31,0	-3,0	75,0	1,0	7,7	1,1	-	116,6	105	101
	SEM	0,6	0,5	1,8	1,8	0,3	0,3	1,3	1,4	1,7	1,7	4	2
	HSD	3,2	n.s.	10,2	n.s.	1,5	1,6	7,4	8,1	9,6	9,7	21	10

SEM står for «pooled standard error of the mean». HSD står for «honestly significant difference» og viser resultatet av Tukey's test, en statistisk sammenligning av behandlingene med $p < 0,05$ etter enveis ANOVA. Bare forskjeller mellom behandlinger som er større enn HSD er statistisk sikre

3.3.3 Fosforekstraksjoner

Tabell 16 viser andelen av totalfosfor som ble ekstrahert fra de organiske gjødselproduktene med ulike ekstraksjonsmetoder.

Det var store forskjeller i andelen fosfor som ble ekstrahert med de ulike metodene, for eksempel ble mellom 0,1-28 % av totalfosfor ekstrahert med vann (væske:prøve forhold 20:1), mens mellom 12-95 % av totalfosfor ble ekstrahert med ammoniumsitratt.

Ved ekstraksjon med vann og bikarbonat ble mest fosfor ekstrahert fra biorest og husdyrgjødselprodukter. Ved ekstraksjon med ammoniumsitratt ble like mye fosfor ekstrahert fra fiskeslamproduktene som fra to av husdyrgjødselproduktene (83-95 % av totalfosfor). Minst fosfor ble i de fleste tilfellene ekstrahert fra biokullproduktene. Fosfor i Struvitt var dessuten lite løselig i vann og bikarbonat (væske:prøve forhold 20:1).

Tabell 16. Andelen fosfor (% av totalfosfor) i 15 organiske gjødselprodukter som ble ekstrahert med P-AL, vann (H₂O), bikarbonat (NaHCO₃) eller ammoniumsitratt (NH₄-sitratt) ved ulike væske:prøve forhold

Nr.	Gjødselprodukt	P-AL		H ₂ O		NaHCO ₃		NH ₄ -sitratt
		20:1	100:1	20:1	100:1	20:1	200:1	standard
1	Storfegj., trinn 1 (skruepresse)	59	64	12	22	10	37	67
2	Storfegj., trinn 2 (filtrering)	65	60	8	11	9	18	61
3	Storfegj., utrånnet og separert	92	89	13	22	20	30	76
4	Grisegj., separert	79	81	8	19	13	61	83
5	Grisegj., utrånnet og separert	82	90	9	20	10	48	88
6	Hestegj., kompostert	58	58	13	17	4	21	75
7	Biorest, matavfall/husdyrgj.	54	70	28	41	39	47	72
8	Fiskeslam, kompostert og tørket	45	81	3	6	5	10	95
9	Fiskeslam 1, tørket	40	64	4	5	6	6	71
10	Fiskeslam 2, tørket	25	46	3	4	2	4	48
11	Fiskeslam 3, tørket	25	58	4	5	2	5	64
12	Fiskeslam, filtrert	34	65	7	8	2	6	67
13	Grisegj., biokull	32	45	1	1	4	10	40
14	Fiskeslam, biokull	7	11	0,1	0,2	0,2	0,3	12
15	Struvitt ¹	88	107	1	4	2	28	71
	SEM	2	2	0,2	0,3	1	1	3
	HSD	11	10	1	2	3	5	16

¹ For Struvitt vises ekstrahert fosfor per innveid prøve som andel av totalfosfor på produktbasis (g P/100g produkt), ikke tørrstoffbasis (g P/100g tørrstoff)

SEM står for «pooled standard error of the mean».

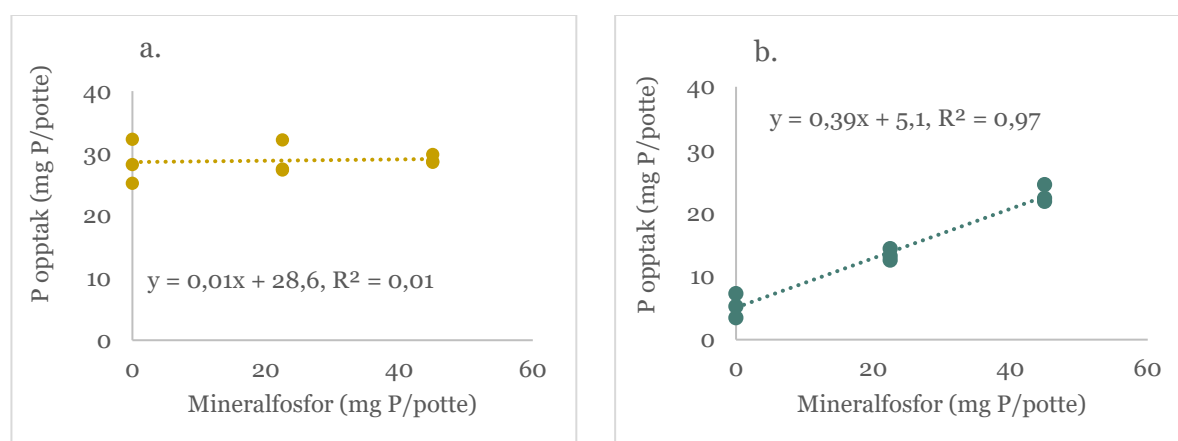
HSD står for «honestly significant difference» og viser resultatet av Tukey's test, en statistisk sammenligning av behandlingene med $p < 0,05$ etter enveis ANOVA. Bare forskjeller mellom behandlinger som er større enn HSD er statistisk sikre.

Økning i forholdet mellom væske og prøve økte andelen fosfor som ble ekstrahert i de fleste tilfellene. Effekten så ut til å være tydeligst for vann og bikarbonat sammenlignet med P-AL. For vann og bikarbonat så effekten ut til å være større for produktene basert på husdyrgjødsel enn for produktene basert på fiskeslam.

3.4 Plantetilgjengelighet av fosfor i veksthusforsøket

Under veksthusforsøket som vi gjennomførte i 2018 og 2019, testet vi fosforeffekten til alle de 15 organiske gjødselproduktene på to typer jord (se kapittel 2.3).

Leirjordas innhold av lett tilgjengelig fosfor, målt som P-AL, var 5,4 mg/100 g jord. Ved dette P-AL-nivået er det anbefalt å gjødsle med like mye fosfor som det som fjernes med avlingene. Til tross for et P-AL-nivå som tilsier behov for fosforgjødsling, fikk vi ikke respons på tilført fosfor i leirjorda fordi jorda bidro med nok fosfor (Figur 4a). Potter uten fosforgjødsel ga like høyt fosforopptak i plantene som pottene med fosforgjødsel. I pottene med sand/torv blandingen ble det derimot tydelig effekt av fosforgjødsling, og fosforopptaket i plantene økte lineært med økende tilførsel av mineralfosfor (Figur 4b). Derfor viser vi her bare resultatene av denne delen av forsøket.



Figur 4. Fosforopptak i bygg som effekt av stigende mengder mineralfosfor (0, 22,5 og 45 mg P/potte) i a. leirjorda og b. sand/torv blandingen.

Figur 5a viser plantetilgjengeligheten av fosfor i de ulike produktene, målt som fosforopptak i plantene som ble høstet fra sand/torv-jorda det samme året som gjødselen ble tilført (2018). Det var stor forskjell i gjennomsnittlig fosforopptak mellom de ulike gjødseltypene, men bare forskjeller som er større enn 8,4 mg P/potte er statistisk sikre.

Figur 5b viser ettervirkningseffekten av de samme gjødselproduktene, inkludert mineralgjødsel, året etter gjødsling (2019), sammenlignet med mineralgjødsling tilsvarende 3 kg P/daa, tilført før start i 2019. Ettervirkningseffekten var gjennomgående lav med små forskjeller mellom gjødselbehandlingene, og ingen av produktene skilte seg ut sammenlignet med fosforeffekten det foregående året. Bare forskjeller som er større enn 1,9 mg P/potte er statistisk sikre (kontrollbehandlingen MinP er ikke inkludert i den statistiske analysen).

Tabell 17 viser mineralgjødselkvivalenter (MFE) og fosforutnyttelsesgrad (PUE) for de ulike gjødselproduktene i 2018 og 2019.

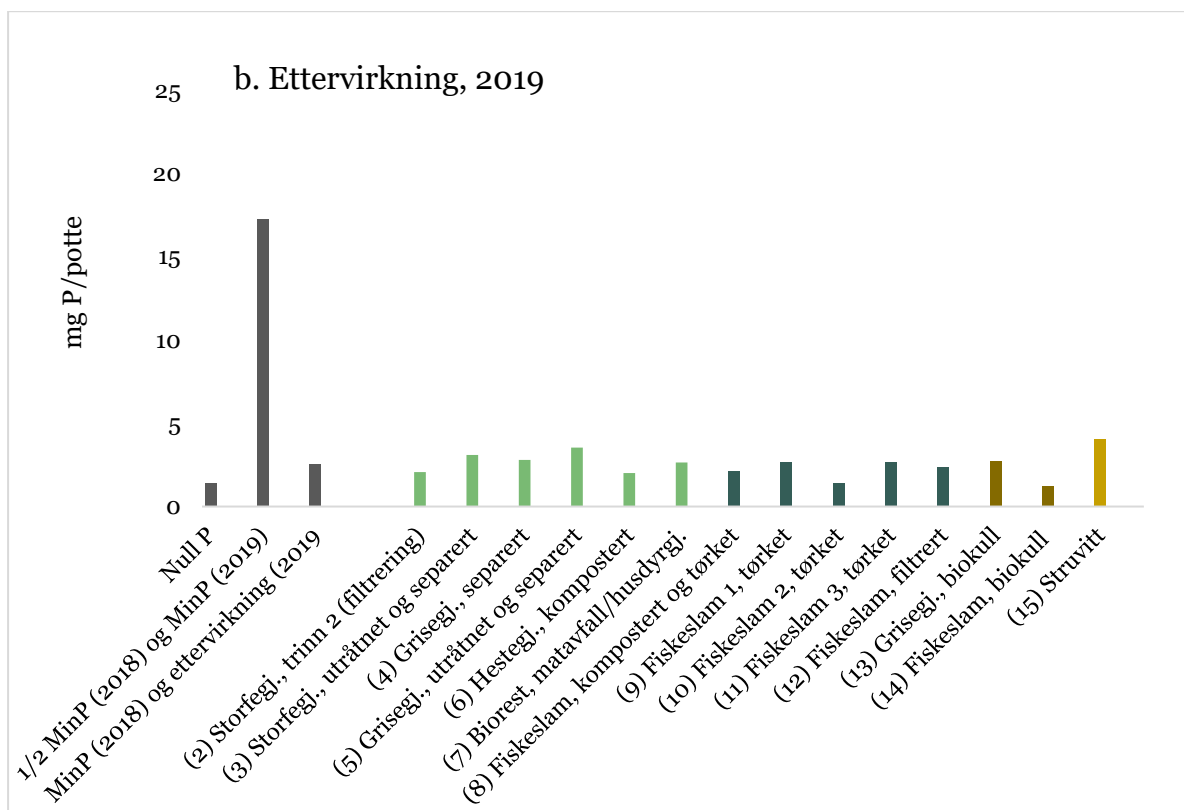
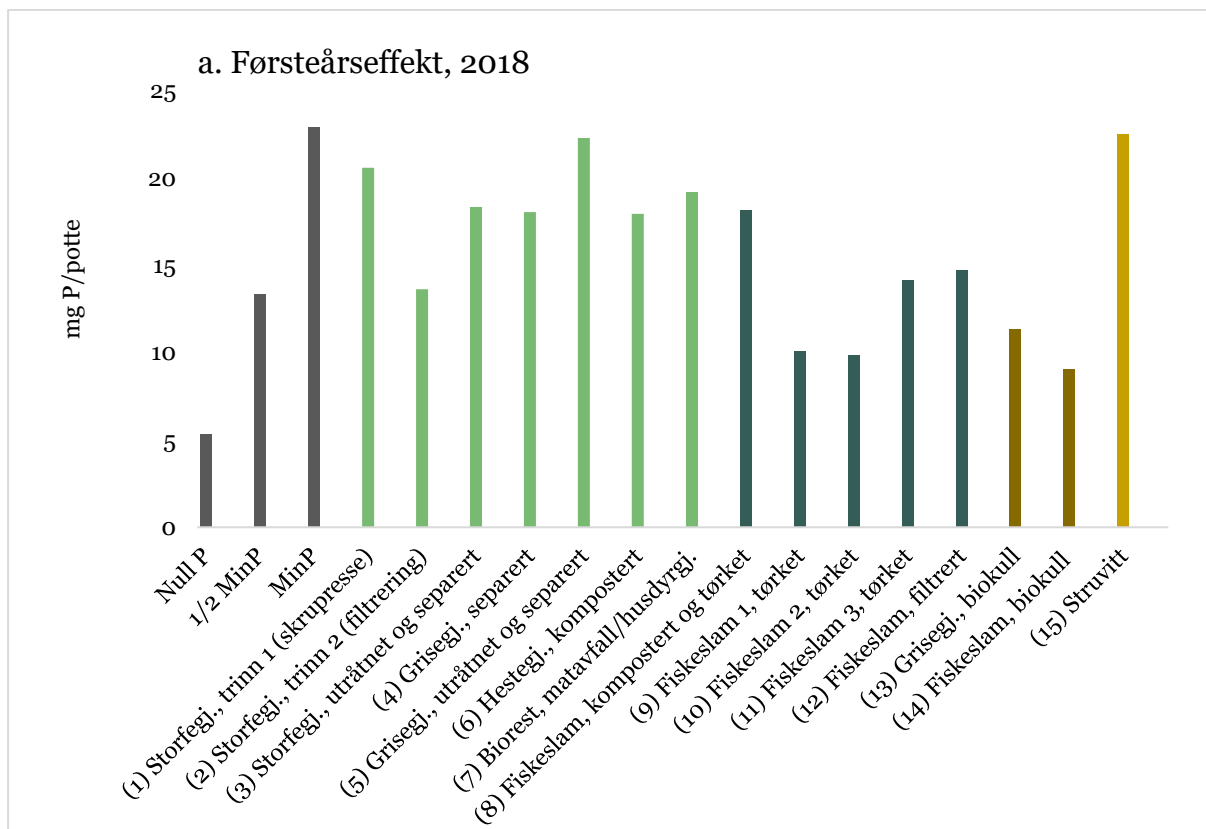
I 2018 hadde flere produkter nesten like høy fosfortilgjengelighet som mineralfosfor, deriblant var flere husdyrgjødselprodukter. På den andre siden var det flere organiske gjødselprodukter med

