TEKNOLOGISK INSTITUT

Projekt 2018-2019 under Region Midtjyllands Bioøkonomiprogram

Afgasset gylle som startgødning for majs

Titel:
Afgasset gylle som startgødning for majs

Udarbejdet for:
Grøngas og JH Agro med støtte fra Region Midtjyllands Bioøkonomiprogram

Udarbejdet af:
Teknologisk Institut - AgroTech
Agro Food Park 15, Skejby
8200 Aarhus N
Bioressourcer og Bioraffinering

Oktober 2019

Forfattere: Søren Ugilt Larsen & Thorkild Qvist Frandsen

Fotos, hvis ikke andet angivet: Søren Ugilt Larsen

Forsidefoto: Forsøgsopstilling i forbindelse med separation af afgasset gylle med skruepressere og naturlig sedimentation i forsøgssiloer.

TEKNOLOGISK INSTITUT

midt regionmidtjylland

Indholdsfortegnelse

Sammendrag 4
1. Indledning 7
2. Afdækning af analyser af fosfor og plantetilgængelighed af fosfor 8
3. Materialer og metoder 12
3.1. Separation af afgasset gylle med to skruepresser 12
3.2. Separation af afgasset gylle og væskefraktion ved naturlig sedimentation 14
3.3. Fældning af fosfor i afgasset gylle med jern, aluminium og polymer 17
3.4. Forbrænding af gyllefiber og hønsegødning 18
4. Resultater og diskussion 20
4.1. Separation af afgasset gylle med to skruepresser 20
4.2. Separation af afgasset gylle og væskefraktion ved naturlig sedimentation 26
4.3. Fældning af fosfor i afgasset gylle med jern, aluminium og polymer 39
4.4. Forbrænding af gyllefiber og hønsegødning 42
5. Konklusion 47
6. Referencer 49
Appendiks 1. Fotos fra forsøg med skruepresser 51
Appendiks 2. Fotos fra forsøg med naturlig sedimentation 55
Appendiks 3. Fotos fra fældningsforsøg med afgasset gylle 61
Appendiks 4. Fotos fra forsøg med forbrænding af gyllefiber og hønsemøg 66

Sammendrag

I projektet 'Afgasset gylle som startgødning for majs' er der i perioden 2018-2019 gennemført en række aktiviteter til at belyse mulighederne for at op-koncentrere og øge plantetilgængeligheden af fosfor (P) i afgasset gylle fra biogasanlæg.

En afdækning af analyser af P-indhold og P-gødningsværdi af restprodukter viste, at dette er komplekst at analysere, og at det kan være en udfordring at få en god indikation både af total-P og plantetilgængeligt P. Den bedste indikation af P-gødningsværdi fås ved egentlige dyrkningsforsøg med planter enten i potter eller i markforsøg, men disse er meget krævende og dyre. Inkubation af restprodukter i jord og efterfølgende laboratorieanalyse ved kemisk ekstraktion af P fra jordprøver kan være en anden mulighed, som i nogen udstrækning tager højde for samspillet mellem restprodukt og jordmiljøet. Den enkleste analyse for P-gødningsværdi opnås ved laboratorieanalyse med kemisk ekstraktion af P direkte på restproduktet. Der er lavet forsøg med en lang række forskellige ekstraktionsmidler og -metoder med varierende hårdhed af ekstraktionen, og hvor en større eller mindre del af total-P derved ekstraheres. Svagheden ved disse analyser er, at der ikke er fundet én analysemetode, som generelt giver god korrelation med faktisk P-optagelse i planter under mange forskellige forhold. Nye undersøgelser tyder dog på, at ekstraktion med bikarbonat (Olsen-P-metoden) generelt korrelerer bedst med P-optagelsen i planter.

Der blev gennemført forsøg med separation af afgasset gylle med en Börger skruepresse og en EYS skruepresse. Ved separationen skete der generelt en opkoncentrering af tørstof, aske, total-N, total-P og P-fraktioner samt en lille reduktion i koncentrationen af NH_4-N i fiberfraktionen sammenlignet med usepareret afgasset gylle. Til gengæld var der stort set ingen ændring i koncentrationerne i væskefraktionen. Koncentrationen af total-P blev øget fra 0,7 kg pr. ton før separationen til 1,3-2,0 kg pr. ton i fiberfraktionen. Som gennemsnit udgjorde vandopløseligt P og citratopløseligt P hhv. 31 og 87 % af total-P. Koncentrationen af K og S var ikke påvirket af separationen.

Kapaciteten af de to skruepresser var 9,98 og 7,00 tons råvare pr. time for hhv. Börger skruepressen og EYS skruepressen, og der blev frasepareret hhv. 0,68 og 0,34 tons fiberfraktion pr. time med hhv. 29,3 og 39,5% tørstof. Der var ingen signifikant forskel mellem de to skruepresser mht. den procentvise andel i fiberfraktionen af tørstof, aske eller næringsstoffer. De to skruepresser havde således samme separationseffektivitet men forskellig kapacitet pr. time og forskelligt tørstofindhold i fiberfraktionen. Fiberfraktionen fra de to skruepresser udgjorde 27,8-29,0% af mængden af tørstof, 9,6-10,6% af total-N, 4,2-4,6% af NH_4-N og 4,3-7,6% af K. Desuden udgjorde fiberfraktionen 13,8-14,1% af total-P, 9,8-10,8% af vandopløseligt P og 13,1-16,5% af citratopløseligt P. Resultaterne tyder på, at P er lidt mindre plantetilgængeligt i fiberfraktionen end i væskefraktionen. Samlet set er der tale om en beskeden opkoncentrering af fosfor i fiberfraktionen.

Der blev gennemført forsøg i 3,3 m høje forsøgssiloer med naturlig sedimentation i afgasset gylle samt væskefraktion fra hhv. Börger og EYS skruepresser. Der blev udtaget prøver i 6 forskellige prøvedybder efter 1, 4, 11 og 50 dages sedimentation, og prøverne blev analyseret for koncentration af tørstof og næringsstoffer. Generelt

blev der observeret en koncentrationsgradient op igennem siloernes profil med højest koncentration tæt på bunden og lavere længere oppe, især for tørstof, total-N og total-P men mere moderat for NH_4-N og ikke for total-K. Efter 50 dages sedimentation varierede koncentrationen af total-P fra ca. 0,6 kg pr. ton tæt ved bunden til ca. 0,4 kg pr. ton øverst i siloen med afgasset gylle og fra ca. 0,45 til ca. 0,3 kg pr. ton i siloen med væskefraktion fra Börger skruepresse.

Hvis man udtager de nederste 25 eller 50% af beholdervolumenet med afgasset usepareret gylle, vil der i princippet kunne udtages hhv. 25,8 og 51,5% af total-P efter 11 dages sedimentation og 27,4 og 52,1% af total-P efter 50 dages sedimentation. For væskefraktionen fra Börger skruepressen vil der tilsvarende kunne fjernes 27,5 og 53,7% af total-P efter 11 dages sedimentation og 31,4 og 58,4% af total-P efter 50 dages sedimentation. Pga. den relativt beskedne koncentrationsgradient for total-P efter sedimentation synes der derfor kun at være et meget beskedent potentiale for at kunne udtage en særligt fosforrig fraktion ved denne form for separation.

Koncentrationen af citratopløseligt P og vandopløseligt P blev analyseret efter 4 dages sedimentation. Generelt var der beskeden effekt af prøvedybde på koncentrationen, og der var ingen sikker effekt på andelen af citratopløseligt P og vandopløseligt P målt som procentvis andel af total-P, der i gennemsnit udgjorde 80% og 35% af total-P. Til gengæld faldt den procentvise andel af begge P-fraktioner med stigende indhold af total-P, mest markant for vandopløseligt P, som udgjorde 41 og 19% af total-P ved hhv. 0,5 og 1,0 kg total-P pr. ton. Disse sammenhænge tyder på, at der ved høje indhold af total-P er en større andel af P, som er hårdere bundet og dermed på kort sigt mindre tilgængelig for planter.

Der blev gennemført et forsøg i laboratorie-skala med fældning af fosfor i afgasset gylle vha. tilsætning af jernsulfat, jernklorid eller aluminiumklorid efterfulgt af tilførsel af en polymer. Væskefasen blev dekanteret manuelt og analyseret for koncentration af total-P. Forsøget viste, at tilførsel af jern eller aluminium alene ikke medførte nogen særlig god separation i væskefase og fast fase, men kombinationen af jern og polymer kunne reducere koncentrationen af total-P i væskefraktionen med op til ca. 97%. En kombination af fældningsmidler og efterfølgende separation med f.eks. dekantercentrifugering kan derfor potentielt medføre en meget stor andel af total-P i fiberfraktionen. Forsøgets resultater skal dog verificeres i forsøg i større skala og i kombination med separation. Endvidere er der behov for at lave en økonomisk vurdering af separationsmetoden med fældningsmidler og polymer, ligesom der skal tages hensyn til evt. udfordringer ved efterfølgende anvendelse af gyllefraktioner indeholdende polymer.

Der blev i en affaldsforbrændingskedel på AVV i Hjørring gennemført et forbrændingsforsøg med lige dele gyllefiber og hønsegødning. Tørstofindholdet i de to biomasser var hhv. 35 og 50%. Det var svært at blæse luft igennem biomassen på risten, og kedeltemperaturen faldt til godt 400°C, formodentlig pga. det høje vandindhold, som efterfølgende medførte markant stigning i fugtigheden i røggassen og potentielt problemer med at overholde NOx-grænser. Hvis gyllefiber skal forbrændes, er der således behov for en større grad af afvanding af gyllefiberen eller alternativt, at der iblandes en større andel af biomasse med lavere vandindhold. Analyser af P-indholdet i de to biomasser og i asken viste et væsentligt højere indhold af total-P i

hønsegødning end i gyllefiber, men andelen af vandopløseligt P og citratopløseligt P var lavere i hønsegødningen. Der var betydelig usikkerhed i forbindelse med udtagning af askeprøver fra forbrændingsforsøget, men uanset askens oprindelse, så var andelen af vandopløseligt P og citratopløseligt P meget lav sammenlignet med P i både gyllefiber og hønsegødning før forbrænding.

1. Indledning

Denne rapport beskriver forsøg med teknologier til separation af P fra afgasset gylle på et biogasanlæg. Forsøgene er udført som led i projektet 'Afgasset gylle som start-gødning for majs', som er gennemført i 2018-2019 med støtte fra Region Midtjyllands Bioøkonomiprogram. Aktiviteterne omfatter 1) en afdækning af analyser til vurdering af plantetilgængeligheden af P, 2) et separationsforsøg med test af to forskellige skruepressere 3) et sedimentationsforsøg til test af fordelingen af P m.m. ved naturlig separation af afgasset gylle og væskefraktionen efter separation af afgasset gylle med skruepresser, 4) afbrændingsforsøg med afgasset gyllefiber sammen med høn-segødning. Projektet er gennemført i samarbejde mellem virksomhederne Grøngas A/S, JH Agro og Teknologisk Institut. Kemira Water Danmark har medvirket ved for-søg med fældning af P, og Affaldsselskabet Vendsyssel Vest I/S (AVV) i Hjørring har medvirket ved forbrændingsforsøget.

2. Afdækning af analyser af fosfor og plantetilgængelighed af fosfor

Metoder til vurdering af fosforgødningsværdi af restprodukter

Ved anvendelse af forskellige P-holdige restprodukter mm. som gødningsmidler er det af stor vigtighed at kunne vurdere P-gødningsværdien, dvs. hvor meget P der er tilgængeligt for planten ved gødskning med gødningsmidlerne. Behovet bliver forstærket af ønsket om en større recirkulering af næringsstoffer, bl.a. via genanvendelse af diverse restprodukter, som kan variere betydeligt i kemiske sammensætning og dermed potentielt også i P-gødningsværdi.

Metoderne til at vurdere P-gødningsværdien kan opdeles i tre kategorier (Brod, 2018): 1) Vækstforsøg hvor der gødskes med restproduktet i potteforsøg eller markforsøg, og hvor effekten vurderes ud fra planters biomasseproduktion og P-koncentrationen, hvorved P-optagelsen kan beregnes. 2) 'Inkubationsforsøg' hvor restproduktet tilføres til jord, og hvor der efter inkubation ved givne betingelser (tid, temperatur) udtages en jordprøve til standard-jordanalyse for P-indhold. 3) Kemisk ekstraktion hvor der laves laboratorieanalyse direkte på restproduktet ved brug af forskellige ekstraktionsmidler.

Dyrkningsforsøg opfattes som den bedste metode til at vurdere plantetilgængeligheden af P (Brod, 2018). Ulempen ved dyrkningsforsøgene er, at de er meget tidskrævende og dyre, ikke mindst hvis man både vil måle den umiddelbare P-gødningsværdi og værdien over længere tid. Det er derfor ønskeligt med lettere, hurtigere og billigere metoder til at analysere P-gødningsværdien. Derfor er der gennem tiden afprøvet mange forskellige laboratorieanalysemetoder som indikator for plantetilgængeligheden af P (Brod, 2018). Analysemetoderne er generelt blevet vurderet ved at sammenholde resultaterne med den 'sande' P-gødningsværdi i enten potteforsøg eller markforsøg (Christiansen et al., 2018). Plantetilgængeligheden af P er imidlertid kompleks, hvilket understreges af, at en lang række undersøgelser endnu ikke har ført til en universel analysemetode, som konsistent kan forudsige plantetilgængeligheden af P under alle eller de fleste forhold. Derimod er der eksempler på, at en laboratoriemetode har en god korrelation med den reelle P-gødningsværdi under nogle forhold, mens en anden laboratoriemetode giver en bedre korrelation under andre forhold (f.eks. (Brod et al., 2015).

Analyse af total-fosfor

Udover plantetilgængeligheden af P er man ofte interesseret i at kende det samlede indhold af P (total-P) i et givent gødningsmiddel eller restprodukt. Dette gøres ofte vha. kraftige metoder til at frigøre P, ofte ved anvendelse af forskellige former for stærke syrer, men hvor metoden afhænger af det materiale, der skal analyseres (Rubæk et al., 2018b). For husdyrgødning og slam anvendes f.eks. 'oplukning'/'destruktion' med salpetersyre (DS259) (Rubæk et al., 2018b). De forskellige metoder til bestemmelse af total-P kan give forskellige resultater, og metoderne identificerer

ikke nødvendigvis den 'sande' totale mængde P i prøven. Dette kan være et betydeligt problem f.eks. i forhold til, hvor meget P der reelt tilføres landbrugsjorden, mens det ved sammenligning af forskellige produkters indhold af total-P kan være af mindre betydning (Rubæk et al., 2018b). Bestemmelse af total-P kan således i sig selv være en udfordring.

Analyse af plantetilgængeligt fosfor ved kemisk ekstraktion

Ved bestemmelse af plantetilgængeligheden af P i et givent gødningsmiddel anvender man ofte en mildere ekstraktionsmetode end ved bestemmelse af total-P, da dette bedre efterligner ligevægtsforholdene i jorden (Brod, 2018), og da kun en lille andel af jordens P er opløst og tilgængelig for planterne (Rubæk, 2018). En lang række forskellige ekstraktionsmidler og -metoder er blevet testet, og i et stort dansk P-projekt, der blev afsluttet i 2018, blev der f.eks. anvendt metoder med følgende ekstraktionsmidler (Christiansen et al., 2018):

- Vand
- Citronsyre ($C_6H_8O_7$)
- Oxalsyre ($C_2H_8N_2O_4$)
- Bikarbonat ($NaHCO_3$, 'Olsen-P')
- Resin (anionbyttermembran)
- Ammonium-citrat ($C_6H_{11}NO_7$)
- Saltsyre (HCl)
- Ammonium-acetat ($C_2H_7NO_2$)
- Ammonium-fluorid (NH_4F)

I andre studier er der desuden anvendt f.eks. ekstraktion med myresyre (CH_2O_2) (Duboc et al., 2017), eddikesyre (CH_3COOH), jernhydroxid og ammonium-laktat ($C_3H_9O_3N$) (Brod et al., 2015).

I sådanne studier er de forskellige laboratoriemetoder til bestemmelse af plantetilgængeligt P afprøvet på en række forskellige P-holdige restprodukter. Resultaterne er sammenholdt med planters P-optagelse i potteforsøg eller markforsøg, hvor der er gødsket med de givne restprodukter, og hvor der som reference er et forsøgsled uden P-gødskning og et eller flere forsøgsled med tilførsel af mineralsk P-gødning, f.eks. tripelsuperfosfat ($Ca(H_2PO_4)_2$) (Christiansen et al., 2018). Ud fra resultaterne kan P-gødningsværdien opgøres på forskellig vis. Ved opgørelsesmetoden 'P-genfindelse' beregnes det, hvor stor en del (i procent) af det tilførte P, der er optaget i plantebiomassen, men efter at man har fratrukket den mængde P, planterne har optaget i forsøgsledet uden P-gødskning (Christiansen et al., 2018), dvs. der korrigeres for den mængde P, som jorden naturligt stiller til rådighed. Ved opgørelsesmetoden 'mineralsk P-gødningsækvivalent' ('Mineral Fertilizer Equivalent', MFE) sammenholdes P-genfindelsen for det givne restprodukt med genfindelsen efter tilførsel af mineralsk P-gødning (angives også i procent) (Christiansen et al., 2018). En MFE-værdi på f.eks. 50% betyder således, at P i restproduktet virker halvt så godt som en tilsvarende dosis P i mineralsk handelsgødning.

I den østrigske undersøgelse af Duboc et al. (Duboc et al., 2017) korrelerede de almindelige P-ekstraktionsmetoder anvendt direkte på gødningsmidlerne generelt dårligt med både P-koncentration og tørstofproduktion i vinterrug i potteforsøg. Der var en lidt bedre korrelation ved ekstraktion på jordprøver, hvor gødningsmidlerne forinden var blevet tilført, enten ved ekstraktion med bikarbonat (Olsen-P) eller calcium-acetat-laktat (CAL). Den bedste korrelation blev opnået for mere avancerede metoder som 'iron bag method' og 'diffusive gradients in thin films' (DGT). Det blev konkluderet, at der er behov for bedre P-analyser end de almindeligt anvendte ekstraktionsmetoder, specielt for restprodukter af meget varierende sammensætning.

I den norske undersøgelse af Brod et al. (Brod et al., 2015) blev der testet 8 forskellige kemiske P-ekstraktionsmetoder for evnen til at forudsige P-gødningsværdien umiddelbart efter tilførsel samt sidst på vækstsæsonen i potteforsøg med alm. rajgræs i potteforsøg, der blev høstet 4 gange. Der indgik 9 forskellige P-holdige restprodukter (bl.a. gyllefiber af afgasset gylle), og gødningerne blev testet i jord med pH 5,5 hhv. pH 6,9. I jord med pH 5,5 blev der for første høst opnået den bedste korrelation ved ekstraktion med $CaCl_2$ og samtidig adsorption af P til filterpapir med jernoxid, mens der for summen af 2., 3. og 4. høst var bedst korrelation for ekstraktion med en neutral ammonium-citrat-opløsning. I jord med pH 6,9 var der bedst korrelation for ekstraktion med bikarbonat (Olsen-P) ved både 1. høst og summen af 2., 3. og 4. høst, mens de øvrige overestimerede P-gødningsværdien af restprodukterne. Det konkluderedes, at den optimale ekstraktionsmetode afhænger både af pH i den givne jord og af, om det drejer sig om den umiddelbare P-gødningsvirkning eller virkningen senere i vækstsæsonen (Brod et al., 2015).

