



**NIBIO**

NORSK INSTITUTT FOR  
BIOØKONOMI

# Biogass fra marint fiskeslam sambehandlet med husdyrgjødsel og myse

Kvalifiseringsprosjekt finansiert av Regionalt Forskingsfond Midt-Norge og Fylkesmannen i Møre og Romsdal i samarbeid med Tingvolløst og Tingvoll Fisk AS

NIBIO RAPPORT | VOL. 4 | NR. 112 | 2018



Joshua Cabell, Ruth Gebauer, Linn Solli, Halvor Kittelsen og Tormod Briseid  
Divisjon for miljø og naturressurser/Bioressurser og kretsløpsteknologi

**TITTEL/TITLE**

Biogass fra marint fiskeslam sambehandlet med husdyrgjødsel og myse: Kvalifiseringsprosjekt finansiert av Regionalt Forskningsfond Midt-Norge og Fylkesmannen i Møre og Romsdal i samarbeid med Tingvollst og Tingvoll Fisk AS

**FORFATTER(E)/AUTHOR(S)**

Joshua Cabell, Ruth Gebauer, Linn Solli, Halvor Kittelsen, Tormod Briseid

<b>DATO/DATE:</b>	<b>RAPPORT NR./ REPORT NO.:</b>	<b>TILGJENGELIGHET/AVAILABILITY:</b>	<b>PROSJEKTNR./PROJECT NO.:</b>	<b>SAKSNR./ARCHIVE NO.:</b>
09.10.2018	4/112/2018	Åpen	RFF256943	18/00298
<b>ISBN:</b>	<b>ISSN:</b>	<b>ANTALL SIDER/ NO. OF PAGES:</b>	<b>ANTALL VEDLEGG/ NO. OF APPENDICES:</b>	
978-82-17-02168-1	2464-1162	30	1	

**OPPDRAUGSGIVER/EMPLOYER:**

Regionalt Forskningsfond Midt-Norge

**KONTAKTPERSON/CONTACT PERSON:**

Joshua Fenton Cabell

**STIKKORD/KEYWORDS:**

Biogass, fiskeoppdrett, marint fiskeslam, landbruk, husdyrgjødsel

Biogas, fish farming, marine fish sludge, agriculture, livestock manure

**FAGOMRÅDE/FIELD OF WORK:**

Bioresursser og kretsløpsteknologi

Bioresources and recycling technologies

**SAMMENDRAG:**

Tingvoll Fisk AS og Tingvollst holder til Torjulvågen i Tingvoll kommune på Nordmøre. Tingvoll Fisk AS driver med landbasert oppdrett av rognkjeks (*Cyclopterus lumpus*) med planer om å utvide til havbasert påvekst etter hvert. Tingvollst produserer prisbelønt ost med melk fra egen gård og har lenge vurdert å bygge et biogassanlegg for behandling av husdyrgjødsel. Dette prosjektet undersøkte gjennom igjennomgang av litteratur og labforsøk aktuelle løsninger for oppsamling og separasjon av marint slam fra fiskeoppdrett og biogasspotensialet til sambehandling av marint slam fra rognkjeks, storfegjødsel fra melkekyr og okser og myse fra osteproduksjon. Litteraturstudien, gjennomførte av Tingvoll Fisk AS, konkulderte med at kombinasjonen semi-lukkede merder med en trakt laget av duk under til oppsamling av fiskeslam fra merdene; en såkalt Radial Flow Separator (RFS) for å sedimentere slammet; og geobags for å rense utspyllinga etter RFS er den mest kostnadseffektive og praktiske løsningen for oppsamling og separasjon av marint slam. NIBIO gjennomførte en biometanepotensiale (BMP) test og et reaktorforsøk med ulike blandinger av disse substratene for å vurdere biogasspotensialet og prosess stabilitet. BMP-testen viser at rent fiskeslam gir mest biogass- og metanutbytte, men fra tidligere erfaring vet vi at rent fiskeslam kan være utfordrende på grunn av opphoping av flyktige fettsyrer (VFA) over tid. En blanding av 60% storfegjødsel og myse + 40% fiskeslam ga høyeste biogass- og metanutbytta av substratblandinger. I reaktorforsøket var det blandingen med 50% storfegjødsel og myse + 50% fiskeslam som hadde høyeste biogass- og metanutbytte, men viste tegn på prosessforstyrrelse (økende innhold av flyktige fettsyrer) etter kun

**NIBIO**NORSK INSTITUTT FOR  
BIOØKONOMI

to uker. Blandingen med 80% storfegjødsel og myse + 20% fiskeslam hadde mindre utbytte og fettsyrenivåene forble lavt i hele forsøksperioden selv om organisk belastningen lignet den andre blandingen. Husdyrgjødsel har en bufferevne som bidrar til å opprettholde prosess stabilitet. Metangassutbytte var tilsvarende BMP-testen til å begynne med, så avtok det etter 15 uker i alle fire reaktorer, spesielt de med 50% fiskeslam. Det er to mulige forklaringer: For det første, fiskeslam inneholder mye fett og protein, substrater som brytes ned til forholdsvis VFA og ammoniakk (ved høyere pH). Begge kan føre til inhibering i for store konsentrasjoner. I de to andre reaktorene med kun 20% fiskeslam kan det være på grunn av sulfat-innholdet i saltvannet. Sulfat-reduserende bakterier (SRB) både konkurrerer med metanogener for molekylær hydrogen og produserer svovlgass, som begge hindrer metanutbyttet. Biogasskulturen som ble brukt til å pøse reaktorene er verken tilpasset et marint miljø eller høy fett og protein-innhold. Dette har også mye å si om ytelse og stabilitet. Konklusjonen er at sambehandling av husdyrgjødsel, myse og marint fiskeslam kan gi lønnsomt metanutbytte men at prosessen og mikrobene må tilpasses for å kunne håndtere sulfat fra sjøvannet og protein fra fiskeslammet hvis det skal være stabilt over tid.

#### SUMMARY:

Tingvoll fisk AS and Tingvollst are located in the village of Torjulvågen in the municipality of Tingvoll in Nordmøre. Tingvoll fisk operates land-based aquaculture for lumpfish (*Cyclopterus lumpus*) with plans to expand to sea-based on-growing over time. Tingvollst produces award-winning cheese with milk from their own farm and has considered investing in a biogas facility to treat cattle manure. Through a literature search and lab studies, this project examined potential solutions for collecting and separating sludge from aquaculture and the biogas potential for co-treating sludge from lumpfish, manure from dairy and beef cattle, and whey from cheese production. The literature study, conducted by Tingvoll fisk, concluded that a combination of semi-closed pens with a textile funnel underneath to capture sediment; a so-called Radial Flow Separator (RFS) for settling solids; and geobags for rinsing the backwash is the most cost-effective and practical solution for collecting and separating marine sludge. NIBIO conducted a biomethane potential test (BMP) and a reactor test with different substrates and substrate combinations to determine the biogas potential and process stability. The BMP-test showed that pure fish sludge had the highest biogas and methane potential. However, from previous experience we know that pure fish sludge is challenging due to the accumulation of volatile fatty acids (VFAs) over time. A mixture of 60% cattle manure and whey + 40% fish sludge resulted in the highest biogas and methane yield. In the reactor test, the combination of 50% cattle manure and whey + 50% fish sludge had the highest yields, but exhibited signs of process disturbance (increasing levels of VFA) after only two weeks. The combination of 80% cattle manure and whey + 20% fish sludge had lower yields and VFA levels remained low throughout the experiment despite the fact that the organic loading rate (OLR) resembled that of the other mix. Cattle manure has a buffering capacity that helps to maintain process stability. Methane gas yield was similar to the BMP-test at the outset then declined after 15 weeks in all four reactors, particularly the ones with 50% fish sludge. There are two possible explanations: first, fish sludge contains high amounts of fat and protein, which break down to VFA and ammonia (at higher pH). Both can cause inhibition at higher concentrations. In the two other reactors with only 20% fish sludge inhibition can have been caused by the sulfate content of salt water. Sulfate reducing bacteria (SRB) both compete with methanogenes for molecular hydrogen and produce hydrogen sulfide, both of which hinder methane yield. The culture used to inoculate the reactors is neither adapted to a marine environment nor high protein and fat content. This is also a factor in determining performance and stability. The conclusion is that co-digestion of cattle manure, whey and marine fish sludge can give a profitable methane yield. However, the process and

the microbial community must be adapted to tolerate sulfate from seawater and protein from fish sludge if it is going to remain stable over time.

LAND/COUNTRY: Norge  
FYLKE/COUNTY: Møre og Romsdal  
KOMMUNE/MUNICIPALITY: Tingvoll  
STED/LOKALITET: Tingvoll

GODKJENT /APPROVED



TRINE EGGEN

PROSJEKTLEDER /PROJECT LEADER



JOSHUA CABELL



# Innholdsfortegnelse

1	Bakgrunn og Formål .....	6
2	Materialer og Metoder .....	8
2.1	Materialer .....	8
2.1.1	Fiskeslam .....	8
2.1.2	Husdyrgjødsel, Oksemøkk og Myse .....	8
2.1.3	Podeslam .....	8
2.1.4	Analysemetoder for karakterisering av substratene .....	8
2.2	Metoder .....	9
2.2.1	Biometanpotensial test (Delmål 3) .....	9
2.2.2	Reaktorforsøk (Delmål 4) .....	11
3	Resultater .....	13
3.1	Oppsamling og separasjon av slam (Delmål 1 og 2) .....	13
3.1.1	Traktformede oppsamlere .....	13
3.1.2	Radial Flow Settler (RFS) .....	14
3.1.3	Trommelfilter .....	15
3.1.4	Bead Filter .....	15
3.1.5	Bernuille Filter .....	16
3.1.6	Beltefilter med bruk av koagulent .....	16
3.1.7	Geotextile Tube: Avvanning og stabilisering av sedimenter fra delstrøm/backwash .....	17
3.2	Biometanpotensial test (Delmål 3) .....	17
3.3	Kontinuerlige reaktorer (Delmål 4) .....	20
3.3.1	Volumetrisk gassproduksjon og spesifikk metanproduksjon .....	21
3.3.2	VFA og pH .....	22
3.3.3	Ammonium og Salinitet .....	23
4	Diskusjon .....	25
5	Konklusjon .....	28
	Referanser .....	29
	Vedlegg .....	31

# 1 Bakgrunn og Formål

Prosjektet «Biogass fra marint slam sambehandlet med substrater fra landbruk» (kortnavn «Marint Slam») har som hovedmål å «undersøke muligheten og potensiale biogassproduksjon basert på marint slam og substrater fra landbruket, herunder blautgjødning og myse fra osteproduksjon». Det er resultatet av at Tingvoll Fisk AS kjøpt et nedlagt settefiskanlegg i Torjulvågen i Tingvoll kommune i nærheten av gården der Tingvollst holder til. Tingvollst har lenge vurdert å bygge et biogassanlegg for å behandle husdyrgjødsel men venter på at det skal bli mer lønnsomt og at investeringskostnadene går ned. Biogassproduksjon fra husdyrgjødsel alene er foreløpig ikke lønnsomt i Norge, i forhold til investeringen. Det ble vist i prosjektet *Fiskeslam som ressurs for bioenergi og plantevekst (Slam BEP)* (RFF 277401, Norges forskningsrådet) at ved å blande 80% husdyrgjødsel og 20% fiseslam kan gassutbyttet økes betydelig, uten noen markant inhibering av prosessen. Tingvoll Fisk AS og Tingvollst ønsket derfor å undersøke om denne prosess-løsningen er aktuelt i deres tilfelle.

Tingvoll Fisk AS produserer rognkjeks som arbeidsfisk til lakseindustrien. Konesjonsvolumet er 3 000 000 fisk på 50 gram per år og en utslipp av 37,5 tonn suspendert stoff, 9,6 tonn nitrogen og 0,9 tonn fosfor. Omregnet til våtslam med en TS på ca 10% blir det cirka 210 tonn slam i året. Tingvoll Fisk AS ønsker å utvide sin produksjon av rognkjeks til en påvekst fasilitet i flytende-semilukket anlegg i den relativt beskyttede Torjulvågen. Fra begge produksjonene er det planlagt sedimentfangst fra avløpsstrømmen om også piloten også gir tilfredsstillende resultater, sedimentet fra marint oppdrett skal da benyttes som en del av substratgrunnlaget til et biogassanlegg sammen med husdyrgjødsel og myse fra osteproduksjonen.

