

Fosforeffekt av organisk avfall

Eva Brod & Anne Falk Øgaard
NIBIO Miljø og naturressurser
eva.brod@nibio.no

Innledning

Både matproduksjon og -forbruk gir store mengder organiske avfallsressurser som inneholder verdifulle næringsstoffer. I NIBIO's strategiske instituttsatsing «Bærekraftig resirkulering av organiske avfallsressurser i fremtidens bioøkonomi» (Kretsløp SIS) jobber vi med å øke kunnskap om hvordan disse organiske avfallsressursene kan utnyttes bedre ved å bruke dem som gjødsel. Vi undersøker gjødslingseffekten for både nitrogen og fosfor. Resultater fra deler av nitrogenundersøkelsene er beskrevet i Henriksen *et al.* (2019), mens denne artikkelen viser deler av arbeidet vårt på fosforeffekten av organisk avfall.

I dag tilføres mye næringsstoffer i matproduksjonen i form av mineralgjødsel. Det ble tilført cirka 8 900 tonn mineralfosfor og 102 000 tonn mineralnitrogen til norsk jordbruk i 2018. 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.

Organiske avfallsressurser har stort potensial for å erstatte bruken av mineralfosfor i landbruket. 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 9 000 tonn (hvorav det meste tapes til havet fra fiskemerder), matavfall cirka 2 600 tonn og avløpsslam cirka 1 900 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. For at fosfor skal kunne tilbakeføres til kretsløpet, må det fraktes dit det trengs, f.eks. fra Vestlandet til kornarealene på Østlandet. Det høye vanninnholdet i mange organiske avfallsressurser gjør 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 øke tørrstoffinnholdet i organiske avfallsressurser og tilrettelegge for transport.

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

Formålet med forsøkene vi viser resultater fra her, var å både lære mer om plantetilgjengeligheten av fosfor i ulike organiske avfallsressurser, og å finne enkle kjemiske analysemetoder som kan brukes til å beskrive fosforgjødslingseffekten av produktet.

Materiale og metoder

Vi har gjennomført forsøk med 15 ulike produkter, med hovedvekt på produkter basert på husdyrgjødsel og fiskeslam:

- 5 produkter basert på mekanisk separert husdyrgjødsel fra storfe eller svin (derav 2 etter anaerob utråtning i biogassreaktor)
- 5 fiskeslamprodukter (tørket eller ubehandlet)
- 2 biokullprodukter basert på husdyrgjødsel fra svin eller fiskeslam
- 1 kompostert hestegjødsel

- 1 flytende biorest etter biogassproduksjon på en blanding av husholdningsavfall og husdyrgjødsel
- 1 struvitt, et mineralsk fosforprodukt (NH_4MgPO_4), som i dette tilfellet er produsert i forbindelse med rensing av kommunalt avløpsvann

Innhold av tørrstoff, totalt nitrogen og totalt fosfor i avfallsressursene er vist i tabell 1.

Gjødselproduktene ble dessuten analysert med flere analysemetoder som kan være aktuelle til å beskrive fosforkvaliteten: Vannløselig P, P-AL, Olsen P og sitratløselig P. Tre av analysemetodene (vannløselig P, P-AL, Olsen P) ble gjennomført både etter standard metode og med et større væske:gjødsel forhold under ekstraksjonen enn standard.

I et veksthusforsøk ble alle produktene tilsatt i en mengde som tilsvarer 3 kg P/daa (45 mg P/potte). Plantetilgjengelighet av fosfor i disse produktene ble sammenlignet med ingen fosforgjødsling og med mineralfosfor i to ulike mengder, tilsvarende 1,5 og 3 kg P/daa. Alle andre næringsstoffene ble gitt som næringsløsning for å sikre at det var kun fosfortilgangen som begrenset planteveksten. For produkter med en betydelig forventet nitrogenereffekt, ble tilfø-