I den danske undersøgelse af Rubæk et al. (Christiansen et al., 2018; Rubæk et al., 2018a) blev der lavet forsøg med 11 typer P-holdige restprodukter, hvis P-gødningsvirkning blev testet i potteforsøg med vårbyg og anvendelse af tre forskellige jordtyper. Af de afprøvede laboratorieekstraktionsmetoder for P (nævnt ovenfor) opnåedes den bedste korrelation for ekstraktion med bikarbonat på alle tre jordtyper. Derimod korrelerede ekstraktion med forskellige syrer og med demineraliseret vand generelt dårligt med den reelle P-genfindelse i potteforsøgene; syrerne ekstraherede generelt for stor en andel af total-P, mens vand generelt ekstraherede meget lave andele af total-P. Det konkluderedes derfor, at ekstraktion med bikarbonat på nuværende tidspunkt er den bedst egnede metode, og at den kan bruges til en simpel klassificering af restprodukters gødningsværdi (Christiansen et al., 2018). Der er dog stadig generelt få studier af kemiske ekstraktionsmetoders evne til at beskrive plantetilgængeligt P i forskellige restprodukter (Brod, 2018).

Analyse af plantetilgængeligt fosfor efter inkubation i jord

Som alternativ til analyse efter kemisk ekstraktion direkte på restproduktet kan der som nævnt laves inkubationsforsøg, hvor restproduktet først tilføres til en given jord, hvorefter der senere analyseres for plantetilgængeligt P i jordprøver med og uden tilførsel af restproduktet (Brod, 2018). Inkubationsforsøg kan give en god indikation af den relative plantetilgængelighed af P i restprodukter, da de i lidt større grad tager højde for samspillet mellem gødningsmidlet og jorden. For laboratorieanalyser af

vandopløseligt P er det f.eks. påpeget, at bl.a. det anvendte forhold mellem fast stof (f.eks. aske) og vand samt pH-værdien i det anvendte vand kan være anderledes end under jordforhold, og at den målte plantetilgængelighed derfor kan afvige fra det reelle niveau i jorden (Skov & Jensen, 2015). F.eks. er pH i vandet i laboratorieanalyser typisk 7,0, mens det i jorden ligger omkring 5,5 (Skov & Jensen, 2015). Ved inkubationsforsøg vil man derfor i højere grad måle P-tilgængeligheden ved reelle pH-værdier m.m.

Christiansen et al. (Christiansen et al., 2018) fandt da også en højere korrelation mellem laboratorieanalyser og P-virkningen i potteforsøg, når gødningsmidlet først blev inkuberet i jord i 7 dage ved 20°C og dernæst analyseret fremfor at analysere direkte på gødningsmidlet. Dette gjaldt både ved P-ekstraktion med vand og med bikarbonat. Inkubationsforsøg kan derfor give mere information end kemisk analyse direkte på restproduktet, og arbejdsindsatsen er væsentligt mindre sammenlignet med egentlige dyrkningsforsøg. Inkubationsforsøg har da også sin begrænsning, da der ikke er planter involveret i inkubationsforsøg og dermed heller ikke exudater fra planterødder, som ellers kan være med til at påvirke tilgængeligheden af P (Brod, 2018).

Valg af fosforanalyser i nærværende undersøgelse

Ovennævnte undersøgelser indikerer, at der ikke synes at være nogen universel laboratorieanalyse, som konsistent forudsiger P-gødningsværdien af forskellige restprodukter. Valget af laboratorieanalyse til nærværende projekt er derfor foretaget ud fra en vurdering af, hvilke analyser der synes 'mindst ringe', hvilke kommercielle laboratorieanalyser, der er tilgængelige samt prisen på analyserne. Desuden var det ønskeligt at få lavet alle analyser på samme laboratorium.

Som to yderpunkter mht. hårdhed af ekstraktionen er der valgt total-P og vandopløseligt P. Tilsammen forventes disse at kunne indikere, om der er væsentlige forskelle i plantetilgængeligheden af P i de forskellige prøver fra forsøgene, ikke mindst via beregning af andelen af vandopløseligt P som procent af total-P. Desuden er der valgt analyse af citratopløseligt P, der vurderes at udgøre en mellemting mellem total-P og vandopløseligt P mht. ekstraktionsgrad. Laboratoriet Eurofins kan lave alle disse tre P-analyser.

Ekstraktion med bikarbonat (Olsen-P) ville også være en interessant analyse, da den har vist god korrelation med P-optagelse i dyrkningsforsøg (Christiansen et al., 2018). Men da metoden indtil videre primært er anvendt til analyse af P i jordprøver, og da der indenfor projektet ikke var mulighed for at lave inkubationsforsøg med gylleprøver m.m. i jord, blev denne analyse fravalgt.

3. Materialer og metoder

3.1. Separation af afgasset gylle med to skruepresser

Forsøgets gennemførelse

Ved biogasanlægget Grøngas Vraa blev der 1. april 2019 gennemført forsøg med separation af afgasset gylle med to forskellige skruepresser:

- Börger, Type RC 50 HP, No. 15014912 1.1, produceret i 2016 af Börger, Tyskland. Skruepressen blev stillet til rådighed og indstillet af Grøngas Vraa.
- EYS Separator, Type SP600HD, serienummer 1H0726153, produceret i 2015 af EYS Metal Sanayi Ve Ticaret Ltd. Sti., Tyrkiet. Skruepressen blev stillet til rådighed og indstillet af JH Agro.

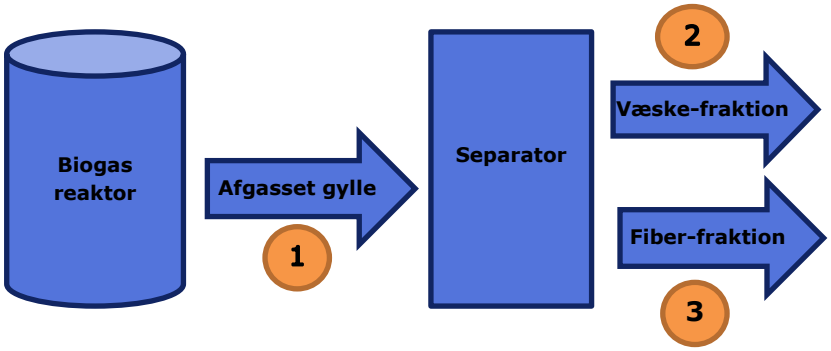
Börger skruepressen var fastmonteret ved Grøngas Vraa, og modtrykket blev indstillet ud fra biogasanlæggets erfaringer således, at fiberfraktionen blev relativt tør og uden afløb af væske fra stakken. EYS skruepressen var opstillet til forsøget, og modtrykket blev indstillet af JH Agro.

Ved forsøget blev hver skruepresse kørt i nøjagtigt 60 minutter, og de to tests blev startet med to timers mellemrum og med udtag af afgasset gylle samme sted. I begge tilfælde blev fiberfraktionen opsamlet i skovlen på en gummiged, og væskefraktionen blev opsamlet i en tankvogn. Både gummiged og tankvogn blev vejet på brovægt (med 20 kg interval) før og efter hver test, hvorved vægtfordelingen mellem de to fraktioner kunne bestemmes. Der var ikke mulighed for at kvantificere mængden af afgasset gylle ved indfødningen i skruepresserne, så den samlede mængde afgassede gylle blev beregnet som summen af fiberfraktionen og væskefraktionen.

I løbet af hver test blev der udtaget 2 prøver af den afgassede gylle ved indløbet samt 4 prøver af hhv. væskefraktionen og fiberfraktionen. Prøvetagningen var jævnt fordelt over de 60 minutters testkørsel. Af de udtagne prøver blev der indsendt følgende prøver til analyse:

- Afgasset gylle før separation: I alt 3 prøver som fungerede som reference for indgangsmaterialet/input ved test af begge skruepresser
- Fraktioner fra Börger skruepressen: I alt 3 prøver af hhv. fiberfraktionen og væskefraktionen
- Fraktioner fra EYS skruepressen: I alt 3 prøver af hhv. fiberfraktionen og væskefraktionen

I alt 15 prøver blev udtaget til analyse samt 5 ekstra prøver til reserve. Princippet for separationsforsøgene samt udtagningsstederne for prøverne er skitseret i figur 1.



Figur 1. Skitse over princippet i separationsforsøgene og angivelse af steder for prøveudtagning.

Laboratorie-analyser

Prøverne fra forsøget med separation med skruepresser blev analyseret af Eurofins i Vejen for følgende parametre:

- Tørstofindhold
- Total-N
- NH_4-N
- Total-K
- Total-P

} Analysenummer PDRQ7

- Vandopløseligt P — Analysenummer CAA26
- Citratopløseligt P — Analysenummer CAI33
- Total-S — Analysenummer CA508
- Aske — Analysenummer DR182

Beregninger og dataanalyse

Ud fra råvaremængderne og koncentrationerne af tørstof, aske og næringsstoffer i input og de to fraktioner fra hver skruepresse er der beregnet massebalancer for fordelingen af tørstof, aske og næringsstofferne.

Der er udført statistiske analyser med proc mixed-proceduren i softwarepakken SAS version 9.3. Der er lavet tre typer af statistiske analyser vedr. hhv. koncentrationer, mængder og procentandele i fraktioner ved separation med de to skruepresser. Alle tre typer analyser er gennemført for hhv. tørstof, aske og hvert af de analyserede næringsstoffer.

Analysen af forskelle i koncentrationen af tørstof, aske og næringsstoffer omfattede 5 forskellige forsøgsled, nemlig afgasset, usepareret gylle (input) og hhv. væskefraktion og fiberfraktion (output-fraktioner) fra både Börger og EYS skruepresserne. Der indgår tre gentagelser for hvert forsøgsled i form af de tre separate prøver til laboratorieanalyse.

Analysen af forskelle i mængden pr. time af tørstof, aske og næringsstoffer efter én times testkørsel for hver af de to skruepresser omfattede 6 forskellige forsøgsled,

nemlig afgasset, usepareret gylle, væskefraktion og fiberfraktion fra hver af de skruepresser. Da der ikke er gentagne målinger af råvaremængder pr. time, kan der ikke laves statisk analyse vedr. forskelle i råvaremængde. For mængden af tørstof, aske og næringsstoffer er der beregnet tre værdier pr. forsøgsled ved at gange råvaremængden med de tre separate laboratorieanalyser pr. forsøgsled, hvorefter der kan laves statistisk analyse.

Analyse af forskelle i procentfordelingen af tørstof, aske og næringsstoffer efter én times testkørsel for hver af de to skruepresser omfattede 4 forskellige forsøgsled, nemlig væskefraktion og fiberfraktion fra hver af de to skruepresser. Procentandelene er beregnet ved at sætte hver af de tre beregnede mængde-værdier for output for hvert forsøgsled i forhold til den gennemsnitlige mængdeværdi for input, hvorefter der kan laves statistisk analyse.

3.2. Separation af afgasset gylle og væskefraktion ved naturlig sedimentation

Forsøgets gennemførelse

I forlængelse af separationsforsøget 1. april 2019 blev der iværksat et forsøg med naturlig sedimentation i følgende typer gylle/fraktioner:

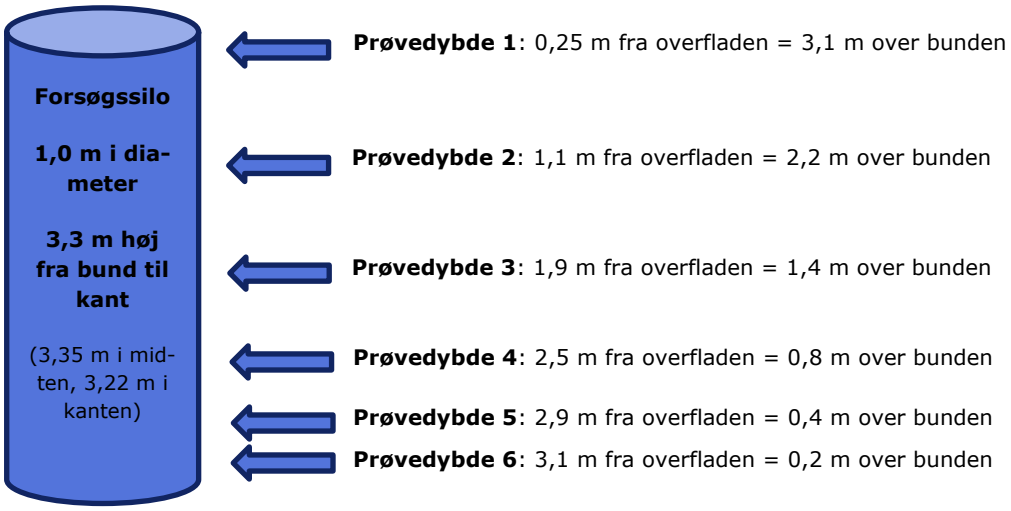
1. Afgasset, usepareret gylle
2. Væskefraktion fra skruepresning afgasset gylle med Börger skruepresse
3. Væskefraktion fra skruepresning afgasset gylle med EYS skruepresse

Afgasset gylle og væskefraktioner blev udtaget umiddelbart efter separationsforsøget og med samme indstillinger af de to skruepresser. Sedimentationsforsøgene blev gennemført i forsøgssiloer, der er 1,0 m i diameter og 3,3 m høje (svagt buet bund med 3,35 m højde i midten og ca. 3,22 m i kanten). Siloerne blev fyldt med afgasset gylle eller væskefraktion op til ca. 5 cm fra siloernes overkant. Ved fyldningen blev der løbende udtaget 3 prøver af hver af de tre typer som repræsenterer den generelle sammensætning før sedimentation, dvs. svarende dag 0.

Til at belyse hastighed og omfanget af sedimentation af næringsstoffer under naturlig sedimentation blev der udtaget prøver i forskellige dybder på følgende tidspunkter:

- Efter 1 dag (20-23 timer)
- Efter 4 dage
- Efter 11 dage
- Efter 50 dage (dog kun for afgasset, usepareret gylle og væskefraktion fra Börger skruepresse)

På hvert prøvetagningstidspunkt blev der udtaget prøver af væsken i 6 dybder i hver silo som vist i figur 2. Som det fremgår var der mindre afstand mellem prøvetagningsdybderne nederst i siloerne, da der blev forventet at være mest markant gradient i denne del af siloerne.



Figur 2. Skitse over prøvetagningsdybder i sedimentationsforsøget.

Prøverne udtaget efter et døgns sedimentation blev udtaget med en flaske (1 L) monteret på enden af en stang, der blev nedsænket til den forudbestemte dybde, hvor flasken blev åbnet ved at hive proppen op via en snor, hvorefter prøveflasken blev fyldt. Fortrængningen af luften i prøveflasken medførte boblen op igennem gyllen, som potentielt kunne forstyrre lagdannelsen i siloen. Derfor blev prøverne efter 4, 11 og 50 dages sedimentation udtaget med en prøvetager i form af et rør (45 mm i diameter), der kunne åbnes og lukkes i enden med en konisk gummiprop via en jernstang ned igennem røret. Rørets ende blev nedsænket til den givne prøvedybde, hvor røret blev åbnet for at lade væske løbe ind i røret, hvorefter røret blev lukket igen, før røret blev hejst op.

Ved alle prøvetagninger blev prøverne udtaget oppefra (dvs. først nærmest overfladen og efterhånden dybere), og der blev rørt så lidt som muligt i gyllen ved prøvetagningen. I hver silo blev der ved hver prøvetagningstid og prøvetagningsdybde udtaget 2 prøver i hhv. venstre og højre side af siloen (hhv. gentagelse A og B, hvor A-prøven altid blev udtaget først), og disse prøver blev indsendt til separat analyse og fungerede dermed som duplikater. Udover prøverne udtaget på dag 0 blev der i alt udtaget 132 prøver.

Laboratorie-analyser

Alle prøver fra sedimentationsforsøget blev analyseret af Eurofins ved Vejen for følgende parametre:

- Tørstofindhold
- Total-N
- NH_4-N
- Total-K
- Total-P

} Analysenummer PDRQ7

Desuden blev alle prøver fra dag 0 og dag 4 (i alt 45 prøver) analyseret for følgende parametre:

- Vandopløseligt P Analysenummer CAA26
- Citratopløseligt P Analysenummer CAI33

Beregninger og dataanalyse

Der er udført statistiske analyser med proc mixed-proceduren i softwarepakken SAS version 9.3. Der er lavet dataanalyse for hver enkelt måleparameter vedr. koncentrationer af tørstof, aske og diverse næringsstoffer. For hver måleparameter blev data analyseret separat for hhv. afgasset gylle, væskefraktion fra Börger skruepresse og væskefraktion fra EYS skruepresse og separat for hhv. 1, 4 og 11 dages sedimentationstid. For hver kombination af biomasse, måleparameter og sedimentationstid blev der lavet en regressionsanalyse med måleparameteren som responsvariabel og med højde over silobund (i meter) som forklarende kontinuert variabel. Højde over silobund blev også medtaget som andengrads-virkning for at tage højde for evt. ikke-lineær sammenhæng mellem højde over silobund og måleparameteren. Hvis der ikke var en signifikant andengrads-effekt (P>0,05), blev dette led udeladt, og analysen blev kørt igen med en reduceret, lineær model. Resultaterne af analyserne er præsenteret i figurer med observerede målinger (enkeltpunkter) og prædikterede sammenhænge (grafer). I figurerne er angivet P-værdier for hhv. førstegrads- og andengrads-effekt af højde over silobund samt den estimerede funktion, såfremt der var en signifikant sammenhæng. Hvis der ikke var nogen signifikant effekt af højde over silobund, er der blot angivet den gennemsnitlige måleværdi på tværs af alle højder over silobund, og der er ikke vist nogen prædikteret sammenhæng, dog er sammenhængen vist med en stiplet linje, hvis P-værdien er mellem 0,05 og 0,10.

Der er beregnet sammenhæng mellem andel af beholdervolumen (fra bunden af beholderen) og akkumuleret andel af total-P. Sammenhængen er beregnet ud fra koncentrationen af total-P i forskellige dybder i forsøgssiloerne efter hhv. 1, 4 og 11 dages sedimentation samt en antagelse om, at hver prøve repræsenterer fraktionen fra midtpunktet mellem prøvedybden og hhv. prøvedybden ovenover og nedenunder, dog repræsenterer den øverste prøve fra en given beregning kun fraktionen fra prøvedybden og ned til midtpunktet mellem prøvedybden og prøvedybden nedenunder. Sammenhængen er vist i figurer, hvor der også er angivet en 1:1-linje, dvs. den forventede sammenhæng, hvis der ikke var nogen variation i P-koncentration ned gennem beholderen.

Der er to analyser vedr. sammenhæng mellem indholdet af total-P (kg pr. ton) og andelen af hhv. citratopløseligt P og vandopløseligt P (begge som procent af total-P) baseret på analyser af prøver udtaget på dag 4 fra de tre siloer i sedimentationsforsøget. I den fulde model indgik som forklarende variabel indholdet af total-P (kg pr. ton, numerisk variabel) og væsketype (afgasset usepareret gylle, væskefraktion fra Börger skruepresse, væskefraktion fra EYS skruepresse, klassevariabel) samt vekselvirkningen mellem disse to faktorer. Ikke-signifikante faktorer blev udeladt successivt.