signifikant lavere tilgjengelighet av fosforet enn mineralfosfor. I 2018 gjaldt dette for tre av de fem fiskeslamproduktene. En t-test hvor alle fiskeslamproduktene ble testet mot alle husdyrgjødselproduktene, viste at fosfor i fiskeslam var signifikant mindre plantetilgjengelig enn fosfor i husdyrgjødsel ($p < 0,001$). I 2018 var gjennomsnittlig fosforopptak fra fiskeslamproduktene 13 ± 4 mg P/potte, mens gjennomsnittlig opptak fra husdyrgjødselproduktene var 19 ± 3 mg P/potte. Gjennomsnittlig fosforutnyttelse fra fiskeslamproduktene var 18 ± 2 %, mens gjennomsnittlig fosforutnyttelse fra husdyrgjødselproduktene var 30 ± 2 % (PUE 2018; Tabell 17).

Lav utnyttelse av fosfor i fiskeslamproduktene i gjødslingsåret 2018 ble ikke kompensert med høyere gjødseleffekt året etter. I ettervirkningsåret 2019 tok plantene i gjennomsnitt bare opp $3 \pm 0,9$ % av restfosforet etter gjødsling med fiskeslamprodukter (PUE 2019; Tabell 17). Til sammenligning tok plantene i gjennomsnitt opp $6 \pm 0,7$ % av restfosforet etter gjødsling med husdyrgjødselprodukter, signifikant mer enn etter gjødsling med fiskeslamprodukter.

Begge biokullproduktene, laget av henholdsvis grisejødsel og fiskeslam, var i gruppen som hadde signifikant lavere plantetilgjengelighet av fosforet enn mineralfosfor. Biokull, fiskeslam så ut til å ha en lavere fosforeffekt enn Biokull, grisejø., men forskjellen mellom de to biokullproduktene var ikke statistisk sikker. I ettervirkningsåret 2019 var fosforeffekten til biokull produktene lav eller ikke målbar (Tabell 17).

Struvitt viste god fosforeffekt i dette forsøket, og ga i 2018 nesten like høyt fosforopptak som kontrollen med full dose mineralfosfor. I ettervirkningsåret ga Struvitt det høyeste fosforopptaket i plantene sammenlignet med de andre gjødselbehandlingene, men effekten var ikke signifikant.



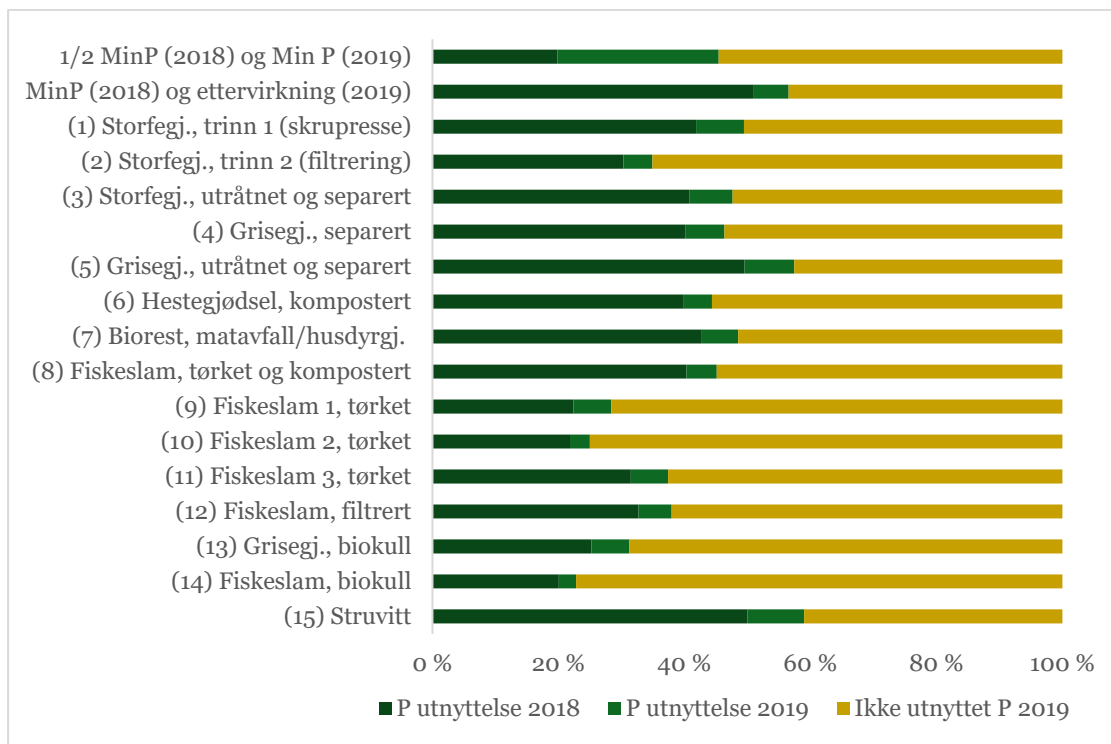
Figur 5. a. Fosforopptak fra 15 ulike organiske gjødselprodukter sammenlignet med opptak fra mineralfosfor (MinP) og ved ingen fosforgjødsling i sand/torv-jord i pottforsøket 2018 (n = 3); b. Etturvirkning av fosfor i gjødselproduktene sammenlignet med tilført mineralfosfor. Fosforopptak etter gjødsling med Storfegj., separert trinn 1 (produkt 1) er korrigert med hjelp av MFE (2018), ettervirkningseffekten er ikke inkludert i dataanalysen. Svarte søyler: kontrollbehandlinger, grønne søyler: husdyrgjødselprodukter, blå søyler: fiskeslamprodukter, brune søyler: biokull, gul søyle: struvitt.

Tabell 17. Mineralgjødselekvivalenter (MFE, %) beregnet for de organiske gjødselproduktene i 2018, og fosforutnyttelsesgrad (PUE, %) beregnet for 2018, 2019 og som sum for 2018 og 2019 (n=3). Kontrollbehandlingen MinP (2019) er ikke inkludert i den statistiske databehandlingen PUE (%) for 2019 og summen for 2018 og 2019.

Nr.	Behandling	MFE, %		PUE, %	
		2018	2018	2019	2018 og 2019
	1/2 MinP (2018) og MinP (2019)	-	36	-	-
	MinP (2018) og ettervirkning (2019)	-	39	5	42
1	Storfegj., separert trinn 1 (skruepresse)	90	35	10	40
2	Storfegj., separert trinn 2 (filtrering)	49	18	2	20
3	Storfegj., utrånnet og separert	76	29	6	33
4	Grisegj., separert	74	28	5	31
5	Grisegj., utrånnet og separert	98	38	9	43
6	Hestegj., kompostert	73	28	2	29
7	Biorest, matavfall/husdyrgj.	80	31	5	34
8	Fiskeslam, kompostert og tørket	74	29	3	30
9	Fiskeslam 1, tørket	28	11	4	13
10	Fiskeslam 2, tørket	27	10	0	10
11	Fiskeslam 3, tørket	52	20	4	22
12	Fiskeslam, filtrert	55	21	3	23
13	Grisegj., biokull	36	13	4	16
14	Fiskeslam, biokull	22	8	0	8
15	Struvitt	99	38	12	44
	SEM	9	4	2	4
	HSD	48	19	8	19

SEM står for «pooled standard error of the mean».

HSD står for «honestly significant difference» og viser resultatet av Tukey's test, en statistisk sammenligning av behandlingene med $p < 0,05$ etter enveis ANOVA. Bare forskjeller mellom behandlinger som er større enn HSD er statistisk sikre.



Figur 6. Fosforbalansene som effekt av gjødselbehandlingene: Fosforutnyttelse (førsteårseffekt i 2018 og ettervirkningseffekt i 2019) og ikke utnyttet fosfor tilført med gjødsel ved avsluttet forsøk, uttrykt som andel av fosfor tilført (%).

Plantene tok bare opp mellom 8 og 44 % av fosforet som ble tilført med de organiske gjødselproduktene eller mineralgjødsel i løpet av 2018 og 2019 (Tabell 17). Den største andelen av fosforet som ble utnyttet, ble tatt opp i løpet av det første året (2018). I ettervirkningsåret (2019) ble bare en liten andel av tilført fosfor tatt opp i plantene, selv om mye var igjen i jorden (Figur 6). Dette tyder på at gjødsel fosfor ble bundet i sand/torv-jorda og var mindre tilgjengelig i året etter gjødsling, enten det ble tilført med organisk gjødsel eller mineralgjødsel.

Tabell 18. pH og P-AL i sand/torv-blandingen målt på høsten 2019 før ettervirkningsforsøket (n = 3). P-AL etter gjødsling med Storfegj. separert trinn 1 (produkt 1) er ikke inkludert i den statistiske analysen.

Nr.	Behandling	pH	P-AL
			mg/100g
	Null P	6,0	1,1
	½ MinP	6,5	1,4
	MinP	6,2	1,4
1	Storfegj., separert trinn 1 (skruepresse)	6,7	(1,6)
2	Storfegj., separert trinn 2 (filtrering)	6,4	1,5
3	Storfegj., utråtnet og separert	6,4	1,4
4	Grisegj., separert	6,5	1,4
5	Grisegj., utråtnet og separert	6,3	1,4
6	Hestegj., kompostert	6,5	1,4
7	Biorest, matavfall/husdyrgj.	6,2	1,1
8	Fiskeslam, kompostert og tørket	6,4	1,7
9	Fiskeslam 1, tørket	6,3	1,6
10	Fiskeslam 2, tørket	6,4	1,5
11	Fiskeslam 3, tørket	6,2	1,4
12	Fiskeslam, filtrert	6,4	1,5
13	Grisegj., biokull	6,2	1,6
14	Fiskeslam, biokull	6,4	1,4
15	Struvitt	6,4	1,7
	SEM	0,1	0,1
	HSD	n.s.	0,6

SEM står for «pooled standard error of the mean». HSD står for «honestly significant difference» og viser resultatet av Tukey's test, en statistisk sammenligning av behandlingene med $p < 0,05$ etter enveis ANOVA. Bare forskjeller mellom behandlinger som er større enn HSD er statistisk sikre. n.s. = «not significant»

Jordprøvene som vi tok før ettervirkningsforsøket ble anlagt i 2019, viste at gjødselbehandlingene hadde ingen signifikant effekt på pH i vekstmediet, til tross for at sand/torv-blandingen var lite bufret (Tabell 18). Vi målte pH mellom 6,0 og 6,7. Jordens pH har stor betydning for plantetilgjengeligheten av fosfor: Løselighet av kalsiumfosfater øker med synkende pH, mens løselighet av aluminium- og jernbundet fosfor øker med økende pH. Ingen effekt av gjødselbehandlingene på jordens pH forenkler tolkningen av produktenes fosforeffekt.

P-AL-tallet, målt som estimat for den plantetilgjengelige fosforfraksjonen i pottene etter gjødslingen og vekstforsøket, var svært lavt for alle behandlingene. Signifikante forskjeller mellom behandlingene ble kun målt mellom produkt 8 (Fiskeslam, kompostert og tørket) (1,7 mg P-AL /100g jord) og det ugjødslete kontroll-leddet (Null P) og produkt 7 (Biorest, matavfall/husdyrgj.) (1,1 mg P-AL/100g jord for begge).

