



BACHELOROPPGAVE

Biogassproduksjon ved anaerob nedbrytning av avløpsslam tilsatt fiskeslam og av rent fiskeslam

Biogas production by anaerobic digestion of sewage sludge added fish sludge and of pure fish sludge

Mari Helle Mossestad
Synne Haram Nordtveit

Bachelor i ingeniørfag, kjemi
Fakultet for ingeniør- og naturvitenskap/Institutt for sikkerhet, kjemi- og bioingeniørfag/Kjemiingeniør/Studieretning miljøteknologi/Studieretning prosessteknologi

Innleveringsdato: 30.05.2022

Jeg bekrefter at arbeidet er selvstendig utarbeidet, og at referanser/kildehenvisninger til alle kilder som er brukt i arbeidet er oppgitt, jf. Forskrift om studium og eksamen ved Høgskulen på Vestlandet, § 12-1.

Forord

Bacheloroppgaven *Biogassproduksjon ved anaerob nedbrytning av avløpslam tilsatt fiskeslam og av rent fiskeslam* er skrevet for det avsluttende 20 studiepoengs emnet KJE350 i bachelorutdanningen for kjemiingeniører våren 2022. Bacheloroppgaven er en ekstern oppgave gitt av Bergen Kommune i samarbeid med Høgskulen på Vestlandet. Oppgaven går inn under et større forskningsprosjekt (RAS-EN) som omhandler massebalanse og energioptimering i landbaserte oppdrettsanlegg (RAS-anlegg), med spesielt fokus på variasjoner i vannkvalitet.

Vi er to studenter med forskjellige spesialiseringer innenfor kjemiingeniørstudiet, miljøteknologi og prosesseteknologi, som har jobbet sammen på denne oppgaven. Oppgaven har vært i større grad vektlagt miljøteknologi, men kunnskap fra tidligere emner som; statistikk, instrumentell analyse, analyseteknikk og vannrenseteknologi har vært hjelpsomme for begge studentene under hele prosjektet. Vi har hatt et godt samarbeid, og lært mye av hverandre og veilederne våre i løpet av dette semesteret.

Vi ønsker å takke vår eksterne veileder avdelingsingeniør Ingvild Fenne, ved Bergen kommune, Vann- og avløpsetaten for god oppfølging under det eksperimentelle arbeidet og for hjelpen vi fikk i etterkant av arbeidet på biogassanlegget. Vi ønsker også å spesielt takke vår interne veileder høgskolelektor Kristin Kvamme ved Institutt for sikkerhet, kjemi- og bioingeniørfag for all tiden og innsatsen som ble lagt i bachelorveiledningen vår. Den svært gode oppfølgingen har vi satt stor pris på. Til slutt ønsker vi å takke Bergen Kommune for tildelingen av en spennende bacheloroppgave.

Bergen 30.05.22

Synne. H. Nordtveit

Synne Haram Nordtveit

Mari Helle Mossestad

Mari Helle Mossestad

Sammendrag

Biogassproduksjon ved anaerob nedbrytning av avløpsslam tilsatt fiskeslam og av rent fiskeslam er en ekstern oppgave gitt av Bergen Kommune i samarbeid med Høgskulen på Vestlandet. Den eksperimentelle oppgaven inngår i et større forskningsprosjekt (RAS-EN) som omhandler massebalanse og energioptimalisering i landbaserte RAS-anlegg (resirkulerende akvakultursystem), med fokus på variasjoner i vannkvalitet. Tidligere bachelor- og forskningsprosjekt har ikke vist en konsekvent signifikant økning i biokjemisk metanpotensial (BMP) ved bruk av henholdsvis vått- og tørket fiskeslam som kosubstrat. Det er derfor interessant å utføre anaerobe utråtningsforsøk ved AMPTS II (Automatic Methane Potential Test System) med substratblandinger basert på prosent flyktig organisk tørrstoff (% VS). I dette bachelorprosjektet ble det undersøkt om biogassproduksjonen ville øke for substratblandinger med hygienisert avløpsslam og 25 eller 40 % VS fiskeslam, og for substrat av rent fiskeslam. Alle forsøkene ble utført med vått og tørket fiskeslam.

Ammoniuminnhold, pH, ledningsevne, temperatur, prosent tørrstoff (% TS), prosent flyktig organisk tørrstoff (% VS) og prosent glødetap (% Wv) ble funnet før og etter utråtning. BMP av slamblandingene ble beregnet fra % VS, akkumulert metangass i Nml og innveininger av podeslam og substrat. Statistiske signifikanstester viste at BMP-gjennomsnittet til substratblandingene med 40 % VS tørket fiskeslam var signifikant høyere enn BMP-gjennomsnittet til substratblandingene med 40 % VS vått fiskeslam. Ingen av fiskeslamssubstratene eller fiskeslamssubstratblandingene fikk signifikant forskjellige BMP-gjennomsnitt enn de til hygienisert avløpsslam alene.

Sammenlignet med podeslam + hygienisert avløpsslam (referanse) verken øker eller minker biogassproduksjonen ved bruk av vått eller tørket fiskeslam, som substrat eller kosubstrat. I prosjektets forsøk ble det ikke funnet at ammoniumkonsentrasjon, pH eller saltinnhold har hatt hemmende effekt på biogassproduksjonen.

Abstract

Biogas production by anaerobic digestion of sewage sludge added fish sludge and of pure fish sludge is an external bachelor thesis given by Bergen Kommune in collaboration with Western Norway University of Applied Sciences. The experimental thesis is part of a larger research project (RAS-EN) which deals with mass balance and energy optimization in land-based RAS (Recirculating Aquaculture System) facilities, with a focus on variations in water quality. Previous bachelor- and research projects have not shown a consistently significant increase in biochemical methane potential (BMP) when using wet and dried fish sludge as a food substrate, respectively. It is therefore interesting to perform anaerobic digestion experiments by AMPTS II (Automatic Methane Potential Test System) with substrate mixtures based on percentage of volatile solids (% VS). In this bachelor project, it was investigated whether biogas production would increase for substrate mixtures with hygienized sewage sludge and 25 or 40 % VS fish sludge, and for substrates of pure fish sludge. All experiments were performed with usage of wet and dried fish sludge.

Ammonium content, pH, conductivity, temperature, percentage total solids (% TS), percentage volatile solids (% VS) and percent loss on ignition of dry mass (% Wv) were found before and after anaerobic digestion. BMP of the sludge mixtures was calculated from the % VS, accumulated methane gas in Nml and the weighed masses of graft sludge and substrate. Statistical significance tests showed that the BMP average of the substrate mixtures with 40 % VS dried fish sludge was significantly higher than the BMP average of the substrate mixtures with 40 % VS wet fish sludge. None of the fish sludge substrate mixtures received significantly different BMP averages than those for sanitized sewage sludge alone.

Compared to graft sludge + hygienized sewage sludge (reference) the biogas production using wet or dried fish sludge, as substrate or co-substrate neither resulted in increases nor decreases. In this project's experiments, it was not found that ammonium concentration, pH or salinity have had an inhibitory effect on biogas production.

Innhold

Forord.....	14
Sammendrag.....	15
Abstract.....	16
Liste over forkortelser.....	18
1. Introduksjon.....	19
1.1 Bakgrunn for oppgaven.....	20
1.2 Problemstilling, hensikt, forskningsspørsmål og mål.....	20
1.3 Temaet biogassproduksjon.....	21
1.4 Teori.....	21
1.4.1 Tidligere arbeid.....	23
1.4.2 AMPTS II for analyse av BMP.....	23
1.4.3 RAS.....	28
1.4.4 Anaerob nedbrytning av substrat til biogass.....	28
1.4.5 Ammoniuminnhold i rånetanker.....	28
1.4.6 pH ved anaerob nedbrytning.....	29
1.4.7 Ko-nedbrytning av forskjellige substrater.....	29
1.4.8 Fiskeslam som kosubstrat i anaerob nedbrytning av kommunalt avløpslam.....	29
1.4.9 Saltinnhold i biogassproduksjon.....	29
1.4.10 Biorest fra biogassanlegg som gjødselvarer.....	30
2 Materialer og metoder.....	30
2.1 Formler og ligninger.....	30
2.2 Instrumentering.....	33
2.3 Utstyr.....	34
2.3.1 Utstyr til AMPTS II forsøk.....	35
2.3.2 Utstyr til måling av pH, temperatur og ledningsevne.....	35
2.3.3 Utstyr til ammoniumanalyse.....	37
2.4 Kjemikalier, reagenser, løsninger og prøver.....	37
2.4.1 Kjemikalier og løsninger.....	40
2.4.2 Prøvemateriale.....	44
2.5 Fremgangsmåte.....	52
2.5.1 Klargjøring av AMPTS II eksperiment.....	52
2.5.2 AMPTS II eksperiment.....	55
2.5.3 Avslutning av AMPTS II eksperiment.....	57
2.5.4 Statistiske signifikanstester for BMP-verdier.....	57

2.5.5 Ammoniumanalyse.....	57
3 Resultater.....	58
3.1 Bestemmelse av % TS, % VS og % Wv	59
3.2 Bestemmelse av pH, temperatur og ledningsevne.....	60
3.3 Biokjemisk metanpotensial (BMP) fra AMPTS II forsøkene	63
3.4 Statistiske signifikanstester for BMP-verdier i hver forsøksrunde.....	64
3.5 Ammoniuminnhold før og etter utråtning i AMPTS II	66
3.6 Innhold av næringsstoff og tungmetall før og etter utråtning.....	67
4. Diskusjon.....	70
4.1 Diskusjon av resultater fra AMPTS-forsøkene	71
Første forsøksrunde med 25 % VS fiskeslam.....	72
Andre forsøksrunde med 40 % VS fiskeslam.....	76
Tredje forsøksrunde med rent fiskeslam	76
Videre diskusjon av BMP-resultatene	79
4.2 pH og ammoniumkonsentrasjoner før og etter utråtning.....	83
4.3 Ledningsevne og saltinnhold før og etter utråtning.....	87
4.4 Tungmetallinnhold og kategorisering av biorest som gjødslingsmiddel	89
4.5 Andre feilkilder og kommentarer	91
5. Konklusjon	96
Videre arbeid	99
6. Referanser (litteraturliste).....	104
7. Appendiks (vedlegg)	104
A: Brukerveiledning ammonium-kyvettetest	112
B: Innveid masse av substrat og substratblandinger før og etter utråtning.....	79
C: % TS, % VS og % Wv beregnet fra innveid masse av substrat og substratblandinger	83
D: Beregninger for å finne masse fiskeslam som måtte tilsettes avløpslam for å lage ønsket substratblanding basert på % VS.....	87
E: AMPTS II forsøksoppsett	89
F: Rådata for akkumulert volum av metan i forsøksseriene (enhet: Nml)	91
G: Tabeller med data for beregning av BMP	96
H: Statistisk analyse av BMP-verdier.....	99
I: Analyseresultater fra Hardanger miljøsenters AS	104
Analyseresultater for den første forsøksrunden.....	104
Analyseresultater for den andre forsøksrunden.....	112

Liste over forkortelser

BMP	Biokjemisk metanpotensial
RAS	Recirculating Aquaculture System (resirkulerende akvakultursystem)
AMPTS II	Automatic Methane Potential Test System (Automatisk metanpotensialtestsystem)
NFR	Norsk Forskningsråd
RFF	Regionale forskingsfond
Pode	Podeslam
Hyg	Hygienisert avløpsslam
FS	Fiskeslam
VFS	Vått fiskeslam
TFS	Tørket fiskeslam
TS	Tørrstoff
VS	Flyktig organisk tørrstoff
Wv	Glødetap
Nml	Normalisert milliliter
Zn	Sink
Cu	Kobber
Cr	Krom
Pb	Bly

Hg	Kvikksølv
Mg	Magnesium
Ca	Kalsium
KOF	Kjemisk oksygenforbruk
NaOH	Natriumhydroksid

1. Introduksjon

Introduksjonskapittelet gir en oversikt over bakgrunnen for valget av bacheloroppgaven, temaet biogassproduksjon og hvorfor det er viktig. Videre er relevant tidligere arbeid og teori innen området presentert, samt problemsstilling og mål.

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Bacheloroppgaven *Biogassproduksjon ved anaerob nedbrytning av avløpslam tilsatt fiskeslam og av rent fiskeslam* ble presentert til bachelorstudentene oktober 2021. Dette bachelorprosjektet er en oppgave som går inn under forskningsprosjektet RAS-EN (2020-2024): «Mass balance and energy optimization in recirculating aquaculture systems (RAS), with special focus on diurnal variations in water quality». Prosjektansvarlig for RAS-EN er Anne-Camilla Diesen Hosfeld ved Høgskulen på Vestlandet. Hovedhensikten med forskningsprosjektet er “Competence building regarding the mass balance in renewable energy self-sufficient RAS systems including diurnal variation in metabolite production and diurnal efficiency of the water treatment systems” (1). Bacheloroppgaven inngår i forskningsprosjektets arbeidspakke W3. Sludge and Sustainable energy. RAS-EN er støttet av Norsk Forskningsråd (NFR) og er en videreføring av et tidligere prosjekt støttet av regionale forskningsfond (RFF): «Utnyttelse av avfall fra marin matproduksjon til regional fornybar energi». Hensikten med RFF-forskningsprosjektet var å optimalisere utnyttelsen av organiske ressurser (i dag: fiskeavfall) tilgjengelig på Vestlandet for å skape verdier for offentlig sektor gjennom å øke produksjonen av fornybar energi ved kommunale biogassanlegg (2).

Oppgaven appellerte til gruppen da det virket spennende å forske på noe som kan forbedre sirkulær økonomi og skape mer fornybar energi. Om man finner en bedre utnyttelse av det marine avfallet så kan det være med på å forbedre konkurransekraft og verdiskaping i Norge. I tillegg synes gruppen at det var motiverende å vite at oppgaven er en del av et større forskningsprosjekt. Bergen kommune er en viktig samarbeidspartner i RAS-EN prosjektet. Alt eksperimentelt arbeid i prosjektoppgaven utføres ved laboratoriet tilhørende biogassanlegget (Bergen Vann) i Rådalen. Hardanger Miljøsender AS er et akkreditert analyselaboratorium og utfører analyser med analyseparameterne tørrstoff, glødetap, kobber, krom, bly, kvikksølv, nikkel, kadmium, arsen, natrium, kalium, magnesium, kalsium, total-nitrogen, kjemisk oksygenforbruk, total-fosfor og ortofosfat. Ekstern veileder er

avdelingsingeniør Ingvild Fenne ved Bergen Vann, og intern veileder er høyskolelektor Kristin Kvamme ved Institutt for sikkerhet, kjemi- og bioingeniørfag.

1.2 Problemstilling, hensikt, forskningsspørsmål og mål

I denne bacheloroppgaven skal det undersøkes om biogassproduksjonen øker ved bruk av henholdsvis vått og tørket fiskeslam som substrat eller som kosubstrat med hygienisert avløpsslam. I dette prosjektet blir eksperimentell forskningsmetode benyttet. Hvilket samutråtningsforhold som gir optimal biogassproduksjon skal undersøkes der tilsatt vått og tørket fiskeslam i substratblandingene baseres på prosent flyktig organisk tørrstoff (% VS). Det er viktig å få gjennomført laboratorieskala batchforsøk for å få en indikasjon på hvilke samutråtningsforhold som bør benyttes når man går videre med pilotskalaforsøk. Fiskeslammene er hentet fra et RAS-anlegg, som er et landbasert fiskeoppdrettsanlegg.

Tidligere bachelor- og forskningsprosjekt har ikke vist en konsekvent signifikant økning i biokjemisk metanpotensial (BMP) ved bruk av henholdsvis vått- og tørket fiskeslam som kosubstrat. Det er derfor et behov for videre forskning på potensialet fiskeslam har som substrat og kosubstrat i laboratorieskalaforsøk. I tidligere forsøk har fiskeslam blitt tilsatt hygienisert avløpsslam hovedsakelig med hensyn på masseprosent. I bacheloroppgaven fra 2021 ble vått fiskeslam tilsatt avløpsslammet med hensyn på prosent flyktig organisk tørrstoff (% VS) (3). Tørket fiskeslam har en mye lengre lagringstid enn vått fiskeslam. Det samme tørre fiskeslammet blir derfor benyttet i alle tre forsøksrundene mens det våte fiskeslammet, som er en ferskvare, blir byttet ut til hver forsøksrunde.

I denne bacheloroppgaven blir både vått- og tørket fiskeslam tilsatt avløpsslam med hensyn på % VS. Ifølge en rapport fra University of Benin har % VS en direkte innvirkning på mengden biogass som blir produsert (4). I hver AMPTS-forsøksrunde skal tørket fiskeslam og vått fiskeslam bidra med samme % VS i substratblandingene. Det blir slik mulig å sammenligne effekten henholdsvis tørket- og vått fiskeslam har på biogassproduksjonen. Det skal også bli gjort forsøk med bare rent fiskeslam som substrat.

Resultatene fra dette prosjektet skal sammenlignes med tidligere bacheloroppgaver og forskningsprosjekter. De viktigste resultatene vil være BMP-resultatene, men pH, konsentrasjonen av ammoniumnitrogen og grunnstoffanalyser er også vesentlige. Forskningsspørsmål som man ønsker å få svar på i dette prosjektet er:

- Hvilke faktorer er avgjørende for å øke biogassproduksjonen ved bruk av henholdsvis tørket og vått fiskeslam som substrat og kosubstrat med avløpsslam?
- Hvilken % VS fra fiskeslam er optimal i substratblanding med hygienisert avløpsslam?

AMPTS II-forsøk blir benyttet for å bestemme biokjemisk metanpotensial (BMP). Enveis variansanalyse (ANOVA), F-tester og t-tester skal benyttes for å avgjøre om BMP-gjennomsnittene er signifikant forskjellige. Andre analyser som blir gjennomført for å gi støttende eksperimentelle data er pH, analyser av ammoniumnitrogen og utvalgte analyser på alkali- og jordalkalimetaller samt tungmetaller.

Mål og delmål for bacheloroppgaven er:

- Bestemme biokjemisk metanpotensial (BMP) med avløpsslam alene som substrat, fiskeslam alene som substrat, og av avløpsslam og fiskeslam som kosubstrater ved bruk av laboratorieskala “batch”-forsøk (AMPTS).
- Avgjøre optimalt samutråtningsforhold for substratblandinger bestående av avløpsslam og tørket- eller vått fiskeslam.
- Beskrive parametere som påvirker biogassproduksjonen ved hjelp av data/resultater fra tidligere bachelor- og forskningsprosjekter.
- Avgjøre om forskjellene mellom BMP-gjennomsnitt er signifikante, ved hjelp av statistikk.

1.3 Temaet biogassproduksjon

Temaet for bacheloroppgaven er biogassproduksjon med substratblandinger av avløpsslam og henholdsvis vått- og tørket fiskeslam, og med rent fiskeslam alene.

Klimaendringer er et globalt problem, og løsningen krever innsats fra alle verdens land. FN's bærekraftsmål fra 2015, ble utformet for å se økonomi, miljø og sosial utvikling i sammenheng, fordi det ene påvirker det andre. Noen delmål er med å forbedre samfunnets ressursutnyttelse og redusere klimagassutslipp (5). Biogassproduksjon er en industriell utnyttelse av organisk avfall og rester. Dette er et eksempel på et tiltak som vil forbedre situasjonen vi er i, samtidig som den vil være lønnsomt. I tillegg til FN's bærekraftsmål ønsker The European Commission å gjøre Europa klimanøytrale innen 2050 gjennom deres klimastrategi «A European Green Deal» (6). For å kunne oppnå denne avkarboniseringen må

man ha en full mobilisering av industrien. Det gjelder spesielt gassektoren, som er en av verstingene den dag i dag. Gjennom dette tiltaket gis det støtte for utvikling av fornybare gasser, som biogass er et eksempel på.

I dag har Norge lavere produksjon av biogass enn både Sverige og Danmark (7). Omtrent halvparten av biogassen som produseres i Norge blir fremstilt i nye anlegg. I disse nye anleggene blir det produsert oppgradert biogass, det vil si at karbondioksid, hydrogensulfid, vandamp og andre små partikler blir fjernet slik at gassen består av opp mot 98 prosent metangass (8). Miljødirektoratet anslår et potensiale for ny biogassproduksjon i Norge i 2030 som tilsvarer cirka fire ganger produksjonsnivået i 2018 (7, s.11). Figur 1 viser beregnet potensial for ny biogassproduksjon per råstofftype. Avløpsslam, som blir brukt som substrat og kosubstrat i dette prosjektet, er en av råstoffene der mulighetene til å produsere biogass ser ut til å være størst. Avløpsslam er markert lysegrønn i figur 1. Fiskeslam, som er markert mørkegrønn i figur 1, er et råstoff med litt lavere forventet potensiale.