3.3. Fældning af fosfor i afgasset gylle med jern, aluminium og polymer

Forsøgets gennemførelse

Der blev 12/8 2019 lavet et forsøg i laboratorie-skala med fældning af fosfor fra afgasset gylle med tilsætning af jern, aluminium og polymer. Forsøget blev gennemført ved Grøngas Hjørring med hjælp og udstyr fra Kemira Water Danmark. Formålet med forsøget var at få en indikation af potentialet for at udfælde en fast fraktion med højt indhold af P fra afgasset gylle med henblik på efterfølgende separation i en dekantercentrifuge.

Forsøget blev udført på afgasset gylle fra Grøngas Hjørring, hvor en portion afgasset gylle blev udtaget fra efterlagringstanken umiddelbart inden fældningsforsøget. Der blev i første omgang lavet test med fældning ved tilsætning af følgende opløsninger med jern eller aluminium:

- Jern(III)klorid: Kemira PIX-111 med 13,8% jern
- Jern(III)sulfat: Kemira PIX-113 med 11,6% jern
- Aluminiumklorid: Kemira PAX-XL-100 med 9,3% aluminium

De tre fældningsmidler blev testet separat i bægerglas med omrører og i doser på op til 10 ml/l svarende til 10 l pr. ton gylle (1%). Ved tilsætning af fældningsmidlerne forekom der kraftig opskumning pga. CO_2 i den afgassede gylle, som skaber opdrift af de flokkulerede faste partikler. Derfor blev testen gennemført på portioner à 0,5 l afgasset gylle i 1,0 l bægerglas. Efter tilsætning af fældningsmidler blev der omrørt i 4 minutter, hvorefter prøverne henstod til naturlig bundfældning i 20 minutter. Herefter var konsistensen af gyllen for alle tre typer fældningsmiddel meget tyk og grødagtig, og der skete ikke nogen egentlig udfældning og ingen dannelse af væskefraktion. Det var derfor ikke muligt at udtage en prøve af væskefraktionen til analyse for koncentrationen af total-P.

Herefter blev der afprøvet tilsætning af forskellige typer polymerer til delprøver af den afgassede gylle med jern- eller aluminiumopløsning. Der blev prøvet flere kationpolymerer (C 2250, C 2240 og C 2230) og en anion-polymer (A 1883 RS). Der var ingen effekt af anion-polymeren, mens kation-polymeren SUPERFLOC C 2240 virkede bedst, og denne blev derfor testet for hver af de tre ovennævnte prøver af afgasset gylle med jern- eller aluminiumopløsning. Der blev lavet en 0,2% polymeropløsning, og til delprøver à 200 ml afgasset gylle blev der tilsat 100 ml polymeropløsning, svarende til tilsætning af 1 kg polymer pr. ton gylle. Polymeropløsningen og den afgassede gylle blev blandet grundigt, hvorefter der skete en markant udfældning af fast stof, som resulterede i en nogenlunde klar væskefase. Der blev ved dekantering udtaget en prøve af væskefasen fra alle tre prøver. Desuden blev der udtaget en prøve af afgasset gylle uden nogen tilsætning som reference.

Alle 4 prøver blev analyseret for total-P på Hjørring Rensningsanlæg. For hver prøve blev der lavet dobbeltbestemmelse for hver af to forskellige fortyndinger med 100 og 1000 gange for afgasset gylle og 10 og 100 gange for afgasset gylle med tilsætning af fældningsmiddel og polymer.

3.4. Forbrænding af gyllefiber og hønsegødning

Forsøgets gennemførelse

Der blev 24. juni 2019 gennemført et forsøg med forbrænding af gyllefiber og hønsemøg. Forsøget blev gennemført i den ene kedel til affaldsforbrænding på Affaldsselskabet Vendsyssel Vest I/S (AVV) i Hjørring. Til forsøget var der 21. juni 2019 blevet leveret 30 tons gyllefiber fra biogasanlægget Grøngas Vrå, hvor fiberen var blevet separeret fra afgasset gylle med en Börger skruepresse (samme som anvendt til øvrige forsøg). Desuden var der blevet leveret 30 tons hønsegødning fra æglæggende høns fra DanHatch ved Vrå. Hensigten var at afprøve forbrænding af disse to biomasser i lige store mængder, hvorved hønsegødningen skulle hæve tørstofindholdet til et niveau, så blandingen skulle kunne forbrænde i den ristefyrede kedel, som normalt bruges til forbrænding af dagrenovation m.m.

De to biomasser blev tippet af i den ene side af på-slaget på forbrændingsanlægget og blandet med grabben. Ved forsøget blev der afprøvet fyring med ca. 4½ tons ren blanding af gyllefiber+hønsegødning, mens resten blev blandet med andre typer affald for at øge tørstofindholdet.

I forbindelse med testen blev der udtaget tre repræsentative prøver af hhv. gyllefiber, hønsegødning og aske à minimum 1 kg. Prøver af gyllefiber og hønsegødning blev udtaget før opblanding. Askeprøver blev udtaget i container med slagge/bundaske. Da der kun blev fyret med 4,76 tons ren blanding af gyllefiber+hønsegødning, vil der kun være en begrænset mængde aske, og denne aske vil i nogen udstrækning blive opblandet med aske fra andre typer affald, der blev afbrændt før og efter. Da både gyllefiber og hønsegødning skulle være stort set uden metal, blev det skønnet, hvornår der kom en relativt ensartet aske uden metal ud i askecontaineren, og der blev taget prøver af denne aske på lidt forskellige tidspunkter (over ca. 1½-2 timer). Prøvetagningen er således behæftet med betydelig usikkerhed.

Alle prøver fra forbrændingsforsøget blev analyseret af Eurofins ved Vejen for følgende parametre:

- Tørstofindhold
- Total-N
- NH_4-N
- Total-K
- Total-P

} Analysenummer PDRQ7

- Vandopløseligt P — Analysenummer CAA26
- Citratopløseligt P — Analysenummer CAI33
- Aske — Analysenummer DR182

Beregninger og dataanalyse

Ud fra laboratorieanalyserne er der beregnet indhold af vandopløseligt P og citratopløseligt P som procentdel af total-P. Desuden er der beregnet indhold af total-P som procentdel af askeindholdet. Alle målte og beregnede parametre er analyseret i en

variansanalyse med de tre 'biomassetyper' som klassevariabel (gyllefiber, hønsegødning, aske), og de tre gentagelser fungerer som replikater, der ikke indgår i modellen. For askeprøverne var koncentrationen af vandopløseligt P under detektionsgrænsen og dermed også vandopløseligt P som procent af total-P. I begge tilfælde er værdien i dataanalysen sat til grænseværdien, selvom værdien formodentlig reelt har været lavere. Ved præsentationen er resultaterne derfor sat til at være 'mindre end' disse grænseværdier.

4. Resultater og diskussion

4.1. Separation af afgasset gylle med to skruepresser

Resultater fra separationsforsøget med skruepresser

Koncentrationer af tørstof, aske og næringsstoffer er vist i tabel 1 for usepareret afgasset gylle samt i væskefraktion og fiberfraktion efter separation med hhv. Börger skruepressen og EYS skruepressen.

Tørstofindholdet i den afgassede gylle var 6,9% før separation, og den blev reduceret til ca. 5,5% i væskefraktionen, mens tørstofindholdet blev øget til 29,3 og 39,5% i fiberfraktionen fra hhv. Börger og EYS skruepresserne. Koncentrationen af total-N blev øget fra 4,9 kg pr. ton før separationen til ca. 8-10 kg pr. ton i fiberfraktionen, mens koncentrationen af NH_4-N blev reduceret lidt. Koncentrationen af total-P blev øget fra 0,7 kg pr. ton før separationen til 1,3-2,0 kg pr. ton i fiberfraktionen. Koncentrationen af vandopløseligt P og citratopløseligt P blev også øget signifikant i fiberfraktionen. Indholdet af vandopløseligt P som andel af total-P var lidt lavere i fiberfraktionen end i afgasset gylle og i væskefraktionen, men forskellen var dog ikke signifikant. Der var heller ingen sikker forskel i andelen af citratopløseligt P mellem fraktionerne. Som gennemsnit af alle prøver i dette forsøg udgjorde vandopløseligt P og citratopløseligt P hhv. 31 og 87 % af total-P. c (Skov & Jensen, 2015).

Koncentrationen af K og S blev ikke påvirket signifikant af separationen. Forholdet mellem total-N og total-P faldt fra 7,1 i usepareret afgasset gylle til 4,9-5,9 i fiberfraktionen, mens der ikke var nogen tydelig ændring i væskefraktionen.

Samlet skete der ved separationen med skruepresserne således en opkoncentrering af tørstof, aske, total-N, total-P og fraktioner af P samt en lille reduktion i koncentrationen af NH_4-N i fiberfraktionen sammenlignet med usepareret afgasset gylle. Til gengæld skete der stort set ikke nogen ændring i koncentrationerne i væskefraktionen, formodentlig fordi fiberfraktionen kun udgjorde en meget lille andel på 5-7 % af den samlede mængde, hvorved der kun fjernes relativt små mængder næringsstoffer i fiberfraktionen.

Kapaciteterne for de to skruepresser er vist i tabel 2. I løbet af en times testkørsel separerede Börger skruepressen og EYS skruepressen hhv. 9,98 og 7,00 tons råvare, og der blev frasepareret hhv. 0,68 og 0,34 tons fiberfraktion pr. time. Med de givne indstillinger af de to skruepresser var kapaciteten således 43% højere for Börger skruepressen.

Den procentvise fordeling af råvare, tørstof, aske og næringsstoffer mellem væskefraktion og fiberfraktion er vist i tabel 3 for de to skruepresser. Fiberfraktionen udgjorde 6,8 og 4,9% af råvaremængden for hhv. Börger skruepressen og EYS skruepressen, mens fiberfraktionen udgjorde hhv. 29,0 og 27,8% af tørstofmængden. Fiberfraktionen udgjorde 9,6-10,6% af mængden af total-N, 4,2-4,6% af NH_4-N og 4,3-7,6% af K. Desuden udgjorde fiberfraktionen 13,8-14,1% af total-P, 9,8-10,8% af vandopløseligt P og 13,1-16,5% af citratopløseligt P. Der var ingen sikker forskel

mellem de to skruepresser i procentandelene i fiberfraktionen hverken for tørstof, aske eller de forskellige næringsstoffer i fiberfraktionen. Derved har de to skruepresser omtrent samme separationseffektivitet med de givne indstillinger, og forskellen mellem de to skruepresser drejer sig primært om kapaciteten pr. time og tørstofindholdet i fiberfraktionen.

For begge skruepresser var andelen af vandopløseligt P i fiberfraktionen generelt lidt lavere end andelen af total-P og citratopløseligt P. Dette tyder på, at P er lidt mindre plantetilgængeligt i fiberfraktionen end i væskefraktionen.

Tabel 1. Koncentrationer af tørstof, aske og næringsstoffer i usepareret afgasset gylle samt i hhv. væskefraktion og fiberfraktion efter separation med en Börger skruepresse og en EYS skruepresse. Hver værdi repræsenterer gennemsnit af tre gentagelser.

Fraktion og teknologi	**Tørstof-indhold**	**Aske**	**Total-N**	**NH_4-N**	**Total-K**	**Total-P**	**Vandopløseligt P**	**Citratopløseligt P**	**Vandopløseligt P som andel af total-P**	**Citratopløseligt P som andel af total-P**	**Total-S**	**N:P-forhold (total-N og total-P)**
	%	%	kg/ton	kg/ton	kg/ton	kg/ton	kg/ton	kg/ton	%	%	kg/ton	
Afgasset, usepareret gylle	6,9	1,9	4,9	2,9	3,5	0,69	0,22	0,54	36,2	89,1	0,62	7,1
Væskefraktion fra Börger skruepresse	5,4	1,9	4,7	2,9	3,6	0,65	0,22	0,48	35,5	77,2	0,57	7,1
Fiberfraktioner fra Börger skruepresse	29,3	2,6	7,7	2,0	3,7	1,30	0,31	1,05	24,3	82,0	1,30	5,9
Væskefraktion fra EYS skruepresse	5,5	1,8	4,7	2,7	4,0	0,66	0,21	0,60	33,5	93,8	0,60	7,1
Fiberfraktioner fra EYS skruepresse	39,5	3,6	9,7	2,5	3,1	2,00	0,49	1,85	24,3	92,7	0,76	4,9
P-værdi	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*0,717*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*0,189*	*0,736*	*0,131*	-
LSD-værdi	*0,5*	*0,2*	*0,4*	*0,2*	*1,3*	*0,27*	*0,02*	*0,13*	*13,7*	*31,9*	*0,63*	-

Tabel 2. Mængder af tørstof, aske og næringsstoffer i usepareret afgasset gylle samt i hhv. væskefraktion og fiberfraktion efter separation med en Börger skruepresse og en EYS skruepresse. Mængderne er beregnet ved at gange råvaremængden (som var uden gentagelser) med koncentrationerne i hver af de tre gentagelser pr. fraktion og teknologi.

Fraktion og teknologi	**Råvare**	**Tørstof**	**Aske**	**Total-N**	**NH_4-N**	**Total-K**	**Total-P**	**Vandopløseligt P**	**Citratopløseligt P**	**Total-S**
	ton/time	ton/time	ton/time	kg/time	kg/time	kg/time	kg/time	kg/time	kg/time	kg/time
Afgasset, usepareret gylle til Börger skruepresse	9,98	0,69	0,19	49,0	28,9	33,3	6,4	2,2	5,4	6,2
Væskefraktion fra Börger skruepresse	9,30	0,50	0,17	43,3	26,7	33,8	6,1	2,0	4,5	5,3
Fiberfraktioner fra Börger skruepresse	0,68	0,20	0,02	5,2	1,3	2,5	0,9	0,2	0,7	0,9
Afgasset, usepareret gylle til EYS skruepresse	7,00	0,48	0,14	34,4	20,3	24,7	4,8	1,5	3,8	4,4
Væskefraktion fra EYS skruepresse	6,66	0,36	0,12	31,2	17,9	26,4	4,4	1,4	4,0	4,0
Fiberfraktioner fra EYS skruepresse	0,34	0,13	0,01	3,3	0,9	1,1	0,7	0,2	0,6	0,3
P-værdi	-	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*
LSD-værdi	-	*0,02*	*0,01*	*1,1*	*0,6*	*11,4*	*2,1*	*0,16*	*0,28*	*1,70*

Tabel 3. Procentfordeling af tørstof, aske og næringsstoffer i hhv. væskefraktion og fiberfraktion efter separation med en Börger skruepresse og en EYS skruepresse. Fordelingen er beregnet ved at gange råvaremængden (som var uden gentagelser) med koncentrationerne i hver af de tre gentagelser pr. fraktion og teknologi, og denne mængde er sat i forhold til den gennemsnitlige input-mængde.

Fraktion og teknologi	**Råvare**	**Tørstof**	**Aske**	**Total-N**	**NH_4-N**	**Total-K**	**Total-P**	**Vandopløseligt P**	**Citratopløseligt P**	**Total-S**
	%-andel	%-andel	%-andel	%-andel	%-andel	%-andel	%-andel	%-andel	%-andel	%-andel
Væskefraktion fra Börger skruepresse	93,2	72,7	90,0	88,3	92,1	101,6	95,1	93,4	82,0	85,2
Fiberfraktioner fra Börger skruepresse	6,8	29,0	9,2	10,6	4,6	7,6	13,8	9,8	13,1	14,2
Væskefraktion fra EYS skruepresse	95,1	75,2	88,6	90,8	87,9	106,8	91,0	93,5	104,8	91,6
Fiberfraktioner fra EYS skruepresse	4,9	27,8	9,1	9,6	4,2	4,3	14,1	10,8	16,5	5,9
P-værdi	-	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*
LSD-værdi	-	*2,2*	*2,7*	*2,9*	*2,1*	*37,4*	*34,1*	*1,6*	*6,3*	*32,0*
Kontrol, sum for Börger skruepresse	100,0	101,7	99,1	99,0	96,7	109,1	109,0	103,2	95,1	99,4
Kontrol, sum for EYS skruepresse	100,0	103,0	97,7	100,4	92,2	111,1	105,1	104,4	121,3	97,5

Tidligere undersøgelse af separation af gylle med skruepresser

Det er tidligere dokumenteret, at separation med skruepressere har en lavere P-separationseffektivitet end f.eks. dekantercentrifuger, både for uafgasset gylle (Cocolo et al., 2016; Sommer et al., 2015) og for afgasset gylle (Aguirre-Villegas et al., 2019; Guilayn et al., 2019). Som gennemsnit af en række forsøg med svinegylle og kvæggylle blev der ved skruepresning opnået 17% af total-P i fiberfraktionen, som udgjorde 11% af massen (Hjorth et al., 2010). Til sammenligning blev der ved dekantercentrifugering i gennemsnit opnået 71% af total-P i fiberfraktionen, som udgjorde 14% af massen.

I en amerikansk undersøgelse af separation af afgasset gylle baseret primært på kvæggylle er det fundet, at skruepresning øgede den gennemsnitlige koncentration af total-P fra ca. 0,5 kg pr. ton før separation til ca. 1,3 kg pr. ton i fiberfraktionen (Aguirre-Villegas et al., 2019). Til sammenligning øgede dekantercentrifugering koncentrationen fra ca. 0,4 kg til ca. 3,3 kg pr. ton.

I en dansk undersøgelse af separation af uafgasset svinegylle blev koncentrationen af total-P øget fra 1,9 kg pr. ton til 2,4 kg pr. ton i fiberfraktionen efter skruepresning, til 2,5 kg pr. ton efter flokulering+afdræning samt til 7,3 kg pr. ton efter dekantercentrifugering (Sommer et al., 2015). Fiberfraktionen udgjorde knap 20% af massen for skruepresning, ca. 50% efter flokulering+afdræning og ca. 20% efter dekantercentrifugering. Opkoncentreringen i fiberen var dog væsentligt mindre effektiv for forsuret gylle, da koncentrationen af total-P i fiberfraktionen kun var 1,5, 1,4 og 2,5 kg pr. ton efter hhv. skruepresning, flokulering+afdræning og dekantercentrifugering.

I en italiensk undersøgelse af skruepresning af afgasset gylle på 13 biogasanlæg baseret på primært svinegylle eller kvæggylle suppleret med energiafgrøder m.m. blev den gennemsnitlige koncentration af total-P øget fra 0,95 kg pr. ton før separation til 2,75 kg pr. ton i fiberfraktionen efter separationen (Tambone et al., 2017). Det var dog kun 28% af total-P, der endte i fiberfraktionen.

Mens skruepresning tydeligvis separerer total-P mindre effektivt end dekantercentrifugering, er omkostningerne til skruepresning dog også væsentligt lavere pr. ton behandlet gylle (Møller et al., 2000; Sommer et al., 2015).

Sammenholdt med resultater i tidligere undersøgelser af skruepresning er det således ikke overraskende med en relativt lav separationseffektivitet, hvor ca. 14% af total-P i den afgassede gylle ender i en fiberfraktion, som udgør 5-7% af massen.