Fiskeslam inneholder mye energi i form av fett og protein, og har derfor generelt et høyt biogasspotensial. Allikevel er fiskeslam en fraksjon som kan gi problemer under biogassbehandling, som følger av opphopning av ammoniakk og fettsyrer. Spesielt er høye nitrogenkonsentrasjoner (lavt karbon / nitrogen-forhold) forbundet med prosessforstyrrelser i reaktorer tilsatt fiskeslam. I Slam BEP ble slam fra laksesmolt (settefisk) brukt som substrat. Settefisk lever i ferskvann. Tingvoll Fisk AS, derimot, driver med oppdrett av rensfisk som lever i saltvann. I tillegg, som en del av osteproduksjon produserer Tingvollst 4,5 m<sup>3</sup> myse/uke. Dette går rett inn i møkkarena. Tidligere studier viser at myse kan være gunstig for biogassproduksjon og prosess-stabilitet, ved at det bidrar til å øke forholdet mellom karbon og nitrogen (Comino, Riggio and Rosso, 2012) og derfor har vi inkludert det i dette forsøket. Disse to faktorer (saltvann og myse) endrer driftsbetingelsene i forhold til betingelsene satt for Slam BEP-forsøket, og de kan ha en betydelig effekt på prosess-stabilitet og biogassutbyttet.

Begge bedriftene involvert har et betydelig behov for energi i produksjonen sin. Tingvoll Fisk AS har flere pumper, lufteanlegg og filtre som forbruker strøm. Foreløpig skal ikke vannet varmes opp, men oppvarming gir betydelig raskere tilvekst og mulighet til å øke omsetning. Ysteriet er også en energikrevende produksjon og forbruker energi stort sett til oppvarming og vasking. I tillegg kommer energibehovet til fjøset (melkerobot, pumper, avkjøling av melk osv). Hvorvidt energiproduksjonen tilsvarener energibehovet krever en nærmere undersøkelse, og er ikke en del av dette prosjektet. En annen faktor som ikke inngår i dette prosjektet, men som bør undersøkes nærmere, er kvaliteten på og gjødseleffekten av biorest fra biogassanlegget.

Tingvoll Fisk hadde ansvar for en undersøkelse og beskrivelse av aktuelle løsninger for oppsamling og separasjon av marint slam (Delmålene 1 & 2) og NIBIO hadde ansvar for gjennomføring av biometanpotensial (BMP)-test (Delmål 3) og kontinuerlig reaktorforsøk (Delmål 4).

Tabell 1. Terminologi

<b>Forkortelse / terminologi</b>	<b>Betydning</b>
<b>VFA</b>	Flyktige fettsyrer
<b>HRT</b>	Hydraulisk retensjonstid
<b>OLR</b>	Organisk belastning
<b>FS</b>	Fiskeslam
<b>RS</b>	Rognkjeksslam
<b>OKS</b>	Storfegjødsel - Okse
<b>KU</b>	Storfegjødsel - Ku
<b>MY</b>	Myse

## 2 Materialer og Metoder

### 2.1 Materialer

#### 2.1.1 Fiskeslam

Fiskeslammet ble samlet fra to anlegg med ulike driftstyper og fiskeart. Det som ble brukt til BMP og under oppstarten av reaktorforsøket var slam samlet på Nofima sitt anlegg på Sunndalsøra. Slammet ble hentet fra en kum der avløpsvann fra flere fiskekar blandes. Nofima har fisk på alle vekststadier, i hovedsak laks og noe rognkjeks. Saltkonsentrasjonen i dette slammet var ikke representativ (for lav) for slammet som skal brukes i gjeldene prosess, og det ble derfor tilsatt salt til et nivå på 33 promille. Slammet hadde et tørrstoffinnhold (TS) på 16,4%. Slammets kjemiske sammensetning ble bestemt internt og på Eurofins, og resultater fra analysene er vist i Tabell 2. Etter oppstarten av reaktorene ble det bestemt at Tingvoll Fisk skal produsere rensefisk (rognkjeks) og ikke settefisk av laks. Med dette som bakgrunn ble det hentet rognkjeksslamm fra Rognkallen (rognkjeksoppdrettsanlegg på Tustna i Aure kommune på Nordmøre). Slammet ble samlet i en IBC-tank over flere dager. Slammet ble pumpet inn på toppen og videre ut gjennom en åpning på siden. Denne oppsamlingsmetoden innebærer at partikler blir værende i tanken mens vannet renner ut. Etter oppsamling hadde slammet en TS-verdi på 10%. Natriumklorid-innholdet ble ikke bestemt men vannet som brukes i anlegget kommer rett fra sjøvann, med saltkonsentrasjon på ca. 33 promille. På grunn av begrensninger i budsjett og tidsbruk ble det ikke gjort noen analyser på rognkjeksslamm. Tingvoll Fisk har tillatelse til å produsere 150 tonn fisk à 50 gram per år. Beregnet fra denne produksjon er utslippstillatelse på 37,5 tonn suspendert stoff, 9,6 tonn nitrogen og 0,9 tonn fosfor. På dette produksjonsnivå er det estimert en ukentlig slammengde på 4 m<sup>3</sup> med 10% TS.

#### 2.1.2 Husdyrgjødsel, Oksemøkk og Myse

Tingvoll ost har en besetning på 60 melkekyr og 80 okser med en årlig melkeproduksjon på 600.000 liter. I tillegg driver de med osteproduksjon med melk fra egen gård. Myse, som er et biprodukt av ysting, blandes med husdyrgjødsel i møkkarena i fjøset før det pumpes ut til gjødsellageret en gang / uke. Vaskevann fra melkerommet, melkerobot og ysteriet pumpes ut til egen beholder og blandes ikke med husdyrgjødselen (med unntak av vann fra kalvene som går til møkkarena, ca. 0,9 m<sup>3</sup>/uke). Substratgrunnlaget for biogassproduksjon består derfor av 31,4 m<sup>3</sup> blautgjødsel (med 7,3% TS), 11,1 m<sup>3</sup> oksemøkk (med 12,5% TS) og 4,5 m<sup>3</sup> myse (med 3,2% TS) per uke. Både husdyrgjødsel, oksemøkk og myse ble samlet i 25-liters tønner og oppbevart på et fryserom frem til de ble blandet med fiskeslam til forsøket.

#### 2.1.3 Podeslam

Biorest fra anlegget på Tingvoll gård (der forsøkene ble utført) ble brukt som podeslam i reaktorene. Gården har et fullskala biogassanlegg som behandler husdyrgjødsel og talle fra storfe. Besetningen består av 25-30 melkekyr og ungdyr. Anlegget er en CSTR-type med to reaktorer av 30 m<sup>3</sup> hver som kjøres parallelt. Driftstemperatur er 35°C.

#### 2.1.4 Analysemetoder for karakterisering av substratene

Husdyrgjødsel, oksemøkk, myse og fiskeslam fra Nofima ble sendt til Eurofins for kjemiske analyse. Disse inkluderer total-N, Kjeldahl-N, KOF, C/N-forhold og salinitet til fiskeslammet fra Nofima. TS (tørrstoff) og VS (glødetap) ble målt med standardmetoder. Først ble substratene tørket på 105° i et døgn for å bestemme tørrstoffinnholdet og deretter brent på 550° i 90 minutter for å bestemme innhold av organiskstoff.



Tabell 2. Karakterisering av substratene

	%TS	%VS av TS	VS g/kg	KOF <sub>Cr</sub> g/L	KOF/VS	C/N-forhold	N
<b>Fiskeslam (Nofima)</b>	16,5	70,7	116,4	210	1,80	-	1200 mg/l <sub>1</sub>
<b>Fiskeslam (Rognkallen)</b>	10,0	65,2	65,1	-	-	-	2100 mg/l <sub>1</sub>
<b>Husdyrgjødsel</b>	7,2	78,9	57,5	320*	5,57*	18	3600 mg/kg <sub>2</sub>
<b>Oksemøkk</b>	12,5	84,3	105,8	140	1,32	19	4600 mg/kg <sub>2</sub>
<b>Myse</b>	3,2	91,5	32,1	45	1,40	-	670 mg/l <sub>1</sub>

1) Total-N  
 2) Kjeldahl-N  
 3) \*Disse verdiene er uvanlig høy for husdyrgjødsel. I litteraturen ligger det nærmer 150 g/L.

## 2.2 Metoder

### 2.2.1 Biometanpotensial test (Delmål 3)

Det ble undersøkt metanpotensial fra tilsammen 8 forskjellige substrater og blandinger. Biorest fra en kontinuerlig 6 liters lab-skala reaktor (CSTR) driftet mesofilt med kumøkk som substrat ble brukt som inokulum. Fiskeslammet som ble brukt i testen inneholdt for lite kalium (K), kalsium (Ca) og magnesium (Mg) sammenlignet med det som kan forventes i marint fiskeslam. Det ble derfor løst 0,29, 3,73 og 6,36 gram av hhv. KOH, Ca(OH)<sub>2</sub> og MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O i 100 mL vann, som påfølgende ble tilsatt flaskene med fiskeslam. Det ble målt pH, innhold tørrstoff (TS) og VS i inokulum og substrater før oppstart. Oversikt på prøver (substrater og blandinger), pH-verdier, innhold TS og VS, samt mengde tilsatt mineral-løsning i flaskene er vist i tabell 1.

Metanpotensialet ble bestemt i henhold til organisk tørrstoff (VS) i 500 mL glassflasker ved 37 °C (figur 1).



Figur 1. Instrumenter og utstyr til BMP-test

Ca. 2,5 gram VS inokulum og 1,0 gram VS substrat ble tilsatt i hver flaske, og totalt 30 flasker; 3 parallele for hvert substrat, samt positiv (cellulose) og negativ (kun inokulum) kontroll ble brukt i forsøket. Totalt flaskevolum = 530 mL, headspace = 130 mL. Flaskene ble forseget og inkubert i ristebenk ved 37 °C i 32 dager. Volum produsert biogass (mL) ble beregnet fra målt gasstrykk (MB), og gass-sammensetning (V % CH<sub>4</sub> og CO<sub>2</sub>) ble analysert med en micro-gasskromatograf (Agilent Tech). Ved avslutning av BMP-testen ble pH og innhold ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) målt i flaskene (tabell 2, resultater). NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N ble analysert med spektrofotometrisk metode (Ammonium Cell Test, Merck, Spectroquant), og prøvene ble sentrifugert (15000 RPM / 15 min) og fortynnet (10x) før analysering.