Figur 1: (7) Figur 1. Totalt beregnet potensial for ny biogassproduksjon per råstofftype i 2030 (gigawatttime) "Kategorien "Matavfall næring" er slått sammen av fire underkategorier i Carbon Limits rapport; s. 159.

1.4 Teori

1.4.1 Tidligere arbeid

I 2012 ble et forskningsprosjekt med navn: «Biogas production from fish wastes in co-digestion with sewage sludge» gjennomført i Sverige (9). Hensikten med prosjektet var å finne det best mulige kosubstrat-forholdet for å forbedre biogassproduksjonen ved hjelp av

fiskeslam. Ifølge artikkelen ble det i eksperimentene til Levlin og Tomczak-Wandzel brukt Bioprocess Controls AMPTS II utstyr, og dette ble utført i mesofilt temperaturområde. Substrater brukt i prosjektet var gress, torskekjøtt og innvoller fra abbor. Levlin og Tomczak-Wandzel oppnådde resultater som støttet opp forventningene de hadde til arbeidet. De fikk høyest biokjemisk metanpotensial (BMP) fra kosubstrat med slam og innvoller fra abbor, samt fra kosubstrat med slam, innvoller fra abbor og torskekjøtt. De fikk høyere BMP når fiskeavfall ble benyttet som kosubstrat. Basert på dette arbeidet, kan biogassproduksjonen optimaliseres ved bruk av fiskeavfall som kosubstrat.

Bergen Kommune har over flere år bidratt med bacheloroppgaver, omhandlende slam og biogassproduksjon, til kjemiingeniørutdanningen ved HVL. I bacheloroppgavene i årene 2017 (10), 2018 (11) og 2021 (3) ble det benyttet de samme eksperimentelle metodene med avløpsslam og fiskeslam som blir benyttet i dette bachelorprosjektet i 2022.

I bachelorprosjektet fra 2017 ble det konkludert at substratblandinger bestående av hygienisert slam med henholdsvis 10 og 25 masseprosent vått fiskeslam gav signifikant forskjellig BMP sammenlignet med bare avløpsslam som substrat (10). Sammenlignet med BMP-gjennomsnittet til podeslam + hygienisert avløpsslam økte det biokjemiske metanpotensialet med 40 % for substratblandingen med 25 masseprosent fiskeslam, og 28 % for substratblandingen med 10 masseprosent fiskeslam. Bachelorgruppen konkluderte at substratblandinger bestående av avløpsslam og oppimot 25 masseprosent fiskeslam vil gi en økning i BMP i forhold til hygienisert avløpsslam alene. I dette prosjektet ble fiskeslam tilsatt avløpsslam med hensyn på masseprosent. Prosent flyktig organisk tørrstoff (% VS) ble målt etter at fiskeslammet var blandet med avløpsslammet. Substratblandingen med 10 masseprosent fiskeslam hadde en % VS på 1,81 og blandingen med 25 masseprosent fiskeslam hadde en % VS på 1,72.

I prosjektet fra 2018 ble det funnet at BMP-gjennomsnittet økte med 24 % når hygienisert slam ble blandet med tørket fiskeslam til substratblanding, sammenlignet med BMP-gjennomsnittet til hygienisert slam alene som substrat (11). Imidlertid ble BMP-gjennomsnittet redusert med 9 % når hygienisert slam på tilsvarende måte ble blandet med vått fiskeslam. I disse forsøkene hadde tørket fiskeslam ca. 25 % VS, mens vått fiskeslam ble tilsatt med hensyn på masseprosent (25 % vått fiskeslam og 75 % hygienisert slam).

Bacheloroppgavene fra 2017 og 2018 ble begge utført i samarbeid med Regionale forskingsfond-prosjektet (RFF-prosjektet). Bachelorprosjektet i 2021 fant ingen signifikant forskjell mellom BMP-gjennomsnittene, og konkluderte derfor med at biogassproduksjonen hovedsakelig er avhengig av podeslam og hygienisert slam, og ikke av fiskeslam (3). I 2021-prosjektet ble fiskeslam tilsatt avløpsslam med hensyn på % VS for det tørkede fiskeslammet og masseprosent for det våte fiskeslammet. Det ble gjort forsøk på tørket fiskeslam med % VS på 10, 15, 25 og 35. Vått fiskeslam ble forsøkt med 10 og 25 masseprosent.

Tabell 1: Oversikt over substrat benyttet i ulike bacheloroppgaver, sortert etter år.

År	Substrat
2016	<ul style="list-style-type: none"> - Slam fra Ytre Sandviken renseanlegg - Slam fra Knappen renseanlegg - Etylenglykol 99,8 %
2017	<ul style="list-style-type: none"> - Slam fra Holen renseanlegg - Slam fra Ytre Sandviken renseanlegg - Slam fra Kvernevik renseanlegg - Vått fiskeslam
2018	<ul style="list-style-type: none"> - Tørket og vått fiskeslam fra et landbasert settefiskanlegg - Matavfall levert av Mjøsanlegget AS (behandlingenlegg for matavfall)
2020	<ul style="list-style-type: none"> - Glykolbasert avfall (EGW) fra avfallsmottak
2021	<ul style="list-style-type: none"> - Tørket fiskeslam fra et gitt landbasert oppdrettsanlegg - vått fiskeslam fra et gitt landbasert oppdrettsanlegg
2022	<ul style="list-style-type: none"> - Tørket fiskeslam fra et gitt RAS anlegg - vått fiskeslam fra et gitt RAS anlegg

1.4.2 AMPTS II for analyse av BMP

Automatisk metanpotensialtestsystem (AMPTS) II er en analytisk metode brukt i forbindelse med målinger av biokjemisk metanpotensial (BMP) fra anaerob nedbrytning av biologisk nedbrytbart substrat. En anaerob prosess vil si lukket kompostering i tank (der det dannes gass) uten tilgang på oksygen (12). BMP er normalisert volum av metangass produsert per gram VS av substrat tilsatt. (13)

AMPTS II består av 4 ulike enheter, enhet A: Inkuberingsenhet, enhet B: CO₂ – fangstenhet, enhet C: gassdetektorenhet og enhet D: programvaren på tilhørende PC-enhet.

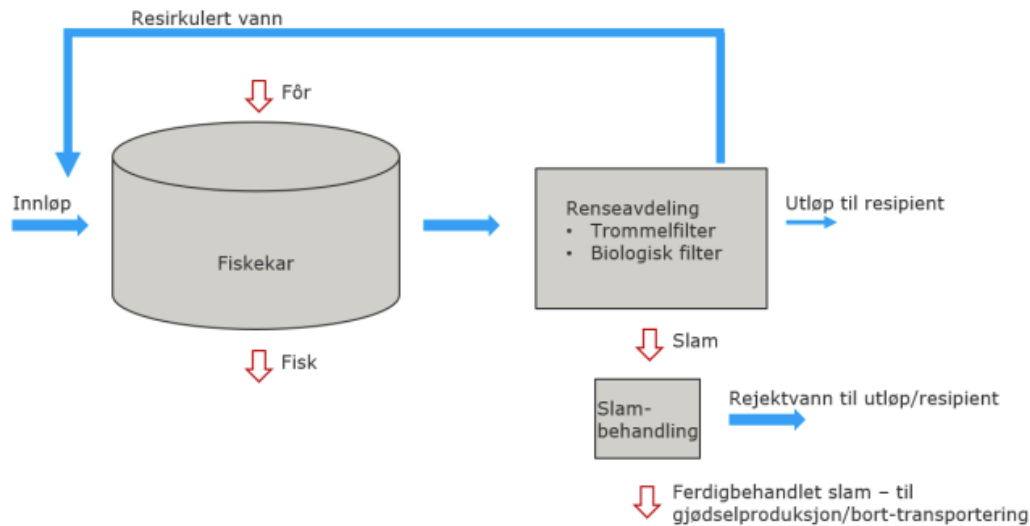
Inkuberingsenheten (enhet A) kan måle opp mot 15 forskjellige minireaktorer, som rommer 600 ml. Et motorhode med omrøringspinne blir koblet til hver sin minireaktor og plassert i et termostatisk vannbad. Den andre enheten i AMPTS II er CO₂ – fangstenhet (enhet B), som fjerner karbondioksid fra den produserte biogassen. I CO₂ – fangstenheten er det 15 glassflasker som rommer 100 ml som er koblet til hver sin minireaktor med gummislanger. Det blir tilsatt natriumhydroksid (NaOH) med thymolphthalein som indikator i hver glassflaske, og når løsningene er mettet med CO₂ og til dels H₂S vil det avfarges. Denne enheten av AMPTS II sørger for at kun metangass går videre til enhet C. Neste enhet i AMPTS II kalles for gassdetektoren (enhet C), og består av 15 flowceller og et vannbad. Minireaktorene i enhet A er koblet til hver sin flowcelle med gummislanger. Gassdetektoren måler volumet av metangass fra CO₂ – fangstenheten, ved at man har en magnetisk kontroll i bunnen av vannbadet og når ±10 ml gass er samlet opp blir magnetkraften brutt og flowcellene løftes. Hvert løft blir registrert og loggført i en programvare på tilhørende PC-enhet (enhet D). I programvaren kan man analysere data/resultater blant annet grafisk.

BMP blir målt med AMPTS, hvor man legger inn % VS for hvert substrat i hver av de 15 flaskene og diverse parametere som er relevante for forsøket inn i programvaren.

Programvaren regner ut massene av substrat og podeslam som skal tilsettes i hver av de 15 flaskene. De faktiske massene som blir veid inn blir brukt i utregningene av BMP. CO₂-fikseringsflaskene blir så koblet til reaktorflaskene og gassdetektoren med Tygon®-slanger. Hver enkelt flaske med sitt system blir så spylt med nitrogengass for å fjerne oksygen og for å sjekke at systemet er tett slik at man oppnår anaerobe forhold. Den anaerobe utråtningen i minireaktorene tar 3-4 uker.

1.4.3 RAS

RAS står for “Recirculating Aquaculture System” og er en resirkuleringsteknologi som benyttes i lukkede anlegg, som oftest består av et mekanisk trinn, biotrinn og et trinn for avgassing (14). Figur 2 viser et eksempel på oppbygging av et RAS-anlegg med slagbehandling.



Figur 2: (14) Figur 1: Forenklet prinsippskisse av RAS-anlegg med etterfølgende slambehandling.

Klimaendringene har skapt en rekke utfordringer for oppdrettsnæringen. Man må nå forholde seg til høyere overflatetemperatur, oksygenmangel og forsuring i havet og høyere havnivå (15). Det er dessuten økende interesse for å drive en mer bærekraftig akvakulturnæring, der man produserer fisk samtidig som man ivaretar naturressursene. Man ønsker at produksjonen i et oppdrettsanlegg skal ha minst mulig påvirkning på økologien i området rundt anlegget. Alt dette, sammen med den store etterspørselen etter sjømat, har resultert i stadig flere etableringer i Norge av landbaserte akvakultursystem, som er en bærekraftig metode for fiskeoppdrett (16). I RAS-anlegg blir omtrent 95 prosent av vannet resirkulert, noe som fører til betraktelig lavere vann- og energiforbruk sammenlignet med anlegg som ikke benytter resirkuleringsteknologi (17). Med slike fiskeanlegg blir også næringsstoffene i vannet resirkulert (18).

En utfordring med landbaserte oppdrettsanlegg er utslipp. Ulempen med å drive landbaserte fiskeanlegg er at det oppstår konsentrerte avfallsstrømmer av avføring og uspisst fôr. Anleggene som benytter resirkuleringsteknologi, samler opp over 98 % av avfallsstrømmene (17). I landbasert fiskeoppdrett får man en produksjon av biprodukter som skaper deponeringsutfordringer for oppdrettsanlegg. For å forbedre sirkulærøkonomien i prosessen og minske mengden avfall ønsker man å finne flere bruksområder for slammet.

1.4.4 Anaerob nedbrytning av substrat til biogass

I anaerob stabilisering av slam brytes organisk stoff i slammet ned uten fritt oksygen tilgjengelig (19, s. 521). Denne prosessen skjer i en lukket, oppvarmet beholder der organisk

materiale omvandles til løse forbindelser ved bakteriell nedbrytning (syreproduserende bakterier). Forbindelsene brytes deretter ned av metanproduserende bakterier til sluttproduktene metan (CH_4), karbondioksid (CO_2), vann (H_2O) samt små mengder av andre gasser (N_2, O_2, H_2S). Den delen av materialet som ikke er brutt ned blir kalt bioest. Denne prosessen produserer altså fornybar energi i form av biogass, og gir en betydelig reduksjon i slammengder.

Anaerob nedbrytning eller stabilisering blir ofte kalt utråtning, og foregår i tre faser (figur 3): hydrolysefasen, den syreproduserende fasen og den metanproduserende fasen (19, s. 521). I hydrolysefasen løser det partikulære, organiske substratet seg opp, slik at bakteriene kan bryte det ned. I den syreproduserende fasen blir organisk stoff brutt ned av bakterier til organiske syrer. I den metanproduserende fasen bryter en annen gruppe av bakterier de organiske syrene ned til biogass, som består av metan og karbondioksid. Her nøytraliseres syren som blir produsert i den syreproduserende fasen, og dette gjør at pH kan holdes stabil. De anaerobe nedbrytningsprosessene er relativt langsomme prosesser. En vanlig metode for å for å øke nedbrytningshastigheten er å varme opp slammet. Variabler som har stor betydning for nedbrytningsprosessen er pH, oppholdstid, temperatur og type slam. Vanligvis holder man temperaturen forholdsvis stabil enten i mesofilt område ($32 - 42^\circ C$) eller i termofilt område ($50 - 58^\circ C$) (12, s. 20). Utråtning i termofilt temperaturområde fører til hygienisering av slammet. Bergen biogassanlegg tar imot avfall av kategori III. Avfall innenfor kategori III har krav om hygienisering ved 70 grader celsius (20). Avfall tilhørende kategori I og II krever høyere hygieniseringstemperaturer.



Figur 3: Prosessfasene ved anaerob stabilisering av slam.

Man skiller gjerne mellom to typer biogassanlegg, ett-trinns- og to-trinns-anlegg (19, s. 522). I gamle ett-trinns-anlegg skjer biologisk omsetning og fortykkelse i samme tank. I slike tanker er oppholdstiden lang ettersom en stor del av tanken ikke blir utnyttet til biologisk omsetning. I moderne ett-trinns-anlegg sørger man for tilstrekkelig omrøring for å øke kontakten mellom bakteriene og substratet (19, s.522). I dag dimensjoneres majoriteten av biogassanlegg som ett-trinns-anlegg, men dersom anlegget er så stort at det er aktuelt å bygge to råtnetanker, bør tankene både kunne drives i serie ved lav belastning og i parallell ved økende belastninger. Biogassanlegget i Rådalen er et eksempel på et anlegg som har to råtnetanker, se figur 4.



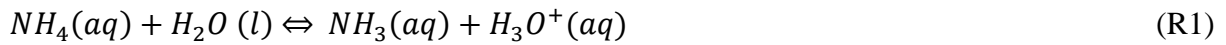
Figur 4: Råtnetankene til biogassanlegget i Rådalen. (privat bilde)

Råtneprosessen foregår i lukkede beholdere med kontrollert oppvarming, vanligvis utstyrt med rører eller rundpumping av slammet. Gjennom stabiliseringen reduseres total tørrstoffmengde i slammet med 25 — 35 %. Vanligvis blir tørrstoffkonsentrasjonen i slammet fordoblet gjennom anlegget. Alkaliteten fra bikarbonat bør være over 1000 mg $CaCO_3/l$ og pH i råtnetanken bør ligge i området 7.0 — 8,5. Biogassen vil bestå av 65— 70 % metan og 30— 35 % karbondioksid under normal drift. $\frac{CO_2}{CH_4}$ -forholdet er avhengig av innholdet av organiske syrer i nedbrytningsprosessen. Dersom CO_2 -innholdet øker til over 45 %, tyder det på at prosessen er ute av balanse og at den metanproduserendefasen ikke går som den skal. Metangassen som blir produsert har en høy brennverdi og energipotensialet kan utnyttes til produksjon av varmeenergi og/eller elektrisitet via en gassturbin eller gassmotor. I en avtale mellom Bergen kommune og Gasnor AS, som gjelder frem til 30. september 2030, blir biogass produsert på anlegget i Rådalen nytt til drivstoff til busser stasjonert på Haukås (21).

1.4.5 Ammoniuminnhold i råtnetanker

Ammoniuminnhold i råtnetanker og rejektivann fra rejektivannlager bør kontrolleres rutinemessig ettersom høye konsentrasjoner av ammoniakk kan påvirke biogassproduksjonen negativt (22). Nedbrytning av proteinholdige substrater i råtnetanken fører til produksjon av ammonium (NH_4^+) eller ammoniakk (NH_3). Ammonium og ammoniakk er i et

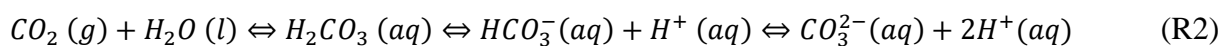
likevektsforhold, og hvilken form som dominerer avhenger av variabler som temperatur og pH (reaksjon R1).



Økning i temperatur eller pH vil føre til en økning i frie ammoniakkmolekyl, mens en økning i totalt gasstrykk vil gi lavere pH og færre frie ammoniakkmolekyler. (22) Dersom det er høye konsentrasjoner av NH_3 i en råtnetank, kan det hemme aktiviteten til de metanproduserende bakteriene. For å bestemme mengde ammonium-nitrogen (NH_4 -N) i slam og rejektivann kan en ammonium-kyvettetest benyttes. Totalt ammoniakknitrogen (TAN), altså frie ammoniakknitrogen pluss ammoniumnitrogen, har en generell grenseverdi på rundt 1700-1800 mg/l for utråtninger med høg rate («high rate digesters») (23). Overskridelser av TAN-grenseverdien kan føre til reaktorfeil.

1.4.6 pH ved anaerob nedbrytning

Biogassprosesser vil vanligvis fungere best ved pH nøytrale verdier eller rett over det nøytrale (24). Det vil si pH mellom 7,0 og 8,5. For å holde pH nøytralt og stabil må nedbrytningsprosessen ha relativt høy og konstant alkalitet. Alkalitet er et mål på mengden av alkaliske stoff i biogassproduksjonen. Jo høyere alkaliteten er, jo bedre bufferkapasitet er det i prosessen hvilket fører til en mer stabil pH verdi. Alkalitet består primært av hydrogenkarbonation (HCO_3^-) som er i likevekt med karbondioksid (CO_2) (reaksjon R2). Karbondioksid og karbonationer bidrar også til alkalitet. Nedbrytningen av nitrogenrike stoff med høy andel av protein og aminosyrer, kan øke alkaliteten fordi ammoniakk som er frigjort kan reagere med oppløst karbondioksid til ammoniumhydrogenkarbonat.



CO_2 = karbondioksid

H_2CO_3 = karbonsyre

HCO_3^- = hydrogenkarbonation

CO_3^{2-} = karbonation

Alkalitet i en biogassprosess kan bli målt både ved total alkalitet (TA), og ved hydrogenkarbonat alkalitet (HA). Lav alkalitet kan føre til at syreproduksjonsprosessen blir for høy i forhold til kapasiteten til å produsere metangass. Dette er spesielt vanlig ved oppstart, overbelastning og temperatursvingninger, eller hvis mikroorganismene er utsatt for giftige stoffer som hemmer deres aktivitet. På den andre siden, er for høy alkalitet noe som kan føre til frigivelse av ammoniakk, som er hemmende for metanproduksjonen. Den kritiske grensen for dette kan variere mellom forskjellige prosesser basert på hvor stor grad mikroorganismene i prosessen tilpasser seg til høye ammoniakkkonsentrasjoner. Hvis alkaliteten av biogassprosessen ikke er stabil, burde dette bli sett på som et faresignal og årsaken burde undersøkes. En lav pH tyder på at forstyrrelser allerede har hatt en effekt, fordi en kraftig nedgang bare oppstår når mesteparten av alkaliteten har reagert og er konsumert.

1.4.7 Ko-nedbrytning av forskjellige substrater

Nedbrytning av substratblandinger gir generelt en høyere biogassproduksjon (24). Vanligvis når man har flere substrater vil det bli produsert mer gass enn ved bruk av rene substrater. Årsaken til dette er at et komplekst materiale er mer sannsynlig til å inkludere alle komponentene som er viktige for mikrobiell vekst. En slik blanding kan blant annet føre til en bedre tilgjengelighet av sporstoffer eller et mer gunstig $\frac{C}{N}$ -forhold (karbon/nitrogen -forhold). En variasjon av substrater er altså ønskelig fordi det øker sannsynligheten for en stabil prosess. Eksempler på kosubstrater man kan benytte i sammenheng med biogassproduksjon er matavfall fra husholdninger, husdyrgjødsel, halm og prosessavfall fra skogbruk. Råstoffene med høyest potensial for å produsere biogass er matavfall fra husholdninger og avløpsslam (7).