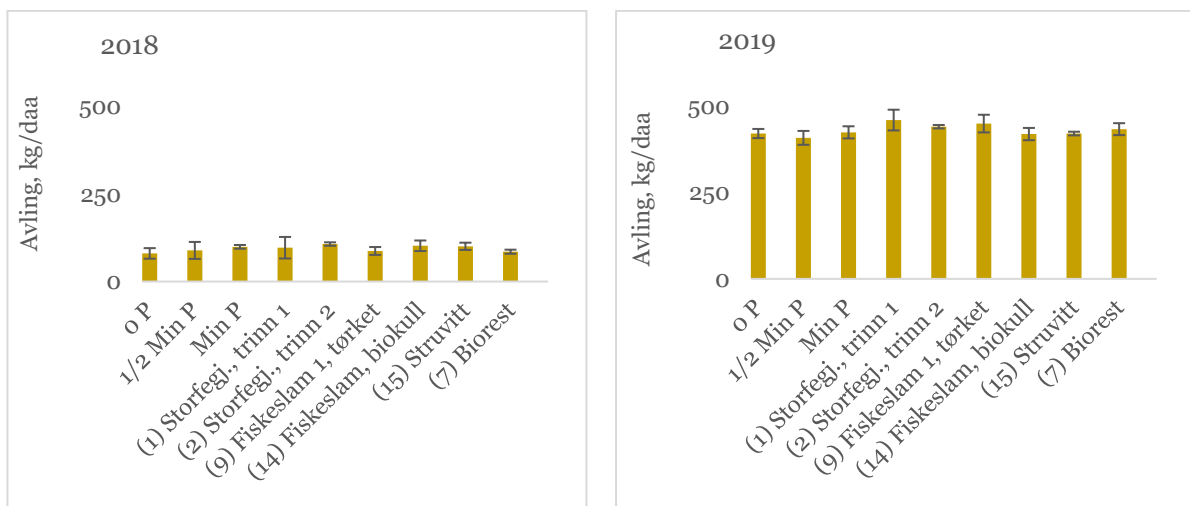
3.5 Plantetilgjengelighet av fosfor i feltforsøkene

3.5.1 2-årig feltforsøk på Øsaker (2018-2019)

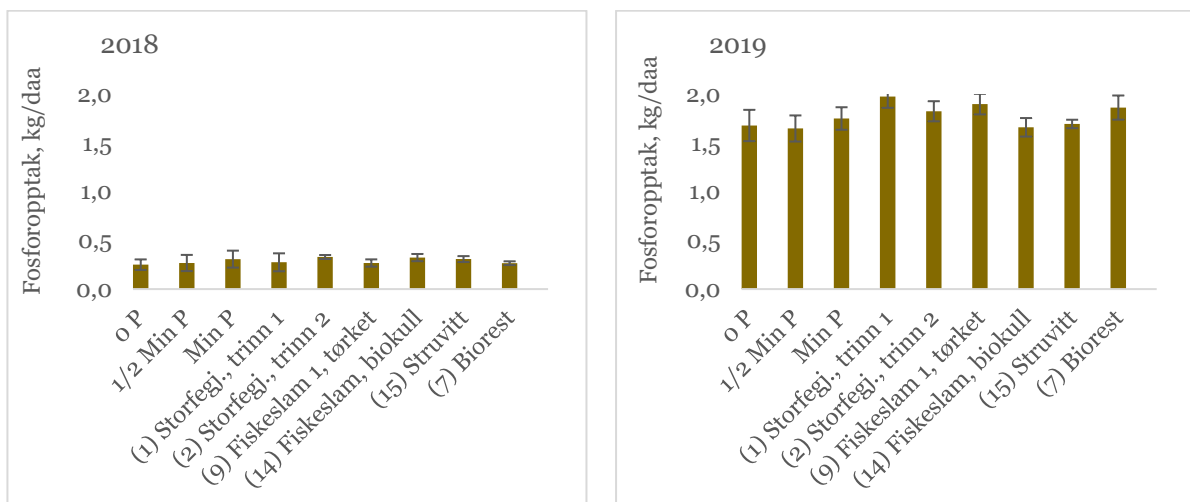
I feltforsøket på Øsaker undersøkte vi fosforeffekten til et utvalg av de organiske gjødselproduktene som vi hadde med i potteforsøket (produkt 1, 2, 9, 14, 15 og 7).

I 2018 ga feltforsøket svært lave avlinger på grunn av det uvanlig tørre og varme været (Figur 7). Kornavlingene var bare mellom 80 og 107 kg/dekar, og det var ingen signifikante avlingsforskjeller mellom gjødselbehandlingene. Året etter var kornavlingene høyere, mellom 409 og 461 kg/dekar, men det var ingen signifikante forskjeller mellom gjødselbehandlingene i 2019 heller.

I 2018 var også fosforopptaket i kornet lavt, rundt 0,3 kg fosfor/dekar, uten signifikante forskjeller mellom gjødselbehandlingene (Figur 8). Året etter var fosforopptaket i kornet høyere, mellom 1,7 og 1,9 kg fosfor/dekar, men fortsatt uten signifikante forskjeller mellom gjødselbehandlingene.



Figur 7. Kornavling (15 % vann) på Øsaker i 2018 og 2019. Feilfelt viser standardavvik (n = 3; i 2019 mangler ett gjentak av Null P, Storfegj., separert trinn 1 og Struvitt).



Figur 8. Fosforopptak i korn på Øsaker i 2018 og 2019. Feilfelt viser standardavvik (n = 3; i 2019 mangler ett gjentak av Null P, Storfegj. separert trinn 1 og Struvitt)

Tabell 19. Kornavling (15 % vann), proteininnhold i kornet og hektolitervekt på Øsaker i 2019

Behandling	Avling	Protein	Hektolitervekt
	kg/daa	%	kg/hL
0 P	422	11,4	73,6
1/2 Min P	409	11,2	74,6
Min P	425	11,1	74,0
1 Storfegj., separert trinn 1	461	11,2	73,6
2 Storfegj., separert trinn 2	442	11,5	74,2
9 Fiskeslam 1, tørket	451	11,7	74,2
14 Fiskeslam, biokull	420	10,8	74,0
15 Struvitt	422	11,7	73,9
7 Biorest	434	10,9	74,4
SEM	14	0,4	0,4
HSD	n.s.	n.s.	n.s.

SEM står for «pooled standard error of the mean».

HSD står for «honestly significant difference» og viser resultatet av Tukey's test, en statistisk sammenligning av behandlingene med $p < 0,05$ etter enveis ANOVA. Bare forskjeller mellom behandlinger som er større enn HSD er statistisk sikre.

n.s. = «not significant»

Tabell 19 viser avlingsparametere for 2019. Det var ingen signifikant effekt av gjødslingsbehandlingene på avling, proteininnhold i kornet eller hektolitervekt.

Tabell 20 viser resultatene for planteprovne som ble tatt i løpet av vekstsesongen ved ulike vekststadier i 2018 og 2019. I 2018 hadde gjødselbehandlingene ingen signifikant effekt på hverken fosforkonsentrasjon eller N/P forhold i planteprovne som ble tatt ved Zadoks 39 (rett før skyting). I 2019 ble planteprovne tatt ved Zadoks 37 (under strekking) og Zadoks 45 (begynnende skyting). Ved Zadoks 37 var fosforkonsentrasjonen i planteprovne signifikant høyere etter gjødsling med Fiskeslam 1, tørket (produkt 9) sammenlignet med plantene som ikke fikk fosforgjødsel eller Fiskeslam, biokull (produkt 14). N/P forholdet i planteprovne var ikke signifikant forskjellig mellom gjødselbehandlingene. Ved Zadoks 45 var fosforkonsentrasjonen gjennomsnittlig lavere enn i planteprovne som ble tatt ca. to uker før, og forskjellene mellom behandlingene var jevnet ut, slik at den statistiske testen ikke viste forskjeller mellom gjødselbehandlingene. N/P forhold i planteprovne var $< 7,2$ for alle behandlinger, noe som indikerer at planteveksten på dette stadiet var hovedsakelig styrt av nitrogentilgang (Liebisch et al. 2013).

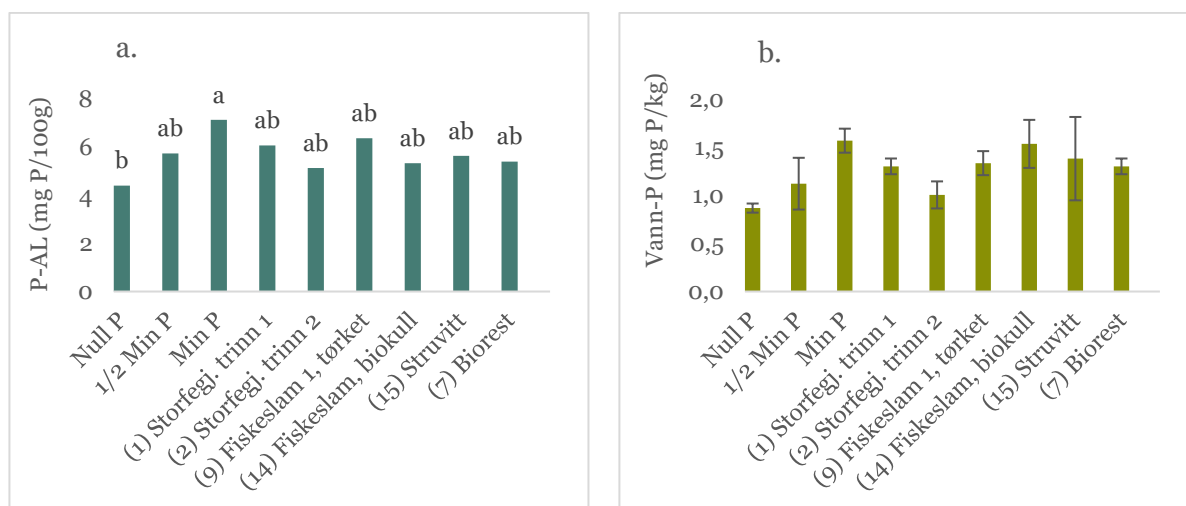
Tabell 20. Fosforkonsentrasjon (g/kg tørrstoff) og forhold mellom nitrogen- og fosforkonsentrasjon (N/P) i planteprøvene tatt ved ulike vekststadier (Zadoks) på Øsaker i 2018 og 2019 (n=3)

Behandling	- 2018 -		- 2019 -			
	Zadoks 39		Zadoks 37		Zadoks 45	
	P konsentrasjon	N/P	P konsentrasjon	N/P	P konsentrasjon	N/P
Null P	3,3	14,6	4,5	10,3	3,5	6,5
1/2 Min P	3,7	13,4	4,8	9,9	3,3	7,3
Min P	3,8	13,4	5,1	9,4	3,6	6,6
1 Storfegj., separert trinn 1	3,9	12,8	4,7	9,0	3,5	6,1
2 Storfegj., separert trinn 2	3,6	13,4	4,9	10,5	3,8	6,3
9 Fiskeslam 1, tørket	3,3	15,1	5,5	8,9	3,8	6,2
14 Fiskeslam, biokull	3,3	14,6	4,5	10,5	3,4	6,7
15 Struvitt	4,2	12,4	5,2	8,9	3,5	6,1
7 Biorest	3,6	13,5	5,1	8,9	3,8	6,4
SEM	0,2	0,6	0,2	0,7	0,2	0,6
HSD	n.s.	n.s.	0,8	n.s.	n.s.	n.s.

SEM står for «pooled standard error of the mean».

HSD står for «honestly significant difference» og viser resultatet av Tukey's test, en statistisk sammenligning av behandlingene med $p < 0,05$ etter enveis ANOVA. Bare forskjeller mellom behandlinger som er større enn HSD er statistisk sikre.

n.s. = «not significant»

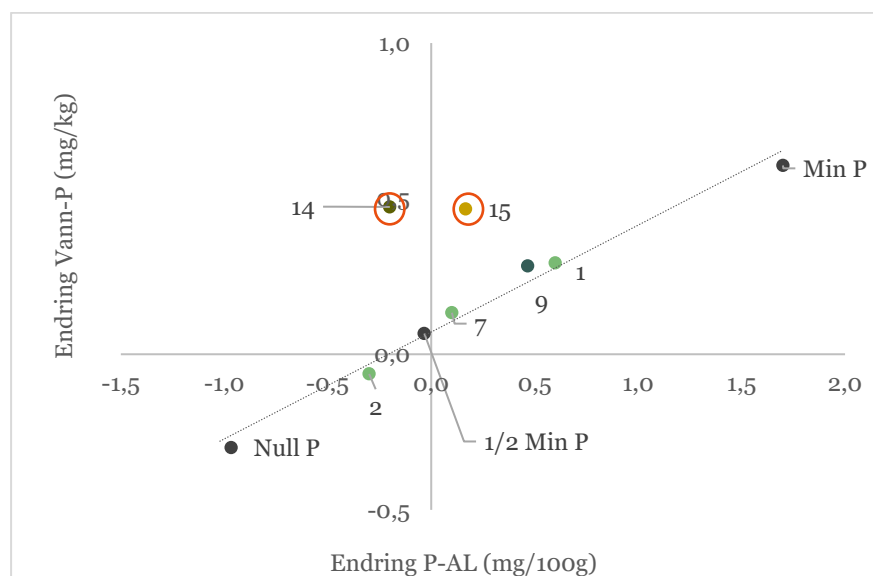


Etter to vekstsesonger med gjødsling i både 2018 og 2019, viste jordprøvene som ble tatt ut på høsten 2019, signifikante effekter av gjødselbehandlingene på fosforstatus i jorden (Figur 9a). P-AL-tallet var signifikant lavere på jorden til det ugjødslete kontroll-leddet (Null P) sammenlignet med rutene som hadde blitt gjødslet med 3 kg P/dekar som mineralgjødsel (MinP) to år på rad. Etter to år uten fosfortilførsel hadde Null P rutene gjennomsnittlig P-AL = 4,4 mg/100g, og fosforstatus ble klassifisert som lavt. Gjødsling med full mengde mineralgjødsel (MinP) derimot, økte fosforstatus gjennomsnittlig til P-AL = 7,1 mg/100g. Ingen av de organiske gjødselproduktene førte til en signifikant endring av fosforstatus i jord, og P-AL-klassen (middels/optimal) forble dermed uendret.