Tabell 1. Tørrstoff (TS) og innhold av totalt nitrogen (N) og totalt fosfor (P) i 15 ulike organiske avfallstyper

Organisk avfallsressurs	TS %	N g/kg TS	P g/kg TS
Storfegj., separert trinn 1 (skrupresse)	22	23,9	6,0
Storfegj., separert trinn 2 (filtrering)	84	52,5	14,0
Storfegj., utråtnet og separert	24	23,3	10,9
Grisegj., separert	24	26,9	25,5
Grisegj., utråtnet og separert	23	30,1	27,2
Grisegj., biokull	90	15,4	65,9
Hestegj., kompostert	18	26,8	6,6
Fiskeslam 1, tørket	96	68,2	21,5
Fiskeslam 2, biokull	100	56,4	61,1
Fiskeslam 3, kompostert og tørket	68	32,5	34,4
Fiskeslam 4, tørket	83	68,6	36,9
Fiskeslam 5, tørket	92	34,2	45,8
Fiskeslam 6, ubehandlet	7	74,8	31,5
Struvitt	-	57 ¹⁾	112 ¹⁾
Biorest, matavfall/husdyrgj.	5	83,0	10,0

¹⁾ innhold av N og P i struvitt er angitt som g/kg produkt

selen av mineralnitrogen redusert tilsvarende forventet nitrogenereffekt av produktet. I forsøket hadde vi tre potter (gjentak) av hver gjødselbehandling.

Vi dyrket bygg hvor vi høstet hele planten når aksene begynte å bli synlig etter cirka 6 uker. Plantene har gjort unna det meste av næringsopptaket når de kommer til dette vekststadiet.

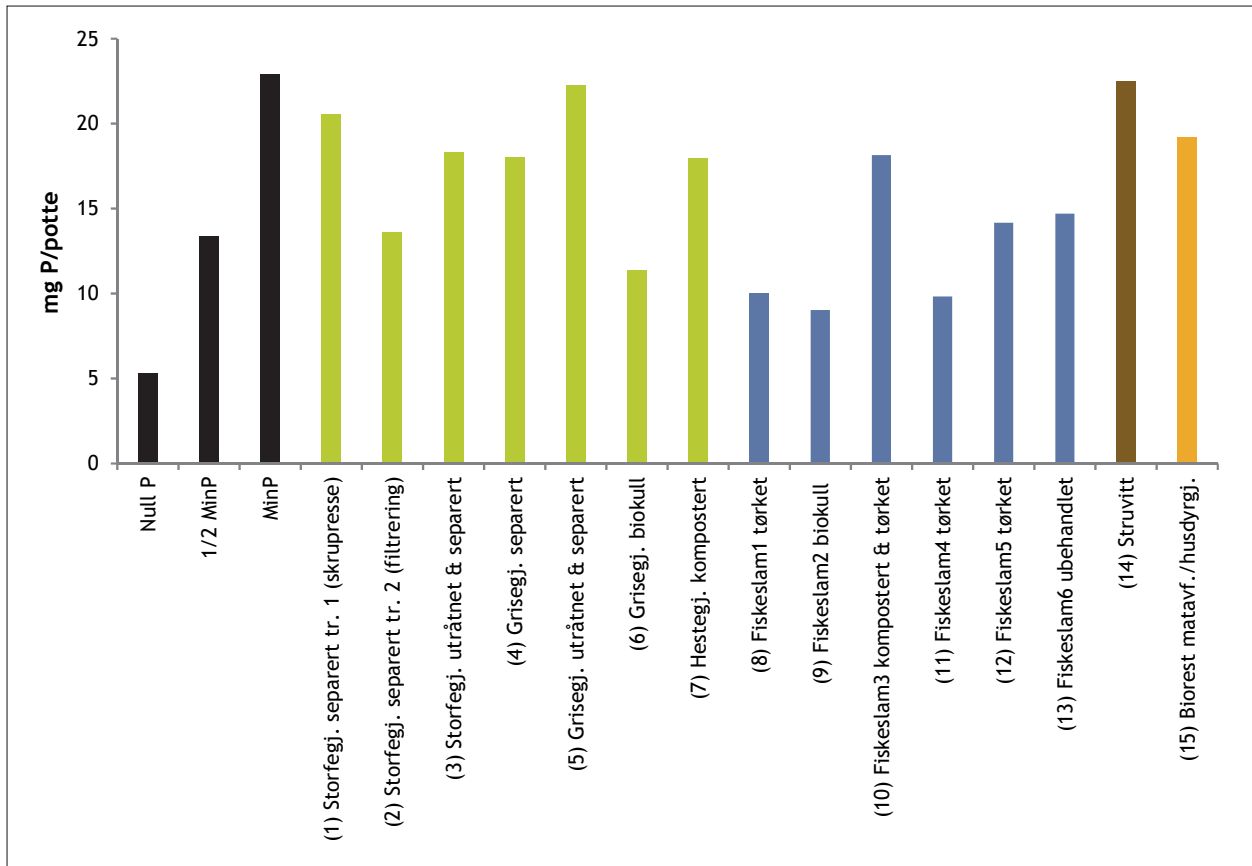
Forsøket ble gjennomført både med et næringsfattig vekstmedium (sand blandet med torv) og med en naturlig dyrkingsjord (leirjord fra Øsaker). Leirjordas innhold av lett tilgjengelig fosfor, målt som P-AL, var 5,5 mg/100 g jord. Ved dette P-AL-nivået er det anbefalt å gjødsle med like mye fosfor som det 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. Potter uten fosforgjødsel ga like høyt fosforopptak i plantene som potter med fosforgjødsel. I pottene med sand/torv ble det tydelig effekt av fosforgjødsling. Derfor viser vi her bare resultatene av denne delen av forsøket.