4.2. Separation af afgasset gylle og væskefraktion ved naturlig sedimentation

Resultater fra forsøget med naturlig sedimentation

Figur 3-8 viser sammenhængen mellem prøvedybde i forsøgssiloerne (som højde over bunden) og koncentrationen af hhv. tørstof, total-N, NH_4-N, total-K, total-P samt citratopløseligt P og vandopløseligt P. Figur 9 viser tilsvarende sammenhængen mellem prøvedybde og indholdet af citratopløseligt P og vandopløseligt P angivet som procentandel af total-P. Hver af figurerne viser sammenhængen for usepareret afgasset gylle og for væskefraktionen fra hhv. Börger skruepressen og EYS skruepressen. Desuden er sammenhængen vist for hhv. 0, 1, 4, 11 og 50 dages sedimentation, dog er ikke alle analyseparametre repræsenteret for alle sedimentationstider. I figurerne er der vist en fuldt optrukket graf, når der er fundet en signifikant effekt af prøvedybden ($P \leq 0,05$) og en stiplet graf, når der er tæt på at være en signifikant effekt af prøvedybden ($0,05 < P \leq 0,10$).

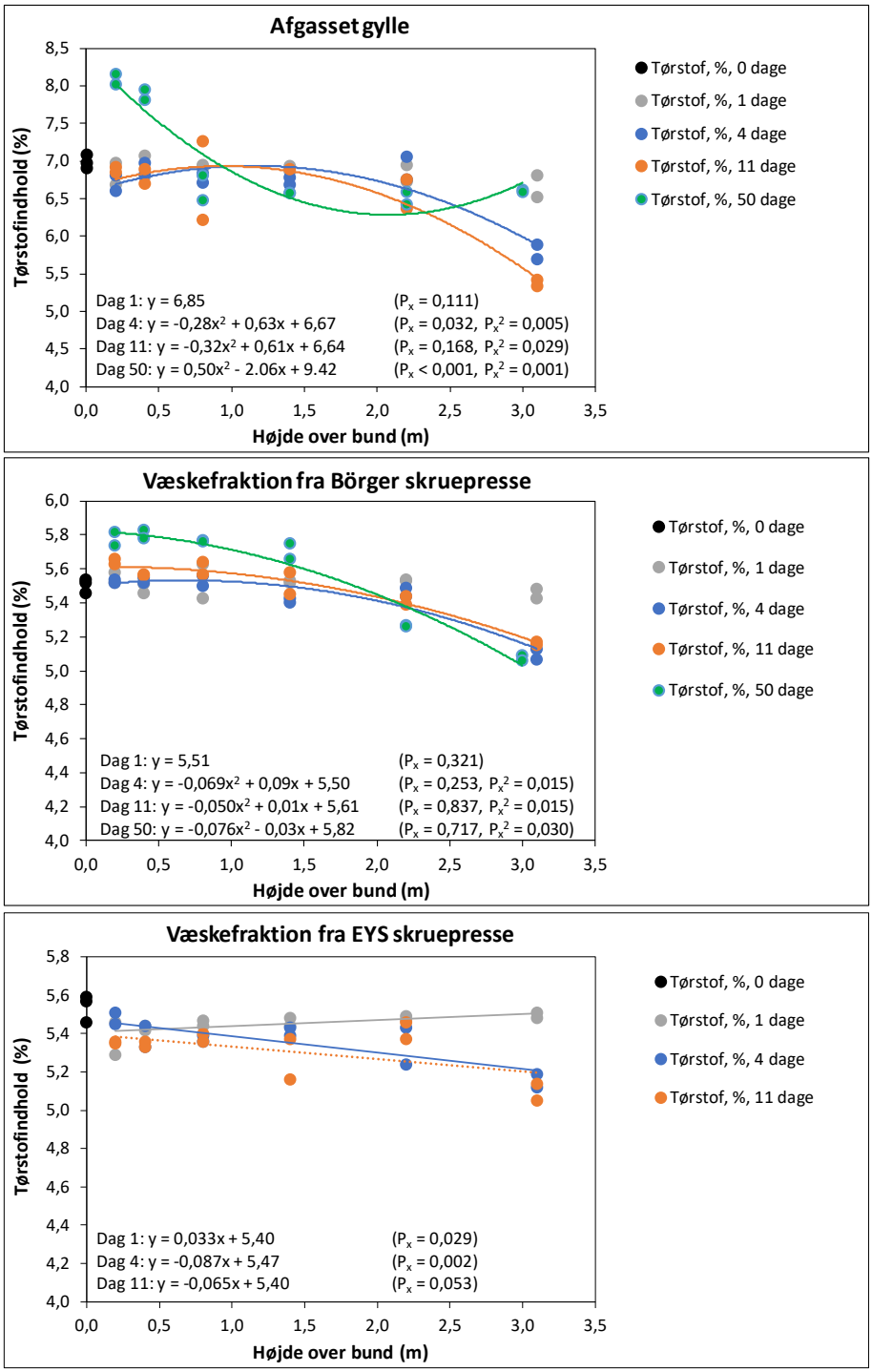
Tørstofindholdet afhang generelt af prøvedybden med højere koncentration tæt på bunden end længere oppe i siloerne, og generelt blev forskellene i tørstofindhold større med længere sedimentationstider (figur 3). For afgasset usepareret gylle var tørstofindholdet efter 50 dages sedimentation omkring 8% tæt på bunden men omkring 6,5-7,0 højere oppe. For væskefraktionen fra Börger skruepressen var der også en signifikant gradient i tørstofindhold fra dag 4, og gradienten blev øget til dag 50, hvor tørstofindholdet varierede fra ca. 5,8% tæt ved bunden til ca. 5,1% øverst i siloen. For væskefraktionen fra EYS skruepressen var der også sammenhæng mellem prøvedybde og tørstofindhold men mindre markant. I en tidligere undersøgelse af sedimentation i afgasset gylle var der i én lagertank et kraftigt flydelag med høj tørstofkoncentration, mens der i anden lagertank ikke var noget flydelag men til gengæld var en høj tørstofkoncentration i bundlaget (Ørtenblad & Kjellerup, 1991). I nærværende undersøgelse var der ikke noget flydelag.

Variationen i koncentration af total-N (figur 4) fulgte i store træk samme mønster som tørstofindholdet (figur 3). Dette stemmer med tidligere undersøgelser, hvor indholdet af organisk N og total-P også var stærkt korreleret med tørstofindholdet (Ørtenblad & Kjellerup, 1991). Koncentrationen af total-N afhang i nogle tilfælde signifikant af prøvedybden (figur 4). For afgasset gylle var der først en sikker sammenhæng efter 50 dages sedimentation, hvor indholdet var ca. 5,2% tæt ved bunden og 4,8-5,0% i resten af siloens højde. For væskefraktionen fra Börger skruepressen var der signifikant sammenhæng efter 4, 11 og 50 dages sedimentation, især efter 50 dage hvor koncentrationen varierede fra omkring 4,9% tæt ved bunden til ca. 4,3% øverst i siloen. For væskefraktionen fra EYS skruepressen var der ikke så tydelig en effekt af prøvedybde.

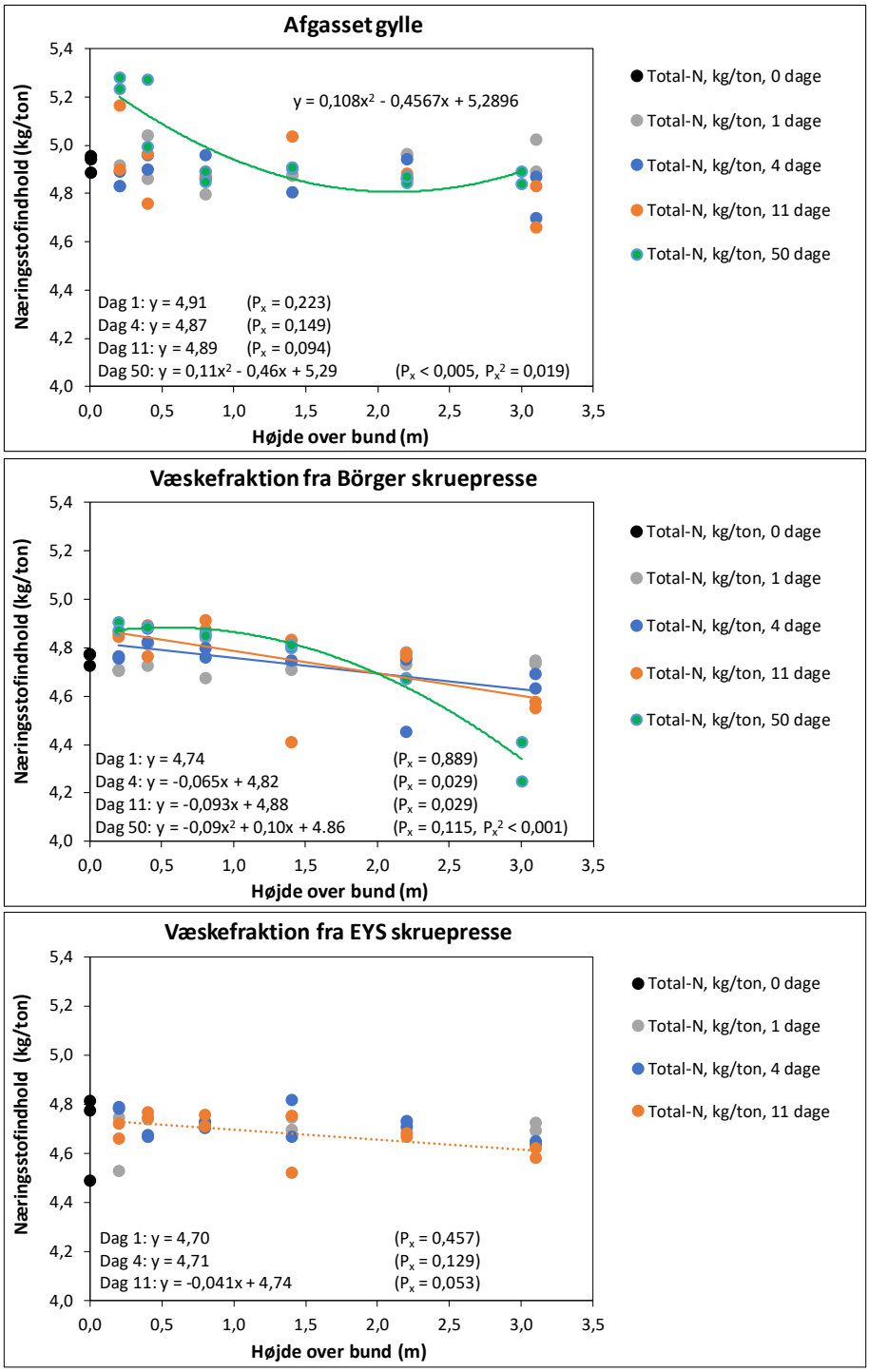
Koncentrationen af NH_4-N afhang i nogle tilfælde signifikant af prøvedybden med faldende koncentration fra silobund mod silotop, men generelt var der tale om relativt små forskelle i koncentrationen (figur 5). Dette hænger formodentlig sammen med,

at NH_4-N er vandopløseligt, hvorfor der ikke ventes at ske nogen større sedimentation.

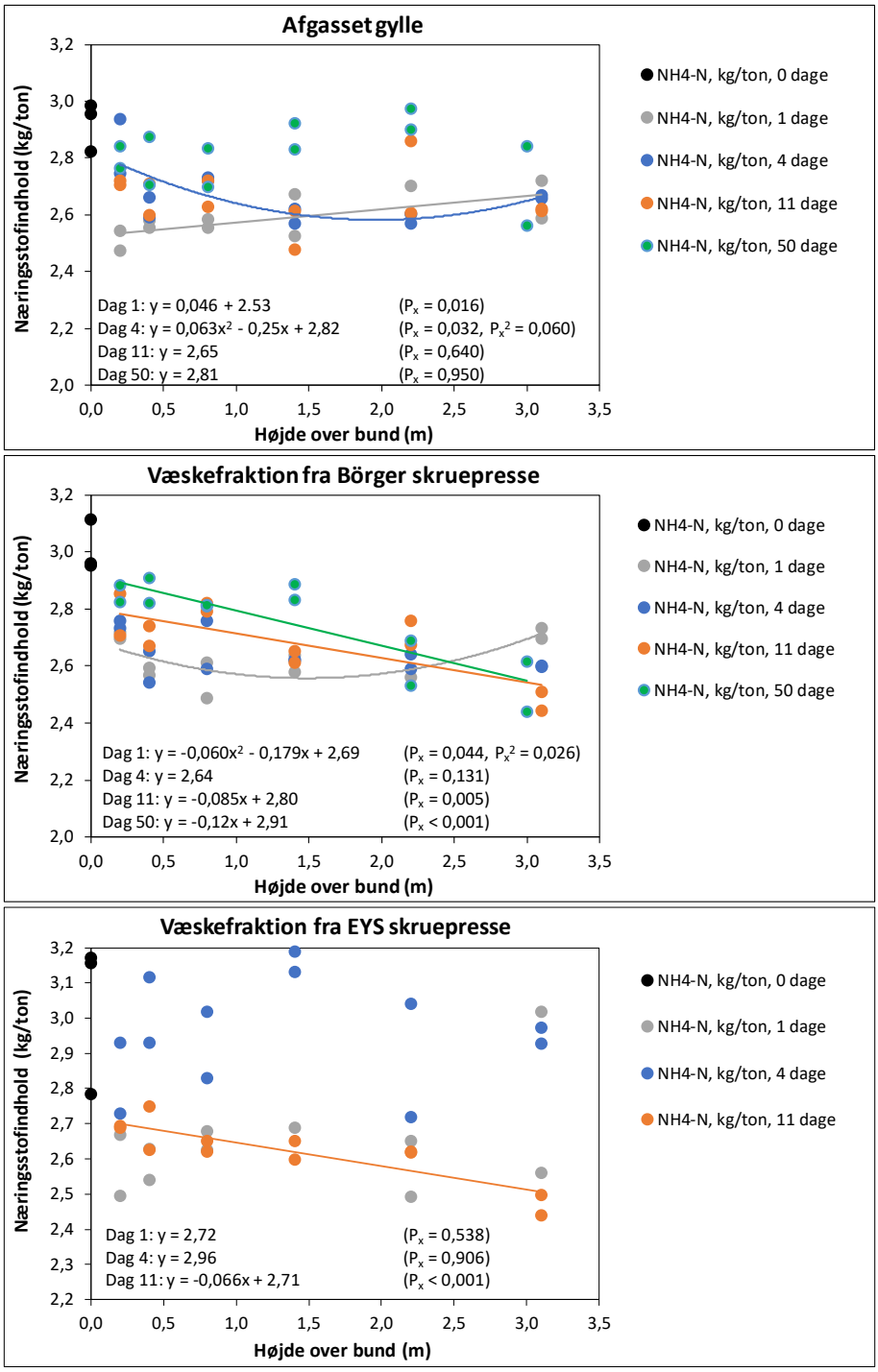
For total-K var der ingen signifikante sammenhænge mellem prøvedybde og koncentration (figur 6). K er vandopløseligt og forventes derfor heller ikke at sedimentere, og resultaterne er i overensstemmelse med en tidligere undersøgelse af sedimentation i afgasset gylle, hvor der også var en ligelig fordeling af K og NH_4-N ned gennem en lagertank (Ørtenblad & Kjellerup, 1991). Det kan dog undre, at der er betydelige forskelle i den gennemsnitlige koncentration mellem de forskellige prøvetagningsdage indenfor en gylletype (figur 6). For afgasset gylle var den gennemsnitlige koncentration af total-K f.eks. 4,8 kg pr. ton efter 1 dags sedimentation og 2,6 kg pr. ton efter 50 dages sedimentation. Tilsvarende var koncentrationen 5,2 og 2,7 kg pr. ton efter 1 og 50 dages sedimentation i væskefraktion fra Börger skruepressen. Da der ikke ventes at ske noget tab af K ved f.eks. fordampning, og da prøverne er taget i samme dybder på hver prøvetagningsdag, burde den gennemsnitlige koncentration på tværs af 12 enkeltprøver kun variere meget lidt. Da serierne af prøver er indsendt løbende til analyse, formodes noget af variationen i gennemsnitlig koncentration at skyldes analyseusikkerhed, muligvis med generelle niveauforskydninger mellem forskellige analysedage. Da alle prøver indenfor en prøvetagningsdag er indsendt samlet og formodentlig er analyseret samme dag, vurderes denne usikkerhed ikke at så tvivl om den observerede effekt af prøvedybde på koncentrationen.



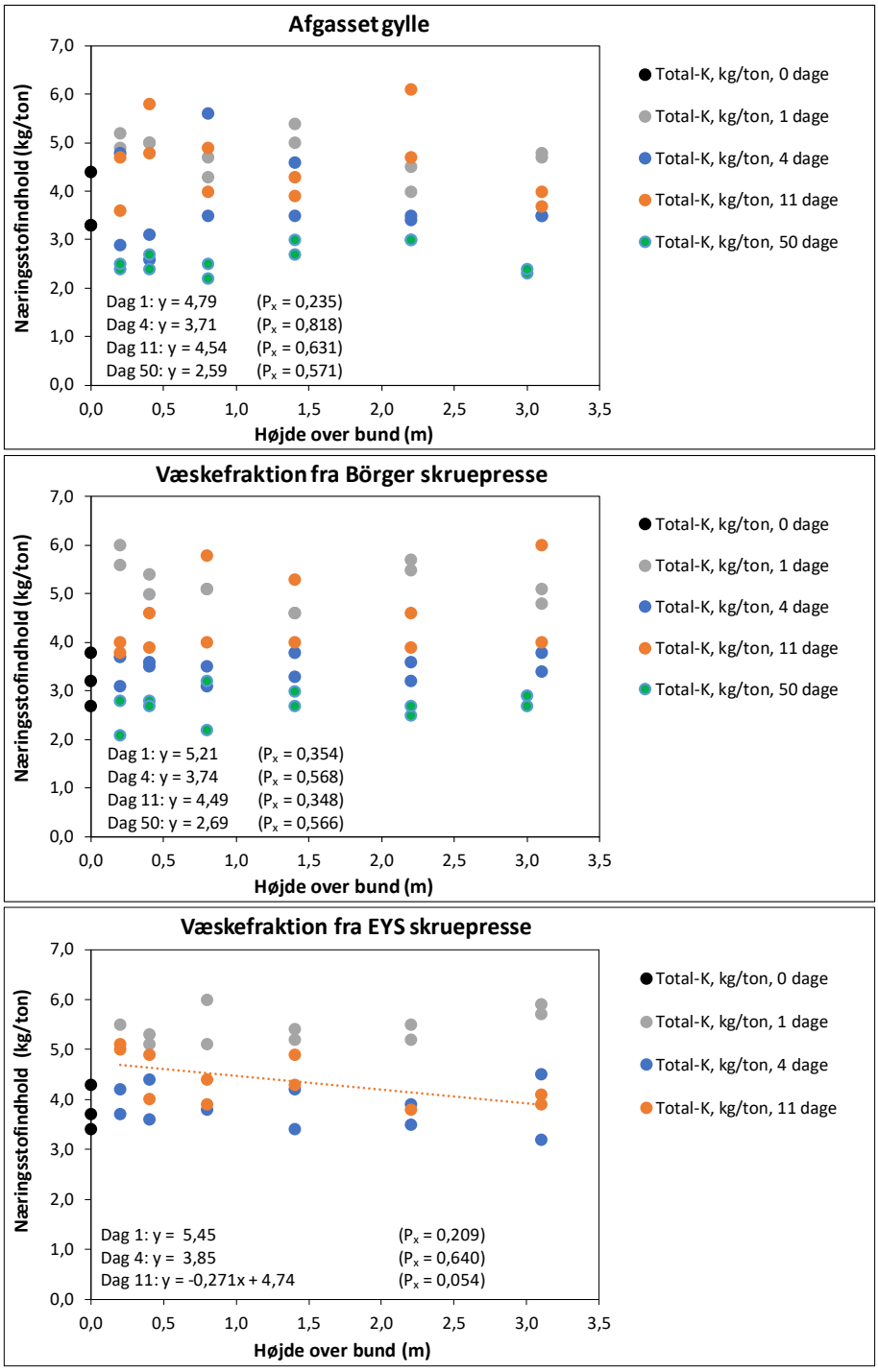
Figur 3. Sammenhæng mellem prøvedybde og koncentration af tørstof i afgasset gylle og væskefraktion af afgasset gylle fra to forskellige skruepresser. Koncentrationen er analyseret efter hhv. 0, 1, 4, 11 og 50 dages naturlig sedimentation i siloer med 3,2 m væskesøjle. Hvert punkt repræsenterer en enkeltprøve. Tre prøver udtaget efter 0 dages sedimentation repræsenterer fuldt opblandet gylle, men er blot afbildet ved højen 0,0 m over bund.