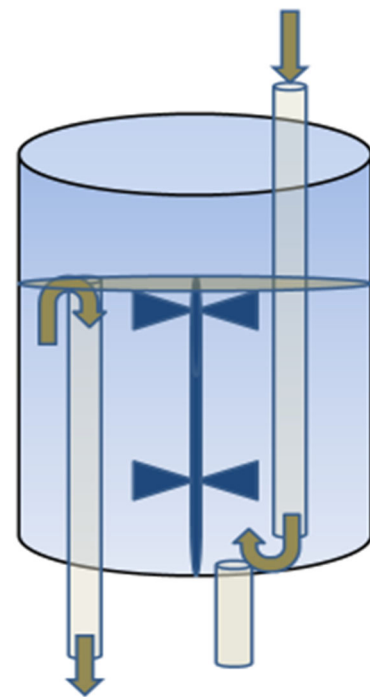
Tabell 3. Karakteristikk av substrater og inokulum, og tilsatt mengde mineral-løsning

Prøve-id.	TS %	VS % (TS)	pH	Mineral-løsning (mL / flaske)
Storfegjødtsel ku	7,2	79,0	7,63	-
Myse	3,9	92,2	6,68	-
Fiskeslam (Nofima)	15,8	68,5	5,94	0,859
Storfegjødtsel okse	12,7	84,2	7,14	-
80% KU. 20% FS.	8,7	75,4	6,98	0,289
70% KU. 10% MY. 20% FS.	6,7	80,5	7,23	0,301
53% KU. 7% MY. 40% FS.	10,2	72,9	6,60	0,507
54% KU. 19% OK. 8% MY. 20% FS.	9,5	77,3	6,93	0,263
Inokulum	3,7	67,2		-

## 2.2.2 Reaktorforsøk (Delmål 4)

Forsøket ble gjennomført i 4 laboratoriereaktorer på 20 l volum, med elektrisk omrøring og elektrisk oppvarming i bunnen. Veggene er isolert med en 4 cm tykk matte av polyuretan. Som vist i figur 2, ble reaktorene matet gjennom et rør som rekker til under slamoverflaten. Bioresten ble tatt ut gjennom overløpet som strekker seg til litt over halvveis til toppen av reaktorene. Volumet til toppen av overløpet er 11 liter og det er arbeidsvolumet som ble brukt til forsøket. Reaktorene er i toppen utstyrt med slanger som fører til gassmålere av type peristaltiskpumpe med et tellerverk. Tellerverkene ble kalibrert hver uke ved bruk av målesyndere fylt med en salt-syre væske. Gassen fortrenger væsken og volumet blir da sammenlignet med tallet på tellerverket. Under forsøkene ble reaktorinnholdet rørt med omdreiningshastighet på 62 rpm. Like før innmating og uttak ble omrøring slått av.

Reaktorene ble først fylt med 11 liter podeslam fra biogassanlegget. På dag én (torsdag den 18. mai) ble alle fire reaktorer tilsatt en blanding av 400 ml husdyrgjødsel/oksemøkk og 100 ml fiskeslam (80%/20%). Følgende tirsdag ble de igjen tilsatt den samme blandingen. Deretter ble mengde substrat redusert til 250 ml (200 mL husdyrgjødsel/50 mL fiskeslam, med samme blandingsforhold som tidligere). For å gi mikroorganismene tid til å tilpasse seg ble mengde substrat gradvis økt, og fra dag 57 til dag 66 av forsøket (14. – 23. juli) ble alle fire reaktorene tilsatt 400 mL husdyrgjødsel og 100 mL fiskeslam. På dag 67 (24. juli) ble substratblandingene endret i reaktorene som følger: Reaktor 1 og 4 ble tilsatt 50/50 blanding av 250 ml husdyrgjødsel/oksemøkk/myse og 250 ml fiskeslam, reaktor 2 ble tilsatt en blanding av 400 ml husdyrgjødsel/oksemøkk og 100 ml fiskeslam, og reaktor 3 ble tilsatt 400 ml husdyrgjødsel/oksemøkk/**myse** og 100 ml fiskeslam. Blandingsforholdet mellom husdyrgjødsel, oksemøkk og myse var basert på virkelig forhold på Tingvollst.



Figur 2. Reaktoroppsett

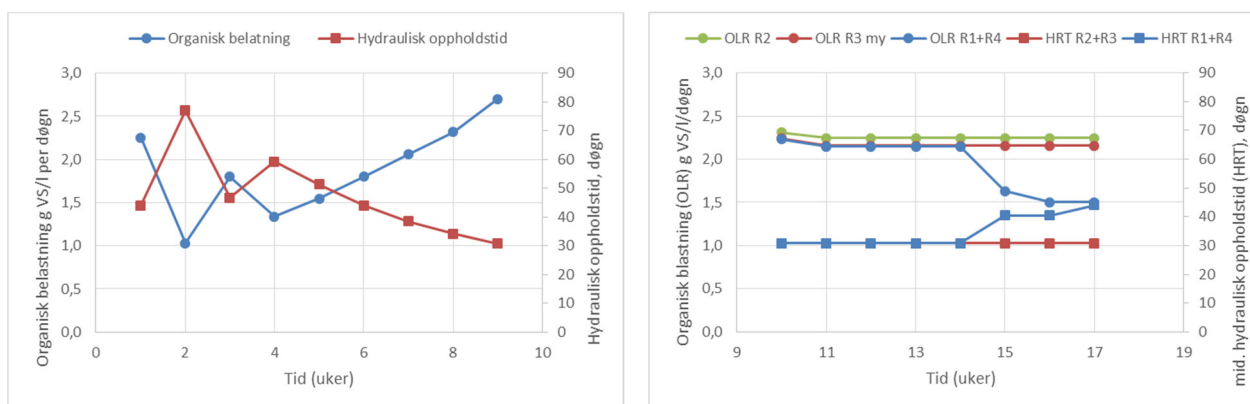
Tabell 4. Oversikt over substratblandinger

Reaktor 1-4 (dag 1-64)	59% KU + 21% OK + 20% FS
Reaktorer 1 & 4 (dag 67-120)	33% KU + 12% OK + 5% <b>MY</b> + 50% FS
Reaktor 2 (dag 67-120)	59% KU + 21% OK + 20% FS
Reaktor 3 (dag 67-120)	53% KU + 19% OK + 8% <b>MY</b> + 20% FS

Oppstartsperioden for dette forsøket var lengre enn det som normalt er nødvendig. Årsaken til dette er at det ble bestemt å endre type fiskeslam ved dag 67. Fra dag 67 av forsøket ble det tilsatt en substratblanding med slam fra rognkjeks.

Hydraulisk oppholdstid (eller HRT – hvor lang tid det tar for substratet å passe gjennom reaktoren) og organisk belastning (eller OLR – mengden organisk materiale tilført per reaktorvolum per dag) var henholdsvis 31 dager og 2,7 g VS/L/d for alle fire reaktorene under oppstartsperioden. Etter overgangen til slam fra rognkjeks ble OLR redusert til 2,2 g VS/L/d i alle fire reaktorene. Fra dag 99

(driftsuke 14) ble mengden substrat tilsatt R1 og R4 redusert til 350 mL av den samme 50/50 blandingen på grunn av forhøyede konsentrasjoner av flyktige fettsyrer (VFA). HRT økte til 45 dager og OLR ble redusert til 1,5 g VS/L/d i R1 og R4. HRT og OLR i R2 og R3 forble uendret.



Figur 3a og b. Driftsbetingelser, organisk belastning, OLR, a: under oppstart (dag 0 – uke 9), b: etter oppstart (uke 9 – uke 17)

Volumetrisk gassproduksjon ble målt med en peristaltisk pumpe og tellerverk. Tellerverket ble kalibrert med en opp-den målesylinder fylt med en syreløsning. Gassen fortrenget løsningen og volumet ble sammenlignet med tallet på tellerverket. Gassammensetning ble bestemt med en GA5000 gassmåler fra Geotech. pH i reaktoren ble målt minst en gang i uke med en pH10 lommemåler fra VWR. VFA ble målt hver uke eller annen hver uke med en Mettler-Toledo DL22 titrator og metoden utviklet av Møller & Ward (Møller and Ward, 2011). Ved slutten av forsøket ble bioresten analysert for ammonium og salinitet. Først var prøvene sentrifugert på 15000 rpm i 20 minutter og fortynnet 5x. Ammonium ble målt med strips fra Merck av typen MQuant Ammoniumtest HC 428235. En ledningsevne-måler fra Hanna Instruments (HI 9039) ble brukt til å måle salinitet.

## 3 Resultater

### 3.1 Oppsamling og separasjon av slam (Delmål 1 og 2)

Tingvoll Fisk AS vil ta ut store deler av sedimentproduksjonen fra også de planlagte semi-lukkede påvekstmerdene for rognkjeks. Foreløpige tester viser en gjennomførbar mulighet for å benytte en stor trakt laget av duk spent opp under merden som slik konsentrerer sedimentet i innsnevringen i bunn. Deretter benytte en pumpe/lift-up til å ta sedimentet til land. Duken kan klatre noe oppover ytternettet, men uten å forringe produksjonsmiljøet eller fiskehelsen ved brudd i vanntilførsel. Tingvoll Fisk AS ønsker ikke å lukke posen helt for så å øke produksjonsrisikoen (øker kompleksiteten) og innsatsfaktorer som elektrisk strøm.

Estimert sedimentproduksjon fra landbasert oppdrett er 220 tonn våtsediment med tørrstoff lavere enn 12%. Derav 9,6 tonn nitrogen og 0,9 tonn fosfor.

Påvekst i sjø: Om vi antar 2 gangeren mengde for de flytende produksjonen (påvekst = større fisk) får vi en estimert mengde våtsediment 440 tonn i året, 38,4 tonn nitrogen og 3,6 tonn fosfor. Vi kan forvente en større sedimentproduksjon i påvekstmerder grunnet større gjennomsnitt på fisken. Total mengde våtsediment fra rognkjeksproduksjonen som lusespiser: 860 tonn.

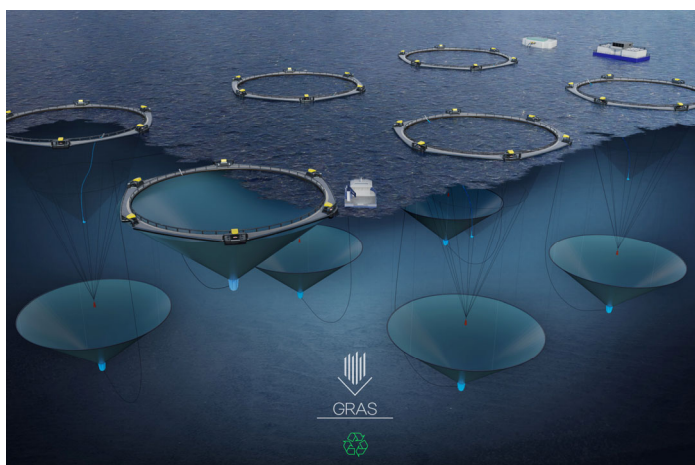
Påvekt av rognkjeks for matfisk: Tingvoll Fisk AS har søkt innregulert områder for også denne aktiviteten i Torjulvågen, men ikke omsøkt konsesjon p.t Om vi videre antar å benytte stålrigg med fire semi-lukkede merder. Stålriggen vil plasseres om lag 50 meter fra land der det er dypt nok og nørt nok land. For å lette transport av våtsediment og ikke legge beslag på sjøareal som benyttes til andre formål. Fire stålmerder vil antageligvis ha samme sedimentproduksjon som en 200 000 stk laksemerd.

De fleste filtreringsmetodene benytter i dag en utspyling eller back wash av oppsamlet TSS (total suspendert stoff). Denne del -sedimentstrømmen fra eksempelvis Radial Flow filter, trommelfilter, Bead filter eller Bernuille kan videre avvannes og fortykkes på forskjellige måter.

Her beskrives noen metoder som kan benyttes ved uttak av marint sediment gjerne pumpet fra under merder og videre fortykning til bruk i biogassproduksjon. Sediment som kan tørkes til over 90 % vil ha bedre (stabil) lagringsevne og lettere kunne innblandes i en biogassproduksjon med flere fraksjoner, som fjøstalle.

#### 3.1.1 Traktformede oppsamlere

Oppsamling av slam fra åpne merd kommer ikke til å skje i første omgang i Torjulvågel siden det er foreløpig kun landbasert oppdrett. Når produksjonen utvides til å inkludere påvekst i sjøen er det mulighet for å samle sediment fra åpne/semi-lukkede merd. Tingvoll Fisk AS ønsker å unngå behov for pumper for å tilføre ferskt vann til merdene og derfor ser på traktoppamlere som aktuelt. Disse flyter under merdene og kan heves eller senkes alt etter forhold. Til sedimentfangst flyter de under merdene med litt mellomrom slik at vann strømmer gjennom merda men nært nok

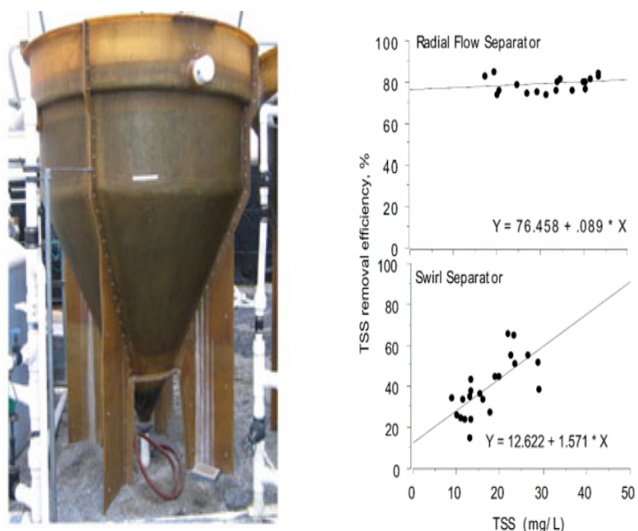


Figur 4. GRAS-konseptet. Tegning fra AS Bolaks og Lift Up AS.