Resultater og diskusjon

Plantetilgjengelighet av fosfor

Figur 1 viser tilgjengeligheten av fosfor i de ulike produktene, målt som fosformengde i plantene som ble høstet. De svarte søylene som er kontrollbehandlingene med tilførsel av mineralfosfor tilsvarende 0, 1,5 og 3 kg P/daa, viser at det var tydelig respons på fosforgjødsling med det næringsfattige vekstmediet (sand/torv). De grønne søylene er produkter basert på ulike typer husdyrgjødsel, mens de blå søylene er fiskeslamprodukter fra ulike settefiskanlegg og som er behandlet med ulik teknologi. Som figuren viser, var det stor forskjell i gjennomsnittlig fosforopptak mellom de ulike gjødseltypene, men bare forskjeller som er større enn 8,3 mg P/potte er statistisk sikre.

Flere av produktene hadde en signifikant lavere tilgjengelighet av fosforet enn mineralfosfor. Dette gjaldt for fire av fiskeslamproduktene og to av husdyrgjødselproduktene. En statistisk test hvor alle fiskeslamproduktene ble testet mot alle husdyrgjødselproduktene viste at fosfor i fiskeslam var signifikant mindre tilgjengelig for plantene enn fosfor i husdyrgjødsel ($P < 0,1$ %). Gjennomsnittlig fosforopptak fra fiskeslamproduktene var 12,7 mg P per potte, mens gjennomsnittlig opptak fra husdyrgjødselproduktene var 17,4 mg P per potte. Fiskeslam består av faeces og fôrrester. I en undersøkelse utgjorde fôr-



Figur 1. Fosforopptak fra ulike gjødselprodukter sammenlignet med opptak fra mineralfosfor og ved ingen fosforgjødsling. Svarte søyler: kontrollbehandlinger, grønne søyler: husdyrgjødselprodukter, blå søyler: fiskeslamprodukter.

rester 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.