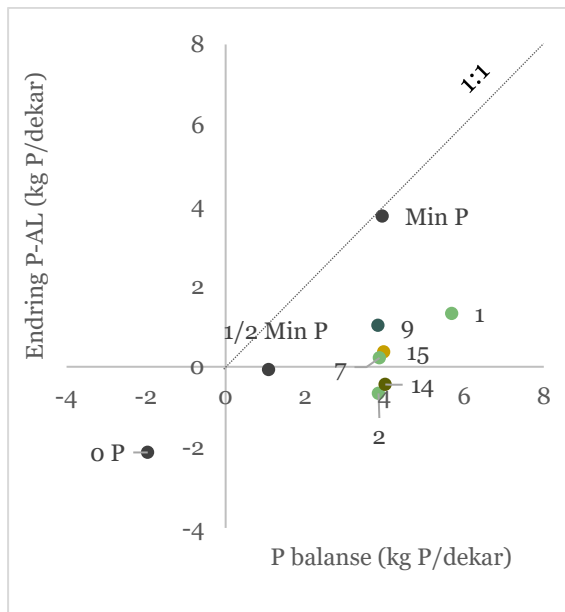
Figur 9b viser effekten av de ulike gjødselbehandlingene på vannløselig fosfor i jorden. Det var ingen signifikante forskjeller mellom behandlingenes effekt på vannløselig fosfor i jorden pga. stor variasjon mellom gjentakene. Likevel tyder også analysen av vannløselig fosfor i jorden på en effekt av fosforgjødsling generelt, og spesielt av mineralgjødsel.

Figur 10 viser endringen P-AL og i vannløselig fosfor som effekt av gjødselbehandlingene i løpet av de to vekstsesongene (fra vår 2018 til høst 2019). Det var nær sammenheng mellom endringen i P-AL og endringen i vannløselig fosfor unntatt for Biokull, fiskeslam (produkt 14) og Struvitt (produkt 15). Disse to produktene viste en større endring i vannløselig fosfor relativt til P-AL-endringen sammenlignet med de andre produktene. Dette var overraskende siden begge disse produktene hadde en lav andel vannløselig fosfor (Tabell 16).

Figur 11 viser sammenhengen mellom fosforbalansen (tilført fosfor minus fosfor fjernet i avling) over to vekstsesonger og endringen i P-AL, omregnet til kg P/dekar, i samme periode. Punktene som ligger under 1:1 linja hadde en mindre endring i P-AL enn overskuddet på fosforbalansen skulle tilsi. Det betyr at en andel av fosforoverskuddet var så sterkt bundet at det ikke ble ekstrahert i P-AL-analysen. Dette gjaldt for alle de organiske gjødselproduktene.



Figur 10. Sammenheng mellom endring i P-AL (mg/100g jord) og vannløselig P (Vann-P) (mg/kg jord) som effekt av gjødselbehandlingene i løpet av to vekstsesonger på øsaker (fra vår 2018 til høst 2019) (n=3). 1 = Storfegj., separert trinn 1, 2 = Storfegj., separert trinn 2, 7 = Biorest av matavfall/husdyrgj. 9 = Fiskeslam 1, tørket, 14 = Biokull, fiskeslam, 15 = Struvitt



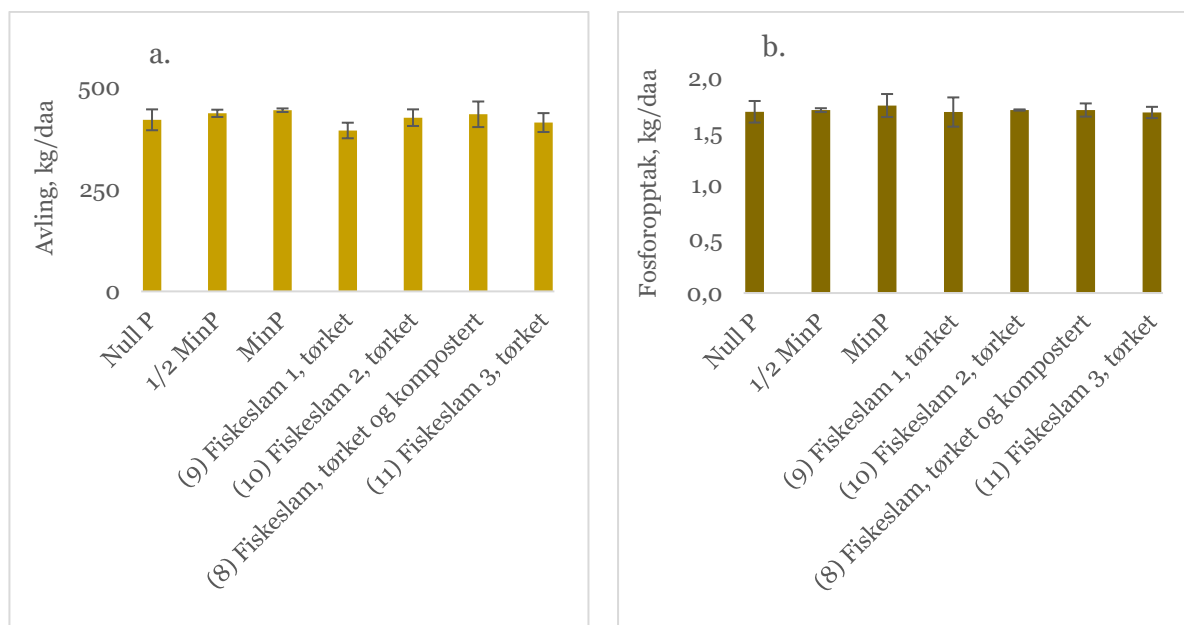
Figur 11. Sammenheng mellom P balanse (kg P/dekar) etter avsluttet forsøk (høst 2019) og endring i P-AL (kg P/dekar) som effekt av gjødselbehandlingene gjennom to vekstsesonger på Øsaker (fra vår 2018 til høst 2019) (n=3). 1 = Storfegj., separat trinn 1, 2 = Storfegj., separat trinn 2, 7 = Biorest matavfall/husdyrgj. 9 = Fiskeslam 1, tørket, 14 = Fiskeslam, biokull, 15 = Struvitt

3.5.2 1-årig feltforsøk på Sparbu (2018)

I feltforsøket på Sparbu undersøkte vi fosforeffekten til et utvalg av gjødselproduktene basert på fiskeslam (produkt 9, 10, 8 og 11).

Avlingsnivået var betydelig høyere på Sparbu sammenlignet med avlingsnivået på Øsaker det samme året (2018), mellom 393 kg/dekar og 443 kg/dekar uten signifikante forskjeller mellom gjødselbehandlingene (Figur 7; Figur 12a). Også fosforopptaket var høyere på Sparbu sammenlignet med Øsaker, rundt 1,7 kg P/dekar, uten signifikante forskjeller mellom behandlingene (Figur 8; Figur 12b).

Tabell 21 viser resultatene fra planteprovne som ble tatt ved Zadoks 31 (begynnende strekking) og Zadoks 57 (under skyting). Fosforkonsentrasjonen i planteprovne fra Sparbu (rundt 2,5 g P/kg tørrstoff) var jevnt over lavere sammenlignet med fosforkonsentrasjonene i planteprovne fra Øsaker begge år (3,3-5,1 g P/kg tørrstoff; Tabell 20). Heller ikke på Sparbu hadde gjødselbehandlingene en signifikant effekt på fosforkonsentrasjonen i plantematerialet ved noe tidspunkt. Det var heller ingen signifikant effekt på N/P forholdet som var betydelig høyere ved Zadoks 31 sammenlignet med Zadoks 57, og sammenlignet med Øsaker.



Figur 12. a. Kornavling (15 % vann) og b. fosforopptak i korn på Sparbu i 2018. Feilfelt viser standardavvik (n=3)

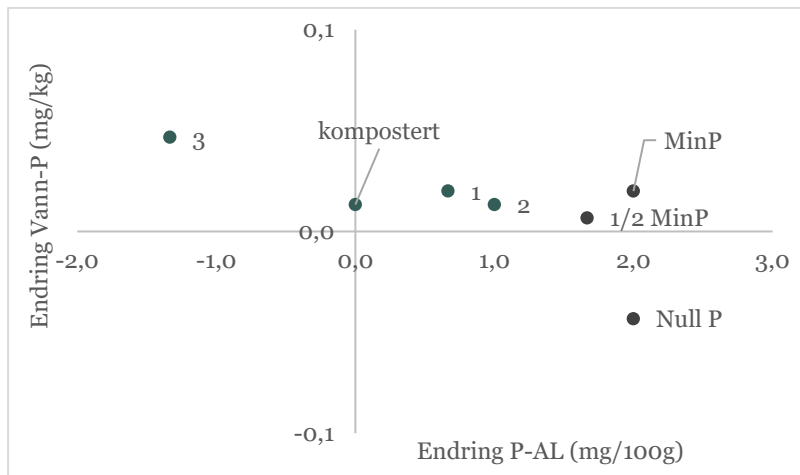
Tabell 21. Fosforkonsentrasjon (g/kg tørrstoff) og forhold mellom nitrogen- og fosforkonsentrasjon (N/P) i planteprøvene tatt ved ulike vekststadier på Sparbu i 2018 (n=3)

Behandling	Zadoks 31		Zadoks 57	
	P konsentrasjon	N/P	P konsentrasjon	N/P
Null P	2,2	23,9	2,6	10,1
1/2 MinP	2,5	20,6	2,4	10,1
MinP	2,5	20,0	2,4	10,0
9 Fiskeslam 1, tørket	2,2	25,0	2,5	10,4
10 Fiskeslam 2, tørket	2,3	24,1	2,6	9,7
8 Fiskeslam, kompostert og tørket	2,3	21,3	2,5	10,2
11 Fiskeslam 3, tørket	2,2	24,5	2,8	9,9
SEM	0,1	1,7	0,1	0,6
HSD	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

SEM står for «pooled standard error of the mean».

HSD står for «honestly significant difference» og viser resultatet av Tukey's test, en statistisk sammenligning av behandlingene med $p < 0,05$ etter enveis ANOVA. Bare forskjeller mellom behandlinger som er større enn HSD er statistisk sikre.

n.s. = «not significant»



Figur 13. Endring i P-AL (mg/100g jord) og vannløselig fosfor (Vann-P) (mg/kg jord) som effekt av gjødselbehandlingene på Sparbu (fra vår 2018 til høst 2018) (n=3). 1 = Fiskeslam 1, tørket, 2 = Fiskeslam 2, tørket, kompostert = Fiskeslam, kompostert og tørket, 3 = Fiskeslam 3, tørket

Figur 13 viser endringen i P-AL og vannløselig fosfor som effekt av gjødselbehandlingene i løpet av vekstsesongen på Sparbu (vår 2018 til høst 2018). I motsetning til Øsaker-feltet var det ingen sammenheng mellom endringen i P-AL og endringen i vannløselig fosfor på Sparbu-feltet. Det er ingen signifikant forskjell mellom behandlingene og deres effekt på endring av vannløselig fosfor eller P-AL, og det var heller ingen signifikant effekt av gjødselbehandlingene på vannløselig fosfor eller P-AL sammenlignet med det ugjødslete kontroll-leddet Null P (ikke vist).

Kommentar

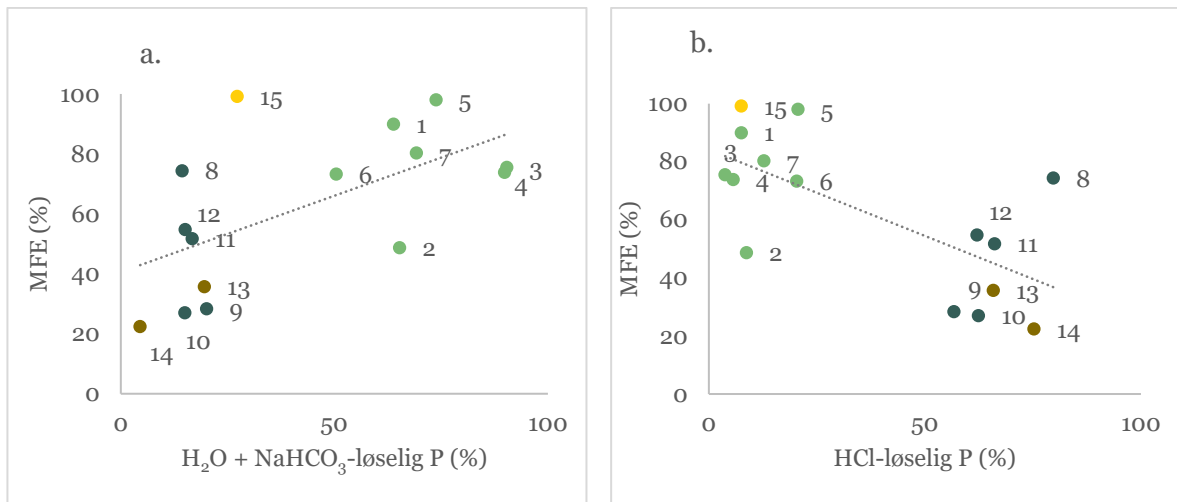
Forsøksfeltet på Sparbu hadde i utgangspunktet et P-AL-tall (11-17 mg P-AL/100g) som var for høyt til at en kunne forvente tydelige effekter av gjødselbehandlingene på fosforopptak. For jord i fosforklasse høyt (10-14 mg P-AL/100g) og meget høyt (> 14 mg P/100g) er det anbefalt å redusere fosforgjødsling til korn delvis eller helt, fordi jorda bidrar med mye fosfor. For å lykkes med fosforforsøk vil det være avgjørende at forsøket plasseres på jord der en kan forvente at plantene responderer på fosforgjødsling (P-AL < 5-7). Resultatene fra feltforsøket vårt på Sparbu bekrefter dette.