Figur 4. Sammenhæng mellem prøvedybde og koncentration af total-N i afgasset gylle og væskefraktion af afgasset gylle fra to forskellige skruepresser. Koncentrationen er analyseret efter hhv. 0, 1, 4, 11 og 50 dages naturlig sedimentation i siloer med 3,2 m væskesøjle. Hvert punkt repræsenterer en enkeltprøve. Tre prøver udtaget efter 0 dages sedimentation repræsenterer fuldt opblandet gylle, men er blot afbildet ved højen 0,0 m over bund.



Figur 5. Sammenhæng mellem prøvedybde og koncentration af NH_4-N i afgasset gylle og væskefraktion af afgasset gylle fra to forskellige skruepresser. Koncentrationen er analyseret efter hhv. 0, 1, 4, 11 og 50 dages naturlig sedimentation i siloer med 3,2 m væskesøjle. Hvert punkt repræsenterer en enkeltprøve. Tre prøver udtaget efter 0 dages sedimentation repræsenterer fuldt opblandet gylle, men er blot afbildet ved højen 0,0 m over bund.



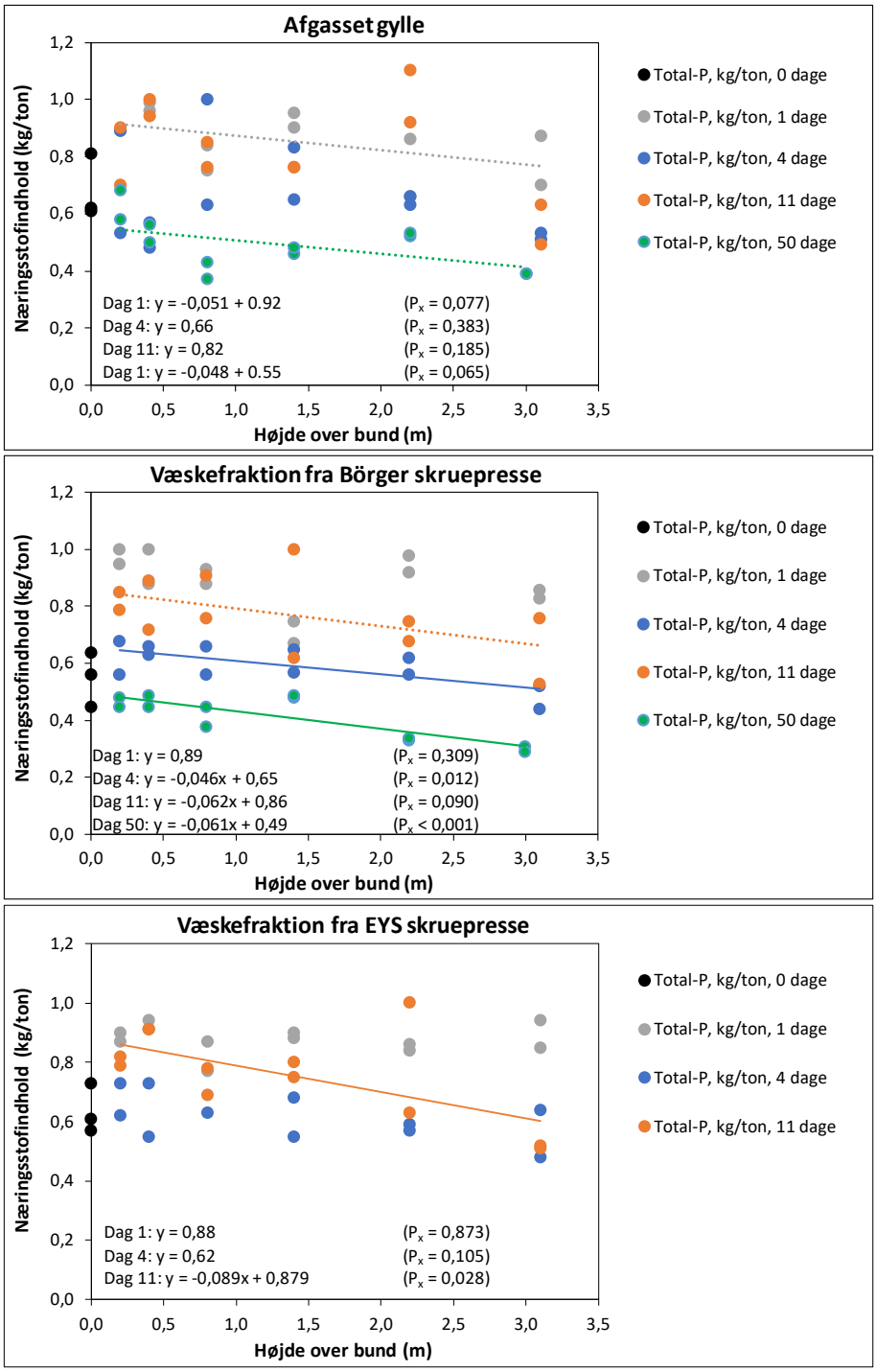
Figur 6. Sammenhæng mellem prøvedybde og koncentration af total-K i afgasset gylle og væskefraktion af afgasset gylle fra to forskellige skruepresser. Koncentrationen er analyseret efter hhv. 0, 1, 4, 11 og 50 dages naturlig sedimentation i siloer med 3,2 m væskesøjle. Hvert punkt repræsenterer en enkeltprøve. Tre prøver udtaget efter 0 dages sedimentation repræsenterer fuldt opblandet gylle, men er blot afbildet ved højen 0,0 m over bund.

Koncentrationen af total-P afhang i nogle tilfælde af prøvedybden med faldende koncentration fra silobund til silotop (figur 7). For afgasset gylle var sammenhængen dog kun næsten signifikant, mens der var mere sikre sammenhænge for væskefraktionen fra Börger skruepressen. Efter 50 dages sedimentation varierede koncentrationen fra ca. 0,6 kg pr. ton tæt ved bunden til ca. 0,4 kg pr. ton øverst i siloen med afgasset gylle og fra ca. 0,45 til ca. 0,3 kg pr. ton i siloen med væskefraktion fra Börger skruepresse. Ligesom for koncentrationen af total-K var der dog også meget markante forskelle i det generelle niveau af total-P mellem prøvetagningsdagene. For afgasset gylle var den gennemsnitlige koncentration f.eks. 0,86 og 0,49 kg pr. ton efter hhv. 1 og 50 dages sedimentation, og samme niveauforskydninger ses for væskefraktionen fra Börger skruepressen. Selvom resultaterne vedr. effekt af prøvedybde indenfor hver gylletype og sedimentationstid vurderes at være valide, er det bekymrende med disse store men uforklarlige variationer i gennemsnitsniveauet for både total-K og total-P.

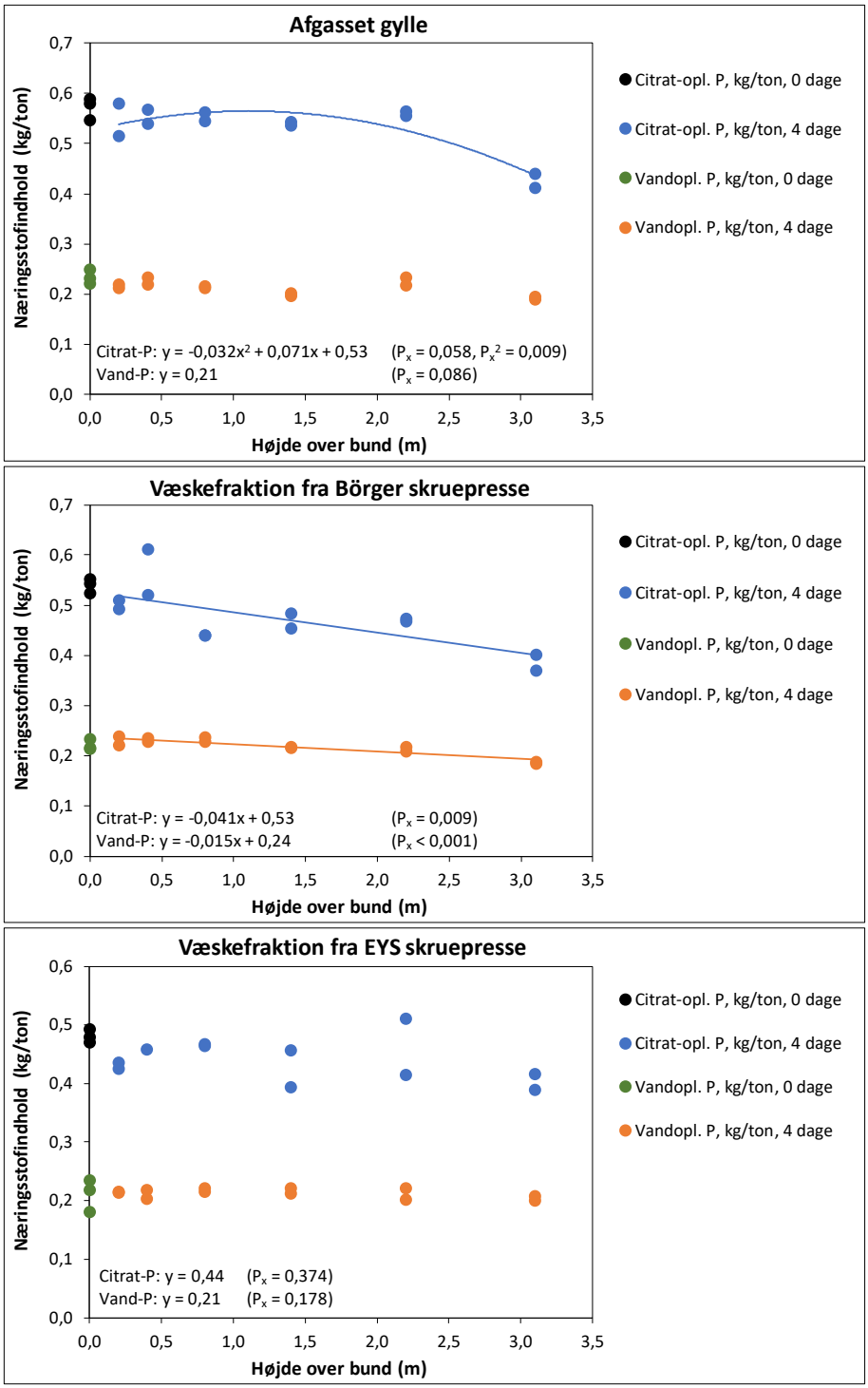
Koncentrationen af citratopløseligt P og vandopløseligt P blev kun analyseret efter 4 dages sedimentation (figur 8). Koncentrationen af citratopløseligt P faldt signifikant med stigende afstand fra silobunden for både afgasset gylle og væskefraktionen fra Börger skruepressen, i begge tilfælde fra et niveau på ca. 0,50-0,55 kg pr. ton tæt ved bunden til 0,40-0,45 kg pr. ton øverst i siloen. For vandopløseligt P faldt koncentrationen kun signifikant for væskefraktionen fra Börger skruepressen med ca. 0,23-0,24 kg pr. ton tæt ved bunden til 0,18-0,19 kg pr. ton øverst i siloen.

Indholdet af citratopløseligt P og vandopløseligt P er i figur 9 vist som andel af total-P, og der var ingen signifikant effekt af prøvedybde. Dette tyder på, at disse delfraktioner af P sedimenterer i omtrent samme omfang som total-P. Som gennemsnit af alle målinger på tværs af de tre gylletyper og 0 og 4 dages sedimentation udgjorde citratopløseligt P og vandopløseligt P hhv. 80% og 35% af total-P. Til sammenligning er der tidligere fundet en vandopløselighed på 19,7% af total-P i gyllefibre (Skov & Jensen, 2015).

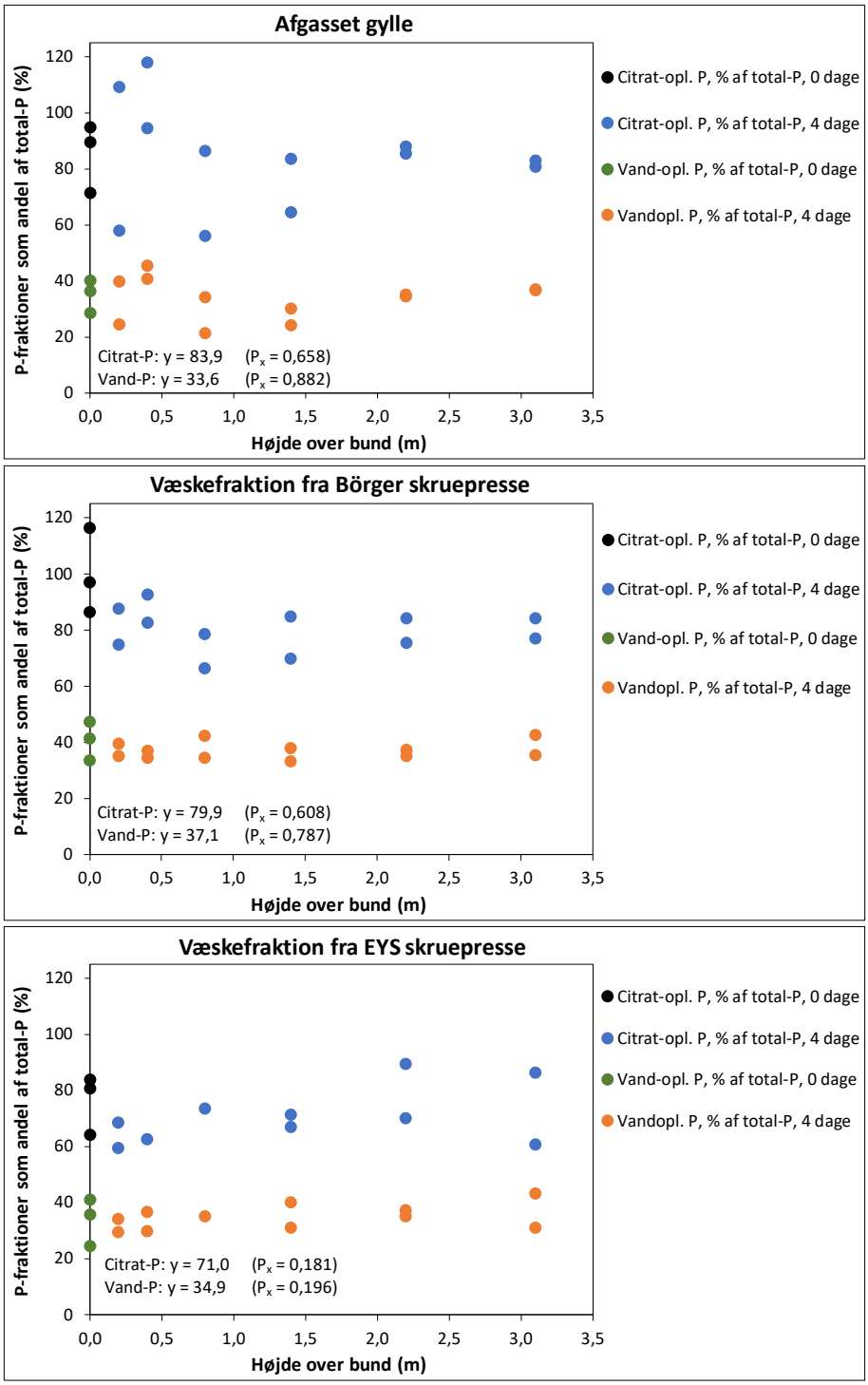
Der var ingen markante forskelle i andelen af de to P-fraktioner mellem de tre gylletyper (der er dog ikke lavet statistisk analyse af dette). Til gengæld var der en signikant sammenhæng mellem indholdet af total-P og andelen af hhv. citratopløseligt P og vandopløseligt P (figur 10). Den procentvise andel af vandopløseligt P faldt markant med stigende indhold af total-P, med 41% og 19% ved koncentrationer af total-P på hhv. 0,5 og 1,0 kg pr. ton. Den procentvise andel af citratopløselig P faldt også med stigende indhold af total-P om end med lidt niveauforskydning mellem de tre gylletyper; andelen faldt fra 80-92% ved 0,5 kg total-P pr. ton til 44-56% ved 1,0 kg total-P pr. ton. Det skal bemærkes, at der kun er tale om tre prøver med en koncentration af total-P på over 0,8 kg pr. ton, men især for vandopløseligt P vil der givetvis være samme sammenhæng uden disse tre observationer. Disse sammenhænge tyder på, at der ved høje indhold af total-P er en større andel af P, som er hårdere bundet og dermed umiddelbart mindre tilgængelige for planter. En konsekvens af dette kan være, at gyllefraktioner med høje koncentrationer af total-P på kort sigt kan have en relativt lavere gødningsvirkning pr. kg tilført total-P sammenlignet med fraktioner med lavere indhold af total-P. Dette bør dog belyses nærmere.



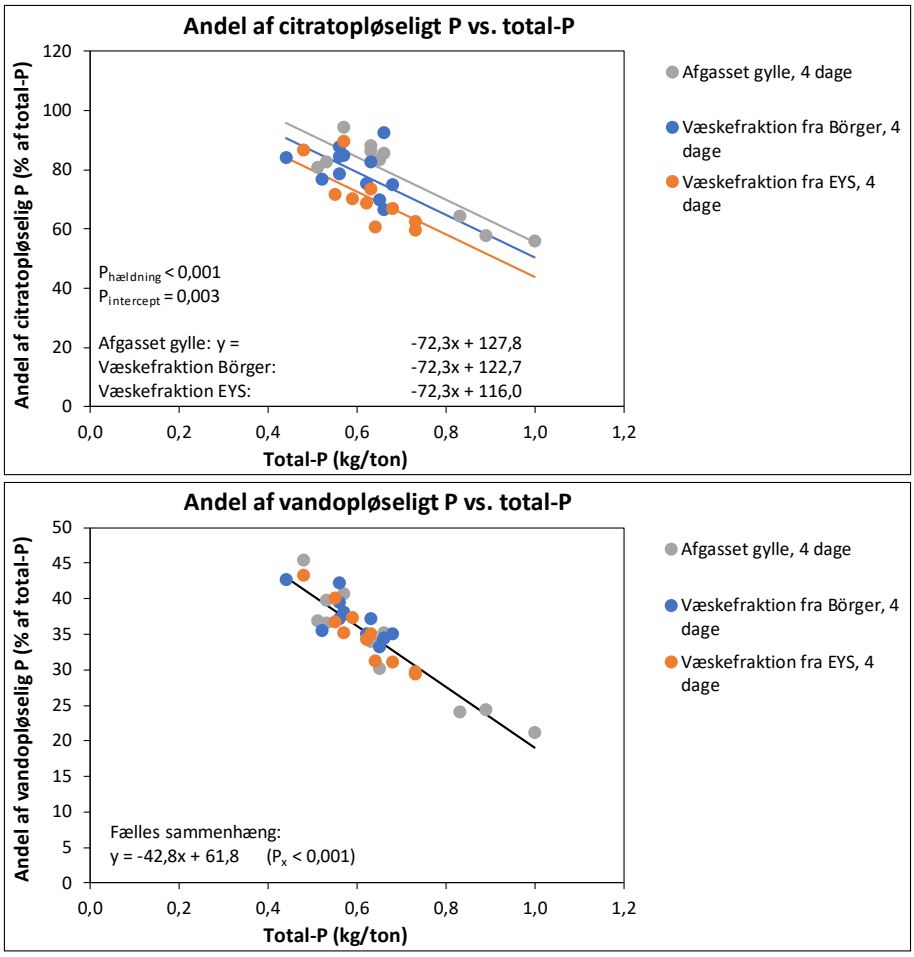
Figur 7. Sammenhæng mellem prøvedybde og koncentration af total-P i afgasset gylle og væskefraktion af afgasset gylle fra to forskellige skruepresser. Koncentrationen er analyseret efter hhv. 0, 1, 4, 11 og 50 dages naturlig sedimentation i siloer med 3,2 m væskesøjle. Hvert punkt repræsenterer en enkeltprøve. Tre prøver udtaget efter 0 dages sedimentation repræsenterer fuldt opblandet gylle, men er blot afbildet ved højen 0,0 m over bund.