Begge biokullproduktene, laget av henholdsvis grise-gjødsel og fiskeslam, var i gruppen som hadde signifikant lavere plantetilgjengelighet av fosforet enn mineralfosfor. Det er kjent at termisk behandling av husdyrgjødsel som pyrolyse eller forbrenning reduserer fosforgjødsleffekten til sluttproduktet kraftig sammenlignet med utgangsproduktet (Christel *et al.* 2014).

Struvitt viste en god fosforeffekt i dette forsøket, og ga nesten like høyt fosforopptak som kontrollen med full dose mineralfosfor. I samsvar med våre resultater, fant Rittl *et al.* (2019) i et feltforsøk på Tingvoll at struvitt økte fosforinnholdet i graset, og P-AL-

nivået i jorden. Utenlandske forsøk med struvitt har vist varierende plantetilgjengelighet av fosforet. Dette kan skyldes faktorer som partikkelstørrelse, renhet av struvittmineralet, jordas pH og plantart som ble brukt i forsøket (Degryse *et al.* 2017; Talboys *et al.* 2016).

Ni av produktene som ble testet i veksthusforsøket har også blitt testet i feltforsøk på Øsaker og/eller Steinkjer. Resultatene fra feltforsøkene er ikke klare enda, men vil bli rapportert senere.

Fosforanalyser av gjødselproduktene

Tabell 2 viser hvor mye fosfor i de organiske produktene som ble ekstrahert med de ulike analysemetodene.

P-AL ekstraherte mer fosfor fra alle gjødselproduktene enn vann og Olsen P, både ved standard metode og ved økt prøve:væske forhold. Ammoniumsitratt ekstraherte omtrent like mye fosfor fra produktene som P-AL.

Tabell 2. Andelen fosfor (% av totalt fosfor) i 15 organiske avfallsressurser som er ekstraherbart med P-AL, vann, Olsen P eller ammoniumsitratt ved ulike prøve:væske forhold

Nr.	Organisk gjødsel	P-AL		Vann		Olsen P		Ammonium-sitratt standard
		1:20	1:100	1:20	1:100	1:20	1:200	
1	Storfegj., separert trinn 1 (skrupresse)	56	61	11	21	9	35	63
2	Storfegj., separert trinn 2 (filtrering)	60	54	7	10	8	16	55
3	Storfegj., utrånnet og separert	86	83	12	20	19	28	70
4	Grisegj., separert	71	73	7	17	12	55	74
5	Grisegj., utrånnet og separert	74	81	8	18	9	43	79
6	Grisegj., biokull	30	42	1	1	4	10	38
7	Hestegjødsel, kompostert	53	53	12	15	9	19	68
8	Fiskeslam 1, tørket	38	61	4	5	5	5	68
9	Fiskeslam 2, biokull	7	11	0,1	0,1	0,2	0,3	12
10	Fiskeslam 3, kompostert og tørket	43	77	3	6	5	10	91
11	Fiskeslam 4, tørket	23	42	3	4	2	3	43
12	Fiskeslam 5, tørket	24	55	3	5	1	4	61
13	Fiskeslam 6, ubehandlet	27	52	5	7	2	5	54
14	Struvitt	48	58	0,3	1	1	15	39
15	Biorest, matavfall/husdyrgj.	52	67	27	40	38	45	69

For de fleste produktene ble det ekstrahert betydelig mer fosfor med vann og Olsen P når vi økte prøve:væske forholdet. Begge ekstraksjonsmetodene er opprinnelig utviklet for jordprøver, og ekstraksjonsløsningen vil raskt bli mettet med fosfor når fosforrike gjødselprodukter analyseres. Det kan derfor være fornuftig å bruke en høyere væskemengde når gjødselprodukter skal analyseres. Effekten av økt prøve:væske forhold var ikke like tydelig for alle produktene for P-AL som er en mye kraftigere ekstraksjonsmetode enn vann og Olsen P.

Vi sammenlignet analyseresultatene med fosforopptaket i plantene, for å vurdere om de enkelte analysemetodene kan brukes til å beskrive produktets gjødsleffekt.