1.4.8 Fiskeslam som kosubstrat i anaerob nedbrytning av kommunalt avløpsslam

I 2022 kom det ut en artikkel om hvordan man kan maksimere utnyttelsen av tilgjengelige organiske ressurser ved å bruke fiskeslam som kosubstrat i anaerob nedbrytning av kommunalt avløpsslam (25). Utgangspunktet for dette interesseområde, er at akvakulturnæringen på Vestlandet er i vekst. Fiskeprodusenter på land søker aktivt etter kostnadseffektive løsninger for å håndtere den økende mengden utslipp. Ifølge artikkelen er det anslått at rundt 27000 tonn nitrogen og 9000 tonn fosfor går rett i havet hvert år som konsekvens av fiskeslamutslipp fra fiskeoppdrett i Norge. I denne studien ble det lagt vekt på å utnytte vått og tørket fiskeslam som kosubstrat sammen med avløpsslam fra et gitt

avløpsanlegg. Artikkelen fant at tørket og vått fiskeslam kunne utnyttes som substrat både ved termofile- og mesofile anaerobe utråtningsprosesser, med varierende effekter.

1.4.9 Saltinnhold i biogassproduksjon

Kationer er nødvendige for mikroorganismer, men ved høye konsentrasjoner kan kationer virke hemmende på biogassproduksjon (24, s.78). Høye saltkonsentrasjoner kan lede til kollaps av cellene til bakteriene ved at de frigjør vann i et forsøk på å fortynne saltkonsentrasjonene rundt cellen.

Industrielt avfall, for eksempel matavfall og avfall fra fiskeindustri, kan ha en høy startkonsentrasjon av salter. Kationer kan også bli frigitt i løpet av dekomponering av organiske substrater. Den optimale konsentrasjonen ved metanproduksjon er rundt 100-200 mg/l for natrium, 400 mg/l for kalium, 200 mg/l for kalsium og 720 mg/l for magnesium. Hemming av biogassproduksjon er blitt påvist ved saltkonsentrasjoner rundt 1500 mg/l, men konsentrasjoner opp mot 8000 mg/l kan fungere ved en gradvis tilnærming. Grenseverdier for saltinnhold vil variere basert på hvilket substrat som blir dekomponert. Sannsynligvis er dette relatert til at forskjellige organismer gror i forskjellige substrater, som må ha forskjellige egenskaper for å kunne håndtere høye saltkonsentrasjoner. Kationer kan ha en positiv effekt på biogassproduksjon ettersom det er vist at de kan redusere hemming fra høye ammoniumkonsentrasjoner.

Elektrisk ledningsevne kan benyttes som et mål på saltholdighet, også kjent som salinitet (26). De vanligste enhetene å oppgi ledningsevne med er mikrosiemens per cm ($\mu S/cm$) og millisiemens per cm (mS/cm).

1.4.10 Biorest fra biogassanlegg som gjødselvarer

Restproduktet etter anaerobisk utråtning kalles biorest. Næringsstoffene tilgjengelig i substratet som blir benyttet i biogassproduksjonen, blir frigitt og konsentrert i bioresten (24). Bioresten er dermed næringsrik og kan benyttes som organisk gjødsel i jordbruk og lignende dersom den er av god kvalitet (27). Biorest inneholder organisk materiale og gjødselstoffer, hvilket gjør det til et mer miljøvennlig alternativt fremfor kunstgjødsel og husdyrgjødsel (28). Dersom biogassproduksjonen gjennomføres med relativt rene substrater som møkk, matavfall og plantematerialer kan restproduktet bli benyttet som biogjødsel i matproduksjon (24).

Kvaliteten og næringsinnholdet er avhengig av flere faktorer som for eksempel hvilket substrat som er benyttet i prosessen, valg av forbehandlingsmetode og lagring.

I Sverige blir rundt 200 000 tonn biorest produsert årlig, hvor omtrent 90 prosent blir benyttet som gjødslingsmiddel (24). Sammenlignet med kompost er biorest et relativt nytt fenomen, og det er fremdeles bruk for mer forskning på bruken av biorest. Biorest har vist seg å fungere svært bra som gjødsel og kan gi lignende eller bedre avlinger enn mineralgjødsel. Biorest ser også ut til å ha positiv effekt på jordas kjemiske tilstand og struktur samt for mikroorganismer i jorda.

Forskriften om organiske gjødselvarer har som formål å gi retningslinjer for bruk av blant annet biorest som gjødselvarer (29). Forskriften er til for å legge til rette til at produkter kan utnyttes som en ressurs samtidig som man tar hensyn til forretningsmessige, helsemessige og hygieniske ulemper ved utnytting. Forskriften ivaretar hensynet til biologisk mangfold og bidrar til en miljøforsvarlig forvaltning av jordsmonnet. Tabell 2 inneholder maksimumsgrenser for tillatt innhold av tungmetaller ved ulike kvalitetsklasser. De ulike kvalitetsklassene har forskjellige bruksvilkår for utnyttelse av bioresten.

Tabell 2: Maksimumsgrenser for tillatt innhold av tungmetaller [mg/kg TS] ved de ulike kvalitetsklassene (27).

Kvalitetsklasser	[mg/kg TS]			
	0	I	II	III
Kadmium (Cd)	0,4	0,8	2	5
Bly (Pb)	40	60	80	200
Kvikksølv (Hg)	0,2	0,6	3	5
Nikkel (Ni)	20	30	50	80
Sink (Zn)	150	400	800	1500
Kobber (Cu)	50	150	650	1000
Krom (Cr)	50	60	100	150

2 Materialer og metoder

Dette kapittelet beskriver forsøksmetodene som ble benyttet i bacheloroppgaven for å svare på forskningsspørsmålene som ble gitt i introduksjonskapittelet. Hovedforsøkene i prosjektet er anaerob utråtning av substratblandinger av avløpsslam og fiskeslam, og fiskeslam alene ved bruk av AMPTS II. AMPTS II ble benyttet fordi det er det instrumentet som er kjøpt inn og er tilgjengelig ved Bergen Biogassanlegg i Rådalen, hvor forsøkene ble utført. Det er viktig å få gjennomført laboratorieskala batchforsøk for å få en indikasjon på hvilke samutråtningsforhold som bør benyttes i fremtidige pilotskalaforsøk.

De tre planlagte AMPTS II forsøkene ble gjennomført mellom 25. januar og 22. april ved Bergen Biogassanlegg i Rådalen. Disse ble utført for å bestemme biokjemisk metanpotensial (BMP) i substratblandinger. I tillegg ble det gjennomført målinger av prosent innhold av tørrstoff (% TS), glødetap (% Wv) og flyktig organisk materiale (% VS), pH, ledningsevne, temperatur og ammoniumanalyser før og etter den anaerobe utråtningen. Eksternt laboratorium, Hardanger miljøseniter AS, utførte analyser av utvalgte tungmetaller, alkali- og jordalkalimetaller, kjemisk oksygenforbruk (KOF), total-nitrogen, total-fosfor og ortofosfat av analyseprøvene før og etter utråtning.

2.1 Formler og ligninger

Bestemmelse av tørrstoff (TS), flyktig, organisk materiale (VS) og glødetap (Wv)

$$\% TS = \frac{\text{Masse digel med tørket prøve} - \text{masse tom digel}}{\text{Masse digel med våt prøve} - \text{masse tom digel}} * 100 \% \quad (1)$$

$$\% VS = \frac{\text{Masse digel med tørket prøve} - \text{masse digel med glødet prøve}}{\text{Masse digel med våt prøve} - \text{masse tom digel}} * 100 \% \quad (2)$$

$$\% Wv = \frac{\text{Masse digel med tørket prøve} - \text{masse digel med glødet prøve}}{\text{Masse digel med tørket prøve} - \text{masse tom digel}} * 100 \% \quad (3)$$

TS, *Total Solids*, er et mål på tørrstoffinnholdet i prøven (30). Her blir det undersøkt hvor mye av prøven som ikke inneholder vann. Rene, tørre digler blir fylt 2/3 fulle av slam, slamblandinger eller rene substrat som blir veid før og etter tørking i tørkeskap på 105 °C i 20 timer.

VS, *Volatile Solids*, er et mål på hvor mye organisk materiale det er i prøven (31). Her blir det undersøkt hvor stor del av nedbrytbart materiale det er i prøven. Prøven som man har tørket i tørkeskapet blir veid før og etter den har glødet i glødeskap i to timer på 550 °C. Den fraksjonen som går tapt i glødeovnen er den organiske fraksjonen av prøven.

Formel for beregning av biokjemisk metanpotensial med innveide verdier

$$BMP = \frac{V_S - V_B \cdot \frac{m_{IS}}{m_{IB}}}{m_{sS} \cdot VS_s} \quad (4)$$

Symbolforklaring:

- BMP er biokjemisk metanpotensial [Nml/g VS]
- V_S er akkumulert volum av biometan fra substratprøve [Nml]
- V_B er akkumulert volum av biometan fra blankprøve (podeslam) [Nml]. Her blir gjennomsnittet av parallellene til blankprøven benyttet.
- m_{IS} er masse av podeslam i substratprøveflasken [g]
- m_{IB} er masse av podeslam i blankprøveflasken [g]
- m_{sS} er masse av tilsatt substrat i substratprøveflasken [g]
- VS_s er andel organisk material målt i substrat

Bestemmelse av BMP, *Biokjemisk metanpotensial*, av et spesifikt substrat defineres av maksimum mengde av metangass som kan bli produsert av en anaerob nedbrytning (13).

Formel for beregning av utråtningsgrad

$$utråtningsgrad = \frac{\% VS \text{ før} - \% VS \text{ etter}}{\% VS \text{ før}} \quad (5)$$

Enveis ANOVA

For å undersøke om det er signifikant forskjell mellom noen forventningsverdier i et forsøk, utføres enveis ANOVA, også kjent som enveis variansanalyse, der hypotesene er (32):

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i = \dots = \mu_a$$

H_1 : ikke alle forventningsverdiene er like

ANOVA-testen forutsetter at målingene i en gruppe er uavhengige og normalfordelte, samt at alle målingene har samme standardavvik (32, s. 112). En variansanalyse gjennomføres som en F-test ved at F_{obs} blir sammenlignet med F_{krit} for å avgjøre om man skal påstå H_1 eller ikke.

Formel 6, SS_G , beregner kvadratsummen for differansene mellom middelerdiene for de ulike gruppene og den totale middelerdien.

$$SS_G = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{x}_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^a n_i * (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \quad (6)$$

Variansen mellom gruppene (formel 7) beregnes ved å dele SS_G på antall frihetsgrader.

Frihetsgrader er lik $a - 1$, der a er antall grupper.

$$S_G^2 = SS_G / (a - 1) \quad (7)$$

SS_E (formel 8) beregner kvadratsummen for differansene innad i gruppene.

$$SS_E = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad (8)$$

Variansen innad i gruppene (formel 9) beregnes ved å dele SS_E på antall frihetsgrader, $N-1$, der N er likt totalt antall målinger.

$$S_E^2 = SS_E / (N - 1) \quad (9)$$

For å sammenligne variansen innad i gruppene med variansen mellom gruppene beregnes:

$$F_{obs} = S_G^2 / S_E^2 \quad (10)$$

Med 5 % signifikansnivå beregnes F_{krit} med følgende formel:

$$F_{krit} = f_{0,05}(a - 1, N - 1) \quad (11)$$

F-tester

F-tester blir brukt til å sammenligne varians for to metoder. (32, s. 110) Dersom man sammenligner metodene A og B beregnes F_{obs} på følgende måte:

$$F_{obs} = s_A^2 / s_B^2, \text{ der } s_A^2 > s_B^2 \quad (12)$$

s_A^2 og s_B^2 er empiriske varianser beregnet ut ifra målingene til metodene. Størrelsen på F_{krit} er avhengig av testens signifikansnivå, antall frihetsgrader og om testen er en- eller tosidig.

Ensidig F-tester

Dersom metode B har høyere empirisk varians enn metode A kan man spørre: Gir metode B signifikant høyere varians enn metode A?

$$H_0: \sigma_B^2 \leq \sigma_A^2$$

$$H_1: \sigma_B^2 > \sigma_A^2$$

F_{obs} er et estimat for forholdstallet σ_B^2/σ_A^2 . (32, s.111). Med 5 % signifikansnivå leses F_{krit} av ved $\alpha = 0,05$. Formel for F_{krit} blir da:

$$F_{krit} = f_{0,05}(m_A, m_B) \quad (13)$$

m_A er frihetsgrader for metode A og m_B er frihetsgrader for metode B.

Er $F_{obs} > F_{krit}$, kan man med 95 % sikkerhet påstå at metode B har høyere varians enn metode A.

t-tester

I t-tester er standardavviket estimert med s (32, s. 97).

Hypotesene i en t-test kan skrives som følgende:

$$H_0: \mu_A - \mu_B = 0$$

$$H_1: \mu_A - \mu_B \neq 0$$

Metode når det ikke er en signifikant forskjell mellom s_A og s_B :

$$s = \sqrt{\frac{(n_A-1)s_A^2 + (n_B-1)s_B^2}{n_A+n_B-2}} \quad (14)$$

Formel 14 gir et samlet estimat for standardavviket.

$$t_{obs} = \frac{|\bar{x}_A - \bar{x}_B|}{s \sqrt{\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B}}} \quad (15)$$

t_{obs} sammenlignes med t_{krit} , som blir lest av fra kvantiltabellen for t-fordelinger. Ved tosidig t-test med 5 % signifikansnivå blir formelen for t_{krit} følgende:

$$t_{krit} = t_{0,025,m} \quad (16)$$

m er frihetsgradene og blir regnet ut ved hjelp av formel 17.

$$m = n_A + n_B - 2 \quad (17)$$

Metode når forskjellen mellom s_A og s_B er signifikant:

Dersom en F-test viser signifikant forskjell mellom s_A og s_B , kan det ikke beregnes et samlet estimat for s . t_{obs} må da beregnes slik:

$$t_{obs} = \frac{|\bar{x}_A - \bar{x}_B|}{\sqrt{\frac{s_A^2}{n_A} + \frac{s_B^2}{n_B}}} \quad (18)$$

Antall frihetsgrader beregnes på følgende måte:

$$m = \frac{\left(\frac{s_A^2}{n_A} + \frac{s_B^2}{n_B}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_A^2}{n_A}\right)^2}{n_A+1} + \frac{\left(\frac{s_B^2}{n_B}\right)^2}{n_B+1}} - 2 \quad (19)$$

m avrundes til nærmeste hele tall. t_{obs} sammenlignes med t_{krit} fra kvantiltabellen for t-fordelinger. Er $t_{obs} > t_{krit}$ påstår man H_1 .

Standardavvik

Empirisk standardavvik, s , kan defineres på følgende måte (32, s.13):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (20)$$

Konfidensintervall

En generell formel for beregning av konfidensintervall når standardavviket er ukjent, og det empiriske standardavviket s benyttes (32, s. 91):

$$\bar{x} \pm t_{\alpha,m} \frac{s}{\sqrt{n}} = \left[\bar{x} - t_{\alpha,m} \frac{s}{\sqrt{n}}, \bar{x} + t_{\alpha,m} \frac{s}{\sqrt{n}} \right] \quad (21)$$

$t_{\alpha,m}$ leses av i kvantiltabell for t-fordelinger. For 95 %-konfidensintervall er $\alpha = 0,025$. m er antall frihetsgrader og er lik $n - 1$, der n er lik antall målinger.

2.2 Instrumentering

- pH-elektrode: EasyPlus™ Titration and Analyser med EasyPlus™ Titration Sensor (EG11-BNC), produsert av Mettler Toledo. Elektroden oppbevares i 3M KCl løsning.
- HQ14d konduktivitetmåler, produsert av Hach.
- Automatisk metanpotensialtestsystem II (AMPTS II) består av tre enheter:
 - Inkuberingsenheten består av 15 600 ml minireaktorer med motorhode for omrøring. Podeslam og substrat fyller 400 ml av hver av beholderne. Glassbeholderne står i vannbad ved 54°C ved anaerobe forhold.
 - CO_2 -fangstenheten består av 15 100 ml flasker koblet til hver sin minireaktor. Flaskene fylles med 3M NaOH med indikator (thymolphthalein) som gjør at løsningene avfarges dersom de blir mettet med CO_2 (og delvis H_2S). Fangstenheten gjør at kun CH_4 går videre til gassdetektorenheten.
 - Gassdetektorenheten har magnetisk kontroll i bunnen. Når gass samles opp, blir magnetkraften brutt og flowcellen løftes. Hvert løft blir registrert i programvaren og blir logges som volum metan pr. tidsenhet.
 - Programvaren til AMPTS II heter «AMPTS II Software» og er installert på en pc som er koblet til instrumentet.
- Glødeovn, produsert av Nabertherm
- Termaks tørkeovn
- NOVA 60 Spektrofotometer, produsert av Spectroquant®
- Rotofix 32A sentrifuge, produsert av Hettich
- Vorteks-mikser, produsert av VWR International

2.3 Utstyr

2.3.1 Utstyr til AMPTS II forsøk

- Eksikator
- 5 kg plastbøtter til oppbevaring av podeslam
- 1 l plastflasker til oppbevaring av substratene
- Avtrekksskap og punktavtrekk
- Porselendigler
- Analysevekt Entris 2224I-1S Sartorius
- Bordvekt Entris 5201I-1S Sartorius

- Metallskjeer
- Kjøleskap
- Fryser

2.3.2 Utstyr til måling av pH, temperatur og ledningsevne

- Destillert vann
- Lofritt papir
- 150 ml begerglass
- Konduktivitetsmåler
- pH-elektrode (oppbevares i KCl løsning)

2.3.3 Utstyr til ammoniumanalyse

- Ammonium Cell Test (Spectroquant®): Spectroquant® kyvetter Ammonium, 4,0 - 80,0 mg/l NH₄-N
- NOVA 60 Spektrofotometer
- Destillert vann
- 50 ml begerglass
- 250 ml Erlenmeyerkolber
- Glasstrakter
- 100 ml målekolber
- Sentrifuge
- Whatman foldet filterpapir
- Vorteks-mikser
- Stativ til kyvetter
- Lofritt papir
- 50 ml Ultra High Performance sentrifugerør med tilhørende korker
- 20-200 µl Thermo Scientific FINNPIPETTE® F2 automatpipette
- 0,5-5 ml Thermo Scientific FINNPIPETTE® F2 automatpipette

2.4 Kjemikalier, reagenser, løsninger og prøver

2.4.1 Kjemikalier og løsninger

- 3M NaOH med tilsatt indikator bestående av thymolphtalein (0,4 %), etanol (99,5 %) og vann.

- Thymolphthalein

2.4.2 Prøvemateriale

- Tørket fiskeslam
- Vått fiskeslam
- Podeslam
- Hygienisert slam
- Cellulose, microcrystalline: kontrollprøve

Fiskeslammene er hentet fra et anlegg som benytter to ulike typer av landbaserte fiskeanlegg – gjennomstrømningsanlegg (FTS – flow through system) og RAS-anlegg. Sjøvann blir ikke benyttet i anlegget. Primærfiltreringen av vannet foregår med ulike trommelfiltre fra Hydrotch. Filtratet har et lavt tørrstoffinnhold, sannsynligvis i området 2-3 % TS. Sekundær filtreringen av vannet foregår med båndfilter. Filtratet har da sannsynligvis tørrstoffinnhold i området 15-25 % TS, avhengig av blant annet graden av overføring og produksjon. Dette våte fiskeslammet er ikke lagringsstabil og må behandles som en ferskvare. Videre blir slammet tørket i en friksjonstørke. Etter dette er TS vanligvis på rundt 90 %. Det tørre fiskeslammet er lagringsstabil. Derfor kan det samme tørre fiskeslammet bli benyttet i alle forsøksrunder, mens det våte fiskeslammet må være helt ferskt ved start av hver forsøksrunde.

2.5 Fremgangsmåte

2.5.1 Klargjøring av AMPTS II eksperiment

I dette bachelorprosjektet ble det benyttet podeslam fra råtnetankene ved Bergen biogassanlegg. Substratene i dette prosjektet var:

- Hygienisert avløpsslam, som kommer fra ulike avløpsrensplanter i Bergen Kommune
- Fiskeslam, henholdsvis tørket og vått, fra et RAS-anlegg på Vestlandet
- Ren cellulose, som blir benyttet som kontrollprøve og skal gi BMP i referanseområdet 350 ± 29 Nml/g VS (13).

Ferskt vått fiskeslam ble mottatt dagen før hver forsøksrunde. Tørket fiskeslam ble mottatt dagen før den første forsøksrunden begynte. Fiskeslammet ble holdt kjølig i kjøleskap for å øke holdbarheten på fiskeslammet (henholdsvis tørket og vått). På oppstartsdatoen for hver forsøksrunde ble podeslam og hygienisert slam tatt ut i hver sine 5 kg plastbøtter fra tanker i biogassanlegget.