Figur 8. Sammenhæng mellem prøvedybde og koncentration af citratopløselig og vandopløseligt P i afgasset gylle og væskefraktion af afgasset gylle fra to forskellige skruepresser. Koncentrationen er analyseret efter hhv. 0 og 4 dages naturlig sedimentation i siloer med 3,2 m væskesøjle. Hvert punkt repræsenterer en enkeltprøve. Tre prøver udtaget efter 0 dages sedimentation repræsenterer fuldt opblandet gylle, men er blot afbildet ved højen 0,0 m over bund.



Figur 9. Sammenhæng mellem prøvedybde og hvor stor en andel citratopløseligt P og vandopløseligt P udgør af total-P i afgasset gylle og væskefraktion af afgasset gylle fra to forskellige skruepresser. Analyserne er foretaget efter hhv. 0 og 4 dages naturlig sedimentation i siloer med 3,2 m væskesøjle. Hvert punkt repræsenterer en enkeltprøve. Tre prøver udtaget efter 0 dages sedimentation repræsenterer fuldt op-blandet gylle, men er blot afbildet ved højen 0,0 m over bund.

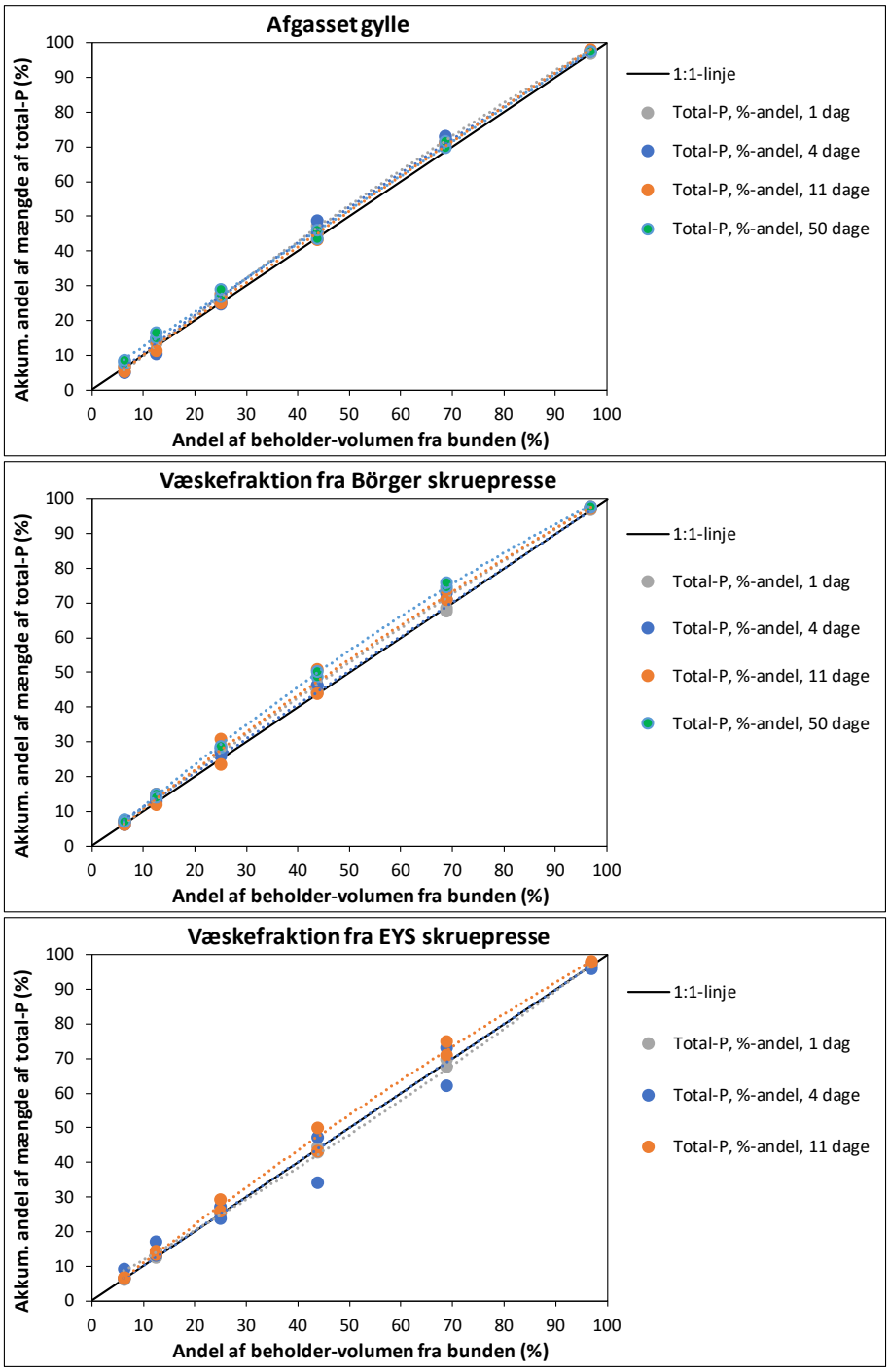


Figur 10. Sammenhænge mellem indholdet af total-P og andelen af hhv. citratopløseligt P og vandopløseligt P i afgasset gylle, væskefraktion fra Börger skruepresse og fra EYS skruepresse. Prøverne repræsenterer forskellige prøvedybder fra 3,2 m høje siloer efter 4 dages naturlig sedimentation. Hvert punkt repræsenterer en enkeltprøve.

Figur 11 viser sammenhængen mellem andel af beholdervolumen (fra bunden af beholderen) og akkumuleret andel af total-P. Denne sammenhæng viser, hvor stor en andel af total-P, der i princippet vil kunne fjernes med f.eks. de nederste 25 eller 50% af beholdervolumenet. For afgasset gylle vil der med disse volumenandele kunne fjernes 25,8 og 51,5% af total-P efter 11 dages sedimentation og 27,4 og 52,1% af total-P efter 50 dages sedimentation. For væskefraktionen fra Börger skruepressen vil der kunne fjernes 27,5 og 53,7% af total-P efter 11 dages sedimentation og 31,4 og 58,4% af total-P efter 50 dages sedimentation. For væskefraktionen fra EYS skruepressen vil der kunne fjernes 27,6 og 53,9% af total-P efter 11 dages sedimentation.

Pga. den relativt beskedne koncentrationsgradient for total-P efter sedimentation synes der derfor kun at være et beskedent potentiale for at kunne udtage en særligt fosforrig fraktion. Dels synes sedimentationen samlet set at give for beskedne forskelle i koncentrationen af total-P, og dels synes sedimentationen at gå for langsom,

hvilket i givet fald ville kræve stor lagerkapacitet for afgasset gylle for udnytte dette separationsprincip.



Figur 11. Sammenhæng mellem andel af beholdervolumen fra bunden (% af samlet beholdervolumen) og akkumuleret andel af total-P (% af samlet mængde total-P i beholderen) i afgasset gylle og væskefraktion af afgasset gylle fra to forskellige skruepresser. Sammenhængen er analyseret efter hhv. 1, 4, 11 og 50 dages naturlig sedimentation i siloer med 3,2 m væskesøjle. Hvert punkt repræsenterer en enkeltprøve. 1:1-linjen angiver den teoretiske sammenhæng, hvis der ikke var nogen variation i P-koncentration ned gennem beholderen.

Tidligere undersøgelser af naturlig sedimentation i gylle

Der har tidligere været lavet undersøgelser af variationen af fosfor og andre næringsstoffer ned gennem profilen i gyllebeholdere og dermed også effekten af sedimentation. I de fleste undersøgelser har der været fokus på uafgasset gylle, f.eks. fandt Birkmose (Birkmose, 2003) i en undersøgelse af gylletanke med slagtesvinegylle og sogylle, at de nederste 10% af volumenet indeholdt hhv. 34 og 25% af gyllens fosfor. Nye målinger i gylletanke i 2019 viser også en betydelig sedimentation af total-P i de nederste lag af uafgasset svinegylle med koncentrationer på op til 2,4 kg pr. ton, mens der stort set ikke sker nogen sedimentation i uafgasset kvæggylle (Martin Nørregaard Hansen, SEGES, personlig kommunikation, 29/3 2019). En tidligere undersøgelse med 10 måneders sedimentation i rør (1,9 m høje, 7,5 cm diameter) med svinegylle uden og med afgasning viste en kraftig sedimentation af total-P i de nederste lag (Sommer & Hansen, 2005). En ældre undersøgelse med sedimentation i afgasset gylle viste en forhøjet koncentration af total-P i overfladelaget i en gylletank, hvor der var flydelag, mens der i en anden tank uden flydelag var en forhøjet koncentration i de nederste lag (Ørtenblad & Kjellerup, 1991).

Generelt for disse tidligere undersøgelser er der tale om længere sedimentationstider end i nærværende undersøgelse. Dette kan være en medvirkende årsag til den større separation af total-P i de ældre studier, hvilket understreger, at naturlig sedimentation er en tidskrævende form for separation.

4.3. Fældning af fosfor i afgasset gylle med jern, aluminium og polymer

Resultater fra fældningsforsøget

Tilsætning af fældningsmidlerne med enten jern eller aluminium medførte en fortykning af den afgassede gylle, men der skete ikke en tydelig udfældning af fast stof og dannelse af en væskefase (se fotos i appendiks). Efter tilsætning af forskellige polymerer skete der generelt en markant udfældning og dannelse af en nogenlunde klar væskefase, så der kunne udtages en væskeprøve. Kation-polymeren C 2240 virkede bedst og blev derfor brugt på alle prøver med tilsætning af enten jern eller aluminium.

Koncentrationen af total-P i afgasset gylle uden fældningsmidler samt i væskefraktionen efter tilsætning af enten jern eller aluminium samt polymer er vist i tabel 4. Det ses, at koncentrationen af total-P i vandfasen er reduceret med ca. 97% ved tilsætning af jernklorid og jernsulfat og 91% ved tilsætning af aluminiumklorid sammenlignet med koncentrationen i afgasset gylle uden fældningsmidler. Tilsætning af især jern synes derfor at have et betydeligt potentiale for at reducere koncentrationen af total-P i væskefasen. Jernklorid vil pga. kloridindholdet korrodere stål, mens jernsulfat ikke har denne effekt og derfor vil være lettere at anvende på biogasanlæg m.v. Resultaterne skal tages med forbehold, da det kun er præliminære laboratorieforsøg, og da analyserne af total-P ikke er foretaget af et akkrediteret laboratorium.

Reduktionen i koncentrationen i total-P ved tilsætning af jernsulfat og polymer til afgasset gylle viser, at dette kan udgøre en mulighed for at opnå en væskefraktion med lavere P-indhold og en fiberfraktion ved efterfølgende separation i en dekantercentrifuge. Det er dog nødvendigt at teste separationen i dekantercentrifugen i praksis for at se, om de flokkulerede partikler kan holde til centrifugeringen og for at vurdere den reelle kapacitet og separationseffektivitet. Der vil givetvis også være mulighed for at optimere doserne af jernsulfat og polymer, som i dette forsøg var ganske høje. Denne metode til opkoncentrering af P i en fiberfraktion vil være forbundet med væsentlige omkostninger til indkøb af jernsulfat og polymer samt til anskaffelse og drift af dekantercentrifugen. Til gengæld vil der være mulighed for at fjerne en betydeligt større andel af total-P fra afgasset gylle end ved brug af f.eks. en skruepresse. Til sammenligning har tidligere tests i praksis ved Grøngas Hjørring med dekantercentrifugering af afgasset gylle vist, at koncentrationen af total-P blev reduceret med ca. 52% uden tilsætning af fældningsmidler og polymer (data fra Grøngas Hjørring). Tilsætning af jernsulfat og polymer forud for dekantercentrifugering ser dermed ud til at forbedre separationen væsentligt, og den yderligere reduktion i koncentrationen af total-P fra ca. 50% til potentielt over 95% reduktion skal som minimum opveje omkostningerne til brug af fældningsmidlerne. Endvidere kan der være miljømæssige hensyn at tage ved brug af polymerer i forhold til den efterfølgende anvendelse af gødningsfraktionerne.

Tabel 4. Koncentration af total-P i afgasset gylle uden tilsætning af fældningsmiddel samt i væskefraktionen efter tilsætning af tre forskellige fældningsmidler og efterfølgende tilsætning af en polymer. Koncentrationerne er korrigeret for fortynding med opløsninger af fældningsmidler og polymer. Resultaterne skal tages med forbehold, da det kun er præliminære laboratorieforsøg, og da analyserne af total-P ikke er foretaget af et akkrediteret laboratorium.

Prøve nr.	**Biomasse**	**Fældningsmiddel**		**Koncentration af total-P, kg/ton**		**Reduktion i total-P i forhold til afgasset gylle før fældning**
				Gnsn.	Std.afv.	%
1	Afgasset gylle	Ingen		8,1	0,179	0,0
3	Væskefraktion efter fældning	Kemira PIX-111	Jern(III)klorid, 13,8% jern	0,24	0,025	97,0
4	Væskefraktion efter fældning	Kemira PIX-113	Jern(III)sulfat, 11,6% jern	0,29	0,031	96,4
6	Væskefraktion efter fældning	Kemira PAX-XL-100	Aluminiumklorid, 9,3% aluminium	0,72	0,050	91,2

Tidligere undersøgelse af fældning af P med fældningsmidler efterfulgt af mekanisk separation

Tilsætning af flokkuleringsmidler før separation af gylle forbedrer generelt separationseffektiviteten for f.eks. P, og tilsætning af koaguleringsmidler som jernklorid og aluminiumsulfat til at koagulere partikler og udfælde P kan yderligere øge effektiviteten (Hjorth et al., 2010). Som gennemsnit af en række undersøgelser med svinegylle og kvæggylle er der opnået 79% af total-P i fiberfraktionen, som udgjorde i gennemsnit 22% af den oprindelige gyllemængde (Hjorth et al., 2010).

Et dansk studium har vist, at koncentrationen af total-P i uafgasset svinegylle kunne øges fra ca. 0,3 kg pr. ton op til ca. 5,0 kg pr. ton ved tilsætning af koaguleringsmidler som jernsulfat og aluminiumsulfat efterfulgt af afvanding på bælte og skruepresning (Møller et al., 2007a). Derved blev 72-91% af total-P separeret i en fiberfraktion, der udgjorde 4,5-13,0% af massen. Denne separationsmetode gav en højere separationseffektivitet end dekantercentrifugering af gylle med sammenligneligt tørstofindhold.

Et italiensk studium med separation gylle og afgasset gylle fra svin og kvæg har vist, at der ved filtrering (0,25 mm filter) kan opnås en separation med 72-93% af total-P i fiberfraktionen, hvis der forud for filtreringen tilsættes $Al_2(SO_4)_3$ og 20-74% ved tilsætning af $Ca(OH)_2$ (Cattaneo et al., 2019). For både afgasset svinegylle og afgasset kvæggylle blev separationseffektiviteten for P øget fra omtrent 50-55% uden tilsætning til omtrent 70-75% efter tilsætning af $Al_2(SO_4)_3$, med en lidt større effekt for svinegylle. Separationseffekten blev øget yderligere til godt 80% for afgasset

kvæggylle og godt 90% for afgasset svinegylle, hvis ammonium først blev strippet af den afgassede gylle.

Et dansk forsøg med separation af slagtesvinegylle med hhv. skruepresning, dekantercentrifugering og flokkulering efterfulgt af bæltefiltrering viste, at dekantercentrifugering øgede koncentrationen af P i fiberfraktionen væsentligt, mens der var lidt mindre effekt af flokkulering+bæltefiltrering og kun lille effekt af skruepresning (Cocolo et al., 2016). Separationseffekten var dog væsentligt reduceret for forsuret gylle.

4.4. Forbrænding af gyllefiber og hønsegødning

Resultater fra forbrændingsforsøget

Ved håndtering af gyllefiber og hønsegødning var det en udfordring for grabben til indfødningen at få fat i materialet, da det havde tendens til at drysse ud mellem grabarmene.

Ved afbrændingsforsøget med en blanding af lige dele gyllefiber og hønsemøg blev der fyret med 4,76 tons af blandingen, selvom det var planen at fyre med ca. 60 tons af blandingen. Analyser af indhold af tørstof, aske og næringsstoffer i de to typer biomasse ses i tabel 5. Med et vandindhold på 35% i gyllefiber og 50% i hønsegødning formodes vandindholdet i blandingen at have været omkring 43%.

Forbrændingen var ikke god, givetvis pga. for højt vandindhold i blandingen. Desuden var det svært at blæse nok luft gennem materialet på risten i kedlen. Temperaturen i kedlen faldt markant, og det var utilstrækkeligt med de to oliefyrede hjælpebrændere for at holde kedeltemperaturen over de 850°C, som er minimumskravet af hensyn til emissioner. Ovntemperaturen nåede ned på 405°C mod de normalt 1.000-1.100°C. Der blev derfor også fyret med træ, hvorved forbrændingen kom i gang igen. Umiddelbart efter steg produktionen af damp i røggaskondensatoren markant med en stigning i fugtighed i røggassen fra 12,5% til 19%, hvilket også indikerer, at der var højt vandindhold blandingen af gyllefiber og hønsemøg, og at vandet blev fordampet ved samfyringen med træ. På sigt ville den lave røggastemperatur også give problemer med overskridelse af miljøgrænser, da NOx-anlægget kræver en driftstemperatur på 750°C, men forsøget blev stoppet inden da.

Hvis gyllefiber skal forbrændes, er der således behov for en større grad af afvanding af gyllefiberen eller alternativt, at der iblandes en større andel af biomasse med lavere vandindhold.