I våre tidligere forsøk har Olsen P (1:20) pekt seg ut som en bedre metode enn de andre for å beskrive fosforkvaliteten til organiske gjødselprodukter. Denne gangen kom modifisert Olsen P (1:200) mye bedre ut enn vanlig Olsen P, og forklarte 62 % av variasjonen mellom produktenes gjødsleffekt (figur 2a). Vanlig Olsen P forklarte bare 28 % av variasjonen.

I motsetning til tidligere forsøk, kom P-AL (1:20) nesten like godt ut som modifisert Olsen P (1:200), og forklarte 57 % av variasjonen mellom produktenes gjødsleffekt (figur 2b).

Både modifisert metode med vann, modifisert P-AL og sitrattløselig P kom godt ut, og forklarte så mye som cirka 50 % av variasjonen mellom produktenes gjødsleffekt.

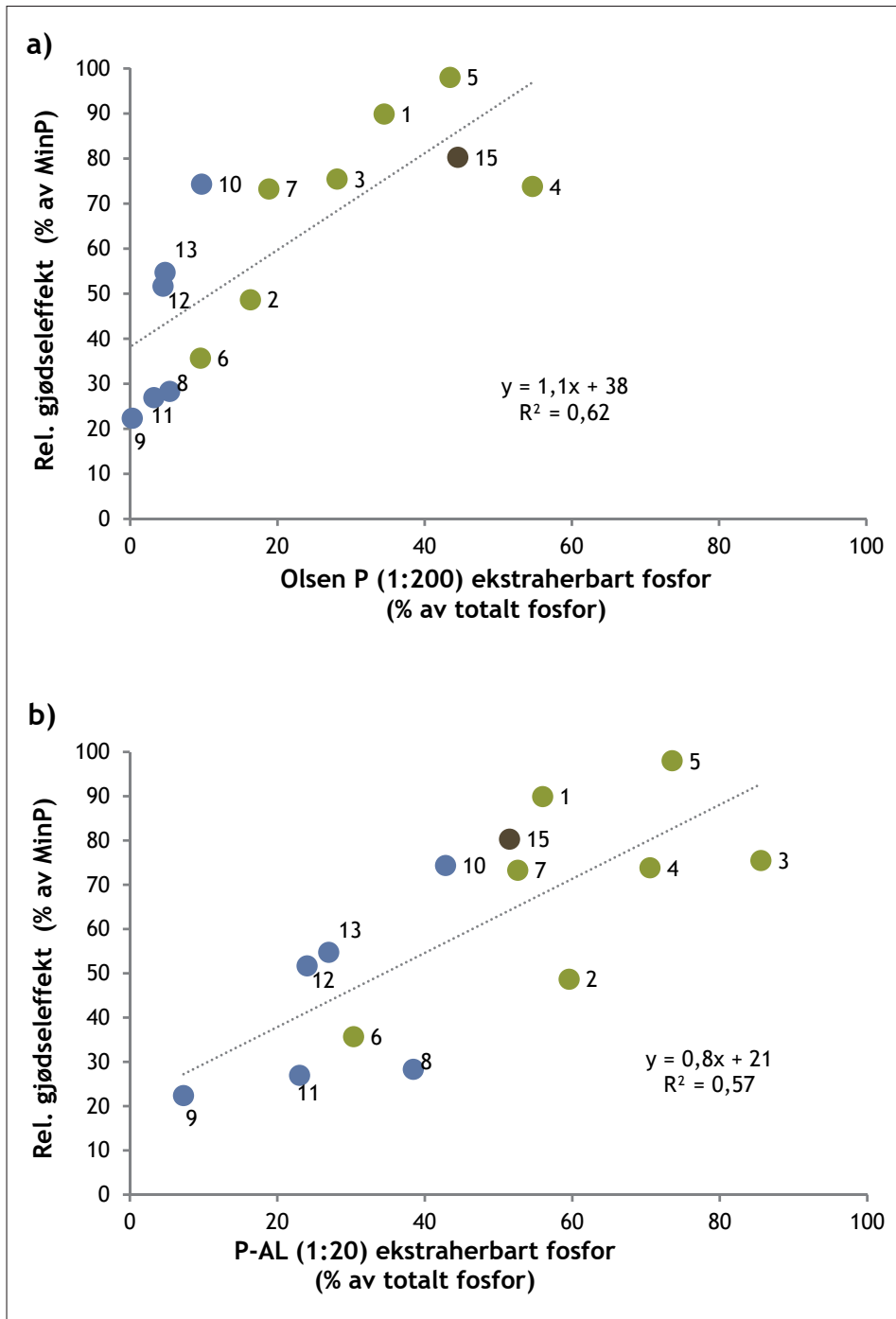
Vi tok ikke hensyn til struvitt i disse vurderingene fordi det er kjent at gjødsleffekten til struvitt kan være god, til tross for at fosforet er lite løselig i vann og bikarbonat (Olsen P). I vårt vekstforsøk tok plantene opp omtrent like mye fosfor fra struvitt som fra MinP, til tross for at bare 0,3–1 % av fosforet i struvitt var løselig i vann, og 1–15 % var løselig i Olsen P ekstraktet (figur 1; tabell 2).