Det våte fiskeslammet ble fortynnet til ønsket innhold av tørrstoff (% TS,) i en 2 L flaske. I hver sin 1 liter plastflaske ble det overført omtrent 5 dl av henholdsvis podeslam, hygienisert avløpsslam og fortynnet vått fiskeslam. Flaskene ble deretter fryst ned og sendt til Hardanger Miljøsender AS for analyse med analyseparameterne tørrstoff, glødetap, kobber, krom, bly, kvikksølv, nikkel, kadmium, arsen, natrium, kalium, magnesium, kalsium, total-nitrogen, kjemisk oksygenforbruk, total-fosfor og ortofosfat. Disse analysene blir utført med én parallell for hver prøve (rene substrater, substratblandinger, podeslam, podeslam tilsatt substrater, og biorester).

Videre ble % TS, prosent flyktig organisk tørrstoff (% VS) og prosent glødetap (% Wv) målt for podeslam og alle rene substrater i rene porselendigler. Dette ble utført med to paralleller per prøve. Hver digel som ble brukt for å måle % TS, % VS og % Wv hadde stått i tørkeovn i forkant av forsøket, for å så bli avkjølt i en eksikator i 10-15 minutter. Hver digel ble nummerert og veid inn på en analysevekt med fire desimaler. Alle innveiningene ble notert inn i en Excel-fil hvor utregningene av % TS, % VS og % Wv ble gjort. Videre ble hver digel fylt med ca. $\frac{3}{4}$ prøve og veid inn på samme analysevekt. Deretter ble prøvene satt til tørking i tørkeovn. Ovnene hadde en temperatur på 105 °C og digelene sto der over natten i ca. 20 timer. Når prøvene var ferdig tørket ble de plassert i en eksikator i ca. 10 minutter, for avkjøling. Når digelene hadde nådd romtemperatur ble de veid på analysevekten. Dette ble registrert i Excel-arket og resultatene ble brukt til å finne % TS ved hjelp av formel 1. Deretter ble digelene satt i glødeovn i 2 timer, som hadde en temperatur på 550 °C. Når prøvene var ferdig glødet, ble de igjen plassert i eksikator i omtrent 10-15 minutter for avkjøling. Ved romtemperatur ble digelene veid på analysevekt. Formel (2) og (3) ble brukt sammen med resultatene i Excel-arket til å finne % VS og % Wv for alle prøvene.

Substratblandinger ble laget ved hjelp av gjennomsnittlig målt % VS av de rene substratene (tabell 4). Substratblandingen bestod av 900 g hygienisert slam og beregnet masse substrat (se tabell 6). Eksempelberegninger for substratblandingen er vedlagt i appendiks D.

Substratblandingen for tørket og vått fiskeslam ble laget i hver sin 2 liter flaske. % TS, % VS og % Wv ble bestemt for substratblandingen på tilsvarende måte som for podeslam og rene substrater.

Gjennomsnittlig % VS fra substratblandingen ble lagt inn i programvaren til AMPTS II, og forholdet 3:1 av podeslam og substrat ble valgt. Programmet regnet ut hvor mye podeslam og

substrat som skulle tilsettes i hver reaktorflaske. Hver flaske skulle totalt inneholde 400 g prøve. Forsøksoppsettet til de ulike AMPTS II forsøkene er gitt i tabell 2, der hver av prøveblanding er kjørt med tre paralleller.

Tilsvarende prøveblandinger av podeslam og substrat ble laget i 2 liters flasker, der total masse til prøveblandingene var 1200 gram. Prøveblandingen med cellulose ble laget i en mindre plastflaske, der totalmassen til prøven var 400 gram. Prøveblandingene, som ikke inneholdt cellulose, skulle sendes til analysering hos Hardanger Miljøsenster AS. Omtrent 0,5 liter av hver prøveblanding ble overført til hver sin plastprøveflaske og deretter fryst frem til de skulle sendes. Alle prøveblandingene ble analysert på biogasslaboratoriet. For hver prøveblanding ble det målt pH, ledningsevne og temperatur og gjort analyser på ammoniuminnhold, % TS, % VS og % Wv.

CO₂ – fangstenheten (enhet B) inneholdt 15 glassbeholdere fylt med en løsning av natriumhydroksid (NaOH), thymolphthalein, etanol og vann. Løsningen ble laget i forkant av ekstern veileder grunnet sikkerhetshensyn. Ekstern veileder lagde en 3M NaOH løsning av NaOH pellets i 2000 ml rent vann. 40 mg Thymolphthalein (0,4 %), 9 ml etanol (99,5 %) og 1 ml vann ble tilsatt i et beger. Ekstern veileder overførte 10 ml av løsningen i begeret med 2000 ml løsningen av 3 M NaOH og blandet. 80 ml av denne blandingen ble overført av bachelorgruppen til hver av de 100 ml glassflaskene. Hver flaske ble først lukket med et lokk som hadde to fester til rør på seg, og deretter ble det skrudd en ny kork over (som var åpen på midten av korkehodet). Til slutt ble 15 ferdig oppkuttet biter av Tygon® rør, bøyd i en U-form, festet med endene i rørfestene til lokkene. For å klargjøre gassdetektorenheten (enhet C) ble vannbadet ble fylt med rensset vann til et merket nivå.

På hver av de 15 reaktorflaskene ble det skudd på et plastikklokk med 2 rørfester på toppen og et hull. Deretter ble det plassert et motorhode med en rørepinne som passet hullet i lokket på hver flaske. Reaktorflaskene ble plassert i enhet A (inkuberingsenheten) etter et visst mønster, og vannbadet ble fylt opp med rensset vann slik at vannet nådde over innholdet i flaskene. 15 biter av korte Tygon® rør ble festet til det ene røret på plastikk lokkene til reaktorflaskene. På hvert av de korte rørene ble det festet på en gul stopper som gjorde røret gasstett. Den ene enden av Tygon® røret på reaktorflaskene ble så festet til enhet C, etter et gitt mønster. Videre ble 15 lange biter av Tygon® rør, festet til det andre røret på hvert plastikklokk til flaskene i enhet A. Endene på de lange Tygon® rørene ble så festet til det ene røret på

reaktorflaskene i enhet B. Motorhodene i enhet A ble seriekoblet med motorkabler, og koblet til en detektor.

2.5.2 AMPTS II eksperiment

Kontrollsidene ble åpnet i dataprogrammet til AMPTS II. Målingen av prosessen i hver reaktorflaske ble startet ved å klikke på startknappen til hver celle. Som en kontroll ble hver flowcelle i enhet C fysisk løftet to ganger mens graf-siden sto fremme på pc-en. Det ble kontrollert at det kom grafer i diagrammet for hvert løft. På kontrollsidene ble hver celle stoppet ved å klikke på pauseknappen etterfulgt av stoppknappen for hver celle.

Det termostatiske vannbadet ble slått på ved hovedbryteren, og det ble undersøkt om et grønt lys lyste opp. Videre ble driftstemperaturen kontrollert og endret om nødvendig. Tygon®-røret som var koblet til flaske 1 i enhet A, ble koblet fra enhet C og lagt i et beger med vann.

Det andre Tygon®-røret på flaske 1 i enhet A som var stengt med en gul stopper ble åpnet slik at nitrogengass kunne strømme gjennom røret. Flasken og røret ble så skyllet med en lav «gass flow» (2.5 til 10 l/min) i ca. 60 sekunder. Deretter ble stopperen lukket igjen, nitrogentilførselen ble frakoblet og Tygon®-røret ble koblet til enhet C igjen. Dette ble repetert på alle reaktorflaskene som ble brukt i forsøket. Når alle flaskene var blitt spylt, ble hver flow celle i enhet C åpnet manuelt for å frigi eventuell gjenværende gass. Kontrollsidene ble åpnet og alle cellene ble aktivert for dataregistrering ved å klikke på start knappen for hver celle. Fart og intervaller for motorene ble stilt inn på venstre side av programsiden. «On» og «Apply motor settings» ble trykket på, som gjorde at omrøring startet i alle reaktorflaskene.

Det ble satt opp tre forskjellige forsøk hvor det skulle analyseres for biokjemisk metanpotensial, gitt i tabell 3. I forsøk 2 ble % VS i fiskeslamsubstratprøvene økt fra 25 % VS til 40 % VS. Da ble % VS fra hygienisert slam redusert i fiskeslamsubstratprøvene fra 75 % VS til 60 % VS. I det siste forsøket ønsket man å se hvilke BMP verdier man fikk ved kun rent fiskeslam som substrat, både vått og tørket.

Tabell 3: Forsøksoppsett til AMPTS II forsøkene.

AMPTS nr.	Forsøk #1 Start-dato: 21.01.22 Slutt-dato: 25.02.22	Forsøk #2 Start-dato: 08.03.22 Slutt-dato: 08.04.22	Forsøk #3 Start-dato: 22.03.22 Slutt-dato: 22.04.22
1-3	Podeslam (blankprøve)	Podeslam (blankprøve)	Podeslam (blankprøve)
4-6	Podeslam + hygienisert avløpsslam	Podeslam + hygienisert avløpsslam	Podeslam + hygienisert avløpsslam
7-9	Podeslam + hygienisert avløpsslam + 25 % VS fra vått fiskeslam	Podeslam + hygienisert avløpsslam + 40 % VS fra vått fiskeslam	Podeslam + rent fiskeslam (vått)
10-12	Podeslam + hygienisert avløpsslam + 25 % VS fra tørket fiskeslam	Podeslam + hygienisert avløpsslam + 40 % VS fra tørket fiskeslam	Podeslam + rent fiskeslam (tørket)
13-15	Podeslam + cellulose (positiv kontrollprøve)	Podeslam + cellulose (positiv kontrollprøve)	Podeslam + cellulose (positiv kontrollprøve)

Inkuberingsenheten ble kontrollert periodevis, i tilfelle omrøringen ikke fungerte som den skulle. Lutløsningen ble tilsatt en pH-indikator for å kontrollere den syrebindende kapasiteten til løsningen (13). Dersom det ved kontroll ble observert at fargen på lutløsningen begynte å bli svakere, ble løsningen byttet ut. Det ble også kontrollert at vannivået var innenfor den anbefalte høyden i vannbadet. Destillert vann ble tilført vannbadet ved behov.

2.5.3 Avslutning av AMPTS II eksperiment

AMPTS-forsøkene ble avsluttet når produsert metangass var mindre eller lik 5 milliliter per dag (13, s. 48). Ved avslutning lastet man ned en rapport fra «Download report» menyen. Rapporten overførte man deretter til en minnepenn for så å lagre filen på en privat pc. Rapporten ble kontrollert før man gikk videre med avslutningen av forsøket. Kontrollsiden ble åpnet, og loggingen ble stoppet ved å trykke på «Pause»-knappen etterfulgt av «Stop»-

knappen for hver celle. Reaktormikserne ble stoppet på kontrollsiden under motorkontroll. Der ble det valgt «Off» og «Apply motor settings». Videre ble det termostatiske vannbadet skrudd av med hovedbryteren. Alle rør og motorkabler ble frakoblet. Vannbadet ble tømt manuelt. Alt utstyr ble demontert og vasket. Til slutt ble dataene gått igjennom og bearbeidet i etterkant. Akkumulert volum fra hver minireaktor ble valgt fra den siste dagen der alle minireaktorene produserte nok metangass til at det ble registrert. BMP ble så regnet ut (formel 4) med tilhørende 95 %-konfidensintervall.

For de utrånende prøvene i enhet A ble det målt % TS, % VS, % Wv, pH, ledningsevne og ammoniuminnhold på samme måte som ved før utråtning. Biorestene ble deretter fryst ned for lagring før prøvene fra forsøksrunden ble sendt til analyse ved Hardanger Miljøsender AS.

2.5.4 Statistiske signifikanstester for BMP-verdier

Statistiske tester ble gjennomført etter hver AMPTS-forsøksrunde for å fastslå om BMP-gjennomsnittene var signifikant forskjellige på 5 %-signifikansnivå. Enveis variansanalyse (ANOVA) ble gjennomført uten blankprøveparallelene og kontrollprøveparallelene. Dersom enveis ANOVA viste at F_{obs} (formel 10) var mindre enn F_{krit} (formel 11), kunne man ikke påstå at forventningsverdiene (BMP-gjennomsnittene) var forskjellige. Dersom F_{obs} var større enn F_{krit} , påstod man at minst to av forventningsverdiene var forskjellige, og man måtte da teste BMP-verdiene videre med F-test: to utvalg for varianser. F-tester sammenligner to varianser om gangen. Når man gjennomfører F-test må man markere prøveparallelene med høyest varians først, slik at man får en F_{obs} (formel 12) som er større enn 1. Dersom F_{obs} i F-testen blir høyere enn F_{krit} (formel 13), så betyr det at den ene av de to variansene er høyere enn den andre. Man må da gå videre med t-test med antatt ulike varianser (formel 18). Dersom F-testen ga F_{obs} mindre enn F_{krit} kunne man ikke påstå at den ene variansen ikke var signifikant høyere enn den andre. Da måtte man gå videre med en t-test med antatt like varianser. Dersom denne type test ga t_{obs} (formel 15) mindre enn t_{krit} (formel 16), kunne man ikke påstå at BMP-gjennomsnittene var signifikant forskjellige. Ved t_{obs} større enn t_{krit} , kunne man påstå at BMP-gjennomsnittene var signifikant forskjellige på gitt signifikansnivå (5 %).

2.5.5 Ammoniumanalyse

Det ble gjennomført ammoniumanalyse av alle slamblandingene som var i AMPTS-forsøkene. Slamblandingene ble testet i ammoniumceller både før og etter utråtning. I hver

ammoniumanalyse ble det analysert to paralleller av hver slamblanding. I tillegg ble det målt på en kontrollprøve bestående av rent vann, en negativ prøve. Alle prøvene var i romtemperatur (ca. 18-25 °C) før analyse. Fremgangsmetoden for ammoniumanalysen er vedlagt i appendiks A.

Konsentrasjonen av $NH_4 - N$ i de fortynnede prøvene ble lest av fra spektrofotometeret og notert i en Excel-fil. For å få de ufortynnede konsentrasjonene måtte de avleste verdiene ganges med fortynningsfaktoren som var lik 100. Til slutt ble gjennomsnittet av de parallelle prøvene regnet ut i mg/l.

3 Resultater

I dette kapittelet blir det gjort rede for de resultatene som ble oppnådd fra analysene og målingene beskrevet i material- og metodekapittelet. Resultatene fra statistiske tester for BMP-verdiene er også presentert. Alle gjennomsnitt i resultatkapittelet er regnet ut med alle desimaler i Excel.

3.1 Bestemmelse av % TS, % VS og % Wv

Digler med substrat, substratblandinger og analyseprøver ble veid inn med to paralleller på analysevekt, før og etter utråtning. Massene er gitt i appendiks B i tabell 14 og 15. Disse ble benyttet i formel 1, 2, 3 for å regne ut % tørrstoff (TS), flyktige faste stoffer (VS) og glødetap (Wv). Dette er gitt i appendiks C, i tabell 16 og 17.

Gjennomsnittet av prøveparallellene for % TS, % VS og % Wv, med tilhørende standardavvik er gitt i tabell 4 og 5. Alle standardavvik er beregnet ved hjelp av formel 20. Tabell 4 inneholder gjennomsnittlige resultater før utråtning, og tabell 5 inneholder gjennomsnittlige resultater etter utråtning.

Tabell 4: Gjennomsnittlige resultater for % TS, % VS og % Wv med tilhørende standardavvik i forskjellige slamblandinger før utråtning.

Forsøksrunde	Dato	Prøve	% TS gjennomsnitt	% VS gjennomsnitt	% Wv gjennomsnitt
1	25.01.22	Pode	2,75 ± 0,06	1,7267 ± 0,0009	61,87 ± 0,04
		Hyg	4,783 ± 0,006	3,58 ± 0,01	74,8 ± 0,1
		VFS	9,6 ± 0,2	8,1 ± 0,2	84,2 ± 0,7
		TFS	94,336 ± 0,004	65,7 ± 0,4	69,6 ± 0,4
		Cellulose	95,078 ± 0,009	88,36 ± 0,02	92,93 ± 0,02
	26.01.22	Hyg + 25 % VFS	5,42 ± 0,03	4,20 ± 0,02	77,5 ± 0,1
		Hyg + 25 % TFS	6,7 ± 0,6	5,2 ± 0,5	77,4 ± 0,8
	27.01.22	Pode + hyg	3,11 ± 0,01	2,04 ± 0,01	65,4 ± 0,1
		Pode + hyg + 25 % VS VFS	3,099 ± 0,009	2,04 ± 0,01	65,8 ± 0,2

		Pode + hyg + 25 % VS TFS	$3,17 \pm 0,0003$	$2,089 \pm 0,003$	$65,8 \pm 0,1$
		Pode + cellulose	$3,39 \pm 0,02$	$2,354 \pm 0,008$	$69,5 \pm 0,1$
2	08.03.22	Pode	$2,68 \pm 0,01$	$1,630 \pm 0,003$	$60,80 \pm 0,07$
		Hyg	$4,596 \pm 0,002$	$3,628 \pm 0,009$	$78,95 \pm 0,02$
		VFS	$10,29 \pm 0,03$	$8,76 \pm 0,07$	$85,1 \pm 0,4$
		TFS	$94,08 \pm 0,02$	$65,75 \pm 0,09$	$69,9 \pm 0,1$
		Cellulose	$95,11 \pm 0,01$	$93,7 \pm 0,7$	$98,5 \pm 0,7$
	09.03.22	Hyg + 40 % VFS	$5,9 \pm 0,1$	$4,9 \pm 0,1$	$82,6 \pm 0,5$
		Hyg + 40 % TFS	$7,69 \pm 0,02$	$6,22 \pm 0,02$	$80,93 \pm 0,01$
	10.03.22	Pode + hyg	$2,628 \pm 0,007$	$1,73 \pm 0,02$	$65,9 \pm 0,9$
		Pode + hyg + 40 % VFS	$3,154 \pm 0,006$	$2,038 \pm 0,004$	$64,63 \pm 0,02$
		Pode + hyg + 40 % TFS	$3,329 \pm 0,002$	$2,143 \pm 0,006$	$64,4 \pm 0,1$
		Pode + cellulose	$3,496 \pm 0,004$	$2,345 \pm 0,007$	$67,1 \pm 0,1$
	3	22.03.22	Pode	$2,74 \pm 0,06$	$1,74 \pm 0,01$
Hyg			$5,17 \pm 0,02$	$4,09 \pm 0,02$	$79,0 \pm 0,1$
VFS			$9,955 \pm 0,005$	$8,68 \pm 0,02$	$87,1 \pm 0,2$
TFS			$94,211 \pm 0,008$	$69,0 \pm 0,1$	$73,2 \pm 0,2$
Cellulose			$95,152 \pm 0,003$	$93,4 \pm 0,3$	$98,1 \pm 0,3$
24.03.22		Pode + hyg	$3,07 \pm 0,005$	$2,05 \pm 0,001$	$66,66 \pm 0,08$
		Pode + VFS	$3,21 \pm 0,02$	$2,18 \pm 0,02$	$67,8 \pm 0,2$
		Pode + TFS	$3,43 \pm 0,01$	$2,31 \pm 0,01$	$67,2 \pm 0,2$
		Pode + cellulose	$3,30 \pm 0,01$	$2,4 \pm 0,2$	74 ± 7

Tabell 5: Gjennomsnittlige resultater for % TS, % VS og % Wv med tilhørende standardavvik i forskjellige slamblandinger etter utråtning.

Forsøksrunde	Dato	Prøve	% TS gjennomsnitt	% VS gjennomsnitt	% Wv gjennomsnitt
1	24.02.22	Pode	2,55 ± 0,01	1,51 ± 0,01	59,2 ± 0,3
		Pode + hyg	2,58 ± 0,01	1,498 ± 0,006	58,04 ± 0,04
		Pode + hyg + 25 % VFS	2,591 ± 0,007	1,52 ± 0,02	58,9 ± 0,7
		Pode + hyg + 25 % TFS	2,642 ± 0,006	1,543 ± 0,003	58,39 ± 0,01
		Pode + cellulose	2,64 ± 0,02	1,56 ± 0,02	59,3 ± 0,2
2	08.04.22	Pode	2,40 ± 0,01	1,3656 ± 0,0003	56,9 ± 0,2
		Pode + hyg	2,53 ± 0,04	1,46 ± 0,02	57,73 ± 0,03
		Pode + hyg + 40 % VFS	2,44 ± 0,006	1,417 ± 0,002	58,02 ± 0,07
		Pode + hyg + 40 % TFS	2,57 ± 0,01	1,476 ± 0,009	57,31 ± 0,09
		Pode + cellulose	2,494 ± 0,003	1,424 ± 0,004	57,1 ± 0,1
3	21.04.22	Pode	2,399 ± 0,007	1,418 ± 0,004	59,1 ± 0,3
		Pode + hyg	2,54 ± 0,02	1,50 ± 0,02	58,9 ± 0,2
		Pode + VFS	2,59 ± 0,03	1,55 ± 0,02	59,9 ± 0,2
		Pode + TFS	2,779 ± 0,001	1,639 ± 0,009	59,0 ± 0,3
		Pode + cellulose	2,539 ± 0,003	1,496 ± 0,002	58,93 ± 0,03

Tabell 6 viser hvor mye fiskeslam som måtte tilsettes for å lage hver av substratblandingen. Den ønskede mengden fiskeslam var beregnet ut fra gjennomsnittlig % VS vist i tabell 4, før utråtning. Eksempelberegning av innveid masse av fiskeslam (henholdsvis tørket og vått) basert på % VS fra fiskeslam i prøven finnes i appendiks D.