Da der kun blev fyret med en relativt lille mængde gyllefiber+hønsegødning, var der også kun tale om en relativt begrænset mængde aske fra denne biomasse, som ud fra analyserne af indholdet af aske (tabel 5) formodes at være i størrelsesordenen 560 kg aske. Da bundasken løbende udsluses fra kedlen via en relativt bred strøm, vil der ved overgangen til forbrænding af en ny type brændsel ske en vis opblanding af asken fra de forskellige brændselstyper. Udtagningen af askeprøver var derfor forbundet med en betydelig usikkerhed mht., om den udtagne aske primært stammer fra forbrændingen af gyllefiber og hønsegødning, eller om den er 'fortyndet' med aske fra forbrænding af diverse affald inkl. træ. Mistanken om opblanding med anden aske bestyrkes af, at andelen af total-P som procent af aske kun var 0,4% i askeprøverne mod 4,0 og 5,2% i hhv. gyllefiber og hønsegødning (tabel 5). Da total-P må forventes at udgøre ca. samme andel af askefraktionen før og efter forbrændingen, tyder dette også på, at der er sket en fortynding med aske fra forbrænding af biomasser med lavere P-indhold end gyllefiber og hønsegødning.

Indholdet af næringsstoffer var betydeligt højere i hønsegødning end i gyllefiber, bl.a. med et indhold af total-P på 10,0 kg pr. ton i hønsegødning mod 1,7 kg pr. ton i

gyllefiber (tabel 5). Vurderet ud fra andelen af vandopløseligt P og citratopløseligt P som procent af total-P synes plantetilgængeligheden af P at være omtrent dobbelt så høj i gyllefiber som i hønsegødning (tabel 5). Da udtagning af askeprøverne som nævnt er forbundet med betydelig usikkerhed, kan der ikke drages klare konklusioner mht. ændringen i plantetilgængelighed af P under forbrændingsprocessen. Uanset hvilken biomasse askeprøverne primært stammer fra, så er andelen af vandopløseligt P og citratopløseligt P dog meget lavt i askeprøverne, hvilket indikerer en lav plante-tilgængelighed af P efter forbrændingen. Dette er i overensstemmelse med tidligere undersøgelser af effekten forbrænding på plantetilgængeligheden (se efterfølgende afsnit).

Tabel 5. Koncentrationer af tørstof, aske og næringsstoffer i hhv. gyllefiber fra afgasset gylle, hønsegødning og aske fra forbrænding af en blanding af lige dele gyllefiber og hønsegødning. Hver værdi repræsenterer gennemsnit af tre gentagelser. Der er betydelig usikkerhed mht., om den udtagne aske stammer fra forbrændingen af gyllefiber og hønsegødning, eller om den er 'fortyndet' med aske fra forbrænding af diverse affald inkl. træ.

Biomasse/prøve-type	**Tørstof**	**Aske**	**Total-N**	**NH_4-N**	**Total-K**	**Total-P**	**Vandop-løseligt P**	**Citrat-opløse-ligt P**	**Vandop-løseligt P i % af total-P**	**Citrat-opløse-ligt P i % af to-tal-P**	**Total-P som % af aske**	**Total-K som % af aske**
	%	%	kg/ton	kg/ton	kg/ton	kg/ton	kg/ton	kg/ton	%	%	%	%
Gyllefiber fra afgas-set gylle	35,3	4,4	10,8	2,8	3,2	1,7	0,5	1,6	27,2	91,0	4,0	7,5
Hønsegødning	50,0	19,1	18,3	6,5	14,0	10,0	1,3	5,3	13,4	53,9	5,2	7,3
Aske af gyllefiber + hønsegødning	83,0	81,3	0,2	0,0	3,0	3,1	<0,08	0,2	<2,6	7,1	0,4	0,4
P-værdi	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*0,027*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*0,004*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*
LSD-værdi	*11,9*	*2,2*	*5,8*	*4,3*	*1,1*	*1,4*	*0,1*	*2,2*	*2,3*	*25,8*	*0,9*	*1,3*

Tidligere undersøgelse af forbrænding af gyllefibre mm. og fosforgødningsvirkningen af asken

Et forbrændingsforsøg med samfyring med op til 50% gyllefiber i en flisfyret fjernvarmekedel med trapperist viste, at gyllefibre og træflis udgør et glimrende brændsel i traditionelle flisfyr (Skov & Jensen, 2015). Udfordringerne var især knyttet til at opnå en ensartet brændselskvalitet. Det vurderedes endvidere, at NO_x-emissionen vil være afgørende for, hvor stor en andel af gyllefibre, der i praksis kan iblandes flisen. Desuden peger undersøgelsen på, at en forsuring af asken med salpetersyre kan gøre næringsstofferne vandopløselige og dermed øge planternes udnyttelse af næringsstofferne.

I en undersøgelse af forbrænding af halm, træpiller og træflis ved 850-1500°C var andelen af vandopløseligt P i aske meget lav med værdier mellem 0,003 og 3,2% af total-P, mens den tilsvarende andel af vandopløseligt P i tripelsuperfosfat var 73% (Li et al., 2016). I dyrkningsforsøg havde askerne dog omtrent samme P-gødningsvirkning som referencegødningen.

Forbrændingstemperaturens betydning for plantetilgængeligheden af P i aske blev undersøgt i et forsøg med forbrænding af gyllefiber (Thygesen et al., 2011). Plantetilgængeligheden blev omtrent halveret, når forbrændingstemperaturen blev øget fra 400 til 700°C, hvilket formodentlig skyldes dannelse af hydroxy-apatit. Det blev konkluderet, at for at bevare en høj P-gødningsvirkning bør forbrændingstemperaturen derfor ikke bør overstige 700°C, selvom energiproduktionen er optimal ved forbrændingstemperaturer over 800°C. Alternativt kan fiberfraktionen bruges til termisk forgasning, da dette kan gøres effektivt ved lavere temperaturer.

En undersøgelse af pyrolyse af fiberfraktionen fra afgasset gylle viste, at pyrolysetemperaturer over 600°C medførte biochar/bioaske med gradvist større andele af P-forbindelser med lav opløselighed (Bruun et al., 2017). Således faldt andelen af calciumfosfat og andelen af apatit steg med stigende temperatur. For biochar opnået ved lavere pyrolysetemperaturer øgedes opløseligheden af P relativt hurtigt igen efter tilførsel til jord, til samme niveau som i den oprindelige gyllefiber, mens tilgængeligheden var reduceret i meget længere tid efter pyrolyse ved højere temperaturer.

Asken fra termisk forgasning af fiberfraktion fra svinegylle (uden afgasning) og fjerkrægødning havde meget lavt indhold af vandopløseligt P på kun godt 0% af total-P, mens vandopløseligheden af gyllefiberen før forgasning var næsten 100% (Rubæk et al., 2007). Til sammenligning var vandopløseligheden af superfosfat ca. 70%. Efter inkubation af asken i jord i en uge var vandopløseligheden af P fra asken af fjerkrægødning næsten på niveau med superfosfat, og asken fra svinegyllefiber var 25-50% i forhold til superfosfat. Dette understreger, at laboratorieanalyser direkte på asken ikke giver et retvisende billede af tilgængeligheden af P efter tilsætning til jord (Rubæk et al., 2007).

I dyrkningsforsøg med vårbyg på P-udpint jord blev der fundet relativt god gødningsvirkning af diverse asketyper fra bl.a. forbrænding eller forgasning af gyllefiber, dog tyder resultaterne på, at asken ikke er egnet til startgødning men i stedet som vedligeholdelsesgødning (Sørensen & Rubæk, 2011). Til sammenligning havde pelleteret fiberfraktion (afgasset gylle) fra en dekantercentrifuge samme P-gødningsvirkning som mineralsk P-gødning, mens tørret fiberfraktion (uafgasset) fra en skruepresse havde en lavere P-gødningsvirkning på niveau med virkningen af P fra aske.

Forsøg med forbrænding af fiberfraktionen af husdyrgødning har vist, at hovedparten af P og mindre end 10% af cadmium ender i bundasken, således at bundasken har relativt lavt cadmiumindhold (Møller et al., 2007b). Tilgængeligheden af P i bundasken var dog væsentligt lavere end før forbrændingen, og omkring 80% af P blev immobiliseret i en form for P-mineralet apatit.

5. Konklusion

Analyse af den reelle P-gødningsværdi af forskellige restprodukter er komplekst og udgør en udfordring i forhold til at vurdere produkterne og at anvende dem i passende doser. Ideelt set skal P-gødningsværdien måles i dyrkningsforsøg, hvilket er urealistisk at gøre som standardanalyse. Laboratorieanalyser med kemisk ekstraktion af P direkte på restproduktet er realistisk at praktisere, men desværre korrelerer resultaterne ikke altid godt med den reelle P-optagelse i planter, og der findes ikke én universel P-analyse, der generelt indikerer P-gødningsværdien. Inkubation af restproduktet i jord og efterfølgende laboratorieanalyse kan give lidt bedre indikation af P-gødningsværdien end ved analyse direkte på restproduktet.

Separationen med skruepresser medførte en vis opkoncentrering af P i fiberfraktionen, idet 14% af total-P blev frasepareret i en fiberfraktion, der udgjorde 6,8 og 4,9% af den samlede råvaremængde for hhv. Börger og EYS skruepresserne. Samlet set var der således tale om en beskeden opkoncentrering af P i fiberfraktionen ved separation med skruepresserne.

Forsøget med naturlig sedimentation af afgasset gylle og væskefraktion fra separation af afgasset gylle med skruepresser viste, at der sker en vis sedimentation, som medfører koncentrationsforskelle især for tørstofindhold, total-N og total-P. Koncentrationsforskellene var dog relativt små, og hastigheden for sedimentationen var relativt lav, hvorved der i givet fald ville være behov for stor lagerkapacitet for afgasset gylle for udnytte dette separationsprincip. Ved udtagning af de nederste 25 eller 50% af beholdervolumenet med afgasset usepareret gylle ville der i princippet kunne udtages hhv. 25,8 og 51,5% af total-P efter 11 dages sedimentation og 27,4 og 52,1% af total-P efter 50 dages sedimentation. For væskefraktionen fra Börger skruepressen ville der tilsvarende kunne fjernes 27,5 og 53,7% af total-P efter 11 dages sedimentation og 31,4 og 58,4% af total-P efter 50 dages sedimentation.

Der blev heller ikke fundet særligt store variationer i indholdet af citratopløseligt P og vandopløseligt P som andel af total-P efter sedimentation. Til gengæld faldt andelen af både citratopløseligt P og vandopløseligt P markant med stigende indhold af total-P, mest markant for procentandelen af vandopløseligt P, der var 41 og 19% ved koncentrationer af total-P på hhv. 0,5 og 1,0 kg pr. ton. Disse sammenhænge tyder på, at der ved høje indhold af total-P er en større andel af P, som er hårdere bundet og dermed umiddelbart mindre tilgængelige for planter. En konsekvens af dette kan være, at gyllefraktioner med høje koncentrationer af total-P på kort sigt kan have en relativt lavere gødningsvirkning pr. kg tilført total-P sammenlignet med fraktioner med lavere indhold af total-P. Dette bør dog belyses nærmere.

Forsøget med fældning af P i afgasset gylle med jern, aluminium og polymer viste, at tilførsel af jern eller aluminium alene ikke medførte nogen særlig god separation i væskefase og fast fase, men kombinationen af jern og polymer kunne reducere koncentrationen af total-P i væskefraktionen med op til ca. 97%. En kombination af fældningsmidler og efterfølgende dekantercentrifugering eller anden separation kan derfor potentielt medføre en meget stor andel af total-P i fiberfraktionen. Forsøgets resultater skal dog verificeres i forsøg i større skala og i kombination med separation. Endvidere er der behov for at lave en økonomisk vurdering af separationsmetoden med fældningsmidler og polymer, ligesom

der skal tages hensyn til evt. udfordringer ved efterfølgende anvendelse af gyllefraktioner indeholdende polymer.

Forbrændingsforsøget med lige dele gyllefiber og hønsegødning viste en dårlig forbrænding med for lav kedeltemperatur, givetvis pga. det relativt høje vandindhold i gyllefiberen, men muligvis også fordi, at det er vanskeligt at blæse luft nok igennem på kedelristen. Ved forbrænding af gyllefiber er der således behov for en større grad af afvanding eller alternativt, at der iblandes en større andel af biomasse med lavere vandindhold for at sikre tilstrækkelig god forbrænding. Der var væsentligt højere indhold af total-P i hønsegødning end i gyllefiber, men andelen af vandopløseligt P og citratopløseligt P var lavere i hønsegødningen. Der var betydelig usikkerhed i forbindelse med udtagning af askeprøver fra forbrændingsforsøget, men uanset askens oprindelse, så var andelen af vandopløseligt P og citratopløseligt P meget lav sammenlignet med P i både gyllefiber og hønsegødning inden forbrænding.

6. Referencer

Aguirre-Villegas, H.A., Larson, R.A., Sharara, M.A. 2019. Anaerobic digestion, solid-liquid separation, and drying of dairy manure: Measuring constituents and modeling emission. *Science of The Total Environment*, **696**, 134059.

Birkmose, T. 2003. Naturlig sedimentation i gyllebeholdere med svinegylle. Planteavlsorientering 07-465, Landbrugsinfo 2/7 2003. , Vol. 2019, Landscentret, Planteavl. Landbrugsinfo.

Brod, E. 2018. Manure-based recycling of fertilizers. A literature review of treatment technologies and their effect on phosphorus fertilization effects. Norwegian Institute of Bioeeconomy Research.

Brod, E., Øgaard, A.F., Haraldsen, T.K., Krogstad, T.J.N.C.i.A. 2015. Waste products as alternative phosphorus fertilisers part II: predicting P fertilisation effects by chemical extraction. **103**(2), 187-199.

Bruun, S., Harmer, S.L., Bekiaris, G., Christel, W., Zuin, L., Hu, Y., Jensen, L.S., 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.

Cattaneo, M., Finzi, A., Guido, V., Riva, E., Provolo, G. 2019. Effect of ammonia stripping and use of additives on separation of solids, phosphorus, copper and zinc from liquid fractions of animal slurries. *Science of The Total Environment*, **672**, 30-39.

Christiansen, N.H., Sørensen, P., Lemming, C., Rubæk, G.H. 2018. Måling af restprodukters fosforgødningsværdi. Nr. 141 ed. in: *Gødningsværdi af fosfor i restprodukter*, (Eds.) G.H. Rubæk, M. Askegaard, N.H. christiansen, Vol. DCA Rapport nr. 141, Aarhus Universitet, pp. 44-70.

Cocolo, G., Hjorth, M., Zarebska, A., Provolo, G. 2016. Effect of acidification on solid–liquid separation of pig slurry. *Biosystems Engineering*, **143**, 20-27.

Duboc, O., Santner, J., Golestani Fard, A., Zehetner, F., Tacconi, J., Wenzel, W.W. 2017. Predicting phosphorus availability from chemically diverse conventional and recycling fertilizers. *Science of The Total Environment*, **599-600**, 1160-1170.

Guilayn, F., Jimenez, J., Rouez, M., Crest, M., Patureau, D. 2019. Digestate mechanical separation: Efficiency profiles based on anaerobic digestion feedstock and equipment choice. *Bioresource Technology*, **274**, 180-189.

Hjorth, M., Christensen, K.V., Christensen, M.L., Sommer, S.G.J.A.S.D. 2010. Solid–liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review. **30**(1), 153-180.

Li, X., Rubæk, G.H., Sørensen, P. 2016. High plant availability of phosphorus and low availability of cadmium in four biomass combustion ashes. *Science of The Total Environment*, **557-558**, 851-860.

Møller, H.B., Hansen, J.D., Sørensen, C.A.G. 2007a. Nutrient recovery by solid-liquid separation and methane productivity of solids. *Transactions of the ASABE*, **50**(1), 193-200.

Møller, H.B., Jensen, H.S., Tobiasen, L., Hansen, M.N. 2007b. Heavy metal and phosphorus content of fractions from manure treatment and incineration. *Environ Technol*, **28**(12), 1403-18.

Møller, H.B., Lund, I., Sommer, S.G. 2000. Solid–liquid separation of livestock slurry: efficiency and cost. *Bioresource Technology*, **74**(3), 223-229.

Ørtenblad, H., Kjellerup, V. 1991. Fordelingen af næringsstoffer i lagertanke med afgasset gylle fra biogasfællesanlæg. *Tidsskrift for Planteavl*, **95**(Beretning nr. 2167), 383-392.

Rubæk, G.H. 2018. Fosforstrømme, -balancer og -udnyttelse i dansk landbrug. Nr. 141 ed. in: *Gødningsværdi af fosfor i restprodukter*, (Eds.) G.H. Rubæk, M. Askegaard, N.H. christiansen, Vol. DCA Rapport nr. 141, Aarhus Universitet, pp. 11-16.

Rubæk, G.H., Askegaard, M., Christiansen, N.H. 2018a. Gødningsværdi af fosfor i restprodukter. Aarhus Universitet, DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug.

Rubæk, G.H., Sørensen, P., Christiansen, N.H. 2018b. Restprodukters samlede fosforindhold, hvad betyder målemetoden? Nr. 141 ed. in: *Gødningsværdi af fosfor i restprodukter*, (Eds.) G.H. Rubæk, M. Askegaard, N.H. christiansen, Vol. DCA Rapport nr. 141, Aarhus Universitet, pp. 37-40.

Rubæk, G.H., Sørensen, P., Møller, H.B. 2007. Er fosfor i aske plantetilgængeligt. in: *Plantekongres*, Vol. 2007, Aarhus Universitet, Københavns Universitet, Videncentret for Landbrug. Herning, pp. 320-322.

Skov, S., Jensen, J.Ø. 2015. Afbrænding af gyllefibre og recirkulering af fosfor. F&U-projekt 2012-1. Dansk Fjernvarme. Københavns Universitet.

Sommer, S.G., Hansen, M.N. 2005. Naturlig separering af næringsstoffer i lagret svinegylle – effekt af bioforgasning og gyl-leseparering, (Ed.) D. Jordbrugsforskning, Vol. Grøn Viden, Husdyrbrug.

Sommer, S.G., Hjorth, M., Leahy, J.J., Zhu, K. 2015. Pig slurry characteristics, nutrient balance and biogas production as affected by separation and acidification. *The Journal of Agricultural Science*, **153**(1), 177-191.

Sørensen, P., Rubæk, G.H. 2011. Tilgængelighed af fosfor i aske fra forbrænding af gyllefibre og husdyrgødning. in: *Plantekongres*, Vol. 2011, Aarhus Universitet, Københavns Universitet, Videncentret for Landbrug. Herning, pp. 103-104.

Tambone, F., Orzi, V., D'Imporzano, G., Adani, F. 2017. Solid and liquid fractionation of digestate: Mass balance, chemical characterization, and agronomic and environmental value. *Bioresource Technology*, **243**, 1251-1256.