3.6 Estimering av fosforeffekten til gjødselproduktene

Resultatene fra vekstforsøkene som er beskrevet ovenfor, viser at fosforeffekten til organiske gjødselprodukter kan variere betydelig. For å lykkes med å bruke organiske gjødselprodukter i praksis, vil det derfor være avgjørende å kjenne til fosforeffekten sammenlignet med mineralgjødsel, og dosere gjødselproduktet deretter.

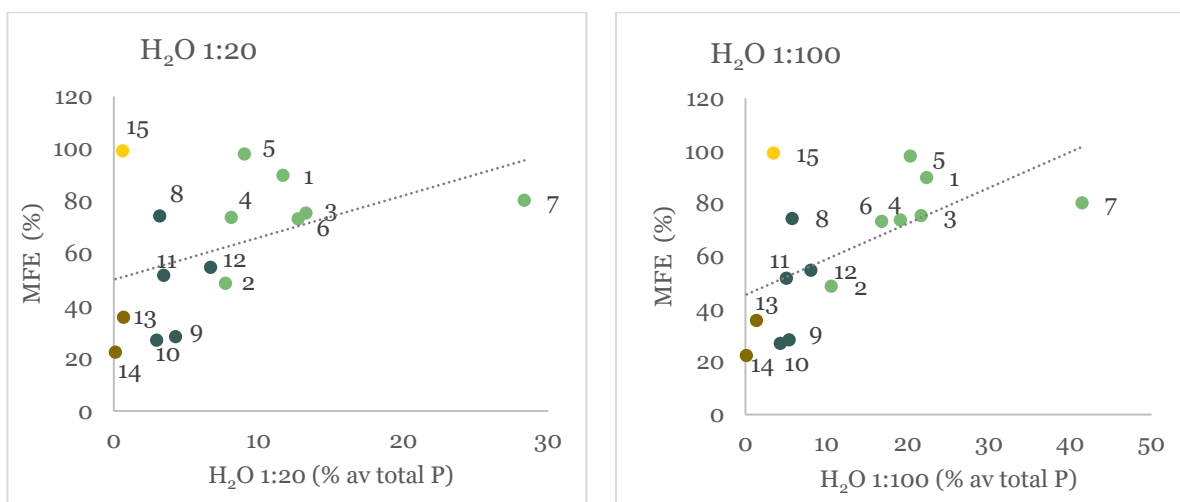
Standardiserte og systematiske vekstforsøk er den beste måten for å teste fosforeffekten til nye produkter, men er tidkrevende i gjennomføringen og kostbare. Et av formålene med forsøkene som vi har gjennomført har derfor vært å finne enkle analysemetoder som kan brukes til å beskrive fosforeffekten til organiske gjødselprodukter, og som kan erstatte vekstforsøk.

Under beskriver vi sammenhengen mellom fosforkvaliteten i gjødselproduktene målt ved ulike ekstraksjonsmetoder (kapitel 2.2) og den relative gjødseffekten sammenlignet med mineralgjødsel (mineralgjødselekvivalenter, MFE som vist i Tabell 17). Det er bare resultatene fra veksthusforsøket (2.3.1 Førsteårseffekt) vi inkluderer i denne sammenligningen.

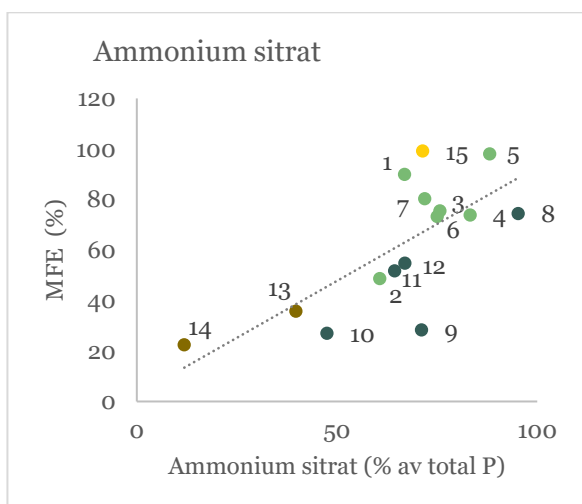
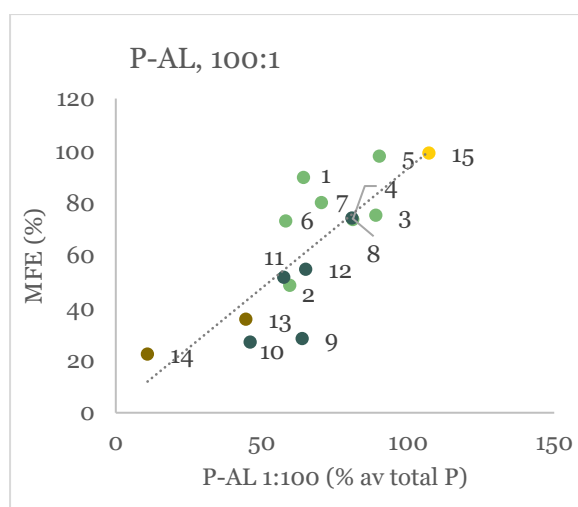
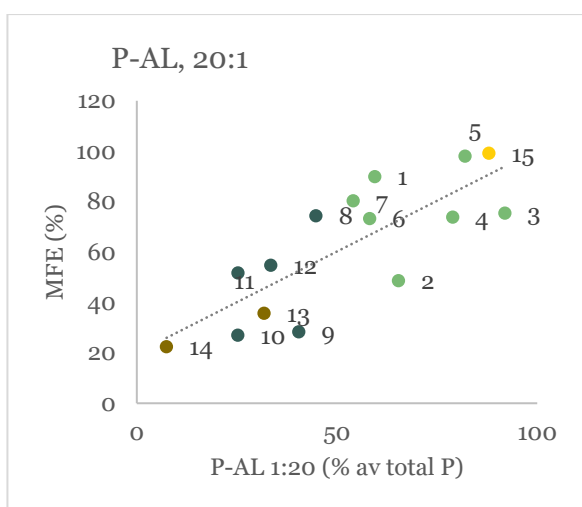
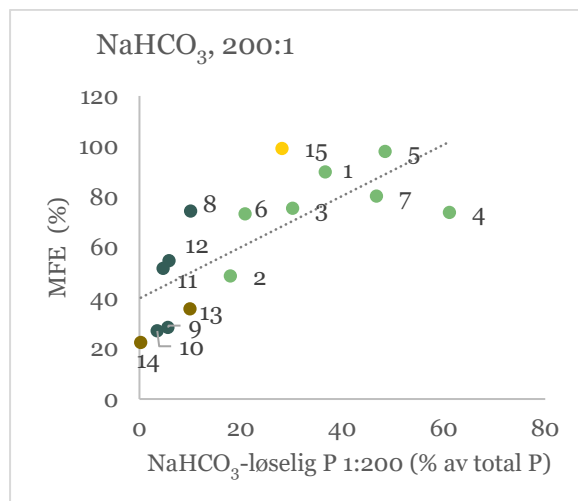
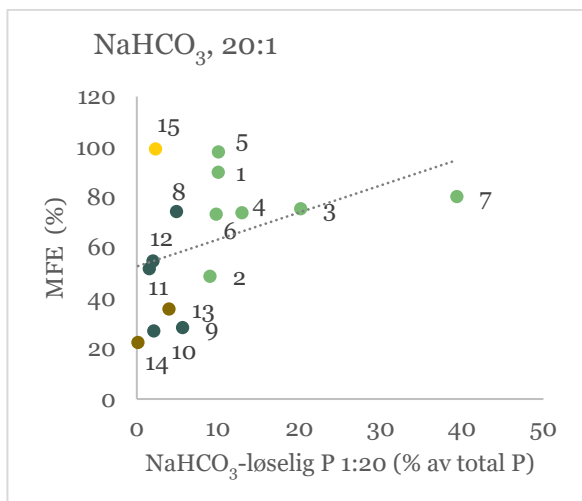


Figur 14. Sammenheng mellom relativ gjødseleffekt (MFE %, mineralgjødselekvivalent; gjennomsnitt av n=3) og fosfor som ble ekstrahert med a. H₂O og NaHCO₃ eller b. HCl under fosforfraksjoneringen som andel av totalfosfor ekstrahert under fraksjoneringen (gjennomsnitt av n=3). Tallene viser til de 15 gjødselproduktene, se Tabell 1 for forklaring; grønne punkter: produkter basert på husdyrgjødsel, blå punkter: produkter basert på fiskeslam, brune punkter: biokull og gult punkt: struvitt.

Fosforeffekten til gjødselproduktene kunne i noe grad bli forklart av fosforforbindelsene i produktene, estimert ved hjelp av den kjemiske fosforfraksjoneringen (kapitel 2.2.2). Figur 14a viser en signifikant og positiv sammenheng mellom lettløselige fosforforbindelser i produktene (summen av H₂O + NaHCO₃-løselig P) og fosforeffekten (Tabell 17). Sammenhengen ble bedre ved å ikke inkludere Struvitt i den lineære regresjonen, fordi fosfor i struvitt er lite løselig i svake ekstraksjonsløsninger, mens fosforeffekten i vekstforsøket vårt var likevel god. Figur 14b viser en signifikant og negativ sammenheng mellom tungt løselige kalsiumfosfater og organiske fosforforbindelser i produktene (HCl-løselig P) og fosforeffekten. Det var ingen signifikant sammenheng mellom NaOH-løselig fosfor og fosforeffekten.



Figuren fortsetter på neste side



Figur 15. Sammenheng mellom fosforeffekten i veksthusforsøket (mineralgjødselekvivalent, MFE %, gjennomsnitt av n=3) og andelen fosfor i ulike gjødselprodukter som er ekstraherbar med utvalgte ekstraksjonsmetoder (gjennomsnitt av n=2). Se Tabell 1 for forklaring av tallene; grønne punkter: husdyrgjødselprodukter, blå punkter: fiskeslamprodukter, brune punkter: biokull og gult punkt: struvitt.

Tabell 22. Resultater fra enkle lineære regresjoner med Y = relativ gjødseffekt i 2018 (MFE %, n=3) og X = andelen fosfor som ble ekstrahert i ulike steg av fosforfraksjoneringen eller med enkeltekstraksjoner (gjennomsnitt av n = 2). Resultatene vises for n = 15 (med Struvitt) og n = 14 (uten Struvitt).

	n = 15 (med Struvitt)			n = 14 (uten Struvitt)		
	Ligning	R ²	p-verdi	Ligning	R ²	p-verdi
Hedley fraksjonering						
H ₂ O + NaHCO ₃ -løselig P	y = 0,5x + 41	0,28	***	y = 0,6x + 35	0,42	***
NaOH-løselig P	y = 56x + 0,6	0,12	*	y = 58x + 0,3	0,00	n.s.
HCl-løselig P	y = -0,6x + 84	0,36	***	y = -0,5x + 80	0,34	***
Enkeltekstraksjoner						
H ₂ O, 20:1	y = 1,6x + 50	0,16	***	y = 2,1x + 42	0,32	***
H ₂ O, 100:1	y = 1,4x + 45	0,27	***	y = 1,6x + 38	0,46	***
NaHCO ₃ , 20:1	y = 1,1x + 53	0,13	*	y = 1,3x + 47	0,23	**
NaHCO ₃ , 200:1	y = 1,0x + 40	0,44	***	y = 1,0x + 38	0,49	***
P-AL, 20:1	y = 0,8x + 20	0,49	***	y = 0,8x + 22	0,46	***
P-AL, 100:1	y = 0,9x + 2	0,51	***	y = 0,9x + 2	0,48	***
Ammoniumsitratt	y = 0,9x + 3	0,40	***	y = 0,9x + 2	0,46	***

*, **, *** viser signifikans ved sannsynlighetsnivåene p < 0,05, 0,01 og 0,001

Det var en signifikant positiv sammenheng mellom andelen fosfor som ble ekstrahert for alle enkeltekstraksjoner og den relative førsteårseffekten (Tabell 22; Figur 15).

Modifisert bikarbonatekstraksjon (væske:prøve forhold 200:1) kom bedre ut enn vanlig Olsen P (væske:prøve forhold 20:1), og forklarte 44 % av variasjonen i fosforeffekten mellom gjødselproduktene. Vanlig Olsen P forklarte bare 13 % av variasjonen. Regresjonskoeffisienten (R²) økte for begge bikarbonatekstraksjonene (NaHCO₃, væske:prøve forhold 20:1 og 200:1) når Struvitt ikke ble tatt med i den lineære regresjonsanalysen.

Også ekstraksjon med vann kom relativt godt ut når Struvitt ikke ble tatt med i regresjonsanalysen. Som for ekstraksjonen med bikarbonat, økte også regresjonskoeffisienten for ekstraksjon med vann når væske:prøve forholdet ble økt fra 20:1 til 100:1. Ekstraksjon med vann forklarte 32 % (væske:prøve forhold 20:1) og 46 % (væske:prøve forhold 100:1) av variasjonen i fosforeffekten mellom gjødselproduktene.