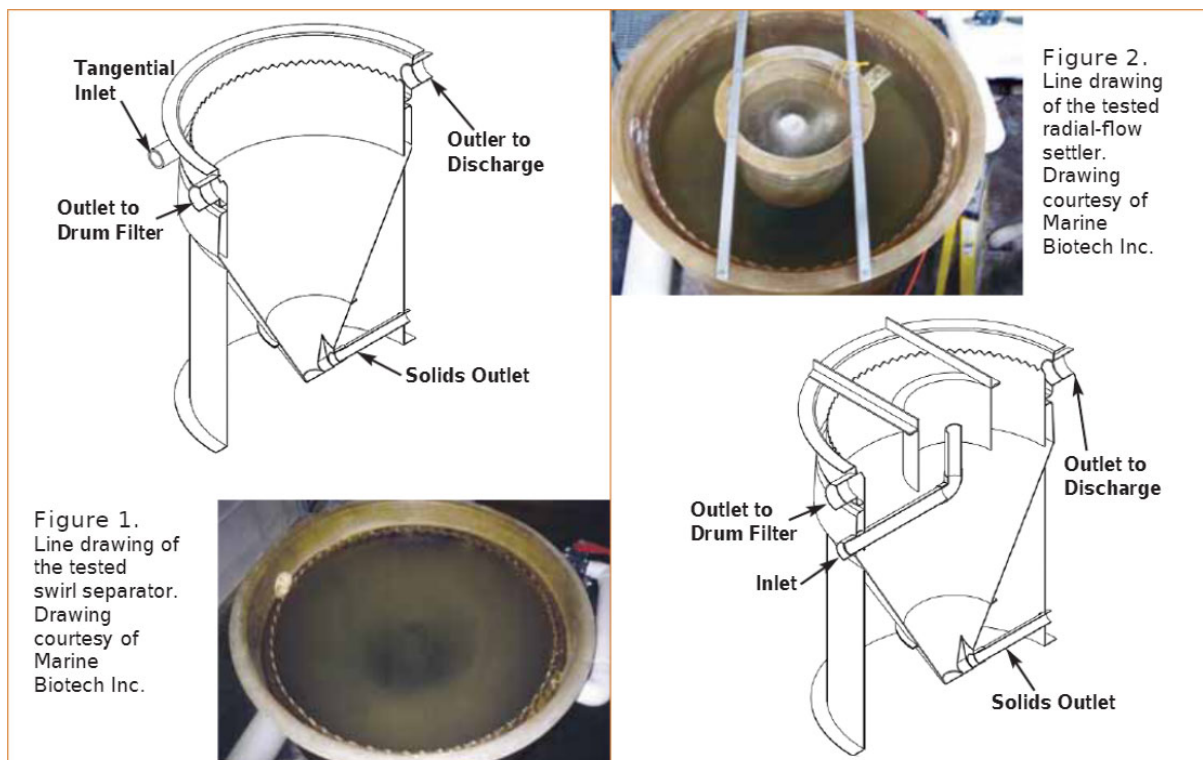
til at sedimentet samles i trakten. Meste parten av sedimentet som faller blir fanget opp i trakten og pumpes opp til land eller til brønnbåt. Dette sedimentet pumpes videre til separasjon og avvanning (se under). AS Bolaks og Lift Up AS har utviklet en teknologi de holder på med å teste. Andre aktører bla. Storvik har testet lignende løsninger.

### 3.1.2 Radial Flow Settler (RFS)

Stephen T. Summerfelts Radial Flow Settler tar ut 73-83 % av TSS. Trenger ikke tilført elektrisk strøm, bare vann i bevegelse. Vår vurdering er her at en RFS per produksjonsenhet (merd eller stor-kar) er fornuftig med tanke på effekt og behov for tilført energi. Uttaket av TSS er høyere og mer konsistent ved å benytte RFS enn ved å benytte Swirl separator eller microscreen drumfilter. Forsøket ble foretatt i et resirkuleringssystem der totalt uttak av TSS ble målt fra de forskjellige applikasjonene (Davidson and Summerfelt, 2005).



Figur 5. Bilde av RFS og TSS fjerningseffekt.



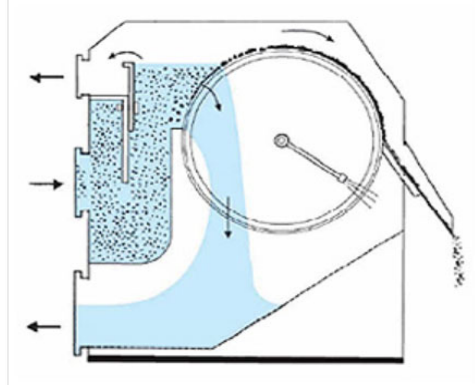
Figur 6. Sammenligning av "Tangential flow settler og RFS. Bilde fra Davidsen og Summerfelt, 2005.

### 3.1.3 Trommelfilter

I Norges akvakultur er spesielt UNIK filteret godt kjent og var på mange måter starten på en revolusjon innen mekanisk rensing av vann. Avløp, RAS og inntaksfiltrering er vanlige bruksområder for trommelfilteret. Trommelfilter leveres av alle de store tilbyderne og er i dag det klart med brukte filteret til diverse akvakulturoperasjoner. Figurene under er hentet fra Pentair Aquativ Eco Systems, USA.

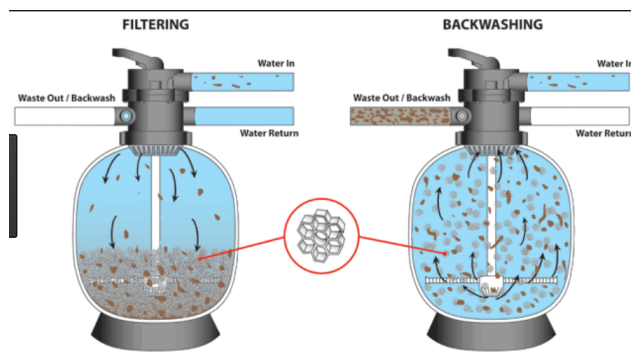
#### Automatic operation

Influent enters through a U-style head box where high flow velocities are minimized. The influent, with suspended solids, flows under a baffle and then upward and is evenly distributed across the length of the screen cylinder. The screen is constructed of stainless steel wedge wire which can effectively handle grease, discrete solids without blinding. The nature action of waste water cascading through the screen creates a powerful backwash which results in a continuously clean screen surface. Solids captured on the face of the screen are removed by a tensioned doctor blade or rotary rigid-rubber wiper. An internal water spray bar system to clean the screen. The spray bar is located within inches of the inside cylinder surface to insure maximum cleaning efficiency.



Figur 7. Eksempler på trommelfilter. Figurene fra Pentair Aquativ Eco Systems, USA.

### 3.1.4 Bead Filter



Figur 8. Eksempel på bead filter i praksis. Figur hentet fra Koi Depot of San Diego.

Bead filter bygger på tradisjonen med sandfilter der sedimentene blir filtrert gjennom en masse av sand. Ingen operasjoner var i begynnelsen automatisert dvs også sanden inne i filteret måtte tømmes og vaskes etter bruk. Dagens filter er gjerne trykkbasert og har alle funksjoner automatisert: Filter, By-pass, vinterkonfigurasjon, tilbakespyling mm. Dermed vil sedimentanriket delstrøm kunne tilføres geobags. Nye bead filter fungerer også som biofilter til mindre biomasser.



Figur 9. Bernuille filter.  
Figur fra Teknor

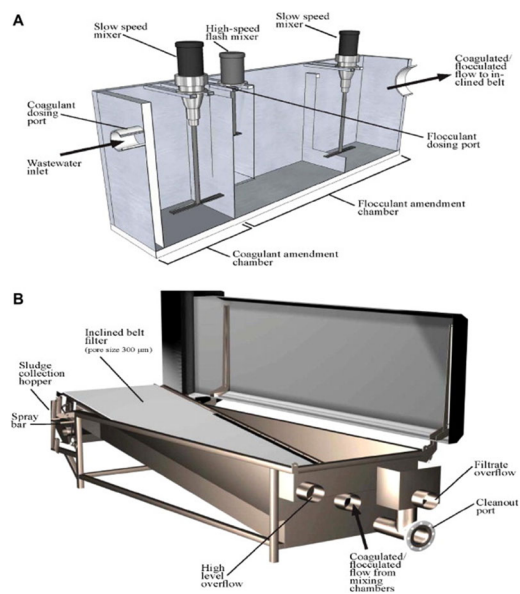
Avhengig av hvilket medie som benyttes i filteret er graden av rensing relativt høy ved gjennomstrømming (single pass), 95% av partikler over 50 micron og omtrent 30% av partikler 5-10 micron.

### 3.1.5 Bernuille Filter

Bernuille filter er en av applikasjonene en kan benytte i en avløpskonfigurasjon. Statistiske trykfilter a la Bernuille kan monteres på vannstrømmen inn eller ut av anlegget i en gjennomstrøm eller RAS annlegg. Det er naturlig at filterkorgen da har forskjellig lysåpning til forskjellig bruk. Bernuille levert av tilbydere i Skandinavia kommer med pneumatiske ventiler og automatisk tilbakespyling som direkte kan føres til geobag.

### 3.1.6 Beltefilter med bruk av koagulant

Det kan argumenteres for at bruk av koagulant er en utvikling av tidligere bruk av sedimenteringsbasseng der «retention time» og SS størrelse avgjør muligheten for sedimentering. Gjennom trykk/vakuumbaserte komponenter fremtvinges denne mekanismen raskere og med økt effekt. (Sharrer *et al.*, 2010)

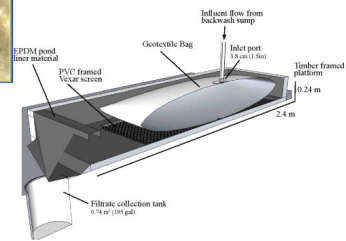


Figur 10. Beltefilter. Figuren fra Water Management Technologies, Baton Rouge, Louisiana, USA og funnet i Sharrer *et al.* 2010



### 3.1.7 Geotextile Tube: Avvanning og stabilisering av sedimenter fra delstrøm/backwash

Geotextile tube er vevde produkter av Mirafi, avvanningssekken har høy slitesterke. Denne spesialisert sekken har mange fordeler: kan ta stort volum med sedimentstrøm, meget kostnadseffektivt, kan tørke sediment til lagertørt, biologisk nedbrytbar tube, lave vedlikehold og operasjonskostnader, liten investering i både utstyr og anlegg. Geotextile tube kan også ta både store vannstrømmer og filtrere lave konsentrasjoner med TSS. Helt ned til 30 mg/l. Ved en slik konfigurasjon, uten forfiltrering er det behov for å tilføre polymer som koagulant for av Geutextile tube skal operere etter beskrivelsen (Ebeling and Rishel, 2006).



Figur 11. Geotextile tube. Figurene fra Ebling og Rishel, 2006.