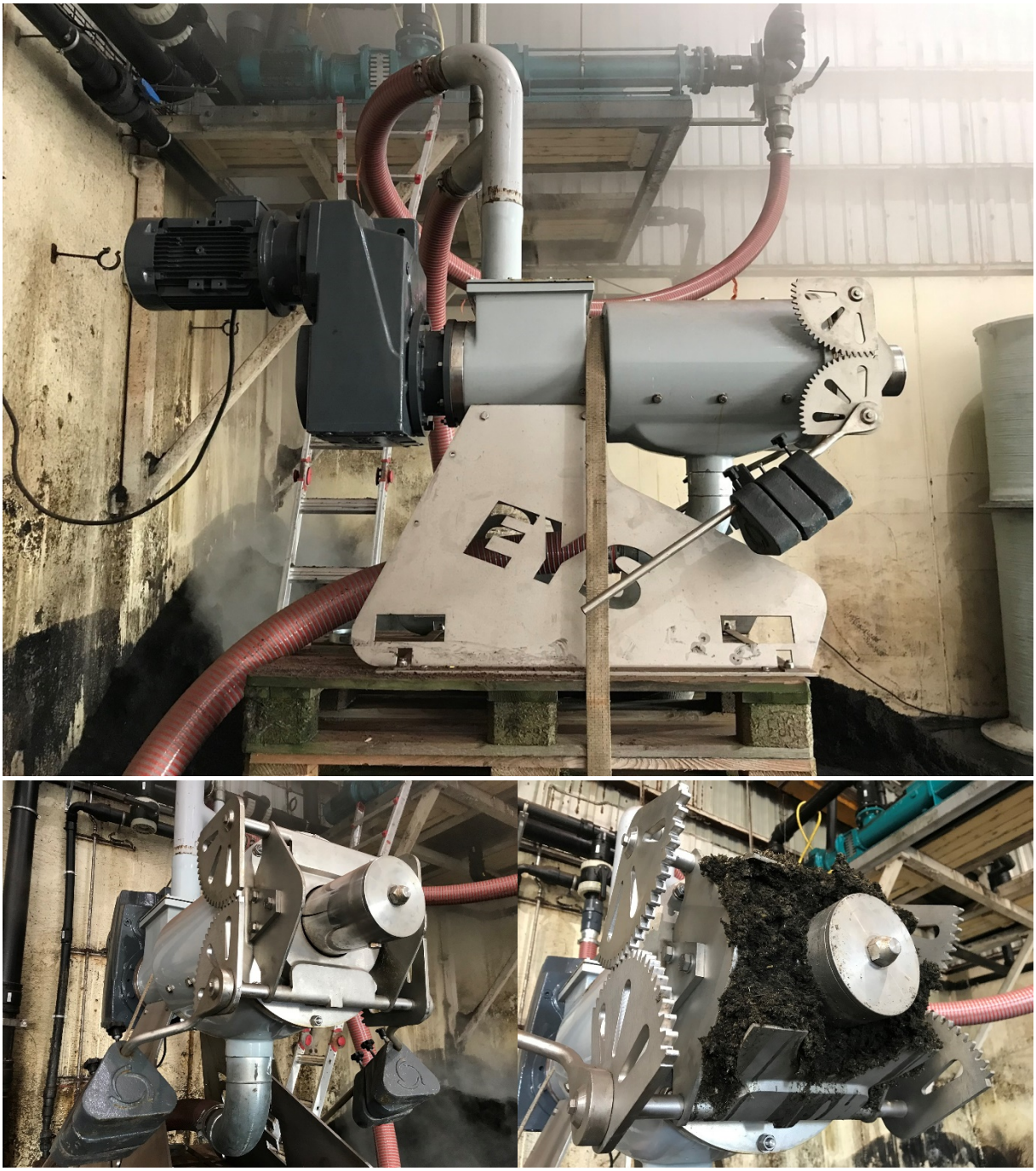
Thygesen, A.M., Wernberg, O., Skou, E., Sommer, S.G. 2011. Effect of incineration temperature on phosphorus availability in bio-ash from manure. *Environ Technol*, **32**(5-6), 633-8.

Appendiks 1. Fotos fra forsøg med skruepresser

Börger skruepresse. Øverst ses afløbet for væskefraktionen, der løber ned i kar under skruepressen. Nederst t.h. ses undersiden af udkastet for fiberfraktionen.

Forsøgsopstilling ved test af Börger skruepresse. T.v. ses den fastmonterede skruepresse og opsamling af fiberfraktion i skovl på teleskoplæsser. T.h. ses den samlede opstilling inkl. tankbil til opsamling af væskefraktionen samt siloer, der efterfølgende blev anvendt til forsøg med naturlig sedimentation. Både teleskoplæsser og tankbil blev vejet på brovægt før og efter kørsel med skruepressen i én time.

Prøvetagning ved separationsforsøget med Börger skruepresse. T.v.: Udtagning af prøve af afgasset gylle umiddelbart før indløb i skruepressen. Midt: Udtagning af prøve fra væskefraktion direkte fra afløb fra skruepressen. T.h.: Udtagning af fiberprøve direkte under skruepressens udkast.



EYS skruepresse. Tilløbet af afgasset gylle sker via røret ovenpå skruepressen, mens afløbet af væskefraktionen sker via røret under skruepressen. Separationsgraden indstilles via forskydning af ballastklodserne på de to jernstænger. Nederst t.v. ses det lukkede afkast for fiberfraktionen, og t.h. ses afkastet under kørsel med skruepressen.

Forsøgsopstilling ved test af EYS skruepresse. T.v. ses opsamling af fiberfraktion i skovl på teleskoplæsser. T.h. ses opsamling af væskefraktion i palletank, hvorfra væsken blev pumpet over i tankbil. Både teleskoplæsser og tankbil blev vejet på brovægt før og efter kørsel med skruepressen i én time. Der blev undervejs udtaget prøver af hhv. afgasset gylle, væskefraktion og fiberfraktion.

Fiberfraktion fra skruepresser. T.v. fiber fra Börger skruepresse, t.h. fra EYS skruepresse.

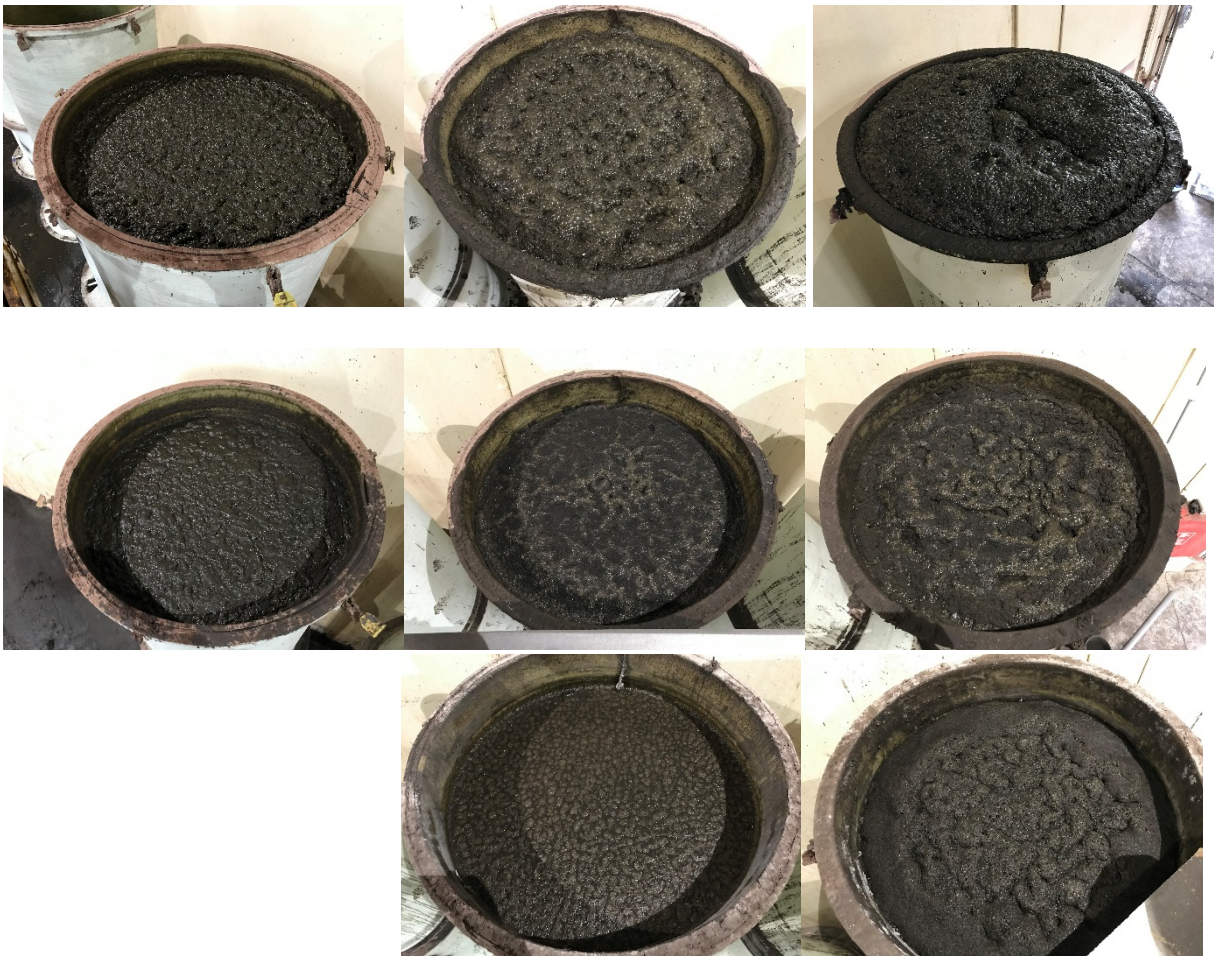
Appendiks 2. Fotos fra forsøg med naturlig sedimentation

Opfyldning af forsøgssiloer til sedimentationsforsøget. T.v.: Opfyldning med væskefraktion fra Börger skruepresse. T.h.: Opfyldning med afgasset gylle i siloen til højre, mens siloerne til venstre og i midten er fyldt med væskefraktion fra hhv. EYS skruepresse og Börger skruepresse. Der blev udtaget prøver løbende under opfyldning af siloerne.

Opfyldning af silo med væskefraktion fra EYS skruepresse. Væskefraktionen blev opsamlet i palletank, som derefter blev løftet op og tømt over i forsøgssiloen.

Forsøgsopstilling med sedimentationsforsøget, hvor de tre siloer til højre blev anvendt.

Skumdannelse efter opfyldning af forsøgssiloer, her med væskefraktion fra EYS skruepresse ca. en time efter opfyldningen.



Overfladen på væsken i forsøgssiloerne på forskellige tidspunkter i sedimentationsforsøget. T.v. med væskefraktion fra EYS skruepresse (silo 3), i midten med væskefraktion fra Börger skruepresse (silo 2) og t.h. med usepareret afgasset gylle (silo 1). Øverste række fotos taget efter 1 døgns sedimentation, midterste række efter 4 døgns sedimentation og nederste række efter 50 dages sedimentation.

Prøvetager anvendt efter 1 døgns sedimentation i sedimentationsforsøget. Når flasken er nedsænket til ønsket prøvedybde, hives proppen op via snoren, og flasken fyldes. Når luften i flasken fortrænges, 'bobler' det op gennem siloen, hvilket potentielt kan forstyrre/opblande væsken i de forskellige lag.

Prøvetager anvendt efter 4, 11 og 50 døgns sedimentation i sedimentationsforsøg. Når enden af røret er nedsænket til ønsket prøvedybde, åbnes og lukkes der med den koniske gummiprop på enden af en jernstang. Da røret er åbent i den øverste ende, opstår der ikke 'bobler' op gennem væsken i siloen.

Prøver af afgasset gylle, væskefraktion og fiber fra separationsforsøget og sedimentations-forsøget.

Appendiks 3. Fotos fra fældningsforsøg med afgasset gylle

Udtagning af afgasset gylle til fældningsforsøg i lab-skala.

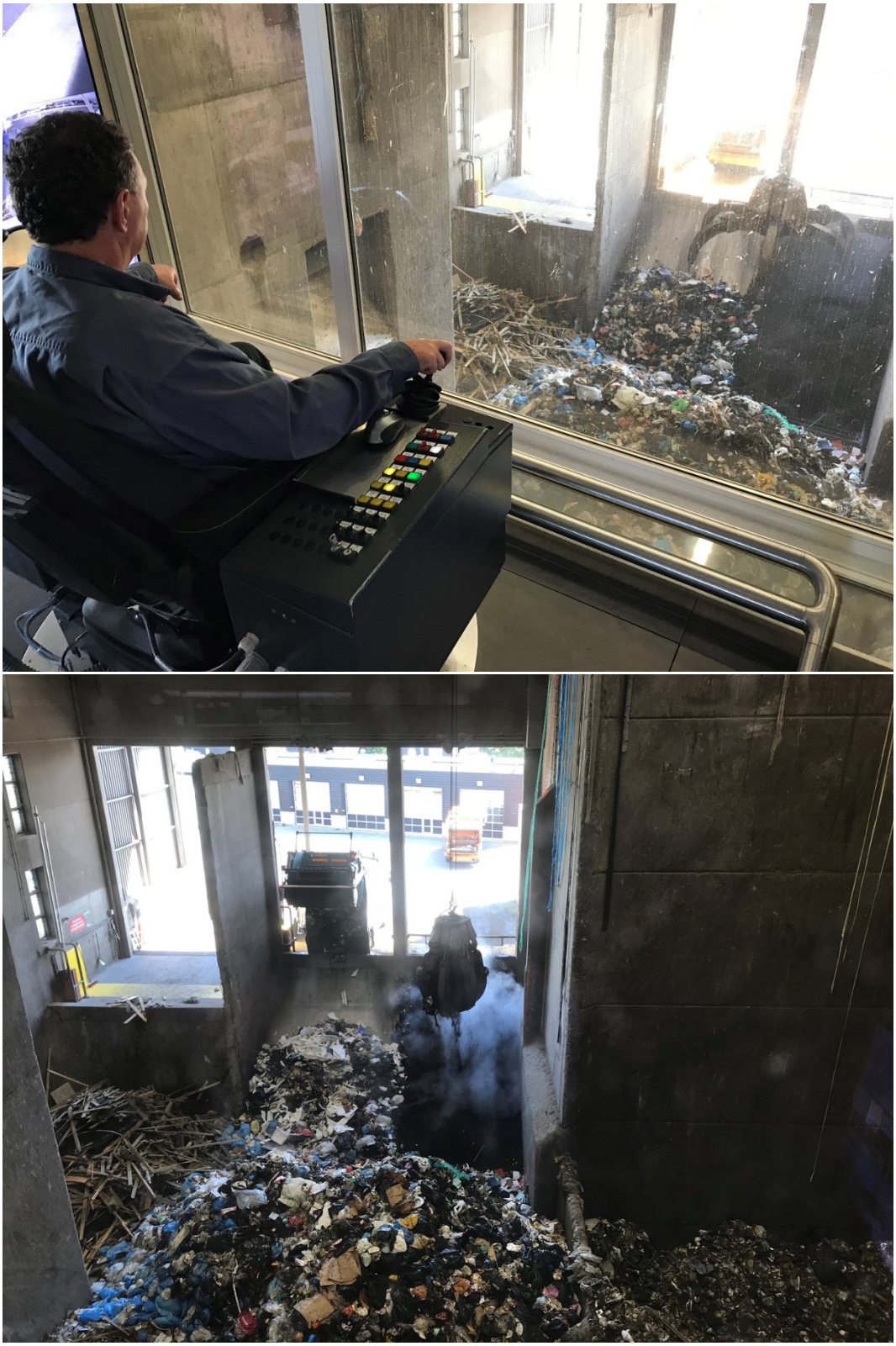
T.v. Tilsætning af fældningsmiddel til testglas med omrører, der kørte i 4 minutter før henstand i 20 minutter. T.h. Der skete en betydelig opskumning af den afgassede gylle efter tilsætning af fældningsmidlerne, hvilket skyldes opdrift af flokkulerede partikler pga. CO_2 i den afgassede gylle.

Fældning med jern(III)sulfat (t.v.) og aluminiumklorid (t.h.). Tilsætningen af de to fældningsmidler medførte en opskumning og fortykning af gyllen, men der skete ikke nogen separation i en grad, så der dannedes en væskefase til analyse for P-indhold.

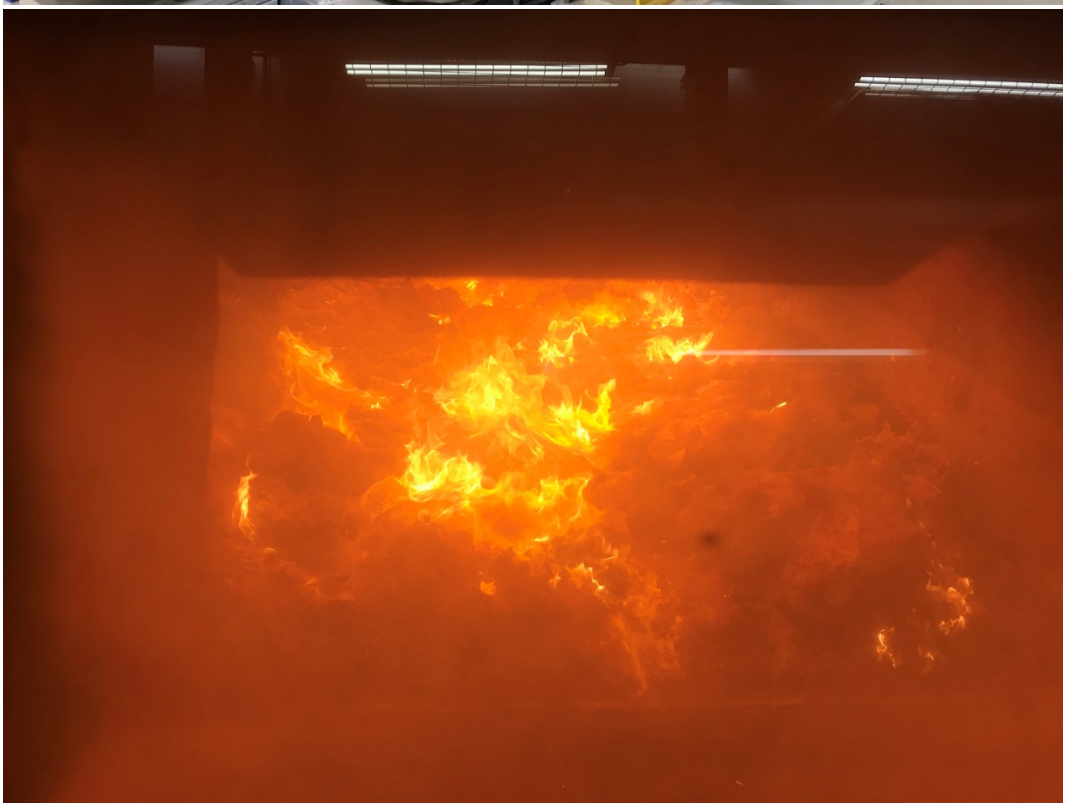
Fremstilling af polymeropløsning (t.v.) og iblanding af polymeropløsning i afgasset gylle med jern(III)sulfat (t.h.).

Afgasset gylle efter tilsætning af først jern(III)sulfat og dernæst polymer. Polymertilsætningen medførte en udfældning af partikler og dermed en væskefase, hvorfra der kunne udtages prøve til analyse for P-indhold.

Appendiks 4. Fotos fra forsøg med forbrænding af gyllefiber og hønsemøg



Kontrolrum til styring af grab samt opgrabning af blanding af gyllefiber og hønsemøg. Begge biomasser blev læsset af i den ene side af siloen og blev blandet med grabben.



Ristefyret kedel samt kig ind i kedlen under forbrændingen.

Billeder fra kedlen, øverst før indfyring af gyllefiber+hønsegødning, nederst efter godt en times fyring med gyllefiber+hønsegødning, hvor forbrændingen er dårlig, og hvorefter der blev indfyret træ. (Foto: AVV, Hjørring).

Askeudtagning i bunden af kedlen (øverst) og askeudkast på transportbånd efter slukning i vandkar (nederst).

Opsamling af aske i containere.

Udtagning af homogen og metalfri askefraktion fra forbrænding af gyllefiber og hønsegødning.