Også P-AL (væske:prøve forhold 20:1) og modifisert P-AL (væske:prøve forhold 200:1) kom godt ut, og forklarte cirka 50 % av variasjonen i fosforeffekten mellom gjødselproduktene, uansett om Struvitt ble tatt med i regresjonen eller ikke. Ekstraksjon med ammoniumsitratt forklarte mellom 40 og 50 % av variasjonen i fosforeffekten.

3.7 Metaanalyse: Sammenheng mellom bikarbonatløselig fosfor og fosforeffekt

Også metaanalysen viste en signifikant positiv sammenheng mellom andelen NaHCO_3 -løselig fosfor i organiske gjødselprodukter og fosforeffekten; ca. 60 % av variasjonen i den relative fosforeffekten mellom gjødselprodukter kunne bli forklart med andelen NaHCO_3 -løselig fosfor av totalfosfor (væske:prøve forhold 200:1) (Figur 16).

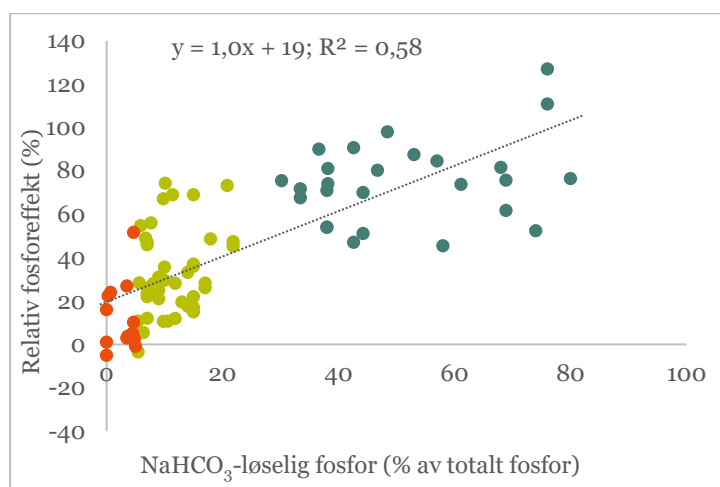
Metaanalysen inkluderte resultater fra forsøk med 82 forskjellige avfallsprodukter (n), til sammen 112 observasjoner. Blant disse fant vi tre produktgrupper hvor den relative fosforeffekten hadde dårlig sammenheng med NaHCO_3 -løselig fosfor:

- struvitt (n = 2, fire observasjoner)
- termisk behandlet avløps slam (n = 10, 10 observasjoner)
- kalkete produkter (n = 10, 14 observasjoner)

De to struvittproduktene viste like høy fosforeffekt som mineralfosfor i fire forsøk, selv om løseligheten av fosfor i bikarbonat bare var 25 og 28 % av totalfosfor (Christiansen et al. 2020; Tabell 16 i denne rapporten).

Fosforeffekten til termisk behandlet avløps slam varierte kraftig, mellom ca. 25 og 75 % av effekten til mineralfosfor, men var bedre enn den kjemiske ekstraksjonen i bikarbonat skulle tilsi i alle forsøk: Bare mellom 0-1 % av totalfosfor i produktene var løselig i bikarbonat (Lemming et al. 2017a; upubliserte data fra Dorette Müller-Stöver).

Fosforeffekten til kalkete gjødselprodukter varierte også kraftig, mellom 10 og 90 % av effekten til mineralfosfor, men uavhengig av andelen NaHCO_3 -løselig fosfor (Alvarenga et al. 2017; Christiansen et al. 2020; Øgaard og Brød 2016). Fosforeffekten til kalkete produkter varierte også for det samme produktet, for eksempel et kommersielt jordforbedringsprodukt (Novogro) viste en fosforeffekt varierende fra 30 til 90 % sammenlignet med mineralfosfor i forsøk med tre forskjellige jordtyper (pH 5,2-5,3) (Christiansen et al. 2020). Novogro er basert på kalkstabilisert slam etter produksjon av industrielle enzymer, med pH 12,4.



Figur 16. Sammenhengen mellom andelen fosfor i ulike gjødselprodukter som var ekstraherbar med bikarbonat (NaHCO_3) (væske:prøve forhold 200:1) og relativ fosforeffekt (% av gjødseffekten til MinP). 83 datapunkter fra egne forsøk, og forskningsresultater fra Aarhus Universitet og Københavns Universitet. Fargene representerer tre produktkategorier: Rød = lav (0-5 %), lysgrønn = medium (5-30 %) og blå = høy (> 30 %) løselighet av fosfor i NaHCO_3 .

4 Diskusjon

4.1 Organiske gjødselprodukter og fosforkvalitet

Det er stor variasjon i potensialet til organiske gjødselprodukter til å erstatte mineralfosfor i jordbruket. Variasjonen omfatter både fosforkvaliteten sammenlignet med mineralfosfor, innholdet av miljøgifter og næringsstoffsammensetningen i forhold til plantenes behov. Undersøkelsene våre – sammen med en rekke tidligere, både norske og internasjonale, tilsvarende forsøk – gir likevel mulighet til å definere kategorier for organiske gjødselprodukter med lignende egenskaper og fosforkvalitet. Innenfor kategoriene vil det være enklere å estimere fosforeffekten til organiske gjødselprodukter sammenlignet med mineralfosfor enn når alle organiske gjødselprodukter ses under ett.

4.1.1 Produkter basert på husdyrgjødsel

Fosforeffekten til ubehandlet husdyrgjødsel fra storfe og svin er vanligvis tilnærmet lik fosforeffekten til mineralgjødsel (Kratz et al. 2019). Resultatene våre tyder på at mekanisk separering ikke har en negativ effekt på den gode fosforeffekten til husdyrgjødsel fra storfe og svin. Seks av de syv gjødselproduktene basert på husdyrgjødsel hadde like god fosforeffekt til bygg som mineralfosfor (Tabell 17). Gode fosforeffekter i vekstforsøk var i samsvar med fosforforbindelsene i produktene; den kjemiske fraksjoneringen viste at fosfor for det meste forelå i uorganisk, løst bundet og lett tilgjengelig form (Tabell 15). Lignende resultater har tidligere blitt presentert av Christel et al. (2016) som observerte at gjødselprodukter basert på svinegjødsel produsert ved ulike separeringsteknologier økte fosfortilgjengeligheten i inkubert jord tilnærmet like mye som mineralfosfor.

Resultatene til Christel et al. (2016) tydet for øvrig på at mekanisk separering med dekantercentrifuge økte konsentrasjonen av tilgjengelig fosfor i jorden i større grad enn separering med skruepresse. Forfatterne forklarte effekten med at en større andel med mindre partikler vil samles i den faste fraksjonen etter avvanning med dekantercentrifuge sammenlignet med skruepresse. Fosfor i husdyrgjødsel er hovedsakelig bundet til mindre partikler som i en skruepresse vil følge den flytende fraksjonen. Fosfor i den faste fraksjonen etter separering med skruepresse vil derfor finnes i større partikler hvor det er mindre løselig, sammenlignet med dekantercentrifuge som vil samle både mindre og større partikler i den faste fraksjonen. Vårt forsøk gir ikke grunnlag for å sammenligne effekten av ulike separeringsteknologier på fosforkvaliteten i sluttproduktet. Likevel tyder også våre resultater på at grisejødsel separert ved dekantering (produkt 5) økte fosforopptak i plantene mer enn de andre produktene basert på husdyrgjødsel (Figur 5). Produkt 5 var det eneste som ble avvannet ved dekantering, mens alle andre produkter basert på husdyrgjødsel ble avvannet med skruepresse.

4.1.2 Produkter basert på fiskeslam

Våre forsøk viser at mye av fosforet i produkter basert på fiskeslam er i en form som ikke er direkte tilgjengelig for plantene. I veksthusforsøket var den gjennomsnittlige fosforeffekten til produkter basert på fiskeslam lavere enn fosforeffekten til både mineralfosfor og produkter basert på husdyrgjødsel (Figur 5a), og dette ble ikke kompensert med høyere fosfortilgjengelighet under ettervirkningsforsøket (Figur 5b).

Den lave fosforeffekten til produktene basert på fiskeslam i veksthusforsøket kan forklares med at fosfor hovedsakelig forelå som tungt løselige kalsiumfosfater (Tabell 15). Dette er i samsvar med en tidligere undersøkelse der vi brukte XRD til å identifisere det stabile kalsiumfosfatet apatitt i tørket fiskeslam, og ^{31}P -fast fase NMR bekreftet funnene (Brod et al. 2015a).

Bare mellom 2 og 25 % av totalfosfor i produktene basert på fiskeslam forelå som organisk fosfor, men det meste av dette var å finne i HCl-fraksjonen fra fosforfraksjoneringen. Også i våre tidligere studier fant vi en stor andel av organiske fosforforbindelser i HCl-fraksjonen etter ekstraksjon av hønsegjødsel eller fiskeslam (Brod et al. 2015a). Dette er overraskende, da det vanligvis blir antatt at tungt løselige organiske fosforforbindelser blir løst ut i NaOH-ekstraksjonen, og at HCl-ekstraktet bare inneholder uorganisk fosfor (Hedley et al. 1982). I samsvar med resultatene våre viste He et al. (2006) at HCl-fraksjonen etter fraksjonering av fjørfegjødsel og svinegjødsel kan inneholde organisk fosfor.

Fiskeslam består av faeces og fôrrester. I en undersøkelse utgjorde fôrrester i gjennomsnitt 50 % av fiskeslammet, men variasjonen var stor (Aas et al. 2016). Fôrrestene inneholder en del fosfor. Fiskeslam har dermed to ulike fosforkilder, i motsetning til husdyrgjødsel hvor det meste av fosforet stammer fra faeces. Dette reiser spørsmål om det er fosforet i fôrrestene som bidrar til en gjennomsnittlig lavere plantetilgjengelighet av fosfor i fiskeslamprodukter sammenlignet med husdyrgjødselprodukter. Dette har vi foreløpig ikke et sikkert svar på.

4.1.3 Biokull

Begge biokullproduktene, laget gjennom pyrolyse av henholdsvis avvannet fiskeslam og grisejødsel, hadde signifikant lavere fosforeffekt enn mineralfosfor (Figur 5a). Heller ikke for biokullproduktene ble den lave fosforeffekten kompensert med høyere fosfortilgjengelighet under ettervirkningsforsøket (Figur 5b). Termisk behandling av organiske avfallsressurser med pyrolyse, forbrenning eller gassifisering er kjent for å redusere fosfortilgjengeligheten i sluttproduktet kraftig sammenlignet med utgangsproduktet, og den reduserende effekten øker med stigende prosessstemperatur (Christel et al. 2014; 2016).

Den lave fosforeffekten til biokullproduktene i veksthusforsøket kan forklares med at det meste av fosforet forelå som uorganiske, stabile fosforforbindelser (Tabell 15). Våre resultater er i samsvar med undersøkelsene til Bruun et al. (2017), som viste med hjelp av ikke-destruktive karakteriseringsmetoder at pyrolyseprosessen omdanner enkle fosfatforbindelser i husdyrgjødsel til stabile kalsiumfosfater som apatitt, og at også stabiliteten til fosforforbindelsene i biokull øker med stigende prosessstemperatur.

Det var en tendens (ikke signifikant) til at fosforeffekten til Biokull, fiskeslam var lavere enn effekten til Biokull, grisejø., til tross for noe lavere pyrolysetemperatur for fiskeslammet enn for grisejødselen (Tabell 1). Uansett viser resultatene våre at produksjon av biokull vil ytterligere redusere kvaliteten til fiskeslam som fosforgjødsel. Dette er et dilemma med tanke på at biokull har betydelig potensial til langtidslagring av karbon i jord og samtidig å kutte klimagassutslipp (Atkinson et al. 2010).

4.1.4 Struvitt

Struvitt hadde i veksthusforsøket like god fosforeffekt som mineralfosfor (Figur 5), til tross for lav løselighet av struvitt-fosfor i vann og bikarbonat (Tabell 16). I samsvar med våre resultater, fant Rittl et al. (2019) i et feltforsøk på Tingvoll at det samme struvittproduktet økte fosforinnholdet i graset, og P-AL-nivået i jorden. Også et annet potteforsøk med sand som vekstmedium viste at dette struvittproduktet kan frigjøre fosfor raskt til krypkvein og raigras (Hesselsøe et al. 2020). Utenlandske forsøk med andre struvittprodukter har vist varierende plantetilgjengelighet av fosforet (Kratz et al. 2019). Dette kan skyldes faktorer som partikkelstørrelse, renhet av struvittmineralet, jordas pH og planteart som ble brukt i forsøket (Degryse et al. 2017; Möller et al. 2018; Talboys et al. 2016).

Flere utenlandske studier har vist at struvitt fungerer best som langtidsvirkende gjødsel (e.g. Talboys et al. 2016). I vårt forsøk viste struvitt en tendens til høyere fosforopptak i ettervirkningsåret, men effekten var ikke signifikant.

4.2 Estimering av fosforeffekten til nye produkter

Den beste metoden for å klarlegge fosforkvaliteten i organiske gjødselprodukter med ukjent fosforeffekt, er å måle fosforopptak i planter etter gjødsling i potte- eller feltforsøk (Kratz et al. 2019). I praktiske sammenhenger, for eksempel under gjødslingsplanlegging med nye produkter, hadde det likevel vært fordelaktig om tidkrevende og kostbare vekstforsøk kunne bli erstattet med enklere metoder, for eksempel om fosforeffekten kunne bli estimert med hjelp av kjemisk ekstraksjon.