Tabell 6: Masse av fiskeslam som måtte tilsettes 900 g hygienisert slam for at fiskeslammet skulle bidra med ønsket % VS i substratblandingene.

Forsøksserie	Substratblanding	Ønsket masse av fiskeslam (g)	Faktisk innveid masse av fiskeslam (g)	Innveid masse av hygienisert slam (g)
1	Hygienisert slam + tørket fiskeslam 25 % VS	16,3	16,3	900,0
	Hygienisert slam + vått fiskeslam 25 % VS	132,9	132,9	900,0
2	Hygienisert slam + tørket fiskeslam 40 % VS	33,1	33,1	900,0
	Hygienisert slam + vått fiskeslam 40 % VS	248,6	248,6	900,0

3.2 Bestemmelse av pH, temperatur og ledningsevne

Substrat og substratblandinger ble målt for pH, temperatur og ledningsevne, før og etter utråtning for alle forsøksrundene. Dette er gitt til tabell 7 og 8. For både substrater og substratblandinger økte pH, temperatur og ledningsevne etter utråtning i AMPTS II. Verdiene for pH før utråtning i første forsøksrunde lå i område 5,241 til 8,105, hvor vått fiskeslam alene hadde lavest pH mens podeslam sammen med cellulose var høyest. Av substratene hadde podeslam høyest pH (7,982). Etter utråtning økte området til verdiene fra 8,162 til 8,225, hvor hygienisert slam sammen med 25 % VS tørket fiskeslam hadde lavest pH mens podeslam sammen med cellulose hadde høyest. Av substratene hadde podeslam sammen med hygienisert slam og 25 % VS vått fiskeslam høyest pH (8,2).

Ved andre forsøksrunde lå pH før utråtning i område 5,856 til 7,941, hvor vått fiskeslam alene hadde lavest pH mens podeslam med cellulose hadde høyest. Podeslam sammen med hygienisert slam hadde høyest pH blant substratene før utråtning (7,761). Etter utråtning lå verdiene i området 8,125 til 8,183 hvor podeslam med hygienisert slam hadde lavest pH, mens podeslam sammen med hygienisert slam og 40 % VS vått fiskeslam hadde høyest pH.

I tredje forsøksrunde lå verdiene for pH før utråtning i området 5,036 til 7,952, der vått fiskeslam alene hadde lavest pH mens podeslam med cellulose hadde høyest. Etter utråtning økte verdiene til et område fra 8,182 til 8,218, der podeslam med vått fiskeslam hadde lavest pH mens podeslam med hygienisert slam var høyest.

Temperaturen for slamblandingene i første forsøksrunde før utråtning lå i område fra 12,4 til 22,5 °C, mens etter utråtning lå temperaturen i område fra 23,7 til 26,9 °C. I andre forsøksrunde lå temperaturen i område fra 12,1 til 24,7 °C, og i område 26,1 til 27,0 °C etter utråtning. I tredje forsøksrunde varierte temperaturen fra 18,6 til 29,7 °C før utråtning, og 25,9 til 27,4 °C etter utråtning.

Ledningsevnen i første forsøksrunde til slamblandingene før utråtning varierte fra 2,57 til 9,55 mS/cm, hvor vått fiskeslam alene hadde lavest ledningsevne mens podeslam alene hadde høyest verdi. Etter utråtning varierte ledningsevnen fra 10,22 til 11,79 mS/cm, hvor podeslam sammen med cellulose hadde lavest verdi mens hygienisert slam sammen med 25 % VS vått fiskeslam hadde høyest verdi. I andre forsøksrunde lå ledningsevnen i område fra 1,331 til 8,84 mS/cm, der vått fiskeslam alene hadde lavest mens podeslam var høyest. Etter utråtning varierte verdiene fra 9,95 til 11,27 mS/cm hvor podeslam hadde lavest, mens podeslam sammen med hygienisert slam og 40 % VS tørket fiskeslam hadde høyest. Ledningsevnen i tredje forsøksrunde varierte fra 1,772 til 10,52 mS/cm, hvor vått fiskeslam alene hadde lavest mens podeslam var høyest. Etter utråtning økte ledningsevnen til område 10,98 til 12,15 mS/cm, der podeslam hadde lavest og podeslam sammen med tørket fiskeslam var høyest. Vanligvis er usikkerheten til pH-meter $\pm 0,02$, men i tabell 7 og 8 er pH oppgitt med tre desimaler siden det var det som ble vist på displayet til pH-meteret. Usikkerheten i temperatur ble estimert til å være $\pm 0,01$. Usikkerheten i ledningsevnen ble estimert til å være $\pm 0,01$.

Tabell 7: Måleresultater for pH, temperatur og ledningsevne i rent podeslam, rene substrater og i forskjellige slamblandinger før utråtning.

Forsøksrunde	Dato	Prøve	pH	Temperatur [°C]	Ledningsevne [mS/cm]
1	25.01.22	Pode	7,982	22,5	9,55
		Hyg	6,362	22,4	4,26
		VFS	5,241	17,1	2,57
	26.01.22	Hyg + 25 % VS VFS	6,101	12,4	3,03
		Hyg + 25 % VS TFS	6,278	12,6	3,02
	27.01.22	Pode + hyg	7,840	19,7	7,62
		Pode + hyg + 25 % VS VFS	7,837	19,9	8,08
		Pode + hyg + 25 % VS TFS	7,968	20,1	7,84
		Pode + cellulose	8,105	19,7	8,05
	2	08.03.22	Pode	7,681	24,7
Hyg			6,269	20,5	5,33
VFS			5,856	16,7	1,331
09.03.22		Hyg + 40 % VS VFS	5,928	12,1	3,64
		Hyg + 40 % VS TFS	6,037	13,2	4,14
10.03.22		Pode + hyg	7,761	18,8	7,36
		Pode + hyg + 40 % VS VFS	7,736	19,1	7,43
		Pode + hyg + 40 % VS TFS	7,770	19,1	4,34
		Pode + cellulose	7,941	19,0	7,53
			Pode	7,834	29,7

3	22.03.22	Hyg	6,105	26,0	6,33
		VFS	5,036	18,6	1,772
	23.03.22	Pode + hyg	7,814	19,3	8,00
		Pode + VFS	7,708	19,9	8,31
		Pode + TFS	7,86	19,7	8,54
		Pode + cellulose	7,952	19,8	8,49

Tabell 8: Måleresultat på pH, temperatur og ledningsevne i rent podeslam og i forskjellige slamblandinger etter utråting.

Forsøksrunde	Dato	Prøve	pH	Temperatur [°C]	Ledningsevne [mS/cm]
1	24.02.22	Pode	8,172	26,9	10,79
		Pode + hyg	8,182	26,7	10,77
		Pode + hyg + 25 % VFS	8,2	25,9	11,19
		Pode + hyg + 25 % TFS	8,162	25,6	11,05
		Pode + cellulose	8,225	23,7	10,22
2	07.04.22	Pode	8,130	26,4	9,95
		Pode + hyg	8,125	26,9	10,26
		Pode + hyg + 25 % VFS	8,183	26,1	11,01
		Pode + hyg + 25 % TFS	8,144	27,0	11,27
		Pode + cellulose	8,143	26,2	10,78
3	21.04.22	Pode	8,209	26,4	10,98
		Pode + hyg	8,218	25,9	11,21
		Pode + VFS	8,182	27,4	11,87
		Pode + TFS	8,207	26,6	12,15

		Pode + cellulose	8,124	27,3	11,15
--	--	---------------------	-------	------	-------

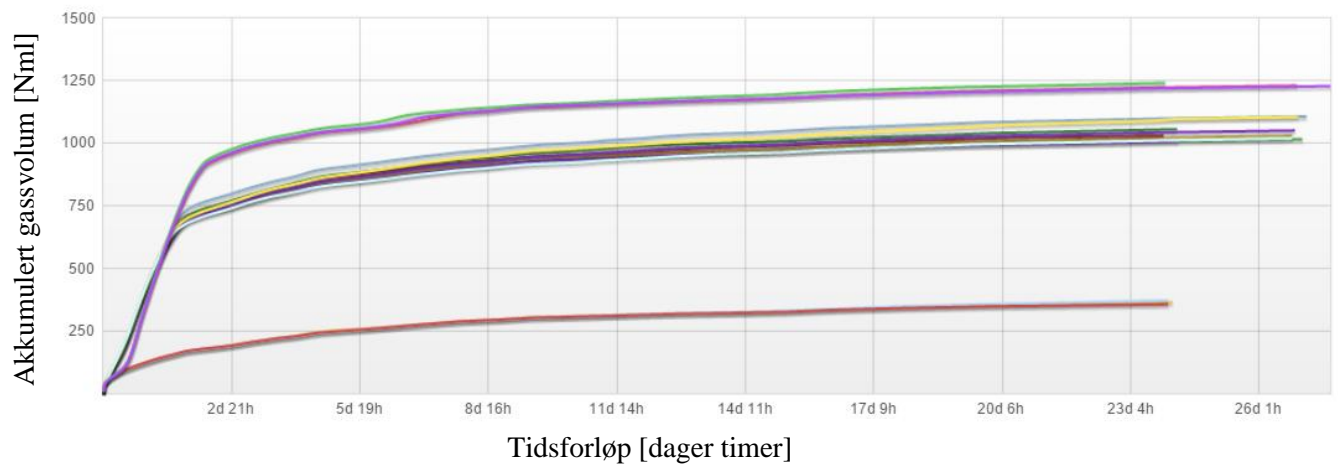
3.3 Biokjemisk metanpotensial (BMP) fra AMPTS II forsøkene

Alle AMPTS II forsøkene foregikk i ca. 24 dager. Rådata for det akkumulerte gassvolumet [Nml] funnet ved AMPTS for alle forsøksrunder er gitt i appendiks F (tabell 19). Rådataene viser det akkumulerte metangassvolumet for hver dag etter start-dato til slutt-dato. BMP for alle forsøksrundene, vist i tabell 9, ble beregnet ved hjelp av formel 4 for alle prøvene som inneholdt podeslam og ko-substrat. I appendiks G er det gitt tabeller med nødvendige data for beregning av BMP i tabell 22, 23 og 24. Gjennomsnittene av BMP og % forskjell sammenlignet med avløpsslam alene (pode + hyg) for alle forsøksrundene er vist i tabell 9, og gjennomsnittene er grafisk presentert i figur 11, 12 og 13. I første forsøksrunde varierte BMP gjennomsnittene fra 353 til 379 Nml/g VS, der podeslam med hygienisert slam hadde lavest verdi mens podeslam med cellulose hadde høyest. Av substratene, hadde podeslam sammen med hygienisert slam og 25 % VS vått fiskeslam høyest BMP gjennomsnitt (365 Nml/g VS). For andre forsøksrunde varierte BMP-verdiene fra 356 til 387 Nml/g VS, der podeslam sammen med hygienisert slam og 40 % VS vått fiskeslam var lavest mens pode sammen med hygienisert slam og 40 % VS tørket fiskeslam var høyest. I tredje forsøksrunde varierte BMP-verdiene fra 375 til 440 Nml/g VS, der podeslam med cellulose var lavest mens podeslam med tørket fiskeslam var høyest. Standardavvikene til gjennomsnittene ble beregnet ved hjelp av formel 21. Figur 5, 6 og 7 viser grafene over det akkumulerte gassvolumet for henholdsvis forsøksrunde 1, 2 og 3.

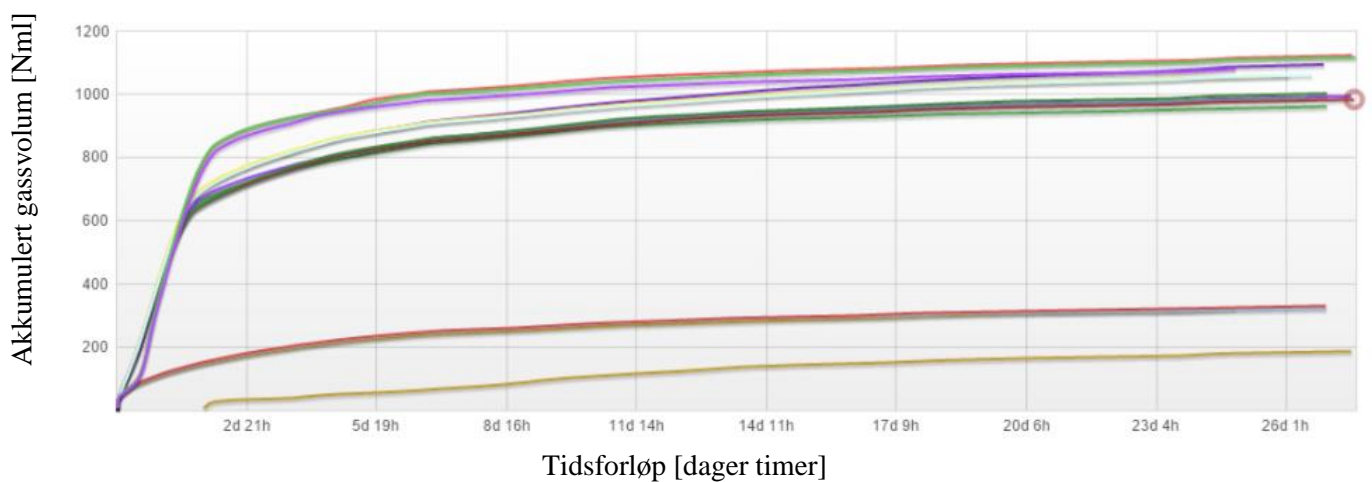
Tabell 9: Biokjemisk metanpotensial av analyseprøver med tilhørende standardavvik til gjennomsnittene.

Forsøksrunde	Prøvenavn	BMP [Nml/g VS]	BMP gjennomsnitt [Nml/g VS]	% forskjell til pode og hyg	
1	Pode + hyg 1	350,76	353 ± 4		
	Pode + hyg 2	349,41			
	Pode + hyg 3	357,41			
	Pode + hyg + 25 % VFS 1	383,61	365 ± 17		3,5
	Pode + hyg + 25 % VFS 2	350,44			
	Pode + hyg + 25 % VFS 3	362,02			
	Pode + hyg + 25 % TFS 1	345,93	349 ± 20		-1,1
	Pode + hyg + 25 % TFS 2	369,77			
	Pode + hyg + 25 % TFS 3	330,11			

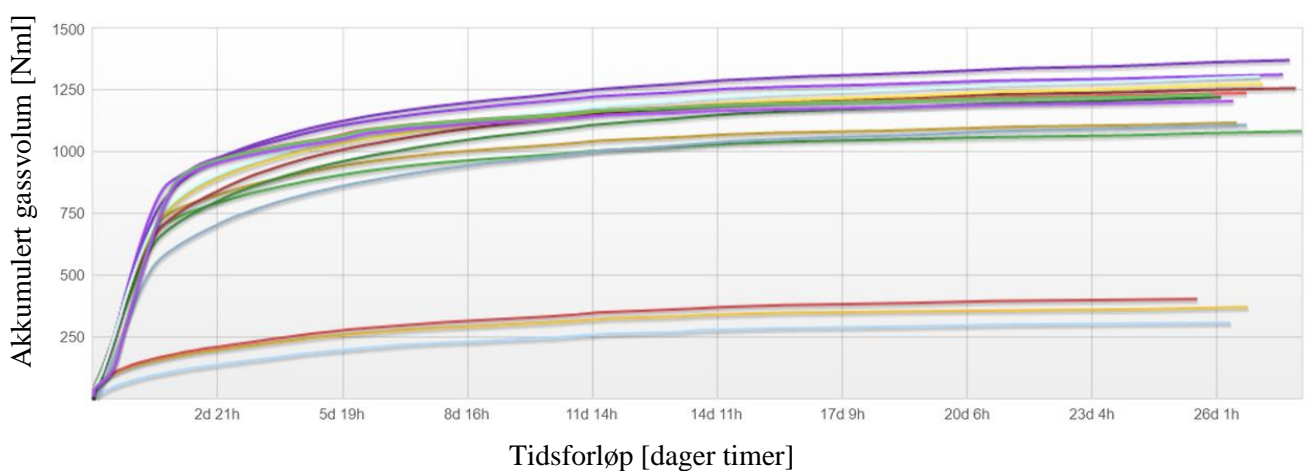
	Pode + cellulose 1	376,75	379 ± 4	7,0
	Pode + cellulose 2	384,52		
	Pode + cellulose 3	375,70		
2	Pode + hyg 1	357,96	366 ± 11	
	Pode + hyg 2	373,18		
	Pode + hyg + 40 % VFS 1	355,34		
	Pode + hyg + 40 % VFS 2	352,07	356 ± 5	-2,6
	Pode + hyg + 40 % VFS 3	361,89		
	Pode + hyg + 40 % TFS 1	398,26		
	Pode + hyg + 40 % TFS 2	379,86	387 ± 10	5,4
	Pode + hyg + 40 % TFS 3	381,44		
	Pode + cellulose 1	369,85		
	Pode + cellulose 2	366,97	363 ± 9	-0,6
	Pode + cellulose 3	353,10		
3	Pode + hyg 1	373,61	416 ± 59	
	Pode + hyg 2	483,74		
	Pode + hyg 3	392,13		
	Pode + VFS 1	354,79	388 ± 29	-7,2
	Pode + VFS 2	407,23		
	Pode + VFS 3	402,68		
	Pode + TFS 1	456,76	442 ± 14	5,8
	Pode + TFS 2	427,90		
	Pode + TFS 3	441,32		
	Pode + cellulose 1	381,28	376 ± 7	-10,7
	Pode + cellulose 2	379,47		
	Pode + cellulose 3	367,62		



Figur 3: Det akkumulerte gassvolumet plottet mot tidsrommet første forsøksrunde har foregått i, for alle 15 prøvene som ble testet for AMPTS II.

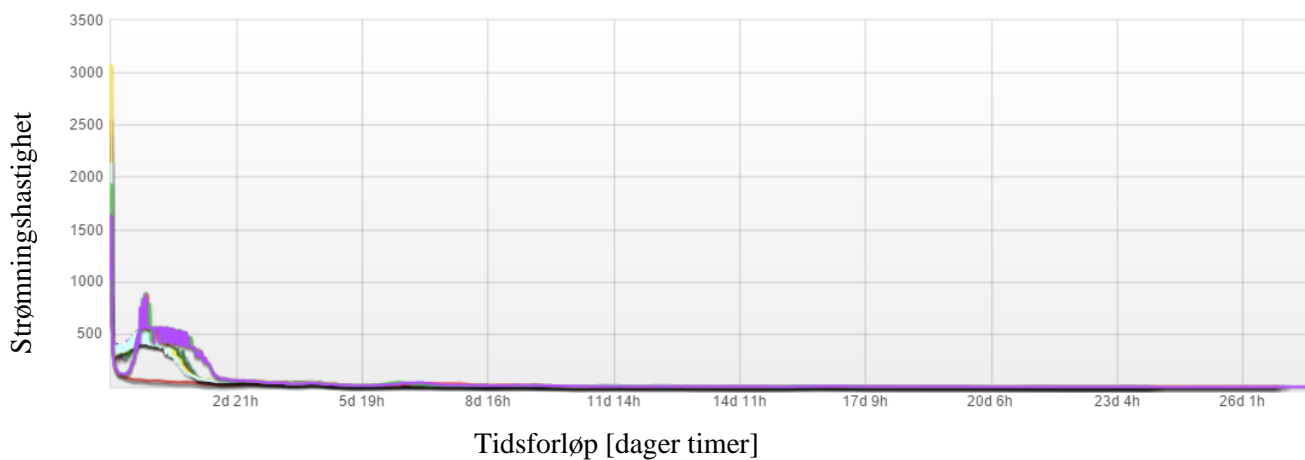


Figur 4: Det akkumulerte gassvolumet plottet mot tidsrommet andre forsøksrunde har foregått i, for alle 15 prøvene som ble testet for AMPTS II.