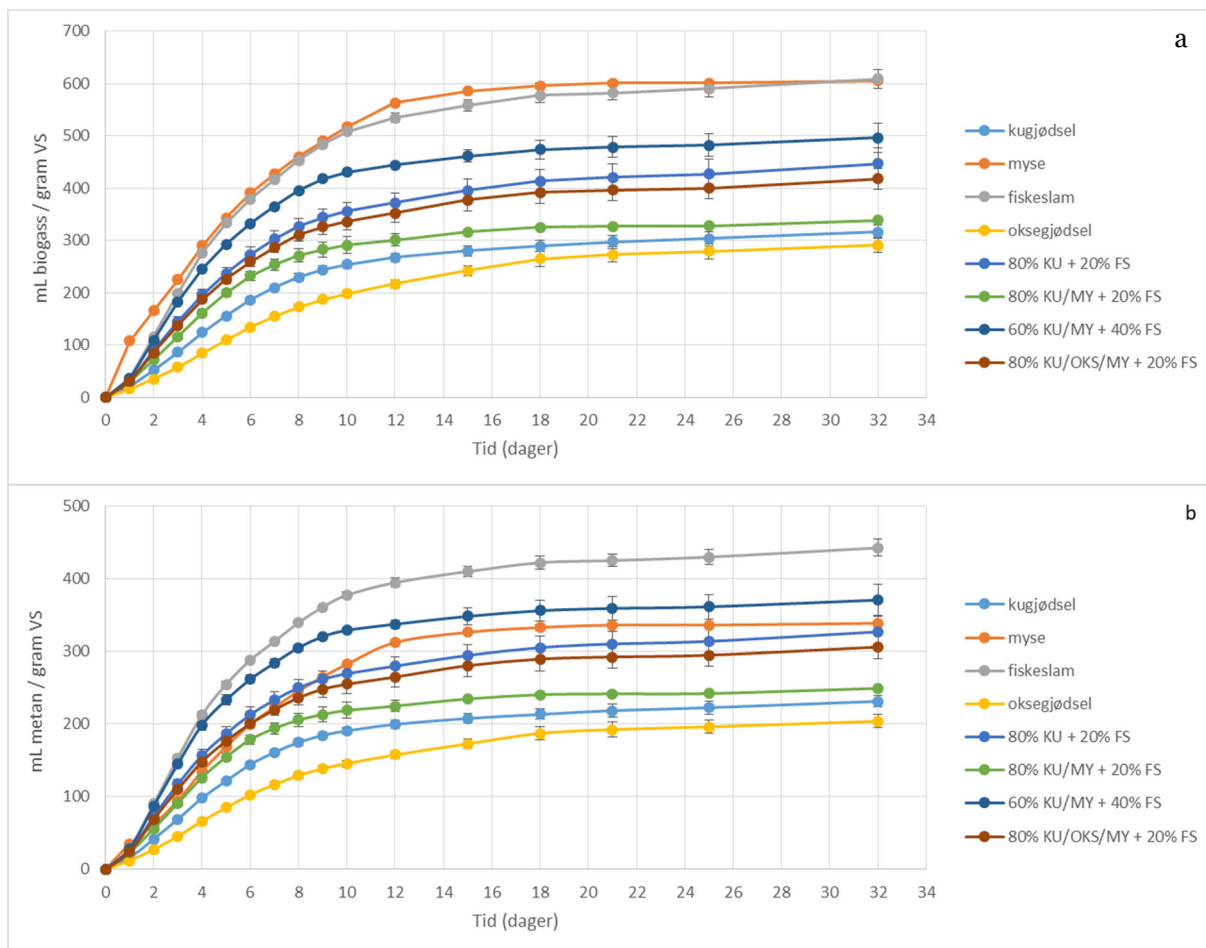
## 3.2 Biometanpotensial test (Delmål 3)

Formålet med BMP-testen var å bestemme maksimalt metanutbytte fra ulike blandinger av marint fiskeslam med storfe gjødsel og myse, med påfølgende drift av kontinuerlige reaktorer driftet med de blandingene som gav høyest gassutbytte. Biogass- og metanpotensial fra substratene er vist som mL / gram VS tilsatt akkumulert / dag i figur 4 a og b, og akkumulert totalt i figur 5 a og b. Gassproduksjon fra negative kontroller er trukket fra alle verdier målt på test-substratene, og positiv kontroll (cellulose) gav metanproduksjon som forventet (ca. 350 mL CH<sub>4</sub> / gram VS tilsatt). Gjennomsnittsverdier og gjennomsnittsavvik målt fra tre parallelle / prøve er vist. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N (mg / L) og pH verdier i flaskene ved avslutning er vist i tabell 4.

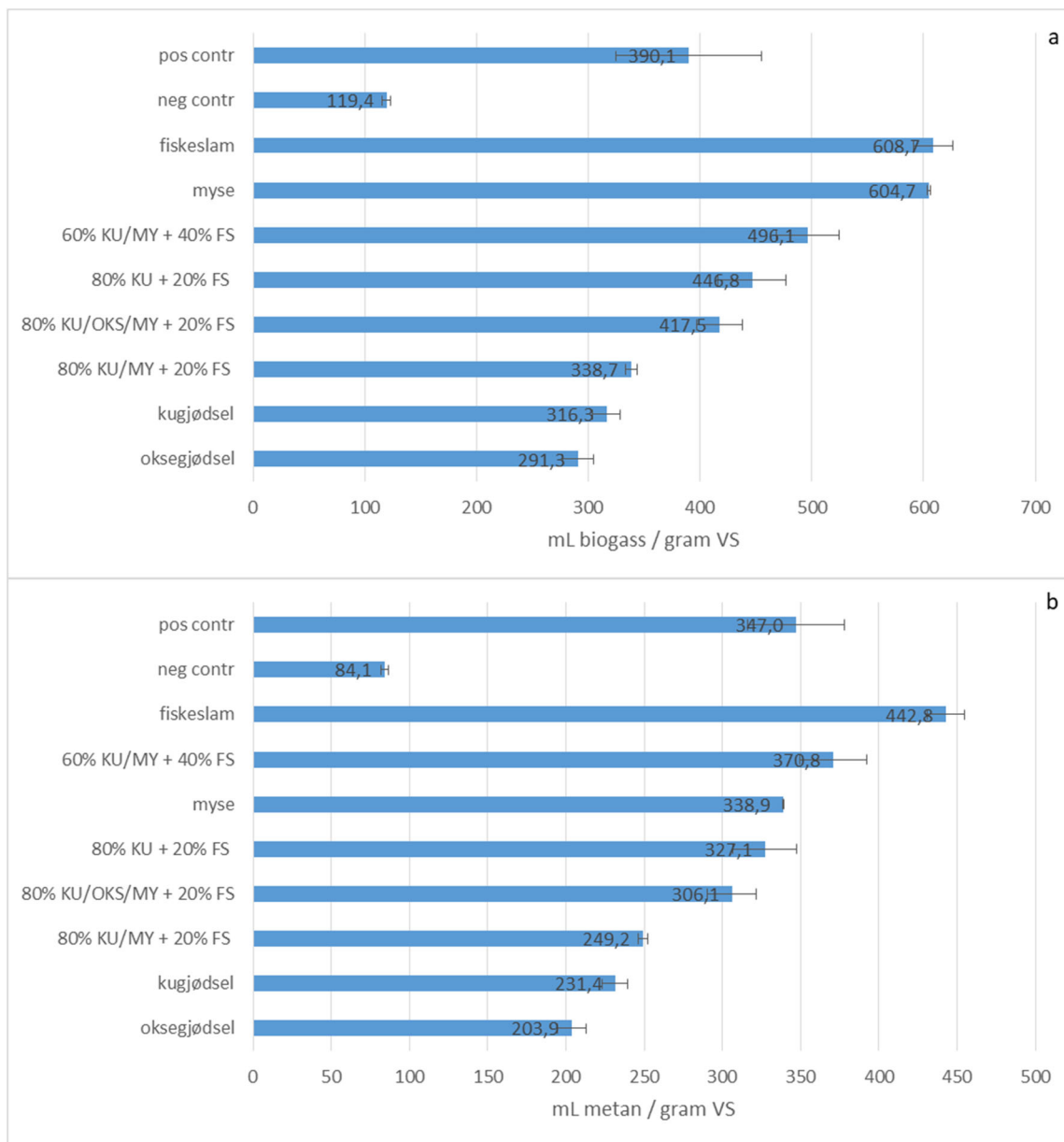
I BMP testen ble høyest biogass- og metanpotensial målt for konsentrert marint fiskeslam, med verdier på hhv. 609 og 443 mL / g VS tilsatt (figur 4 og 5). Konsentrert myse gav biogassutbytte i samme område som fiskeslam målt til 605 mL biogass / g VS tilsatt. En del lavere metanutbytte ble målt i myse enn i fiskeslam, omtrent 340 mL / g VS tilsatt. Dette er som forventet med tanke på høyt innhold sukker i myse, som gir forhold av metan og karbondioksid på omtrent 50 / 50. Gassutbyttene fra fiskeslam og myse er relativt høye, sammenligna med for eksempel storfe gjødsel. For kugjødsel ble det målt biogass- og metanutbytte på hhv 316 og 231 mL / g VS tilsatt, og for oksegjødsel noe lavere, med verdier på hhv 291 og 204 mL / g VS. Fra blandingene ble høyest BMP målt for 60 % storfe gjødsel og myse + 40 % fiskeslam, med biogass- og metanutbytte på hhv 496 og 371 mL / g VS tilsatt. Det er tidligere rapportert BMP for storfe gjødsel på mellom 100 og 300 mL CH<sub>4</sub> / gVS (Schnurer and Jarvis, 2010). BMP fra myse er rapportert å være på ca 260 mL CH<sub>4</sub> / gVS (Vivekanand *et al.*, 2018). Dette resultatet er i overensstemmelse med BMP målt i denne testen.

Ved forsøksslutt ble det målt innhold ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) og pH-nivåer i flaskene brukt i BMP-testen. Høyest ammonium-konsentrasjon ble målt i flaskene med konsentrert fiskeslam, med gjennomsnittsverdi på 513 mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N / L (tabell 4). Lavest konsentrasjon ble målt i kontroll-flaskene og verdiene i disse var på mellom ca. 300 og 350 mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N / L.

Innholdet av ammonium målt i flaskene med fiskeslam overskrider ikke nivåer for grenseverdier rapportert i senere tid. Ammonium-innhold ble undersøkt i BMP-testen for å bestemme maksimal akkumulering av denne potensielt inhiberende komponenten under batch – forhold, og det kan antas at BMP-prosessen ikke var inhibert av ammonium.