Våre tidligere forsøk tydet på at Olsen P (ekstraksjon med bikarbonat, med væske:prøve forhold 20:1) er en praktisk og god metode for å beskrive fosforkvaliteten i organiske gjødselprodukter (Haraldsen et al. 2017). Denne gangen kom modifisert ekstraksjon med bikarbonat (væske:prøve forhold 200:1) bedre ut enn vanlig Olsen P. Olsen P brukes som standardmetode for å estimere plantetilgjengelig fosfor i jord i en rekke land, for eksempel Danmark. Når et mer næringsrikt produkt enn jord skal ekstraheres, kan det være fornuftig å øke væske:prøve forholdet i ekstraksjonen. I forsøket vårt økte mengden ekstrahert fosfor med økende volum av ekstraksjonsløsningen, spesielt for produkter basert på husdyrgjødsel (Tabell 16). Dette samsvarer med at husdyrgjødselproduktene også hadde en bedre fosforeffekt i vekstforsøket enn fiskeslam- eller biokullprodukter (Figur 5). Denne effekten forklarer at ekstraksjon med modifisert bikarbonat (væske:prøve forhold 200:1) i dette forsøket viste bedre sammenheng med fosforeffekten enn standard Olsen P.

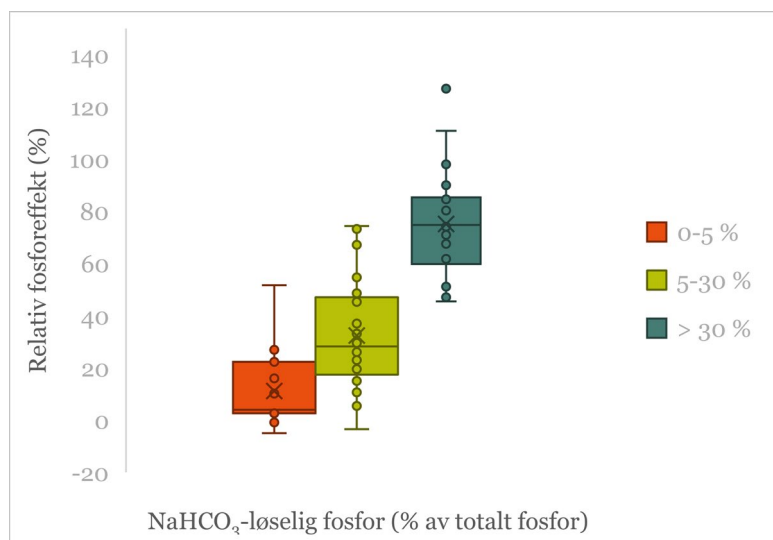
Metaanalysen som inkluderte resultater fra mange forsøk i tillegg til resultatene som er presentert i denne rapporten, bekreftet en signifikant sammenheng mellom andelen NaHCO_3 -løselig fosfor (væske:prøve forhold ca. 200:1) og fosforeffekten til organiske gjødselprodukter (Figur 16).

Resultatene viser at andelen NaHCO_3 -løselig fosfor i et organisk gjødselprodukt kan brukes som indikator for fosforkvaliteten for en rekke produkttyper. Vi foreslår i samsvar med Christiansen et al. (2020), tre kategorier for å beskrive fosforkvaliteten i organiske gjødselprodukter basert på løseligheten av fosfor i bikarbonat (Figur 17) som:

- Lav, hvis andelen NaHCO_3 -løselig fosfor er < 5 % av totalfosfor
- medium, hvis andelen NaHCO_3 -løselig fosfor er 5-30 % av totalfosfor
- høy, hvis andelen NaHCO_3 -løselig fosfor er > 30 % av totalfosfor

I datasettet vårt hadde disse tre produktkategoriene signifikant forskjellig relativ fosforeffekt ifølge enveis ANOVA etterfulgt av Tukey's test ($p < 0,05$) (Figur 17). Tabell 24 viser forventet relativ fosforeffekt i de enkelte produktkategoriene.

Selv om andelen NaHCO_3 -løselig fosfor i organiske gjødselprodukter viste statistisk signifikant sammenheng med fosforeffekten, kan ikke metoden brukes til nøyaktig predikering av fosforeffekten til produkter med ukjent fosforeffekt. Tre kategorier gir en ganske grov inndeling, og det er delvis stor variasjon i fosforeffekten, selv for organiske gjødselprodukter med lik andel NaHCO_3 -løselig fosfor. I arbeidet fremover, vil vi undersøke om predikering av fosforeffekten til organiske gjødselprodukter kan optimaliseres; for eksempel vil vi forsøke å definere produktgrupper og finne tilhørende analysemetode som gir en mer presis bestemmelse av fosforeffekten innen produktgruppen.



Figur 17. Relativ fosforeffekt (MFE %) som effekt av andelen NaHCO_3 -løselig fosfor (% av totalt fosfor) i det organiske gjødselproduktet for tre produktkategorier: Rød = lav (0-5 %), lysgrønn = medium (5-30 %) og blå = høy (> 30 %) løselighet av fosfor i bikarbonat. Boksplott-diagrammet viser fordelingen av observasjonene innenfor en kategori med median (horisontal linje i boksen), gjennomsnitt (x i boksen), nedre kvartil (25 % av observasjonene er mindre enn dette) og øvre kvartil (25 % av observasjonene er større enn dette), minste observasjon og største observasjon og evt. outliere.

Tabell 23. Forslag til inndeling av organiske gjødselprodukter i tre kategorier basert på andel NaHCO_3 -løselig P og sammenheng med relativ fosforeffekt (MFE %)

Produktkategori		Lav	Medium	Høy
NaHCO_3 -løselig fosfor	% av totalt fosfor	0-5	5-30	> 30
Antall i datasettet	n	15	42	25
Relativ fosforeffekt				
Gjennomsnitt	MFE %	11	32	75
Standardavvik	MFE %	14	20	19
50 % av observasjonene ligger mellom	MFE %	3-19	18-47	63-84

I våre egne undersøkelser, viste også andelen vannløselig fosfor i de organiske gjødselproduktene relativt god sammenheng med fosforeffekten i veksthusforsøket, når væske:prøve forholdet ble økt og ekstraksjonsmetoden tilpasset den høye fosforkonsentrasjonen i gjødselproduktene (Figur 15; Tabell 22). Ekstraksjon med vann imiterer likevektsprosesser i jorden, og kan gi en indikasjon på evnen til organiske gjødselprodukter til å frigi lett-tilgjengelig fosfor. Godt samsvar mellom fosforeffekten til organiske gjødselprodukter og svake ekstraksjonsmetoder har tidligere blitt beskrevet av Velthof et al. (1998) og Kratz et al. (2010).

I forsøkene som er presentert her, forklarte P-AL tilnærmet like mye av variasjonen i fosforeffekten til de organiske gjødselproduktene som NaHCO_3 -løselig fosfor (Figur 15; Tabell 22). Dette var overraskende og er ikke i samsvar med våre tidligere resultater der vi konkluderte at P-AL ikke kan brukes til å estimere fosforeffekten til organiske gjødselprodukter (Brod et al. 2015b). Vi forventet heller ikke at ammoniumsitratt skulle komme like godt ut som de svakere ekstraksjonene med bikarbonat og vann (Tabell 22). Produktene som ble inkludert i undersøkelsen til Brod et al. (2015b)

representerte en større produktvariasjon enn produktene inkludert i forsøket presentert her, både når det gjelder opprinnelse, behandling og fosforeffekt. For eksempel kjøttbeinmel viste lav fosforeffekt i vekstforsøkene beskrevet av Brod et al. (2015b), fordi fosfor hovedsakelig forelå som krystallinske stabile kalsiumfosfater. Likevel ekstraherte P-AL-metoden relativt mye fosfor, og andelen P-AL-løselig fosfor overestimerte derfor fosforeffekten til kjøttbeinmel. Treasken, på den andre siden, viste god fosforeffekt i vekstforsøket, selv om andelen P-AL var relativt lav; høy pH i treasken førte til en betydelig økning av pH i ekstraksjonsvæsken, og dermed mindre ekstrahert fosfor og underestimering av fosforeffekten. Den gode sammenhengen mellom andelen P-AL i organiske gjødselprodukter og deres fosforeffekt presentert her, gjelder derfor bare for de utvalgte organiske gjødselproduktene og ikke på generelt grunnlag.

4.3 Tungmetallkonsentrasjon og Gjødselvereforskrift

4.3.1 Produkter basert på fiskeslam

Det er kjent at bruken av fiskeslam som gjødsel har vært begrenset av sink- og kadmiuminnhold i henhold til dagens Gjødselvereforskrift (Lovdata 2003). Sink er både tungmetall og næringsstoff, og tilsettes fiskefôret for å sikre fiskens helse, mens kadmium er et uønsket og giftig tungmetall som kommer med de marine fôringrediensene.

Også i vårt datasett var de fleste produkter basert på fiskeslam i kvalitetsklasse II pga. høye sink og/eller kadmiumkonsentrasjoner (Tabell 14). Tilførsel av fiskeslam til landbruksjord er dermed begrenset til 2 tonn tørrstoff/daa/10 år, eller 200 kg tørrstoff/daa/år. Med denne mengdebegrensningen kan de tørkede fiskeslamproduktene som var med i våre forsøk gi mellom 7 kg N/daa (Fiskeslam 3, tørket) og 16,5 kg N/daa (Fiskeslam 2, tørket) per år. Til sammenligning er gjødslingnormen til 500 kg bygg 11 kg N/daa (Gjødslingshåndbok 2020). Om nitrogentilførselen med fiskeslam er tilstrekkelig eller ikke, vil i tillegg være avhengig av nitrogenkvaliteten i fiskeslammet og avlingspotensialet for arealet, men generelt må det tilføres noe ekstra nitrogen med en slik begrensning.

For at fiskeslam skal kunne resirkuleres og få verdi som organisk gjødsel, må landbruket på mottakersiden kunne stole på at innholdet av tungmetaller, organiske miljøgifter og smittestoffer er tilstrekkelig lavt. I en pressemelding publisert i 2019 anbefalte Mattilsynet derfor alle oppdrettere som skal investere i nye anlegg om å sørge for at behandlingen av fiskeslam sikrer hygienisering og stabilisering (NTB 2019). Resultatene våre viser videre at fiskefôrprodusentene bør jobbe ytterligere med å optimalisere fiskefôrets kvalitet, og å redusere innholdet av sink og kadmium så langt det lar seg gjøre.

4.3.2 Biokull

Begge biokullproduktene var blant produktene med høyest konsentrasjon av tungmetaller (Tabell 14). Biokull, fiskeslam var i kvalitetsklasse II, og Biokull, grise gj. var utenfor kvalitetsklasse III. Det er dermed ikke lov å bruke dette produktet som gjødsel i Norge etter dagens regelverk, verken i jordbruket eller i grøntanlegg.

Dagens Gjødselvereforskrift regulerer bruken av organiske gjødselprodukter basert på tungmetallkonsentrasjon på tørrstoffbasis. Utnyttelse av organisk materiale til bioenergi gjennom pyrolyse, forbrenning eller biogassbehandling vil øke konsentrasjonen av tungmetaller på tørrstoffbasis. Forholdet mellom konsentrasjonen av tungmetaller og fosfor vil likevel være tilnærmet uforandret sammenlignet med utgangsproduktet.

Dagens Gjødselevareforskrift er et utilsiktet hinder for bioenergianlegg som ønsker å utnytte restproduktet til gjødselformål. I våre innspill til revideringen av dagens Gjødselevareforskrift, foreslår vi derfor å regulere bruken av organiske gjødselprodukter ut ifra forholdet mellom konsentrasjonen av nitrogen eller fosfor og tungmetaller for å tilrettelegge for bruk av produkter der karbonet har blitt utnyttet til andre formål.

4.4 Veien til fullverdige gjødselprodukter

Alle de organiske gjødselproduktene hadde en dårlig balansert sammensetning av næringsstoffer sammenlignet med plantenes behov. I praktisk landbruk vil det fremstå som en stor utfordring.

Nitrogen er det næringsstoffet som jordbruksvekstene trenger mest av. Kalium er også et næringsstoff plantene trenger mye av, mens fosfor kommer på tredje plass. Spesielt forholdet mellom nitrogen og fosfor var lavt i alle de organiske gjødselproduktene med unntak av Biorest, matavfall og husdyrgjødsel (produkt 7). Alle fiskeslamproduktene hadde dessuten et lavt innhold av kalium. Dette skyldes at kalium (K^+) som ammonium (NH_4^+) er lett løselige og vil følge væskefasen under avvanningen av fiskeslam.

Utfordringen kan løses ved å kombinere de organiske gjødselproduktene med mineralske gjødselkomponenter, enten ved separat tilførsel eller ved anrikning av de organiske gjødselproduktene. Tørket fiskeslam eller struvitt kan gjerne kombineres med mineralsk gjødsel som inneholder både nitrogen og kalium (f.eks. OPTI-NK 22-0-12). Produkter basert på husdyrgjødsel kan kombineres med mineralsk nitrogengjødsel (f.eks. OPTI-KAS eller OPTI-NS 27-0-0). Slik vil man kunne oppnå et balansert næringsstoff-forhold i sluttproduktet, mer i samsvar med plantenes behov.

En annen mulighet for å løse utfordringen med den ubalanserte næringsstoff-sammensetningen i organiske gjødselprodukter, ligger i behandlingen av organisk avfall. I dag velger de fleste beslutningstakere behandlingsteknologi for å imøtekomme kravene Gjødselevareforskriften stiller, eller ut ifra et behov for å redusere volum eller kostnader. Mulighetene for ressurseffektiv utnyttelse av fosfor og andre næringsstoffer i organisk avfall vil kunne øke betydelig, hvis kvaliteten til sluttproduktet som gjødsel inngår som et av kriteriene for valg av behandlingsteknologi.