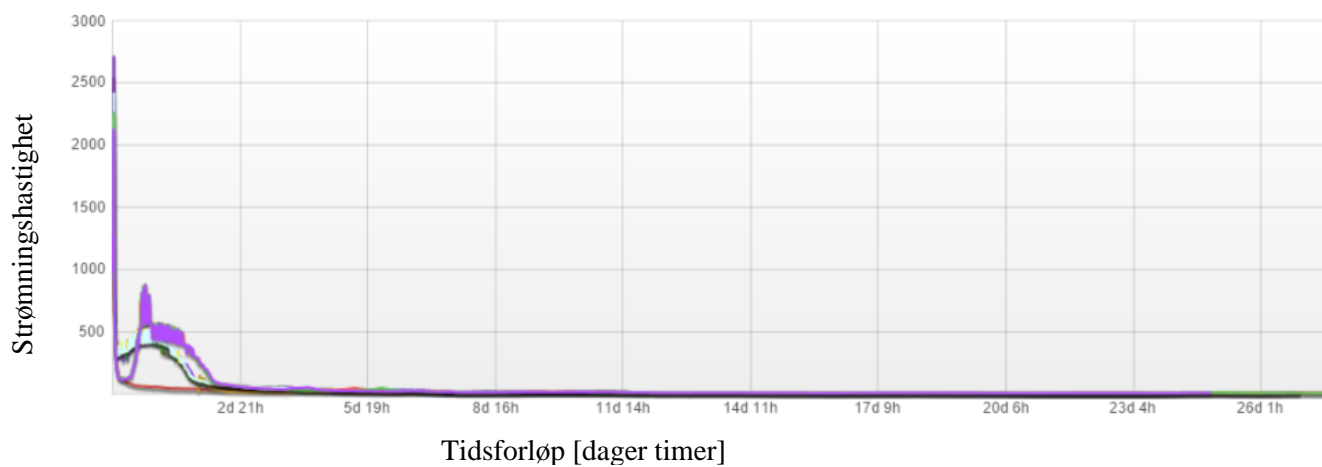


Figur 5: Det akkumulerte gassvolumet plottet mot tidsrommet tredje forsøksrunde har foregått i, for alle 15 prøvene som ble testet for AMPTS II.

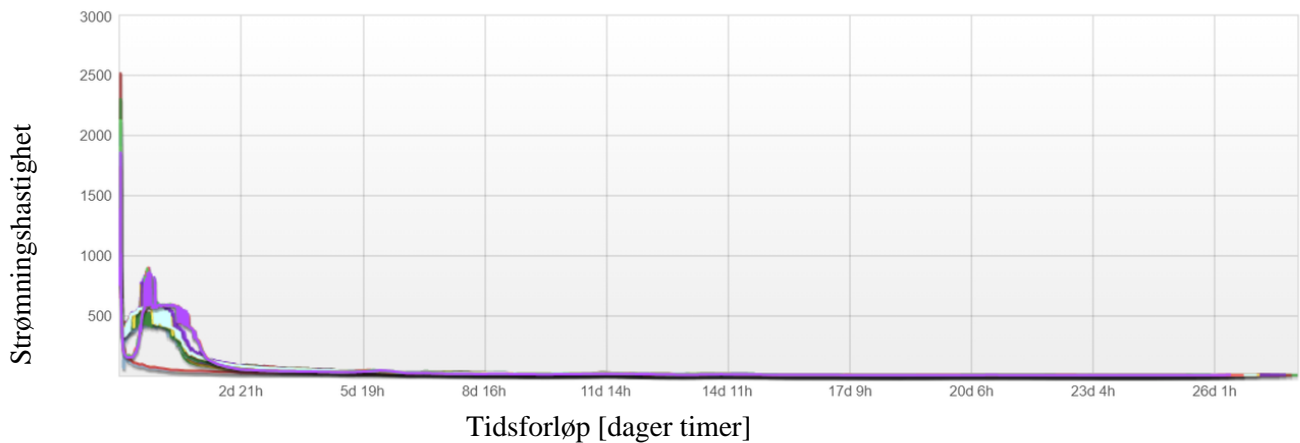
Figur 8, 9 og 10 viser strømningshastigheten i henholdsvis forsøksrunde 1, 2 og 3.



Figur 6: Strømningshastigheten plottet mot tidsrommet første forsøksrunde har foregått i, for alle 15 prøvene som ble testet for AMPTS II.



Figur 7: Strømningshastigheten mot tidsrommet andre forsøksrunde har foregått i, for alle 15 prøvene som ble testet for AMPTS II.



Figur 8: Strømningshastigheten plottet mot tidsrommet tredje forsøksrunde har foregått i, for alle 15 prøvene som ble testet for AMPTS II.

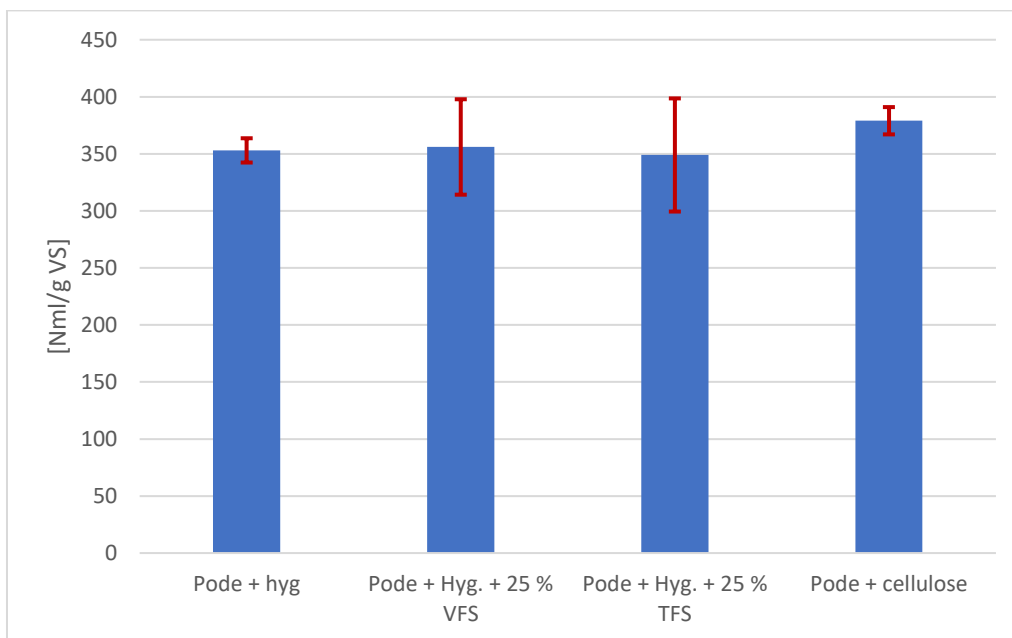
I utregningene av konfidensintervall (tabell 10) er alle siffer brukt i Excel. Verdiene i tabell 10 er beregnet ved bruk av formel 21 og dataene benyttet til utregningene er hentet fra tabell 9. Kritisk t-verdi $t_{0,025,2}$ er 4,303 for tre paralleller ($n = 3$) (14). Kritisk t-verdi $t_{0,025,1}$ er 12,706 for to paralleller ($n = 2$).

Tabell 10: 95 % - konfidensintervall av BMP-gjennomsnittene til prøveparallellene i de forskjellige forsøksrundene

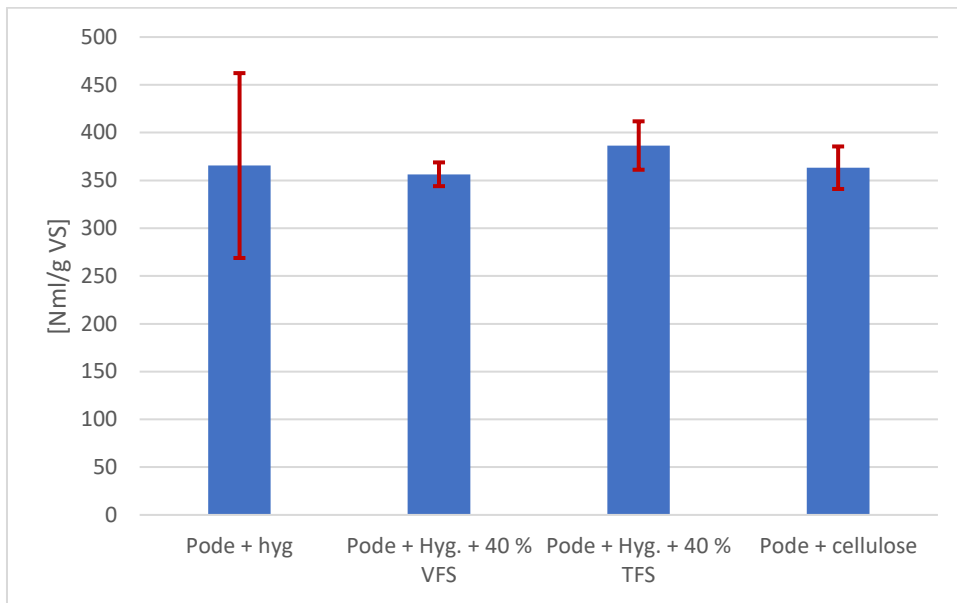
Forsøksrunde	Prøve	95 %-konfidensintervall av BMP-snitt fra prøveparalleller
1	Pode + hyg	$353 \pm 11 = [342, 363]$
	Pode + hyg + 25 % VFS	$365 \pm 42 = [324, 407]$
	Pode + hyg + 25 % TFS	$349 \pm 50 = [299, 398]$
	Pode + cellulose	$379 \pm 12 = [367, 391]$
	Pode + hyg	$366 \pm 97 = [269, 462]$

2	Pode + hyg + 25 % VFS	$356 \pm 12 = [344, 369]$
	Pode + hyg + 25 % TFS	$387 \pm 25 = [361, 412]$
	Pode + cellulose	$363 \pm 22 = [341, 386]$
3	Pode + hyg	$415 \pm 147 = [269, 562]$
	Pode + VFS	$387 \pm 72 = [315, 459]$
	Pode + TFS	$440 \pm 36 = [405, 476]$
	Pode + cellulose	$375 \pm 18 = [356, 393]$

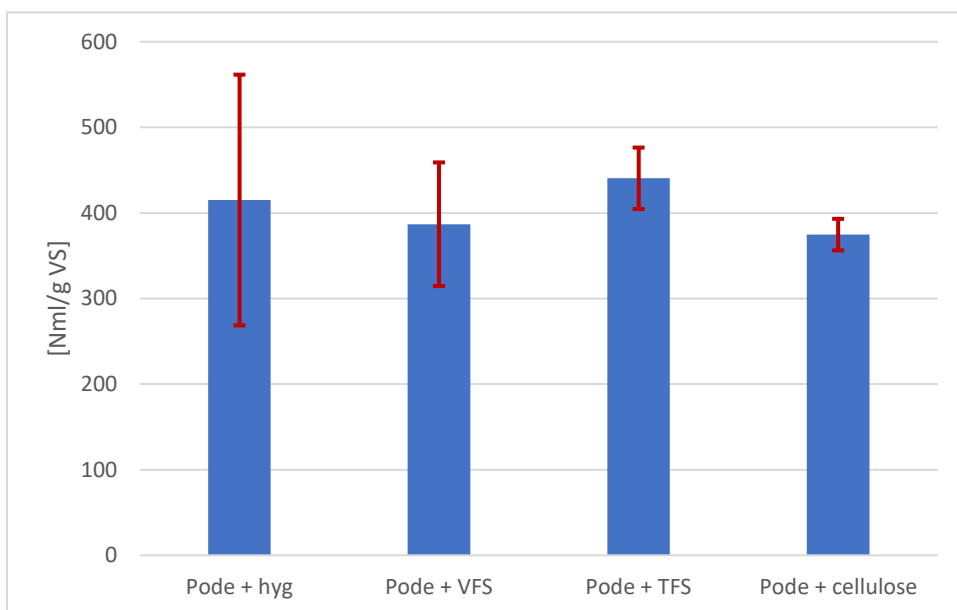
I figur 11, 12 og 13 er 95 % - konfidensintervallene for BMP-gjennomsnittene fra tabell 10 grafisk presentert og markert i rødt.



Figur 9: Gjennomsnittet av BMP verdiene til prøveparallelene i første forsøksrunde, med tilhørende konfidensintervall merket i rødt.



Figur 10: Gjennomsnittet av BMP verdiene til prøveparallellene i andre forsøksrunde, med tilhørende konfidensintervall merket i rødt.



Figur 11: Gjennomsnittet av BMP verdier til prøveparalleller i tredje forsøksrunde, med tilhørende konfidensintervall merket i rødt.

Utråtningsgraden av substratblandingene, vist i tabell 11, ble beregnet ut fra resultatet av % VS før og etter utråtning hentet fra tabell 16 og 17 i appendiks C ved hjelp av formel 5. Tabell 11 inneholder også gjennomsnittlig utråtningsgrad. I første forsøksrunde varierte gjennomsnittlig utråtningsgrad fra 25,2 til 33,5 %, der podeslam sammen med hygienisert

slam og 25 % VS vått fiskeslam hadde lavest utråtningsgrad mens podeslam med cellulose hadde høyest utråtningsgrad. Av substratene hadde podeslam sammen med hygienisert slam den høyeste utråtningsgraden (26,4 %). I andre forsøksrunde lå verdiene i område 15,8 til 39,3 %, der podeslam med hygienisert slam hadde lavest utråtningsgrad og podeslam med cellulose hadde høyest utråtningsgrad. Podeslam sammen med hygienisert slam og 40 % VS tørket fiskeslam hadde høyest utråtningsgrad blant substratene i andre forsøksrunde (31,1 %). I tredje forsøksrunde varierte utråtningsgraden fra 27,0 til 38,4 %, der podeslam med hygienisert slam hadde lavest utråtningsgrad og podeslam med cellulose hadde høyest. Av substratene i tredje forsøksrunde, hadde podeslam sammen med tørket fiskeslam høyest utråtningsgrad (28,9 %) Alle standardavvikene vist i tabell 11 ble beregnet ved hjelp av formel 20.

Tabell 11: Utråtningsgrad av slamblandinger før og etter utråtning med tilhørende standardavvik til gjennomsnittene.

Forsøksrunde	Prøvenavn	Utråtningsgrad [%]	Utråtningsgrad gjennomsnitt [%]
1	Pode + hyg 1	27,0	26,7 ± 0,8
	Pode + hyg 2	25,9	
	Pode + hyg + 25 % VS VFS 1	24,7	25,2 ± 0,7
	Pode + hyg + 25 % VS VFS 2	25,7	
	Pode + hyg + 25 % VS TFS 1	26,0	26,1 ± 0,3
	Pode + hyg + 25 % VS TFS 2	26,3	
	Pode + cellulose 1	33,1	33,5 ± 0,5
	Pode + cellulose 2	33,9	
2	Pode + hyg 1	16,0	16,1 ± 0,2
	Pode + hyg 2	16,3	
	Pode + hyg + 40 % VS VFS 1	30,4	30,4 ± 0,0
	Pode + hyg + 40 % VS VFS 2	30,4	
	Pode + hyg + 40 % VS TFS 1	31,3	31,2 ± 0,1
	Pode + hyg + 40 % VS TFS 2	31,2	
	Pode + cellulose 1	39,1	39,2 ± 0,1
	Pode + cellulose 2	39,3	
3	Pode + hyg 1	27,6	27,0 ± 0,8
	Pode + hyg 2	26,4	
	Pode + VFS 1	29,8	29 ± 1
	Pode + VFS 2	27,5	
	Pode + TFS 1	29,5	28,9 ± 0,8

	Pode + TFS 2	28,3	
	Pode + cellulose 1	34,5	38 ± 5
	Pode + cellulose 2	42,4	

3.4 Statistiske signifikanstester for BMP-verdier i hver forsøksrunde

Appendiks H inneholder tabeller for alle de statistiske testene som ble gjennomført. Alle typer tester ble gjennomført med 5 % signifikansnivå. Fremgangsmåten for statistisk testing av BMP-resultatene var lik for hver forsøksrunde. Man startet med å ta enveis variansanalyse av BMP-verdiene fra prøveparallellelene, uten blankprøveparallellelene (podeslam) og kontrollprøveparallellelene (cellulose). For forsøksrunde 1 og 3 viste de tilhørende enveis variansanalysene at ingen av BMP-gjennomsnittene fra prøveparallellelene var signifikant forskjellige. Enveis variansanalysen til BMP-verdiene i forsøksrunde 2 viste at minst to av BMP-gjennomsnittene var signifikant forskjellige. Variansanalysen ble fulgt opp med tre F-tester med to utvalg for varianser, slik at alle parallellelene ble parvis sammenlignet. Ettersom ingen av F-testene fikk høyere F_{obs} enn F_{krit} ble neste test t-test: to utvalg med antatt like varianser. Fra t-testene ble konklusjonen at BMP-gjennomsnittene til podeslam + hygienisert avløpsslam + 40 % VS vått fiskeslam og podeslam + hygienisert avløpsslam + 40 % VS tørket fiskeslam var signifikant forskjellige. BMP-gjennomsnittet for det tørkede fiskeslammet var signifikant høyere enn for det våte fiskeslammet. Prøvene med fiskeslam gav ikke signifikant forskjellige BMP-gjennomsnitt sammenlignet med referansen BMP-gjennomsnittet til podeslam + hygienisert avløpsslam.

3.5 Ammoniuminnhold før og etter utråtning i AMPTS II

Ammoniuminnhold ble målt før og etter utråtning for alle prøvene som ble analysert i AMPTS II. Ammoniumanalysene ble gjennomført med to paralleller for hver prøve, og en parallell for kontrollprøven, som her var vann. Tabell 12 viser ammoniumkonsentrasjonene for hver forsøksrunde før utråtning, og tabell 13 viser ammoniumkonsentrasjonene for hver forsøksrunde etter utråtning. Tabellene inneholder også gjennomsnittsverdier til parallellelene. I første forsøksrunde varierte gjennomsnittet for ammoniuminnholdet fra 1395 til 1550 mg/l, der podeslam med hygienisert slam hadde lavest ammoniuminnhold mens podeslam med cellulose hadde høyest ammoniuminnhold. Blant slamblandingene hadde podeslam + hygienisert slam + 25 % VS tørket fiskeslam høyest ammoniuminnhold før utråtning (1480 mg/l). Etter utråtning varierte konsentrasjonene fra 1450 til 1685 mg/l, hvor podeslam med cellulose hadde lavest konsentrasjon, mens podeslam sammen med hygienisert slam og 25 %

VS tørket fiskeslam hadde høyest. Blant slamblandingene hadde podeslam + hygienisert slam lavest ammoniuminnhold etter utråtning (1545 mg/l).

I andre forsøksrunde varierte ammoniuminnholdet før utråtning fra 1135 til 1390 mg/l, der podeslam sammen med hygienisert slam og 40 % VS tørket fiskeslam hadde lavest konsentrasjon, mens podeslam hadde høyest ammoniumkonsentrasjon. Etter utråtning lå ammoniuminnholdet mellom 1530 til 1590 mg/l, der podeslam med hygienisert slam hadde lavest konsentrasjon, mens podeslam sammen med hygienisert slam og 25 % VS tørket fiskeslam hadde den høyeste konsentrasjonen.

I tredje forsøksrunde varierte konsentrasjonene før utråtning fra 1355 til 1470 mg/l, der podeslam og hygienisert slam hadde lavest konsentrasjon og podeslam alene hadde den høyeste ammoniumkonsentrasjonen. Etter utråtning varierte konsentrasjonene fra 1645 til 1920 mg/l. Podeslam alene hadde lavest konsentrasjon og podeslam sammen med rent tørket fiskeslam hadde høyest konsentrasjon. Standardavvikene til gjennomsnittene vist i tabell 9 ble beregnet ved hjelp av formel 20.

Tabell 12: Ammoniuminnhold i forskjellige slamblandinger før utråtning med tilhørende standardavvik til gjennomsnittene av parallellene.

Forsøksrunde	Dato	Prøve	Parallell 1 [mg/l]	Parallell 2 [mg/l]	Gjennomsnitt [mg/l]
1	27.01.22	Pode	1500	1510	1505 ± 7
		Pode + hyg	1390	1400	1395 ± 7
		Pode + hyg + 25 % VS VFS	1430	1460	1445 ± 21
		Pode + hyg + 25 % VS TFS	1490	1470	1480 ± 14
		Pode + cellulose	1590	1510	1550 ± 57
		Vann	< 4		
2	10.03.22	Pode	1360	1420	1390 ± 42
		Pode + hyg.	1240	1270	1255 ± 21
		Pode + hyg. + 40 % VS VFS	1250	1220	1235 ± 21
		Pode + hyg. + 40 % VS TFS	1130	1140	1135 ± 7
		Pode + cellulose	1280	1280	1280 ± 0
		Vann	<4		
		Pode	1490	1450	1470 ± 28
		Pode + hyg.	1330	1380	1355 ± 35

3	23.03.22	Pode + VFS	1360	1370	1365 ± 7
		Pode + TFS	1390	1470	1430 ± 57
		Pode + cellulose	1410	1490	1450 ± 57
		Vann	<4		

Tabell 13: Ammoniuminnhold i forskjellige slamblandinger etter utråtning med tilhørende standardavvik til gjennomsnittene av parallellene.