Figur 12a og b: a Biogasspotensial og b: metanpotensial akkumulert mL gass/gram VS/dag



**Figur 13a og b: a: Biogasspotensial og b: metanpotensial akkumulert mL gass/gram VS totalt**

Tabell 5. pH-verdier og innhold ammonium i flaskene etter avsluttet BMP-test

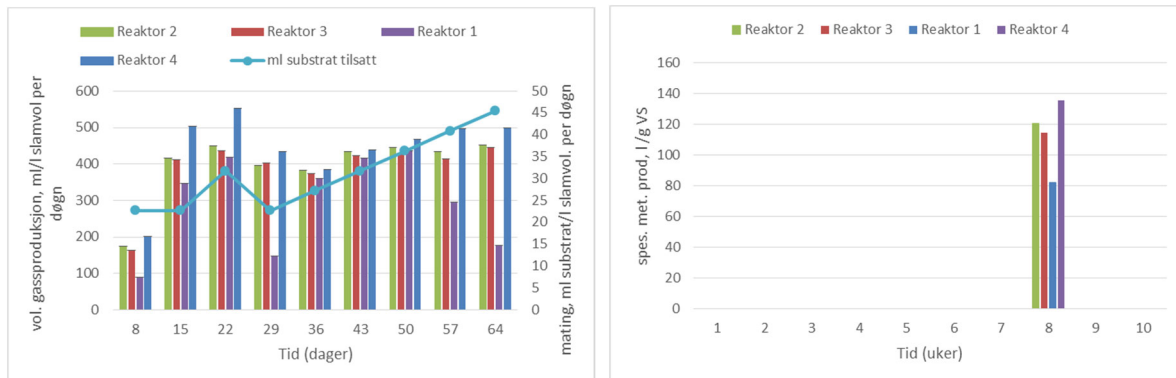
Flaske-nr.	Prøve-id.	NH4+-N (mg / L)	pH
1	Negativ kontroll 1	358	7,36
2	Negativ kontroll 2	349	7,46
3	Negativ kontroll 3	358	7,34
4	Positiv kontroll 1	293	7,17
5	Positiv kontroll 2	298	7,2
6	Positiv kontroll 3	318	7,2
7	Kugjødssel 1	361	7,33
8	Kugjødssel 2	438	7,35
9	Kugjødssel 3	442	7,38
10	Myse 1	400	7,31
11	Myse 2	416	7,32
12	Myse 3	390	7,33
13	Fiskeslam 1	510	7,38
14	Fiskeslam 2	523	7,35
15	Fiskeslam 3	507	7,29
16	Oksejødssel 1	395	7,31
17	Oksejødssel 2	384	7,27
18	Oksejødssel 3	411	7,32
19	80% KU + 20%FS 1	445	7,34
20	80% KU + 20% FS 2	486	7,36
21	80 % KU + 20% FS 3	499	7,35
22	80% KU/MY + 20% FS 1	413	7,36
23	80% KU/MY + 20% FS 2	426	7,42
24	89% KU/MY + 20%FS 3	433	7,32
25	60% KU/MY + 40% FS 1	489	7,35
26	60% KU/MY + 40% FS 2	513	7,38
27	60% KU/MY + 40% FS 3	498	7,4
28	80% KU/OKS/MY + 20% FS 1	438	7,38
29	80% KU/OKS/MY + 20% FS 2	452	7,33
30	80% KU/OKS/MY + 20% FS 3	458	7,37

### 3.3 Kontinuerlige reaktorer (Delmål 4)

Resultatene viste at konsentrert fiskeslam gav høyt metanutbytte i BMP-test, og dette resultatet er ikke direkte overførbart til samme type substrat i kontinuerlig prosess. I BMP-testen er forholdene optimalisert for det metanogene mikrobielle samfunnet ved at substratkonsentrasjonen er fortennet til et nivå som gjør risikoen for opphopning av inhiberende komponenter lav, og ved at kulturen ikke vaskes ut. I en kontinuerlig prosess må den organiske belastningen være betraktelig høyere, og sannsynlighet for inhibering fra hovedsakelig ammoniakk, fettsyrer og salt vil være stor ved tilsetning av konsentrert marint fiskeslam.

### 3.3.1 Volumetrisk gassproduksjon og spesifikk metanproduksjon

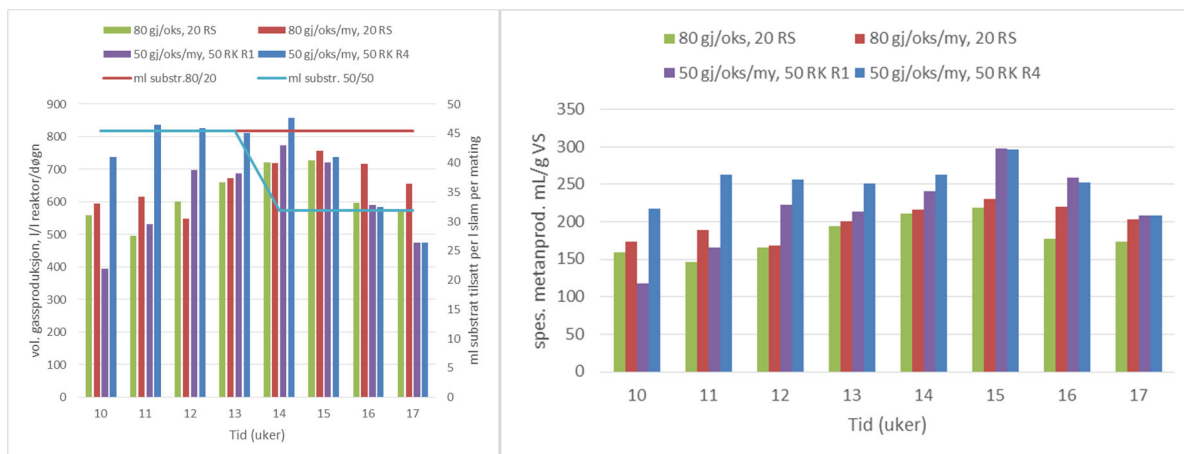
**Oppstart, dag 1-64:** Gassproduksjon under oppstarten var relativt jevnt bortsett fra i R1 som gjennomgående viste lavere produksjon. Sannsynligvis var det noe feil med måleinstrumentene, og ikke en reell forskjell i prosess. Mot slutten av forsøket begynte gassproduksjon å ligne R4. Gjennomsnittlig volumetrisk gassproduksjon i R2, R3 og R4 i den siste uke før differensielle drift var 0,47 liter biogass/liter slamvolum (fig. 14a, tabell 6). Spesifikk metanproduksjon var i gjennomsnitt 0,12 liter metan/g VS (figur 14b, tabell 6).



Figur 14a og b. Oppstart med tilsetning av 80 % kugjødse/oksegjødse og 20 % FS i alle reaktorer. a: vol. gassproduksjon (mL biogass/l substrat/døgn) og b: spesifikk metanproduksjon (mL metan /gram VS) for dagene 8-64

**Differensiell drift, dag 67-120:** Både volumetrisk gassproduksjon og spesifikk metanproduksjon øket etter overgangen til de nye substratblandingene, spesielt for R4 som fikk 50% fiskeslam (tilsvarende i R1, men som nevnte ovenfor er det usikkert om målingene fra denne reaktoren er riktige). I alle reaktorene økt gass- og metanproduksjon gradvis frem til uke 13. Etter uke 13 ble det observert en nedgang i gassproduksjon. For R1 og R4 kan det delvis forklares med at belastningen ble redusert fra uke 15. For R2 og R3, som ble tilsatt samme mengde substrat gjennom hele forsøket, er det usikkert hvorfor gassproduksjonen endret seg ved uke 13. Dette blir diskutert nærmere i diskusjonen.

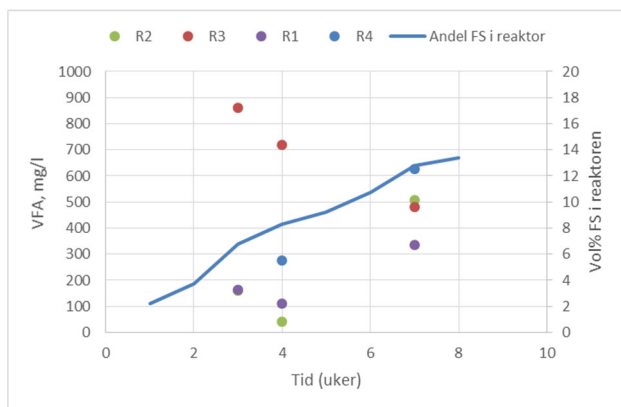
Gjennomsnittlig volumetrisk gassproduksjon i siste HRT var for R1 og R4 0,65 l/l slam/døgn, 0,66 for R2 og 0,70 for R3. Spesifikk metanproduksjon var 0,22 l/g VS for R1&4, 0,18 for R2 og 0,20 for R3 (figur 15a og b). Tilsvarende spesifikk metanproduksjon per tonn substrat er 11,0 Nm<sup>3</sup> for R1 og R4 (gjennomsnitt), 11,2 Nm<sup>3</sup> for R2 og 11,9 Nm<sup>3</sup> for R3.



Figur 15a og b. Driftsresultater, gassproduksjon for reaktorene tilsatt blanding av gjødsel (ku og okse), myse og rognkjeksslam. a: Gjennomsnittlig biogassproduksjon, mL gass / liter reaktorvolum / døgn og b: gjennomsnittlig spesifikk metanproduksjon, mL metan / gram VS / døgn i ukene 10-17.

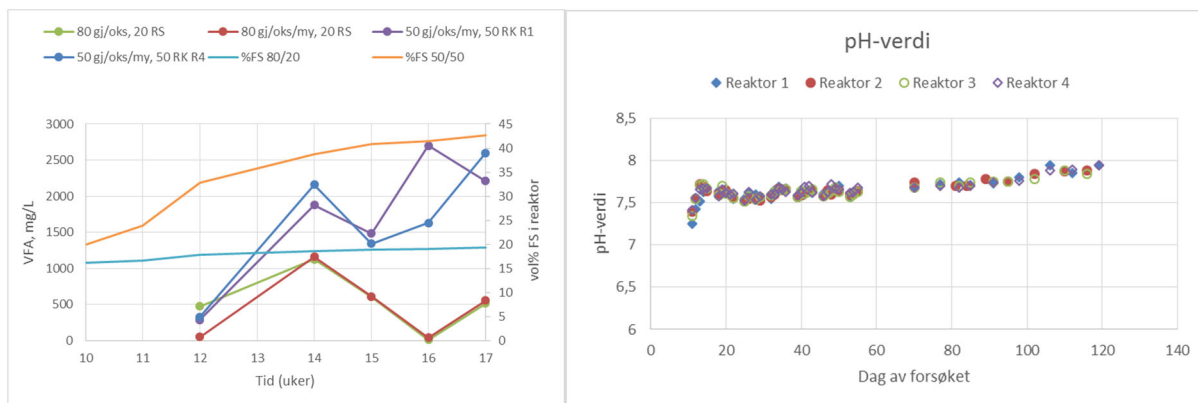
### 3.3.2 VFA og pH

**Oppstart:** VFA økte litt på starten i takt med en økende andel fiskeslam i reaktorene men holdt seg under grensen for prosessinhibering. Verdier for R3 var høye de to første målingene men så kom de ned til samme nivå som de andre reaktorene. Gjennomsnitt verdien i oppstarten var 488 mg/l. pH under oppstarten lå på 7,65.



Figur 16. VFA i bioresten, og volum % gjødsel + fiskeslam tilsatt reaktorene under oppstartsfasen, dag 0 – uke 9.

**Differensielle drift:** Etter overgangen til ulike blanding ser vi tilsvarende endringer VFA-verdier. R2 & R3 forble lave med henholdsvis 566 mg/l og 593 mg/l. Begge kom opp i ca. 1000 mg/l ei uke men gikk ned igjen de neste to ukene. VFA-verdiene for R1 og R4, derimot, gikk kraftig oppover og er grunnen til at vi reduserte belastningen i uke 13. pH verdiene holdt seg stabilt i alle fire reaktorene men vi ser en trend mot høyere verdier mot slutten av forsøket.



Figur 17a og b. Driftsresultater for reaktorene tilsatt blanding av gjødsel, myse og fiskeslam. a: VFA i bioresten, og volum % gjødsel + fiskeslam tilsatt. b: pH verdier i bioresten.

### 3.3.3 Ammonium og Salinitet

Ammonium og ledningsevne ble målt i bioresten på avslutning av reaktorforsøket. I R2 og R3 ble det målt 600 mg/L Tot-NH<sub>4</sub> og i R1 og R4 ble det målt 1200 mg/L (tabell 6). Dette er lavere enn forventet og lavere enn målte verdier i tidligere forsøk med lignende substrat.

Salinitet i bioresten ble bestemt med å måle ledningsevne (μS/cm) og regnet om til konsentrasjon (mg/L). I R2 og R3 ble det målt henholdsvis 13654 og 13073 mg saltioner/L substrat. I R1 og R4 var det i gjennomsnitt 16732 mg/L. Til sammenligning inneholder sjøvann ca. 33-35000 mg/L og brakkevann mellom 1000-10000.

Tabell 6. Driftsbetingelser og oppsummering av resultater fra reaktor-forsøk.