Metoden som den norske bedriften N2 Applied har utviklet for husdyrgjødsel, er et lovende eksempel for hvordan valg av behandlingsteknologi kan øke N/P forholdet i organisk avfall og dermed øke kvaliteten til sluttproduktet som gjødsel: Prosessen anriker husdyrgjødsel med nitrogenoksid fra luften med hjelp av en plasmareaktor som plasseres på gården, og energi. Nitrogen i husdyrgjødsel blir gjennom prosessen bundet som ammoniumnitrat, og faren for ammoniakktap til luften blir redusert. Prosessen senker dessuten pH i sluttproduktet, noe som kan ha en positiv effekt på plantetilgjengeligheten av fosfor. Det har også vist seg at prosessen fungerer for annet organisk materiale etter biogassbehandling. Det skal nå utføres tester om prosessen også kan brukes til å optimalisere gjødselkvaliteten til fiskeslam.

5 Konklusjoner

Fosfor i mineralgjødning utvinnes av råfosfat som er en begrenset ressurs. Det store potensialet som organiske gjødselprodukter har til å erstatte bruken av mineralfosfor i landbruket, blir i dag likevel ikke godt nok utnyttet. Våre forsøksresultater viser at det er systematiske forskjeller i fosforeffekten til organiske gjødselprodukter:

- Husdyrgjødselprodukter som var avvannet ved mekanisk separasjon viste god effekt som fosforgjødsel. Den gode gjødningseffekten kan forklares med at fosfor hovedsakelig foreligger i form av lett tilgjengelige uorganiske forbindelser.
- Fiskeslamprodukter som var avvannet og deretter tørket hadde lavere fosforeffekt enn husdyrgjødselprodukter og mineralfosfor. Dette kan forklares med at fosfor i fiskeslamprodukter i stor grad foreligger som stabile kalsiumfosfater.
- Biokull basert på grisekjødsel eller fiskeslam hadde lav virkning som fosforgjødsel, sannsynligvis fordi pyrolyseprosessen omdanner fosfor i utgangsprодукtene til tungt løselige kalsiumfosfater.
- Struvitt hadde like god effekt som mineralfosfor, selv om struvittfosfor ikke var løselig i vann eller bikarbonat.

Effektiv utnyttelse av fosfor i organiske gjødselprodukter krever enkle kjemiske analysemetoder som kan brukes til å beskrive fosforgjødslingseffekten.

Undersøkelsene våre bekrefter at andelen bikarbonat (NaHCO_3)-løselig fosfor i organiske gjødselprodukter kan brukes som indikator for fosforkvaliteten i en rekke produkttyper med ukjent fosforeffekt. Også metaanalysen med 60 organiske gjødselprodukter viste en positiv sammenheng mellom andelen NaHCO_3 -løselig fosfor og den relative fosforeffekten. Analysemetoden er imidlertid ikke egnet til alle produktgrupper. Fosforeffekten til struvitt, termisk behandlet avløpslam og kalkete produkter viste dårlig sammenheng med NaHCO_3 -løselig fosfor (ble ikke inkludert i metaanalysen).

Basert på resultatene våre, foreslår vi i samsvar med Christiansen et al. (2020), tre kategorier for å beskrive fosforkvaliteten i organiske gjødselprodukter basert på løseligheten av NaHCO_3 -løselig fosfor som:

- Lav, hvis andelen NaHCO_3 -løselig fosfor er $< 5\%$ av totalfosfor
- medium, hvis andelen NaHCO_3 -løselig fosfor er $5\text{-}30\%$ av totalfosfor
- høy, hvis andelen NaHCO_3 -løselig fosfor er $> 30\%$ av totalfosfor

Det er relativt stor variasjon innenfor de tre foreslåtte produktkategoriene (Figur 16), og metoden kan derfor ikke brukes til nøyaktig predikering av fosforeffekten til nye produkter med ukjent fosforeffekt.

En ekstraksjonsmetode som kan predikere fosforeffekten for alle produktgrupper er ikke funnet, men bikarbonat er det ekstraksjonsmidlet som har vist seg egnet for flest produktgrupper. I videre arbeid må produktgrupper defineres og tilhørende analysemetode for fosforeffekt bestemmes.

Litteraturreferanse

- Aas TS, Ytrestøyl T, Berge GM (2016) Tørrstoffinnhold i slam fra landbasert produksjon av Atlantisk laks. Nofima Rapport 32/2016. 19 s.
- Alvarenga E, Øgaard AF, 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 & Technology* 75(7): 1743-1752
- Atkinson CJ, Fitzgerald JD, Higgs NA (2010) Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and Soil* 337: 1-18
- Brod E, Øgaard AF, Hansen E, Wragg D, Haraldsen TK, Krogstad T (2015a) Waste products as alternative phosphorus fertilisers part I: inorganic P species affect fertilization effects depending on soil pH. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 103: 167–185
- Brod E, Øgaard AF, Haraldsen TK, Krogstad T (2015b) Waste products as alternative phosphorus fertilisers part II: predicting P fertilisation effects by chemical extraction. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 103: 187-199
- Brod E, Oppen J, Kristoffersen AØ, Haraldsen TK, Krogstad T (2017) Drying or anaerobic digestion of fish sludge: Nitrogen fertilisation effects and logistics. *AMBIO* 46(8): 852-864
- Bruun S, Harmer SL, Bekiaris G, Christel W, Zuin L, HU Y, Jensen LS, Lombi E (2017) The effect of different pyrolysis temperatures on the speciation and availability in soil of P in biochar produced from the solid fraction of manure. *Chemosphere* 169: 377-386
- Christel W, Bruun S, Magid J, Jensen LS (2014) Phosphorus availability from the solid fraction of pig slurry is altered by composting or thermal treatment. *Bioresource Technology* 169: 543-551
- Christel W, Bruun S, Magid J, Kwapinski W, Jensen LS (2016) Pig slurry acidification, separation technology and thermal conversion affect phosphorus availability in soil amended with the derived solid fractions, chars or ashes. *Plant and Soil* 401: 93-107
- Christiansen NH, Sørensen P, Labouriau R, Christensen BT, Rubæk GH (2020) Characterizing phosphorus availability in waste products by chemical extractions and plant uptake. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, <https://doi.org/10.1002/jpln.202000015>
- Daugstad K, Kristoffersen AØ, & Nesheim L (2012) Næringsinnhold i husdyrgjødsel: Analyser av husdyrgjødsel frå storfe, sau, svin og fjørfe 2006-2011. *Bioforsk Rapport* 7 (24). 29 s.
- Degryse F, Baird R, da Silva RC, McLaughlin MJ (2017) Dissolution rate and agronomic effectiveness of struvite fertilizers – effect of soil pH, granulation and base excess. *Plant and Soil* 410: 139-152
- Egnér H, Riehm H, Domingo WR (1960) Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Böden. II. Chemische Extraktionsmethoden zur Phosphor- und Kaliumbestimmung. *Kungliga Lantbrukshögskolans Annaler* 26, 199–215
- EN 13654-1 (2001) Soil improvers and growing media: determination of nitrogen. Part 1: modified Kjeldahl method. CEN, Brussels
- European Union (2003) Regulation (EC) No 2003/2003 of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 relating to fertilisers. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:304:0001:0194:en:PDF> (24. april 2020)
- Lovdata (2003) Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav. <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2003-07-04-951> (3. juli 2020)

Gjødslingshåndbok (2020) Gjødslingshåndbok.

<https://www.nibio.no/tema/jord/gjodslingshandbok?locationfilter=true> (24. April 2020)

Gollenbeek LR, Ehlert PAI, Buisonjé FE de (2018) Perspectives of Ecochar in Europe: Uses and regulatory requirements. Wageningen University & Research, Livestock Research, Report 1113, 68 s.

Hamilton HA, Brod E, Hanserud O, Müller DB, Brattebøe H, Haraldsen TK (2017) Recycling potential of secondary phosphorus resources as assessed by integrating substance flow analysis and plant-availability. *Science of the Total Environment* 575: 1546–1555

Haraldsen TK, Brod E, Øgaard AF (2017) Kvalitetskriterier og merkekrav for organiske avfallsmaterialer. Forslag til endringer i forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav. NIBIO rapport 3(156), 38 s.

Hesselsøe KJ, Øgaard AF, Aamlid T, Pettersen T (2020) Forprosjekt struvitt – undersøkelse av gjødselverdien i struvitt fra HIAS IKS. NIBIO rapport 6(32), 31 s.

Hedley MJ, Stewart JWB, Chauhan B S (1982) Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal* 46, 970–976

Henriksen TM, Kristoffersen AØ, Brod E, Øgaard AF (2019) Nitrogenerffekt av organisk avfall til korn – et forsøk i laboratoriet. NIBIO bok 5(1): 140-145

Kratz S, Haneklaus S, Schnug E (2010) Chemical solubility and agricultural performance of P containing recycling fertilizers. *Landbauforsch vTI Agric For Res* 60: 227–240

Kratz S, Vogel C, Adam C (2019) Agronomic performance of P recycling fertilizers and methods to predict it: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 115: 1-39

Lemming C, Bruun S, Jensen LS, Magid J (2017a) Plant availability of phosphorus from dewatered sewage sludge, untreated incineration ashes and other products recovered from a wastewater treatment system. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 180: 779-787

Lemming C, Scheutz C, Bruun S, Jensen LS, Magid J (2017b) Effects of thermal drying on phosphorus availability from sewage sludge. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 180: 720-728

Liebisch F, Bünemann EK, Huguenin-Elie O, Jeangros B, Frossard E, Oberson A (2013) Plant phosphorus nutrition indicators evaluated in agricultural grasslands at different intensities. *European Journal of Agronomy* 44: 67-77

LMT (2020) Temperatur og nedbør er hentet fra Landbruks Meteorologisk Tjeneste: www.lmt.nibio.no (11. mars 2020)

MET (2020) Månedsnormaler for normalperioden 1961-1990 er hentet fra Meteorologisk Institutt: www.eklima.met.no (11. mars 2020)

Möller K, Oberson A, Bünemann E, Cooper J, Friedel J, Glæsner N, Hörtenhuber S, Løes AK, Mäder P, Meyer G, Müller T, Symanczik S, Weissenhuber L, Wollmann I, Magid J (2018) Improved phosphorus recycling in organic farming: navigating between constraints. *Advances in Agronomy* 147: 157–237

Murphy J, Riley JP (1962) A single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27, 31-36

Møberg P, Petersen L (1982) Øvelsesvejledning til geologi og jordbundslære. Part 2. Den Kongelige Veterinær-og Landbohøyskole, København, 136 s.

NTB (2019) Fiskeslam kan bli gode gjødselprodukter.

<https://kommunikasjon.ntb.no/pressemelding/fiskeslam-kan-bli-gode-gjodselprodukter?publisherId=10773547&releaseId=17863778> (9. juli 2020)

Olsen SR, Cole CV, Watanabe FS, Dean LA (1954) Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular Nr 939, US Gov Print Office, Washington, DC, s. 1–19

Riley H (1996) Estimation of physical properties of cultivated soils in southeast Norway from readily available soil information. Norwegian Journal of Agricultural Sciences 25, 51 p.

Rittl T, Krogstad T, Eikås S, Saltnes T, Sørensen G, Glestad HE, Løes A-K (2019) Effects of struvite application on soil and plants: a short - term field study. NORSØK report 4(10), 38 s

Sharpley A, Moyer B (2000) Phosphorus Forms in Manure and Compost and Their Release during Simulated Rainfall. Journal of Environmental Quality 29: 1462-1469

Talboys PJ, Heppel J, Roose T, Healey JR, Jones DL, Withers PJA (2016) Struvite: a slow-release fertiliser for sustainable phosphorus management? Plant and Soil 401: 109-123

Velthof GL, van Beusichem ML, Raijmakers WMF, Janssen BH (1998) Relationship between availability indices and plant uptake of nitrogen and phosphorus from organic products. Plant Soil 200: 215–226

Øgaard AF, Brod E (2016) Efficient phosphorus cycling in food production – predicting the phosphorus fertilization effect of sludge from chemical wastewater treatment. Journal of Agricultural and Food Chemistry 64 (24), 4821–4829

Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO) ble opprettet 1. juli 2015 som en fusjon av Bioforsk, Norsk institutt for landbruksøkonomisk forskning (NILF) og Norsk institutt for skog og landskap.

Bioøkonomi baserer seg på utnyttelse og forvaltning av biologiske ressurser fra jord og hav, fremfor en fossil økonomi som er basert på kull, olje og gass. NIBIO skal være nasjonalt ledende for utvikling av kunnskap om bioøkonomi.

Gjennom forskning og kunnskapsproduksjon skal instituttet bidra til matsikkerhet, bærekraftig ressursforvaltning, innovasjon og verdiskaping innenfor verdikjedene for mat, skog og andre biobaserte næringer. Instituttet skal levere forskning, forvaltningsstøtte og kunnskap til anvendelse i nasjonal beredskap, forvaltning, næringsliv og samfunnet for øvrig.

NIBIO er eid av Landbruks- og matdepartementet som et forvaltningsorgan med særskilte fullmakter og eget styre. Hovedkontoret er på Ås. Instituttet har flere regionale enheter og et avdelingskontor i Oslo.