Norsk og dansk metaanalyse

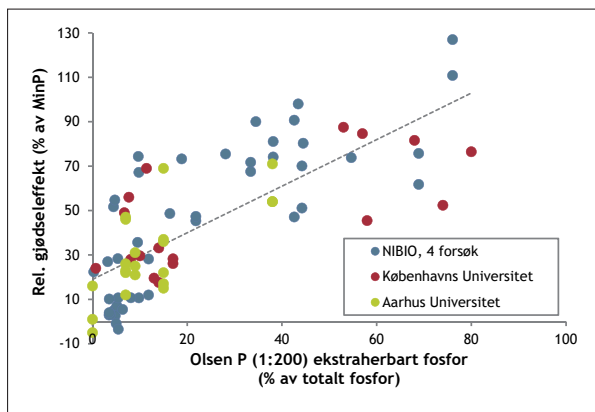
Vi har i tillegg gjennomført en statistisk analyse (metaanalyse) hvor vi samlet egne data fra flere forsøk og forsøksresultater fra Københavns Universitet og Aarhus Universitet.

Metaanalysen omfatter resultater fra både potte- og feltforsøk, med ulike typer jord og gjødselnivåer. I alle tilfeller ble alle andre næringsstoffene enn fosfor gitt som næringsløsning. Vi inkluderte til sammen 89 datapunkter i analysen.

I likhet med vårt eget forsøk, tyder metaanalysen på at cirka 60 % av variasjonen i fosforopptak mellom gjødselprodukter kan forklares med modifisert Olsen P. Metaanalysen bekrefter dessuten at det er stor



Figur 2. Sammenhengen mellom andelen fosfor i ulike gjødselprodukter som er ekstraherbart med a. modifisert Olsen P (prøve:væske forhold 1:200) eller b. P-AL (1:20), og gjødseleffekten, uttrykt som relativ gjødseleffekt (% av gjødseleffekten til MinP). Se tabell 2 for forklaring av numrene; grønne punkter: husdyrgjødselprodukter, blå punkter: fiskeslamprodukter.



Figur 3. Sammenhengen mellom andelen fosfor i ulike gjødselprodukter som er ekstraherbart med modifisert Olsen P (prøve:væske forhold 1:200) og gjødseleffekten, uttrykt som relativ gjødseleffekt (% av gjødseleffekten til MinP). 89 datapunkter fra egne forsøk og forskningsresultater fra Københavns Universitet (kontakt: Dorette Müller-Stöver og Camilla Lemming) og Aarhus Universitet (kontakt: Gitte Rubæk).

spredning mellom datapunktene, og at en kjemisk ekstraksjon ikke vil kunne brukes til nøyaktig predikering av fosforgjødseffekten til organiske gjødselprodukter.