Uke 8		Differensielle drift Siste oppholdstid (uker 14-17)		
	R1-R4: 59% KU + 21% OK + 20% FS fra Nofima	R2: 59% KU + 21% OK + 20% FS fra Rognkjeks	R3: 53% KU + 19% OK + 8% MY + 20% FS fra Rognkjeks	R1 & R4 (gjennomsnitt): 33% KU + 12% OK + 5% MY + 50% FS fra Rognkjeks
<b>Sammensetning</b>				
%TS	10,2	8,9	8,5	9,1
%VS av TS	78,4	77,3	78,1	73,3
g VS/1000 mL	79,3	69,0	66,1	65,7
<b>Driftsforhold</b>				
Organisk belastning, g VS/l per døgn	2,70	2,24	2,16	2,15 (1,50) <sup>1</sup>
(ukesgjennomsnitt)	30,8	30,8	30,8	30,8 (44,0) <sup>1</sup>
Hydraulisk oppholdstid, døgn				
<b>Gass-, metan- og energiproduksjon<sup>2</sup></b>				
Gass, l/døgn, ved STP	5,3 ±1,0 <sup>3</sup>	7,5 ±1,4	8,2 ±1,4	7,5 ±1,9
mL/l slamvolum/døgn	465,6 ±29,5 <sup>3</sup>	655,5 ±69,0	703,7 ±40,1	651,5 ±134,7
mL/g VS	193,0 ±22,2	268,4 ±37,2	300,4 ±16,6	339,1 ±57,5
Vol% metan i gassen	64,0 ±0,6 <sup>3</sup>	66,8 ±0,9	65,7 ±1,0	66,2 ±0,7
Metan, mL/g VS, ved STP	123,6 ±11,2 <sup>3</sup>	179,5 ±20,0	197,5 ±10,7	224,8 ±29,3
l/l eller Nm <sup>3</sup> /tonn substrat	7,47 <sup>3</sup>	11,2	11,9	11,0
Energiproduksjon, kWh/tonn substrat	73,6 <sup>3</sup>	109,9	117,1	108,7
<b>Nedbrytning av organisk stoff</b>				
% reduksjon i TS	-	44	41	52
% VS nedbrutt	-	48	45	58
<b>Forhold i reaktorene</b>				
pH	7,65 ±0,02	7,82 ±0,06	7,79 ±0,06	7,83 ±0,10
VFA, mg/l	488 ±120	566 ±456	593 ±459	2001 ±503
Tot-ammonium, mg/l <sup>4</sup>	-	600	600	1200
Ledningsevne (mg/l) <sup>4</sup>	-	13654	13073	16732 ±1279

<sup>1</sup> Fra dag 102 ble innmating redusert til 350 ml i reaktorene 1 & 4

<sup>2</sup> Gjelder siste HRT

<sup>3</sup> Gjennomsnitt for reaktorene 2-4 i driftsuke 9

<sup>4</sup> Prøver tatt fra bioresten på slutten av forsøket



## 4 Diskusjon

### Oppsamling og avvanning av marint fiskeslam

Tentativt teknologivalg for sedimentfangst fra både landbasert og flytende installasjon kan det benyttes Bead filter/Sand filter, Bernuille, Radial Flow Settler (RFS) eller i kombinasjon. Deretter vil backwash eller utspylinga bli sendt til geobag/avvanningssekk. Grad av sedimentfangst må veis opp mot investering og driftskostnader. Det virker fornuftig å satse på et teknologivalg med få løse komponenter (lavt vedlikeholdsbehov) og ingen eller lite tilført elektrisk energi for operasjon. Lavt energiforbruk og relativ høy effekt på sedimentfangst gir RFS og geobags en fordel. Slammet fanget opp i RFS kan pumpes direkte til biogassanlegget mens sedimentet samlet opp i geobag kan tilsettes om for eksempel vinteren for å øke gassproduksjon når det er størst energibehov.

Salt er en utfordring både i reaktoren og i bioresten. Slammet som ble brukt til forsøket ikke ble avvannet på en måte som fjerner salt men det er antatt at separasjon og avvanning med en RFS og geobag eller lignende reduserer saltinnholdet fordi det er oppløst i vannet. Å undersøke sjebnen til salt under ulike behandlings- og separasjonsmetoder er et forskningsprosjekt i seg selv som krever utprøving og veldig relevant i en Norsk sammenheng.

### BMP og reaktorforsøk

Det er vanskeleg å sammenligne resultatene fra BMP-testen og reaktorforsøket på tre grunner. For det første får man som regel høyere gass- og metanutbytte ved en BMP-test enn i virkeligheten. For det andre unngår man driftsforsyrrelser som en resultat av akkumulering av skadelige stoffer, for eksempel VFA, LCFA, ammoniakk eller sulfat (svovl). Til slutt, ble det brukt to ulike typer fiskeslam til BMP og reaktorforsøk, med unntak av oppstartsfasen til reaktorforsøk der det ble brukt det samme slammet. Resultatene fra BMP-testen var som forventet av erfaring og litteraturen.

Når det gjelder reaktorforsøk, det ble etter en periode med kontinuerlig drift observert en nedgang i biogassutbyttet i reaktorene tilsatt fiskeslam, og det er rapportert lignende prosessutvikling fra andre studier hvor anaerob nedbrytning av fiskeslam er undersøkt. Fiskeslam inneholder mye nitrogen og fettsyrer som brytes ned til hhv. ammonium (hvor ammoniakk er den formen som i størst grad inhiberer mikrobielle samfunn) og flyktige kortkjeda og langkjeda fettsyrer (VFA og LCFA). Fiskeslammet brukt i dette forsøket er marint og inneholder høyere saltkonsentrasjoner enn slam fra settefisk (ferskvann). Høye saltkonsentrasjoner er i tillegg til VFA og ammoniakk forbundet med inhibering av biogassprosess (Gebauer, 2004), og det kan antas at dette også er tilfelle for reaktorene benyttet i denne studien. En av saltene i sjøvann er magnesium sulfat ( $MgSO_4$ ). Under anaerobt forhold bindes sulfat med hydrogen til å bli  $H_2S$ , eller svovlgass. Denne gassen er skadelig for metanogener og i høye konsentrasjoner dødelig.  $H_2S$  ble ikke målt under reaktorforsøket og det er derfor ikke mulig å fastslå om det påvirket prosessen.

Akkumulering av fettsyrer (VFA), spesielt propionsyre er forbundet med inhibering av biogassreaktorer. Propionsyre er en typisk indikator på en inhibert og ustabil biogassprosess (Wijekoon, Visvanathan and Abeynayaka, 2011), og ved høye saltkonsentrasjoner er det rapportert ustabil biogassprosess forbundet med akkumulerte konsentrasjoner av VFA og propionsyre (Gebauer, 2004). Fettsyrenivåene i R1 – R4 var under oppstarten lavere enn 1000 mg / liter, og økte noe i løpet av forsøksperioden. Ved avslutningen var total konsentrasjon av VFA i R1 og R4 (reaktorene med høyest belastning) rett i underkant av 3000 mg / liter. Det er rapportert varierende og relativt høye konsentrasjoner av eddiksyre i stabile biogassreaktorer, og eddiksyre vanligvis ikke forbundet med ustabil biogassprosess. Propionsyreinhibering er rapportert for konsentrasjoner fra ca. 1000 til 8000 mg / liter (Ma *et al.*, 2009).

Det ble målt ammonium konsentrasjoner i de kontinuerlige reaktorene ved avslutning (dag 120). I R1 og R4 var ammonium konsentrasjonen på ca. 1200 mg / L, og i R2 og R3 ca. 600 mg / L. Beregnet

konsentrasjon av ammoniakk ut i fra total ammonium, pH verdier (gjennomsnitt siste HRT) og temperatur er på ca. 0,09 g / L i R1 og R4, og ca. 0,05 g / L i R2 og R3. Inhibering er rapportert for prosesser driftet med ulike ammoniakk konsentrasjoner, og inhibering av biogassprosesser forårsakes ofte av ulike faktorer, for eksempel en kombinasjon av forhøya fettsyre- og ammoniakk-nivåer. Relativt lave nivåer på mellom 0,15 og 2.5 gram ammoniakk / liter er rapportert å inhibere biogassprosess (Van Velsen, 1979; Braun, Huber and Meyrath, 1981; Hashimoto, 1986), men som regel tåler biogassprosesser høyere ammoniakk-konsentrasjoner enn dette. Ammoniakk-konsentrasjoner på ca. 4 gram / liter er observert i biogassreaktorer uten markant inhibering (Angelidaki and Ahring, 1993).

Andelen ammoniakk av total ammonium øker med forhøya pH. I avslutningsperioden ble det observert en økning i pH, og selv om ammonium-nivåene ikke overskrider det som kan antas at en biogassprosess tåler kan det tyde på at økt pH og ammoniakk andel har vært med på å inhibere mikrobiell aktivitet. Lignende trender er også rapportert fra andre forsøk hvor fett- og nitrogenrike substrater er tilsatt kontinuerlige biogassreaktorer (Solli, 2017).

Tabell 7. Protein og fettinnhold til fôret brukt på de to anleggene

Produsent	Fôr	Fiskeart (anlegg)	% Protein	% Fett
EWOS	Micro 40	Laks (Nofima)	47	22
Otohime	B2	Rognkjeks (Rognkallen)	51	11
Skretting	Clean Start 300, 500	Rognkjeks (Rognkallen)	62	14
Skretting	Clean Assist 0,8	Rognkjeks (Rognkallen)	57	15

Det er ikke målt spesifikk saltkonsentrasjon eller bestemt andel av ulike VFA i bioresten fra reaktorene i dette forsøket, og det kan ikke fastslås i detalj hvilke faktorer som har hatt størst innvirkning på resultatene. Ut i fra sammensetning av substratene og analyseresultater kan det antas at innhold av magnesium sulfat ( $MgS_4$ ) i marint slam i kombinasjon med akkumulering av ammonium og fettsyrer har hatt en inhiberende effekt på biogassproduksjon, særlig i substratblandingene med 50% fiskeslam.  $MgS_4$  stimulerer vekst av sulfat-reduserende bakterier (SRB). Disse bakteriene utkonkurrerer metanogener for hydrogen og produserer gjennom sin metabolisme hydrogen sulfid ( $H_2S$ ) som er veldig giftig for metanogener. Det blir både mindre hydrogen til metangass ( $CH_4$ ) og et giftig miljø. Selv om biogassutbyttene minket ble det ikke observert noen prosesskollaps.

Fôret som brukes til rognkjeks inneholder et høyere nitrogen:fett forhold enn fôr til laks (se tabell 7). Fett har 1,5 ganger høyere metanpotentiale enn protein og er derfor veldig gunstig for metanproduksjon. Myse inneholder relativt mye karbohydrat, som har relativt lite metanpotentiale (litt under halvparten det av fett), men bidrar med å øke C:N-forholdet i reaktoren og dermed motvirke hemming pga ammonium. Sånn sett er myse et gunstig tilleggssubstrat og resultater fra R3 i reaktorforsøket tyder på at myse reduserte inhibering.

Flere studier viser at valg av innokulum har en ståt påvirkning på gassproduksjon og prosessstabilitet (De Vrieze *et al.*, 2015). Det finnes mikroorganismer tilpasset ulike miljøer og forhold, som høy salt- eller ammoniumkonsentrasjoner. I reaktorforsøket ble det brukt en innokulum som er tilpasset husdyrgjødsel og derfor høyt ammoniumkonsentrasjoner, men ikke salt. Det er mulig at en innokulum

dyrket fram av marint sediment hadde tålte saltkonsentrasjonen bedre og førte til økt metanutbytte (Fistarol *et al.*, 2016).

I virkeligheten er substratforhold annerledes enn det som ble testet i både BMP og reaktorforsøk. Pt er forholdet (volum) 62% storfegjødsel fra melkekyr, 22% storfegjødsel fra okse, 9% myse og 8% fiskeslam. Når Tingvoll Fisk AS begynner med påvekst av fisk i sjøen kommer mengden slam til å doble eller fire-doble og utgjør 16-26% av total substratvolum, mer i den duren som ble testet. Estimert energiproduksjon fra en blanding som ligner R3 er 359 Mwh/år med 624 tonn fiskeslam (tre ganger dagens mengde), 1632,2 tonn storfegjødsel fra kyr, 577,2 tonn gjødsel fra okser og 234 tonn myse.