Forsøksrunde	Dato	Prøve	Parallell 1 [mg/l]	Parallell 2 [mg/l]	Gjennomsnitt [mg/l]
1	24.02.22	Pode	1640	1590	1615 ± 35
		Pode + hyg	1680	1410	1545 ± 190
		Pode + hyg + 25 % VS VFS	1710	1640	1675 ± 49
		Pode + hyg + 25 % VS TFS	1670	1700	1685 ± 21
		Pode + cellulose	1260	1640	1450 ± 268
		Vann	< 4		
2	07.04.22	Pode	1610	1520	1565 ± 63
		Pode + hyg	1610	1450	1530 ± 113
		Pode + hyg + 25 % VS VFS	1550	1600	1575 ± 35
		Pode + hyg + 25 % VS TFS	1580	1600	1590 ± 14
		Pode + cellulose	1500	1610	1555 ± 77
		Vann	< 4		
3	21.04.22	Pode	1580	1710	1645 ± 91
		Pode + hyg	1700	1700	1700 ± 0
		Pode + VFS	1930	1780	1855 ± 106
		Pode + TFS	1810	2030	1920 ± 156
		Pode + cellulose	1880	1790	1835 ± 63
		Vann	<4		

3.6 Innhold av næringsstoff og tungmetall før og etter utråtning

Tabell 37 til 51, i Appendiks I, inneholder analyseresultatene fra Hardanger miljøseniter AS for forsøksrunde 1 og 2. Tabell 37 til 44 gjelder for forsøk 1 og tabell 45 til 51 gjelder for forsøk 2.

Fra tabell 38 ser man at konsentrasjonen av Hg, As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, P, K, Ca, Mg og Total-N økte i podeslammet fra forsøksrunde 1 etter utråtning. Konsentrasjonen av fosfat-P, KOF_{Cr} og ammonium-N minket etter utråtningen, og konsentrasjonen av Na hadde ingen endring.

Tabell 42 inneholder analyseresultatene til pode + hyg før og etter utråtning. Etter utråtning minket konsentrasjonen av fosfat-P, KOF_{Cr} , Hg, As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, P, K, Ca og Mg. Konsentrasjonen av total-N, Na og ammonium-N økte etter utråtning.

Tabell 43 inneholder analyseresultatene til pode + hyg + 25 % VS vått fiskeslam før og etter utråtning. Etter utråtning minket konsentrasjonen av fosfat-P, KOF_{Cr} , Hg, As, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, P, K, Ca og Mg. Konsentrasjonen av ammonium-N økte etter utråtning, og konsentrasjonen av Pb forble den samme.

Tabell 44 inneholder analyseresultatene til pode + hyg + 25 % VS tørket fiskeslam før og etter utråtning. Etter utråtning økte konsentrasjonen av total-N, fosfat-P og ammonium-N. Konsentrasjonen av KOF_{Cr} , Hg, As, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, P, K, Ca og Mg ble lavere etter utråtning. Konsentrasjonen av Pb forble den samme.

Tabell 46 inneholder analyseresultatene til podeslam fra den andre forsøksrunden, før og etter utråtning. Etter utråtning økte konsentrasjonen av total-N, Zn og ammonium-N. Konsentrasjonen av fosfat-P, KOF_{Cr} , Hg, As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, P, K, Ca, Mg og Na minket etter utråtning.

Tabell 49 inneholder analyseresultatene til pode + hyg før og etter utråtning. Konsentrasjonen av total-N, fosfat-P, As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, P, K, Ca, Mg, Na og ammonium-N økte etter utråtning. Konsentrasjonen av KOF_{Cr} og Hg ble lavere etter utråtning.

Tabell 50 inneholder analyseresultatene til pode + hyg. + 40 % VS vått fiskeslam før og etter utråtning. Etter utråtning økte konsentrasjonen av total-N, Hg, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, P, K, Mg, Na og ammonium-N. Konsentrasjonen av fosfat-P, KOF_{Cr} og As ble lavere etter utråtning, og konsentrasjonen av Cd og Ca forble den samme.

Tabell 51 inneholder analyseresultatene til pode + hyg. + 40 % VS tørket fiskeslam før og etter utråtning. Etter utråtning økte konsentrasjonen av total-N, fosfat-P, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, P, K, Ca, Mg, Na og ammonium-N. Konsentrasjonen av KOF_{Cr} , Hg og As ble lavere etter utråtning.

4. Diskusjon

I denne bacheloroppgaven er eksperimentell forskningsmetode benyttet for å undersøke om biogassproduksjonen økte når avløpsslam ble tilsatt fiskeslam, henholdsvis vått og tørket, samt om biogassproduksjonen økte med bare rent fiskeslam. Bakgrunnen for oppgaven handler om sirkulær økonomi, der man ønsker å finne bedre utnyttelse av det marine avfallet. Fiskeslammet brukt i dette prosjektet var hentet fra et landbasert RAS-anlegg (Recirculating Aquaculture System) på Vestlandet (1). En utfordring knyttet til landbaserte oppdrettsanlegg er utslipp, hvor 98 % av avfallsstrømmene (avføring og uspist fôr) blir samlet opp (17). Det er derfor interessant å finne hvilket samutråtningsforhold som gir optimal biogassproduksjon, slik at man kan nyttiggjøre det marine avfallet hos landbaserte oppdrettsanlegg og minske utslipp. Nye og bedre løsninger som øker biogassproduksjonen vil også være fordelaktig for biogassanlegg som dermed vil produsere mer biometan til bruk som drivstoff og energi.

I forsøkene ble forskjellige samutråtningsforhold undersøkt der tilsatt vått og tørket fiskeslam baseres på % VS (Volatile Solids). Resultatene i denne bacheloroppgaven blir diskutert opp mot problemstillingen og teori gitt i teorikapittelet. Biokjemisk metanpotensial (BMP), men også andre resultater, blir sammenlignet med resultater i foregående bachelor- og forskningsprosjekt. Med dette ønsket man å få svar på hvilke faktorer som er avgjørende for å øke biogassproduksjonen ved tilsats av fiskeslam. Av analysene fra Hardanger Miljøseniter AS fokuseres det på tungmetallanalysene, samt analysene på alkali- og jordalkalimetaller. Tungmetallkonsentrasjonene ble sammenlignet med maksimumsgrenser for tillatt innhold av tungmetaller ved ulike kvalitetsklasser i gjødselvereforeskriften. Årsaken er at de ulike kvalitetsklassene har forskjellige bruksvilkår for utnyttelse av bioresten.

4.1 Diskusjon av resultater fra AMPTS-forsøkene

Første forsøksrunde med 25 % VS fiskeslam

I første forsøksrunde ble substratblandinger med hygienisert avløpsslam og 25 % VS fra henholdsvis vått og tørket fiskeslam testet sammen med podeslam + hygienisert avløpsslam (referanse). BMP-gjennomsnittene (uten kontrollprøven) varierte fra 353 til 365 Nml/g VS (tabell 9). Kontrollprøven hadde et BMP-gjennomsnitt (379 Nml/g VS) som akkurat lå innenfor referanseområdet 350 ± 29 Nml/g VS (13). Enveis variansanalyse viste ingen signifikant endring på gassproduksjonen (BMP) ved tilsats av verken vått eller tørket fiskeslam. Det at BMP-gjennomsnittene til slamblandingene til henholdsvis vått og tørket

fiskeslam ikke er signifikant forskjellige er som forventet da det er tilsatt samme % VS i substratblandingene.

Det var ingen tegn på at fiskeslammet hemmet gassproduksjonen (se kap. 4.2).

Ammoniumanalysen etter utråtning viste liten forskjell mellom ammoniuminnhold i prøven med podeslam og hygienisert slam (1545 mg/l) sammenlignet med prøvene som var tilsatt fiskeslam (VFS: 1675 og TFS: 1685 mg/l). Disse verdiene ligger alle under grenseverdien for totalt ammoniakknitrogen (TAN) på rundt 1700-1800 mg/l (23). Verdiene av pH og konduktiviteten endret seg heller ikke vesentlig ved utråtning med fiskeslam. pH før utråtning var 7,837 for vått fiskeslam og 7,968 for tørket fiskeslam. Etter utråtning var pH 8,200 for vått fiskeslam og 8,162 for tørket fiskeslam. Alle prøveblandinger i forsøksrunde 1 hadde pH innenfor område 7,0–8,5 som da ikke skulle hemme biogassproduksjonen (se kap. 4.2). Siden fiskeslammet ikke gav betraktelig økning i ammoniumkonsentrasjonene, ble det konkludert at det kunne tilsettes en større andel fiskeslam i neste forsøksrunde. Dersom man hadde valgt å redusere % VS fra fiskeslamene, er det sannsynlig at man ikke hadde fått BMP-verdier som var signifikant høyere. Dersom ammoniumanalysen hadde gitt høyere ammoniumkonsentrasjoner i prøvene som inneholdt fiskeslam, så måtte man vært mer forsiktig med å øke andel fiskeslam i prøvene til de neste forsøksrundene.

Andre forsøksrunde med 40 % VS fiskeslam

Fiskeslammet i første forsøksrunde med 25 % VS virket ikke hemmende på biogassproduksjonen, så en mulig årsak til at det ikke ble høyere BMP i fiskeslamprøvene er at det ikke var tilstrekkelig organisk materiale til stede til fortæring. Det ble derfor diskutert å øke % VS fiskeslam opp til 50 % i andre forsøksrunde. Likevel ble det konkludert at det er ikke var gunstig å tilsette så mye fiskeslam i en anaerob prosess da det er mulig at metanproduksjonen kunne bli hemmet. Estevez et al. (25) fikk ved bruk av 30 % VS vått fiskeslam hemming av prosessen på grunn av for høy konsentrasjon av ammonium, men dette forsøket ble utført i et lavere temperaturområde enn det årets bachelorprosjekt benyttet. Det ble derfor tatt i betraktning hva tidligere bachelorprosjekt har oppnådd ved høy % VS.

I 2018 ble forsøk med vått og tørket fiskeslam med 25 masseprosent benyttet, der BMP ble bestemt til 376 Nml/g VS (VFS) og 513 Nml/g VS (TFS) (11). En masseprosent på 25 % tilsvarer ca. 40 % VS. Vått fiskeslam fikk en reduksjon på -9 % sammenlignet med podeslam + hygienisert avløpsslam (referanse). Det viste seg at det tørkede fiskeslammet var signifikant

forskjellig fra andre prøver som ble analysert i bacheloroppgaven fra 2018. Studentene konkluderte med at samutråtning med fiskeslam (tørket) ga økt metanutbytte på BMP og egnet seg derfor som kosubstrat (11). I 2021 tilsatte bachelorgruppen 35 % VS tørket fiskeslam til slamblanding, der BMP ble bestemt til 333 Nml/g VS (3). Tilsatsen førte til en 12 % reduksjon, der BMP verdien heller ikke var signifikant forskjellig fra podeslam + hygienisert avløpsslam (referanse).

Det ble dermed bestemt at andre forsøksrunde skulle testes med hygienisert avløpsslam (referanse) samt substratblandinger av hygienisert avløpsslam og 40 % VS fra henholdsvis vått og tørket fiskeslam. Dette var basert på tidligere resultat i bachelorprosjekt og første forsøksrunde i årets prosjekt. BMP-gjennomsnittene (uten kontrollprøven) varierte fra 356 til 387 Nml/g VS, der podeslam + hygienisert avløpsslam + 40 % VS tørket fiskeslam hadde høyest BMP-gjennomsnitt, og podeslam + hygienisert avløpsslam + 40 % VS vått fiskeslam hadde lavest. Kontrollprøven hadde et BMP-gjennomsnitt (363 Nml/g VS) innenfor referanseområdet 350 ± 29 Nml/g VS (13). Statistiske tester av BMP-verdiene viste at bare 40 % VS vått fiskeslam og 40 % VS tørket fiskeslam var signifikant forskjellige fra hverandre, der BMP-gjennomsnittet for det tørkede fiskeslammet var signifikant høyere enn for det våte fiskeslammet. Dette er et uventet resultat siden % VS er den samme for de to.

Ammoniumanalysen etter utråtning viste på samme måte som i første forsøksrunde, liten forskjell mellom ammoniuminnhold i prøven med podeslam og hygienisert slam (1255 mg/l) sammenlignet med prøvene som var tilsatt fiskeslam (VFS: 1235 og TFS: 1135 mg/l). Etter utråtning endret verdien av pH og konduktivitet seg lite for prøvene som inneholdt fiskeslam. Verdien av pH før utråtning var 7,736 for slamblanding med 40 % VS vått fiskeslam og 7,770 for slamblanding med 40 % VS tørket fiskeslam. Etter utråtning økte pH for slamblanding med vått fiskeslam til 8,183 og 8,144 for slamblanding med tørket fiskeslam. pH og ammoniuminnhold viste altså ingen indikasjon på hemming av biogassproduksjonen i forsøksrunde 2.

Tredje forsøksrunde med rent fiskeslam

I forsøksrunde 3 ble rent fiskeslam som substrat testet sammen med podeslam + hygienisert avløpsslam (referanse). De gjennomsnittlige BMP-verdiene (uten kontrollprøven) varierte fra 388 til 442 Nml/g VS, der podeslam + vått fiskeslam hadde lavest gjennomsnitt mens podeslam med tørket fiskeslam hadde høyest. Kontrollprøven hadde et BMP-gjennomsnitt

(376 Nml/g VS) innenfor referanseområdet 350 ± 29 Nml/g VS (13). Enveis variansanalyse viste ingen signifikant endring på gassproduksjonen (BMP) ved tilsats av verken vått eller tørket fiskeslam. Dette resultatet viser at rent vått fiskeslam og rent tørket fiskeslam ikke har høyere potensial for biogassproduksjon enn avløpsslam. Artikkelen til Estevez et al. hevder at slam generert fra akvakultursektoren har lignende anaerobbiologisk nedbrytbarhet som avløpsslam (25). BMP-verdiene til prøveparallellene i dette og fjorårets bachelorprosjekt (3) støtter opp denne påstanden. Dette er spesielt tydelig i årets bachelorprosjekt ved bruk av rent fiskeslam som substrat i forsøksrunde 3, der det ikke ble observert signifikant forskjell mellom BMP-gjennomsnittene til slamblandingene med henholdsvis rent vått- og tørket fiskeslam og podeslam + hygienisert avløpsslam (referanse).

Verdiene av pH og konduktivitet endret seg ikke vesentlig ved utråtning med fiskeslam. Ammoniumanalysen etter utråtning viste liten forskjell mellom ammoniuminnhold i prøven med podeslam og hygienisert slam (1700 mg/l) sammenlignet med prøvene som var tilsatt rent fiskeslam (VFS: 1855 og TFS: 1920 mg/l). Ammoniuminnholdet i rent fiskeslam overstiger grenseverdien (1700-1800 mg/l) noe som kan indikere hemming. Siden de rene fiskeslammene ikke var signifikant forskjellig fra referansen konkluderes det likevel med at fiskeslammet ikke virket hemmende på biogassproduksjonen i forsøksserie 3 (se kap. 4.2).

Videre diskusjon av BMP-resultatene

En mulig årsak til at det ikke var noen økt effekt av fiskeslammet i de tre forsøksrundene, selv ved ulik % VS, kan skyldes podeslammet som er i utråtningstankene i dag. I dag tilføres det mye mer fett inn i utråtningstankene enn det ble gjort før 2018. Fiskeslam består hovedsakelig av rester av fiskefor og avføring fra fisk. Dette bidrar muligens ikke med så mye ekstra lett nedbrytbart organisk materiale som mikroorganismer kan utnytte i forhold til den nokså optimale blandingen bakteriene vanligvis får tilført.

Substratene som ble brukt i RFF-prosjektet, fra 2016 til 2019, var vanlig fiskeslam fra forskjellige oppdrettsanlegg, tørket fiskeslam fra settefisk produksjonsanlegg, matavfall fra næringsbutikker/restauranter i Stavangerområdet, og kommunalt avløpsslam fra Bergen og Stavanger-regionen (2, s. 9). Det våte fiskeslammet som ble benyttet i bacheloroppgaven fra 2017 er fra en annen leverandør enn i årets og fjorårets bacheloroppgave. Vått og tørket fiskeslam fra bacheloroppgaven i 2018 er fra samme RAS-anlegg som årets bacheloroppgave. Vått og tørket fiskeslam fra bacheloroppgaven i 2021 er fra en annen leverandør enn slammet

i oppgavene fra 2017 og 2018. Slammet fra dette anlegget ble heller ikke benyttet i RFF-prosjektet. I 2017 ble det observert en 42 % økning i BMP av tilsetning av 25 masseprosent vått fiskeslam (10). I 2018 ble det observert en signifikant økning i BMP på cirka 24 % med 25 % VS tørket fiskeslam (11). I 2017 ble det ikke brukt podeslam fra Bergen biogassanlegg, hvilket kan tyde på at podeslammet har en stor innvirkning på BMP-resultatene.

Den gjennomsnittlige BMP-verdien til podeslam + hygienisert avløpsslam (referanse) økte fra forsøksrunde 1 til 3 med henholdsvis BMP-gjennomsnitt på 353, 366 og 416 Nml/g VS, der høyeste og laveste verdi er signifikant forskjellig fra hverandre. Disse BMP-gjennomsnittene til referansen er innenfor området som observert i tidligere bachelorprosjekter med varierende verdier i området 350 til 414 Nml/g VS. Ferskt podeslam og hygienisert avløpsslam ble tatt ut fra tanker på biogassanlegget ved oppstart av hver forsøksrunde. Podeslammet og det hygieniserte avløpsslammet vil begge ha ulik sammensetning ved hvert forsøk.

Avløpsslammet kommer fra avløpsrensaneanlegg og vil naturligvis ha forskjellig sammensetning ved hvert slamuttak. Podeslammet forandrer seg etter hvilke substrat det får tilført. I 2018 begynte Bergen biogassanlegg å ta imot mer fett til biogassproduksjonen. Bakteriekulturen i podeslammet har derfor sannsynligvis blitt mer tilpasset til et fettriakt miljø etter det. Bakteriekulturen i podeslammet er altså ikke den samme hvert år, og dette vil påvirke resultatene i bachelorprosjektene som har benyttet podeslam fra anlegget.

Bakteriekulturen blir stadig matet med forskjellig avfall og vil utvikle og omforme seg basert på hvilken mat bakteriene får tilgjengelig.

I et prosjekt der det blant annet ble benyttet fiskekjøtt og fiskeinnvoller som substrat i mesofilt AMPTS-forsøk ble det funnet at fiskesubstratene økte biogassproduksjonen (9). Fiskekjøtt og fiskeavskjær inneholder fett og næring som metanproduserende bakterier kan fortære og omdanne til biogass. Det våte og tørkede fiskeslammet som ble benyttet i årets bachelorprosjekt bestod hovedsakelig av rester av fiskefôr og fiskeavføring, og har et lavere fettinnhold enn fiskeavskjær og fiskekjøtt som ble benyttet i forskningsprosjektet til Tomczak-Wandzel og Levlin. Forskjellen i fett- og næringsinnhold er sannsynligvis grunnen til at Tomczak-Wandzel og Levlin fikk økning i biogassproduksjonen, mens dette bachelorprosjektet ikke fikk noe signifikant økning i BMP.

I prosjektene til Estevez et al. (25) og Tomczak-Wandzel og Levlin (9) ble det benyttet mesofilt temperaturområde under anaerob utråtning, mens i årets bachelorprosjekt ble det

benyttet termofilt temperaturområde. Temperaturområdet påvirker utråtningsprosessen blant annet ved at mesofile utråtninger tar lengre tid enn termofile. Estevez et al. fant at i mesofilt temperaturområde økte produksjonen av metangass ved bruk av vått eller tørket fiskeslam som kosubstrat med avløpsslam. Tomczak-Wandzel og Levlin fikk også signifikant økning i metanproduksjonen ved mesofilt temperaturområde. Det termofile temperaturområde er en mulig årsak til at det i årets bachelorprosjekt ikke ble signifikant forskjellig BMP ved bruk av vått eller tørket fiskeslam som kosubstrat med avløpsslam.