I denne metaanalysen inkluderte vi ikke 1) kalkete produkter, 2) termisk behandlet avløps slam og 3) struvitt. Fosforgjødseffekten til disse produktene kunne ikke bli forklart av modifisert Olsen P.

Konklusjoner

Veksthusforsøket med et næringsfattig vekstmedium viste store forskjeller i fosforkvaliteten til 15 ulike organiske gjødselprodukter. Produkter basert på husdyrgjødsel hadde bedre fosforgjødseffekt til bygg enn produkter basert på fiskeslam. Behandlingsteknologi så ut til å ha betydning for plantetilgjengeligheten av fosforet. Det er derfor viktig at effekten på fosforkvalitet i sluttproduktet tas med i vurderingen når en velger behandlingsteknologi for å redusere vanninnhold i gjødsel og dermed tilrettelegge for transport over større avstander. Samtidig vil en vellykket fosforresirkulering forutsette at kostnadene knyttet til behandlingsteknologien holdes så lave at resirkuleringsgjødsel kan bli et reelt alternativ til mineralgjødsel for bonden.

Riktig dosering av det organiske gjødselproduktet krever at gjødseffekten er kjent. Forskjellene i fosforgjødseffekten kunne i noen grad bli forklart med kjemiske ekstraksjonsmetoder. Andelen fosfor i de organiske gjødselproduktene som ble ekstrahert med modifisert Olsen P (1:200) forklarte ca. 60 % av variasjonen mellom produktenes gjødseffekt, både i forsøket vårt som er beskrevet her og i en norsk-dansk metaanalyse. Tidligere har vi anbefalt å erstatte P-AL med Olsen P (1:20). Basert på våre nye undersøkelser som vi har presentert her, anbefaler vi nå modifisert Olsen P (1:200) som indikator for plantetilgjengelig fosfor i organiske gjødselprodukter.

Det er viktig å presisere at en kjemisk ekstraksjonsmetode ikke vil kunne gi et nøyaktig svar på andelen fosfor i gjødselproduktet som er plantetilgjengelig. I gjødselplanleggingen vil en estimert tilgjengelighet som ikke er nøyaktig f.eks. angitt som intervall likevel være tilstrekkelig, siden fosfor ikke styrer avlingen i like stor grad som nitrogen.

For mer informasjon om bruk av organiske avfallsprodukter som gjødsel, se:
www.nibio.no/kretslop-sis
www.nibio.no/organisk-avfall

Referanser

Aas, T.S., Ytrestøyl, T. & Berge, G.M. 2016. Tørrstoffinnhold i slam fra landbasert produksjon av Atlantisk laks. Nofima Rapport 32/2016. 19 s.

Christel, W., Bruun, S., Magid, J., Jensen, L.S. 2014. Phosphorus availability from the solid fraction of pig slurry is altered by composting or thermal treatment. *Bioresource Technology* 169: 543–551.

Degryse, F., Baird, R., da Silva, R.C. & McLaughlin, M.J. 2017. Dissolution rate and agronomic effectiveness of struvite fertilizers – effect of soil pH, granulation and base excess. *Plant and Soil* 410: 139–152.

Hamilton, H.A., Brod, E., Hanserud, O., Müller, D.B., Brattebø, H., Haraldsen, T.K. 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.

Henriksen, T.M., Kristoffersen, A.Ø., Brod, E. & Øgaard, A.F. 2019. Nitrogeneffekt av organisk avfall til korn – et forsøk i laboratoriet. NIBIO BOK 5(1): 140–145.

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

Talboys, P.J., Heppel, J., Roose, T., Healey, J.R., Jones, D.L. & Withers, P.J.A. 2016. Struvite: a slow-release fertilizer for sustainable phosphorus management? *Plant and Soil* 401: 109–123.