## 5 Konklusjon

Prosjektet *Biogass fra marint fiskeslam sambehandlet med substrater fra landbruk* har undersøkt løsninger for oppsamling og separasjon av marint fiskeslam fra både landbasert produksjon i lukkede kar og havbasert produksjon i semi-lukkede/åpne merder. Det ble også gjennomført en biometanpotensiale (BMP) test for å bestemme metanpotensialet i ulike substrat og substratblandinger og et reaktorforsøk som testet tre substratblandinger under mer virkelige forhold. Substratene som ble testet var marint slam (fekalier og ufordøyet fôr) fra laks og rognkjeks, gjødsel fra melkekyr, gjødsel fra okser og myse fra et ysteri.

Det finnes en rekke teknologier for oppsamling og separasjon av marint slam. Den mest praktiske og rimeligste kombinasjon for Tingvoll fisk AS er trakter plassert under merdene for å samle opp fiskeslam og fôrrester, en såkalt *Radial Flow Settler* (RFS) til sedimentering av fiskeslam og som siste trinn geobags for å rense utspyllinga etter RFS-trinnet.

I BMP-testen kom ren fiskeslam best ut, med en gass- og metanpotensiale på henholdsvis 609 og 443 mL/g VS tilsatt. Blant substratblandingene kom blandingen med 53% gjødsel av melkekyr + 7% myse og 40% fiskeslam (laks) best ut med en biogass- og metanutbytte på hhv 496 og 371 mL/g VS tilsatt. Ren myse hadde høy biogassutbytte men siden andel CO<sub>2</sub> i gassen er høy (50%) var spesifikk metanproduksjon noe lavere.

I reaktorforsøket ble det testet tre substratblandinger. Høyeste metanutbytte var fra blandingen med 33% gjødsel av melkekyr + 12% oksemøkk + 5% myse og 50% fiskeslam (rognkjeks), men prosessen var ustabil og pga økende VFA-verdier var mengden substrat tilsatt per innmating redusert 32 dager etter overgang til differensielle drift. To reaktorer fikk en blanding med 20% fiskeslam (rognkjeks) og forholdsvis 59% gjødsel fra melkekyr + 21% oksemøkk og 53% gjødsel av melkekyr + 19% oksemøkk + 8% myse. Blandingene med myse kom nest best ut med hensyn til metangassutbytte og hadde stabil VFA-konsentrasjoner. Dette er antageligvis pga mysa, som tipper C/N-forholdet i riktig retning og kan ha utvannet saltinnholdet. Gjennomsnitt gass- og metanproduksjon for denne blandingen i de siste 30 dagene av forsøket var henholdsvis 300,4 og 197,5 mL/g VS. Dette tilsvarer 117,1 kWh/tonn substrat.

Gassproduksjon og metangassutbytte gikk gradvis nedover etter uke 15, mest i reaktoren uten myse. Ammoniakk ble ikke målt, men ut ifra ammonium konsentrasjoner og økende pH mot slutten av forsøket kan det tyde på at ammonium ble omdannet til ammoniakk i økende grad i takt med økende pH. En annen mulig forklaring er at saltvann inneholder magnesium sulfat, som kan virke innhiderende på to grunner. Det første er omdanning av sulfat til sulfid av sulfatreduserende bakterier (SRB). Disse utkonkurrerer metanogener for hydrogen og dermed fører til mindre CH<sub>4</sub>. For det andre, et biprodukt av sulfatreduksjon er hydrogensulfid (H<sub>2</sub>S) som er toksisk for metanogener.

Videre forsøk anbefales for å undersøke følgende spørsmål:

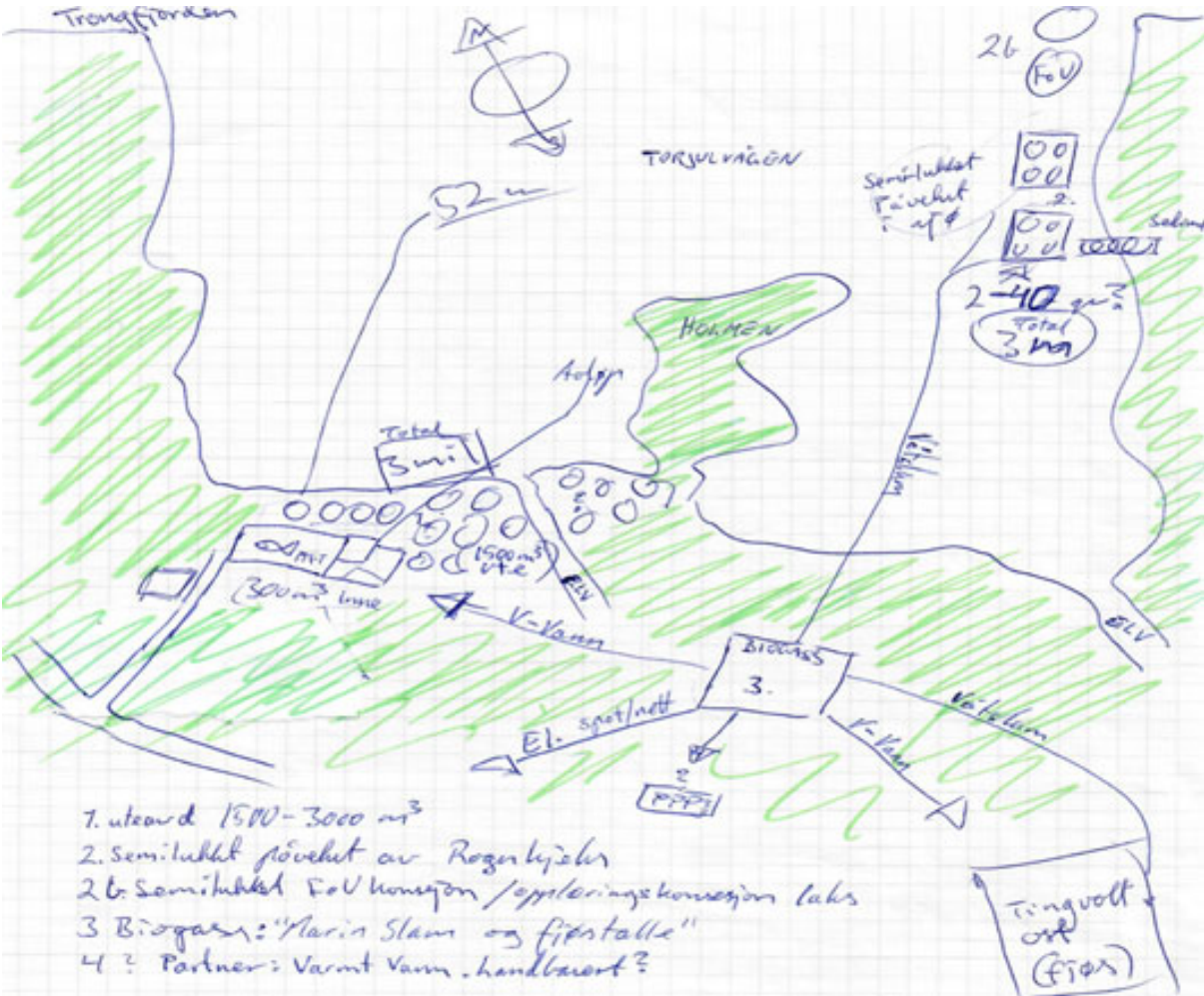
- Hvorfor gikk gassproduksjon gradvis nedover etter uke 15? Var det på grunn av innhibering fra sulfat, ammoniakk, en kombinasjon av de to eller en annen faktor?
- Sammensetning av mikrober har mye å si om prosess og ytelse. Kan prosesstabilitet og ytelse forbedres hvis mikrobene får mer tid til å tilpasse seg eller om man poder med slam hentet fra et anlegg som behandler fiskeslam (helst marint slam hvis det finnes)?
- Hvis avvanning kommer til å bli en del av slambehandlingen bør avvannet slam (>30% TS) brukes til reaktorforsøket. Har dette en betydning for saltinnholdet og sammensetning av slammet?
- I tillegg til gasspotensialet er det viktig å se på gjødselkvaliteten til bioresten. Dette er av stor betydning for Tingvollst. Hvor mye salt er igjen i bioresten og er det skadelig for avlingen? Kan Tingvollst erstatte kunstgjødsel med bioresten?

# Referanser

- Angelidaki, I. and Ahring, B. (1993) 'Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia', *Applied Microbiology and biotechnology*, 38(4), pp. 560–564.
- Braun, R., Huber, P. and Meyrath, J. (1981) 'Ammonia toxicity in liquid piggery manure digestion', *Biotechnology Letters*, 3(4), pp. 159–164.
- Comino, E., Riggio, V. A. and Rosso, M. (2012) 'Biogas production by anaerobic co-digestion of cattle slurry and cheese whey', *Bioresource Technology*. Elsevier Ltd, 114, pp. 46–53. doi: 10.1016/j.biortech.2012.02.090.
- Davidson, J. and Summerfelt, S. T. (2005) 'Solids removal from a coldwater recirculating system - Comparison of a swirl separator and a radial-flow settler', *Aquacultural Engineering*, 33(1), pp. 47–61. doi: 10.1016/j.aquaeng.2004.11.002.
- Ebeling, J. M. P. D. and Rishel, K. L. (2006) 'Performance Evaluation of Geotextile Tubes', in, p. 65. Available at: <https://cals.arizona.edu/azaqua/ista/ISTA7/RecircWorkshop/Workshop PP & Misc Papers Adobe 2006/6 Waste Mgmt/GeoTextile Bags/2006 Roanoke - Performance Evaluation of Geotextile Bags -E.pdf> (Accessed: 15 December 2017).
- Fistarol, G. O. *et al.* (2016) 'Use of a marine microbial community as inoculum for biomethane production', *Environmental Technology*, 37(3), pp. 360–368. doi: 10.1080/09593330.2015.1069900.
- Gebauer, R. (2004) 'Mesophilic anaerobic treatment of sludge from saline fish farm effluents with biogas production', *Bioresource Technology*, 93(2), pp. 155–167.
- Hashimoto, A. G. (1986) 'Ammonia inhibition of methanogenesis from cattle wastes', *Agricultural Wastes*, 17(4), pp. 241–261.
- Ma, J. *et al.* (2009) 'Enhanced propionic acid degradation (EPAD) system: Proof of principle and feasibility', *Water research*, 43(13), pp. 3239–3248.
- Møller, H. B. and Ward, A. J. (2011) 'Modeling Volatile Fatty Acid Concentration in Livestock Manure-Based Anaerobic Digesters by Simple Titration', *Environmental Engineering Science*, 28(7), pp. 507–513. doi: 10.1089/ees.2010.0253.
- Schnurer, A. and Jarvis, A. (2010) 'Microbiological handbook for biogas plants', *Swedish Waste Management U*, 2009, pp. 1–74.
- Sharrer, M. *et al.* (2010) 'The cost and effectiveness of solids thickening technologies for treating backwash and recovering nutrients from intensive aquaculture systems', *Bioresource Technology*, 101(17), pp. 6630–6641. doi: 10.1016/j.biortech.2010.03.101.
- Solli, L. (2017) *Degradation of proteiniaceous material, ammonium accumulation and microbial dynamics in anaerobic digesters*. PhD thesis. Norwegian University of Life Sciences. ISSN 1894-6402, ISBN 978-82-575-1473-0.
- Van Velsen, A. (1979) 'Adaptation of methanogenic sludge to high ammonia-nitrogen concentrations', *Water Research*, 13(10), pp. 995–999.
- Vivekanand, V. *et al.* (2018) 'Synergistic effects of anaerobic co-digestion of whey, manure and fish ensilage', *Bioresource Technology*, 249, pp. 35–41.
- De Vrieze, J. *et al.* (2015) 'Inoculum selection is crucial to ensure operational stability in anaerobic digestion', *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(1), pp. 189–199. doi: 10.1007/s00253-014-6046-3.

Wijekoon, K. C., Visvanathan, C. and Abeynayaka, A. (2011) 'Effect of organic loading rate on VFA production, organic matter removal and microbial activity of a two-stage thermophilic anaerobic membrane bioreactor', *Bioresource Technology*, 102(9), pp. 5353–5360.

# Vedlegg



Kart over Torjulvågen og utviklingsplan.

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

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

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

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