BMP-gjennomsnittene til slamblandingene med tørket fiskeslam fikk mer positive %-avvik til referansene enn slamblandingene med vått fiskeslam (tabell 10). I forsøksrunde 1, 2 og 3 fikk slamblandingene med vått fiskeslam et avvik på henholdsvis +3,5 %, -2,6 % og -7,2 % i forhold til podeslam + hygienisert avløpsslam. Slamblandingene med tørket fiskeslam fikk i forsøksrunde 1, 2 og 3 et avvik på henholdsvis -1,1 %, +5,4 % og +5,8 % i forhold til podeslam + hygienisert avløpsslam. Tilsvarende trender er observert av Estevez et al. og i bacheloroppgavene i 2018 (11) og 2021 (3). Estevez et al. (25) fant ved termofilt pilotskalaforsøk at tilsats av opptil 20 % VS tørket fiskeslam gav signifikant høyere metanproduksjon enn 20 % VS vått fiskeslam med henholdsvis 30-50 % utbytte og 20 % utbytte. Basert på den positive trenden ved bruk av tørket fiskeslam som substrat, vil tørket fiskeslam være mer aktuelt i fremtidige forsøk fremfor vått fiskeslam, som hadde en mer negativ trend. Fiskeslam kan benyttes som substrat i biogassproduksjon siden det ikke gav signifikant lavere BMP-gjennomsnitt enn hygienisert slam alene som substrat. Det ble ikke funnet et optimalt samutråtningsforhold med fiskeslam, da bruken av fiskeslam som substrat ikke gav signifikant høyere BMP.

Prøvene med fiskeslamsubstrat i årets prosjekt fikk tilsvarende BMP som prøvene med pøde + hygienisert avløpsslam. Fra de statistiske testene av BMP-gjennomsnitt ble det funnet at det bare var signifikant forskjellige BMP-gjennomsnitt ved sammenligning av prøveparallelene til 40 VS % VFS og 40 VS % TFS, der prøveparallelene med tørket fiskeslam gav høyere BMP enn prøveparallelene med vått fiskeslam. I sammenligningen av prøveparallelene til henholdsvis vått og tørket fiskeslam med prøveparallelene til podeslam + hygienisert avløpsslam (referanse) var det ingen signifikant forskjell mellom BMP-gjennomsnittene.

4.2 pH og ammoniumkonsentrasjoner før og etter utråtning

Teorikapittelet 1.4.6 gjør rede for at biogassprosesser vanligvis fungerer best ved pH nøytrale verdier eller pH rett over det nøytrale. Det vil si pH mellom 7,0 og 8,5 (24).

Tabell 8 i resultatkapittelet viser målt pH i alle prøver og prøveblandinger før anaerob utråtning. Her er det interessant å se på pH i prøveblandingene som skulle analyseres i AMPTS II, altså podeslamprøvene og alle substratblandingene med podeslam. Alle disse prøveblandingene har pH innenfor område 7,0–8,5.

Dersom man sammenligner pH-verdiene i substratblandingene før og etter utråtning kan man få en indikasjon på bufferkapasiteten i de ulike blandingene. Fra teorikapittelet vet man at for å holde pH stabil må nedbrytningsprosessen ha relativt høy og konstant alkalitet. Jo høyere alkalitet, jo høyere bufferkapasitet. Fra tabell 9 ser man at etter utråtning har alle substratblandingene en pH over 8,1. Det er dermed ikke et problem med for høy syreproduksjon, som ville gitt pH under 7. Fra tabell 12 og 13 ser man at ammoniumkonsentrasjonen har økt fra før til etter utråtning. Dette tyder på at frie ammoniakkmolekyl har reagert med oppløst karbondioksid til ammoniumhydrogenkarbonat (24). Dette vil øke alkaliteten og pH samt ammoniuminnholdet i prøvene. Det skal presiseres at pH sannsynligvis ikke har gitt negativ påvirkning til biokjemiskmetanpotensial i substratblandingene.

Høye konsentrasjoner av ammoniakk under anaerob utråtning kan føre til hemming av biogassproduksjonen (22). Totalt ammoniakknitrogen (TAN) har en generell grenseverdi på rundt 1700-1800 mg/l for utråtninger med høy rate («high rate digesters») (23).

Gjennomsnittlig ammoniumkonsentrasjon målt etter utråtning i første og andre forsøksrunde (tabell 13) hadde alle konsentrasjoner lavere enn den nevnte grenseverdien. Tabell 13 viser at gjennomsnittlig ammoniumkonsentrasjon målt etter utråtning i tredje forsøksrunde hadde ammoniumkonsentrasjoner over TAN-grenseverdien for prøveparallellene podeslam + vått fiskeslam (1855 mg/l), podeslam + tørket fiskeslam (1920 mg/l) og podeslam + cellulose (1835 mg/l). Siden podeslam + cellulose hadde gjennomsnittlig BMP innenfor referanseområde (350 ± 29 Nml/g VS) er det ingen indikasjon på at ammoniuminnholdet hemmer metanproduksjonen. Dette kan tyde på at ammoniumkonsentrasjonen i overkant av 1900 mg/l ikke har hemmet biogassproduksjonen. Hemming av biogassproduksjon oppstår oftere i pilotskalaforsøk med kontinuerlig tilførsel av føde. Man opplever mindre grad av

inhibering i AMPTS-forsøk, da denne type forsøk ikke har kontinuerlig mating og forsøksperioden er kortere (3-4 uker).

Tabell 10 inneholder beregnet % forskjell mellom BMP-gjennomsnittene til henholdsvis substratparalleller og paralleller av podeslam + hygienisert slam (referanse). I den tredje forsøksrunden er forskjellen -7,3 % for podeslam + vått fiskeslam, +5,8 % for podeslam + tørket fiskeslam og -10,7 % for podeslam + cellulose. Statistisk testing av BMP-parallellene (kap. 3.4) viser at det ikke er signifikant forskjell mellom BMP-verdiene i forsøk 3. Det vil si at selv om ammoniumkonsentrasjonen oversteg TAN-grenseverdien for flere av prøveparallellene, så har ikke det medført til signifikant lavere BMP-verdier. Sannsynligvis har ikke ammoniumkonsentrasjonene virket hemmende på biogassproduksjonen.

Bacheloroppgaven fra 2021 fikk tilsvarende resultater på ammoniumkonsentrasjon og pH (3). Ammoniumkonsentrasjonene i oppgaven økte etter utråtning, og pH-verdiene til substratblandingen var alle innenfor 7,0-8,5, med en økning fra ca. 7,9 til omtrent 8,1 etter utråtning.

4.3 Ledningsevne og saltinnhold før og etter utråtning

Høye saltkonsentrasjoner kan virke hemmende på biogassproduksjon (24, s.78). Hemming av biogassproduksjon har blitt påvist ved saltkonsentrasjoner rundt 1500 mg/l, men konsentrasjoner opp til 8000 mg/l kan fungere ved en gradvis økning av konsentrasjonen. Tabell 8 inneholder måleresultatene for ledningsevne før utråtning. Merk at tørket fiskeslam ikke kunne måles i ren form, bare i blanding, siden det var i fast form (pulver). De laveste målingene av ledningsevne var for vått fiskeslam alene og i blanding med hygienisert slam, og tørket fiskeslam i blanding med hygienisert slam. Den laveste målingen var for vått fiskeslam alene, og var 1,331 mS/cm. Den høyeste målingen på 10,52 mS/cm var for podeslam alene.

Etter utråtning økte ledningsevnen i alle slamblandingene og blankprøvene. Den høyeste målingen var på 12,15 mS/cm for podeslam + tørket fiskeslam. Den laveste målingen var på 9,95 mS/cm for rent podeslam. Dette tyder på at kationer har blitt frigitt i løpet av dekomponeringen av organiske substrater, og dermed har saltinnholdet økt ved utråtningen (24). Økning i saltinnhold etter utråtning er forventet. I 2021 var den høyeste målingen på ledningsevne etter utråtning 16,82 mS/cm for podeslam + hygienisert avløpslam + 25 % VS

tørket fiskeslam (3). Den laveste målingen var 9,86 mS/cm, for podeslam + hygienisert avløpsslam + 15 % VS vått fiskeslam. Den observerte forskjellen i ledningsevne er naturlig da det i 2021 ble benyttet fiskeslam som stammet fra brakkvann, mens i årets prosjekt stammet fiskeslammet fra ferskvann. Prøver med tilsatt vått fiskeslam fra brakkvann vil i større eller mindre grad ha større saltinnhold og høyere ledningsevne.

Den målte ledningsevnen i alle slamblandinger og blankprøvene økte etter utråtning, og det er forventet at konsentrasjonene av alkali- og jordalkalimetaller målt av Hardanger Miljøsenters AS også øker etter utråtning. Dersom man sammenligner analyseresultatene til Hardanger miljøsenters AS fra første forsøksrunde før og etter utråtning, ser man at for podeslam øker konsentrasjonen av fosfor, kalium, kalsium, magnesium og natrium etter utråtning. I prøven for podeslam + hygienisert slam minker konsentrasjonen av fosfor, kalium, kalsium og magnesium etter utråtning, mens konsentrasjonen av natrium øker. Det kan være verdt å merke seg at natriummålingene ikke er utført av et akkreditert laboratorium. Podeslam + hygienisert avløpsslam målingene etter utråtning er svært uventede, og kan tyde på at «før og etter»-resultatene har blitt byttet om ved Hardanger miljøsenters AS. Tilsvarende minket de fleste konsentrasjonene av næringsstoffer og tungmetaller for podeslam + hygienisert avløpsslam + 25 % VS vått fiskeslam og podeslam + hygienisert avløpsslam + 25 % VS tørket fiskeslam etter utråtning.

Analyseresultatene til Hardanger miljøsenters AS for forsøksrunde 2 viser at for podeslam minket konsentrasjonene av fosfor, kalium, kalsium, magnesium og natrium etter utråtning. Podeslammet i andre forsøksrunde hadde høyere konsentrasjon av fosfor, kalium, kalsium, magnesium og natrium før ut utråtning enn podeslammet i første forsøksrunde. Fosfor og kalium skiller seg spesielt ut, da de hadde konsentrasjonene 21000 og 14000 mg/kg TS i forsøksrunde 1, og 27000 og 20000 mg/kg TS i forsøksrunde 2. Etter utråtning minket konsentrasjonen av fosfor i podeslammet i forsøksrunde 2 fra 27000 til 8800 mg/kg TS. Det er ikke vanlig å observere lavere konsentrasjoner av næringsstoff eller tungmetaller etter utråtning, heller det motsatte. Dette tyder på at det er skjedd en feil hos Hardanger miljøsenters AS. I første forsøksrunde økte fosforkonsentrasjonen i podeslammet fra 21000 til 32000 mg/kg TS etter utråtning. Dette er et mer forventet resultat. Tilsvarende økte konsentrasjonene av fosfor, kalium, kalsium, magnesium og natrium etter utråtning for podeslam + hygienisert avløpsslam, podeslam + hygienisert avløpsslam + 40 % VS vått fiskeslam og podeslam + hygienisert avløpsslam + 40 % VS tørket fiskeslam.

Måleresultatene til podeslam + hygienisert avløpsslam etter utråtning er forskjellig fra forsøksrunde 1 og 2. De største forskjellene finner man i konsentrasjonene for fosfor og kalsium. Konsentrasjonen til fosfor i første forsøksrunde minket fra 29000 mg/kg TS før utråtning til 16000 mg/kg TS etter utråtning, mens i andre forsøksrunde økte konsentrasjonen fra 20000 til 28000 mg/kg TS etter utråtning. For kalsium minket konsentrasjonen fra 24000 til 12000 mg/kg TS etter utråtning i første forsøksrunde og konsentrasjonen økte fra 16000 til 22000 mg/kg TS etter utråtning i forsøksrunde 2.

4.4 Tungmetallinnhold og kategorisering av biorest som gjødslingsmiddel

Gjødselsforskriften gir en rekke retningslinjer som må opprettholdes får at bioresten skal kunne utnyttes som gjødsel (29). Et av kravene er å varedeklare slammets kvalitetsklasse (se. Kap. 1.4.10). Kvalitetsklassen blir bestemt ut ifra innholdet av tungmetaller i det utråtnede slammet (maksimumsgrenser i tabell 2). Hardanger miljøseniter AS har analysert for tungmetallinnhold i slamblandingene fra første forsøksrunde og andre forsøksrunde, vist i Appendiks I.

I første forsøksrunde er bioresten til podeslam innenfor kvalitetsklasse 2 for Cd, 0 for Pb, 1 for Hg, 3 for Zn, 2 for Cu, og 0 for Cr. Totalt kommer podeslambioresten i kvalitetsklasse 3. Podeslam + hygienisert avløpsslam er innenfor kvalitetsklasse 2 for Cd, 0 for Pb, 1 for Hg, 0 for Ni, 2 for Zn, 2 for Cu og 0 for Cr. Totalt kommer bioresten i kvalitetsklasse 2. Podeslam + hygienisert avløpsslam + 25 % vått fiskeslam er innenfor kvalitetsklasse 2 for Cd, 0 for Pb, 0 for Hg, 1 for Ni, 2 for Zn, 2 for Cu og 2 for Cr. Totalt er bioresten i kvalitetsklasse 2. Podeslam + hygienisert avløpsslam + 25 % tørket fiskeslam er innenfor kvalitetsklasse 2 for Cd, 0 for Pb, 1 for Hg, 1 for Ni, 2 for Zn, 2 for Cu og 0 for Cr. Totalt er bioresten i kvalitetsklasse 2.

I forsøksrunde 2 er podeslambioresten innenfor kvalitetsklasse 2 for Cd, Zn og Cu, 0 for Cr og Pb, og 1 for Hg og Ni. Totalt kommer podeslambioresten i kvalitetsklasse 2. Bioresten til podeslam + hygienisert slam kom innenfor kvalitetsklasse 2 for Cu og Cd, 0 for Pb og Cr, 3 for Zn, og 1 for Hg og Ni. Podeslam + hygienisert slam klassifiseres totalt som biorest av kvalitetsklasse 3. Bioresten til podeslam + hygienisert avløpsslam + 40 % VS vått fiskeslam er innenfor kvalitetsklasse 2 for Cd, Zn og Cu, 0 for Pb og Cr, og 1 for Hg og Ni. Totalt er dermed bioresten i kvalitetsklasse 2. Bioresten til podeslam + hygienisert avløpsslam + 40 %

VS tørket fiskeslam er innenfor kvalitetsklasse 2 for Cd, Zn og Cu, 0 for Pb og Cr, og 1 for Hg og Ni. Totalt er dermed bioresten i kvalitetsklasse 2.

Biorestene av kvalitetsklasse 2 kan benyttes på jordbruksarealer, i parker og i private hager med inntil to tonn tørrstoff per dekar i løpet av en tiårsperiode (29). Alle biorestene kan benyttes på grøntarealer og lignende der det ikke skal dyrkes mat eller fôrvekster, med maks fem cm tykkelse i løpet av en tiårsperiode. Biorestene av kvalitetsklasse 3 kan benyttes som toppdekke på avfallsfyllinger ved maks 15 cm dekk sjikt.

I likhet med Klima- og miljødepartementet fant Estevez et al. (25) at innholdet av tungmetaller må overvåkes i biogassprosesser. De fant at jo mer effektiv den anaerobe nedbrytningsprosessen av organisk materiale er, desto høyere konsentrasjon av tungmetaller er det i fiskeslammet. En høy konsentrasjon av tungmetaller kan begrense kvaliteten på nedbrytningen som oppnås ved bruk av fiskeslam. Tungmetallet Zn er spesielt utfordrende for Bergen biogassanlegg da det var konsentrasjoner innenfor kvalitetsklasse 3 for to av biorestene bestående av podeslam og podeslam + hygienisert avløpsslam. Dette viser at bruk av fiskeslam som substrat kan minke den totale konsentrasjonen av tungmetaller, og slik gi bioresten en lavere kvalitetsklasse. Høye konsentrasjoner av Zn ble også observert ved bacheloroppgavene i 2017 (10), 2018 (11) og 2021 (3). Videre burde reduksjonen av tungmetallet undersøkes for å få biorester i en lavere kvalitetsklasse.

4.5 Andre feilkilder og kommentarer

Temperaturen til vannbadet i AMPTS-instrumentet ble bestemt til å holde en konstant temperatur på 54 °C for alle de tre forsøksrundene. Årsaken til dette var at man ønsket å etterligne forholdene til en termofil råtnetank.

Strømningshastigheten til den produserte biokjemiske metangassen var størst ved start gjennom de tre forsøksrundene (figur 8, 9 og 10). Ettersom bakteriekulturen i prøvene (i AMPTS) ikke ble matet mens forsøksrundene pågikk, var det forventet at gassproduksjonen var størst i starten av forsøkene og minket frem til avslutning av forsøkene. AMPTS forsøkene ble avsluttet når produsert metangass var mindre eller lik 5 ml per dag (13, s. 48).

Ved andre forsøksrunde skjedde det en lekkasje fra den ene prøven med podeslam og hygienisert slam i AMPTS II. Dette ble oppdaget etter omtrent en dag ved hjelp av graf

verktøyet i dataprogrammet til AMPTS II utstyret, da grafen for en av de tre prøvene ikke dukket opp i dataprogrammet (se figur 6, gulbrun graf). Den gule stopperen ble strammet enda mer på den glassflasken det var problem med, slik at man kunne stoppe en eventuell lekkasje fra Tygon® røret. Da denne ble strammet dukket den siste grafen opp i programvaren, men ettersom det hadde gått litt tid fra start av forsøket ble ikke denne prøven optimal for resultatet. Dette kan man se i figur 4, hvor den nederste gule grafen i programvaren representerer prøven som hadde en lekkasje. Parallellen med lekkasje ble behandlet som en uteligger, og fjernet fra videre utregninger av BMP-gjennomsnitt og statistikk-tester.

Tabell 11 viser prosent utråtningsgrad av slamblandingene, som er beregnet fra målt % VS før og etter utråtningsgrad. Utråtningsgraden til slamblandingene (uten kontrollprøvene) ligger i område 16,1 til 31,2 %, der podeslam + hygienisert avløpsslam fra forsøksrunde 2 har den laveste utråtningsgraden, og podeslam + hygienisert avløpsslam + 40 % VS tørket fiskeslam har den høyeste. Utråtningsgraden til podeslam + hygienisert avløpsslam er spesielt lav i forsøksrunde 2. Dette skyldes gasslekkasjen fra andre forsøksrunde som gjorde at det ikke ble anaerobe forhold for den ene slamblandingene, og det akkumulerte gassvolumet registrert ble mye lavere enn det skulle. Etter utråtningsgrad ble bioestene for alle tre paralleller ble blandet og % VS ble målt for blandingen. Dette er forklaringen på hvorfor utråtningsgraden var såpass lav. Utråtningsgrader er vanligvis rundt 30 % for AMPTS-forsøk. Sett bort fra podeslam + hygienisert avløpsslam fra forsøksrunde 2, ligger alle utråtningsgradene i forventet område.

Både pH-meteret og konduktivitetsmåleren driftet en del når det ble målt for pH og ledningsevne. De brukte lang tid på å stabilisere seg, da spesielt pH-meteret. pH-en ble derfor ofte lest av når den tredje desimalen var den eneste som varierte. Det er derfor en viss usikkerhet i disse målingene.

Rent tørket fiskeslam før utråtningsgrad (tabell 4) hadde interessante forandringer for % TS, % VS og % Wv for alle de tre forsøksrundene. Det var forventet at TS (total solids) skulle ha høyest prosent verdi av TS, VS og Wv, hvilket stemte med alle rene tørket fiskeslam prøver. Videre var det forventet at glødetap (Wv) skulle ha en mindre prosent verdi enn VS (volatile solids). Dette stemte verken med forsøksrunde 1, 2 eller 3, der glødetapet var større enn VS. Årsaken til dette er trolig grunnet at tørket fiskeslam kommer i pulverform, og derfor vil ikke være 100 prosent homogent. Selv om det tørkede fiskeslammet ble blandet før det ble tatt ut

innhold til hver prøve, er det sannsynlig at sammensetningene har vært litt forskjellige ved hvert uttak siden det er en relativt heterogen blanding.

5. Konklusjon

Tidligere bachelor- og forskningsprosjekt har ikke vist en konsekvent signifikant økning i biokjemisk metanpotensial (BMP) ved bruk av henholdsvis vått- og tørket fiskeslam som kosubstrat. Det var derfor interessant å utføre anaerobe utråtningsforsøk ved AMPTS II (Automatic Methane Potential Test System) med substratblandinger basert på % VS for å undersøke om biogassproduksjonen ville øke ved bruk av vått eller tørket fiskeslam.

Fiskeslammet ble brukt som substrat og som kosubstrat med hygienisert avløpsslam.

Biokjemisk metanpotensial (BMP) ble beregnet og det ble utført statistiske signifikanstester av BMP-gjennomsnittene.

Gjennomsnittsverdiene av BMP viser at podeslam + substratblandingen med 40 % VS tørket fiskeslam hadde en større økning i BMP (+5,4 %) enn podeslam + substratblandingen med 25 % VS tørket fiskeslam (-1,1 %), i forhold til podeslam + hygienisert avløpsslam (referanse). Tørket fiskeslam alene hadde et tilsvarende prosentavvik på 5,8 %. BMP-gjennomsnittet til podeslam + hygienisert slam + 40 % VS tørket fiskeslam (387 Nml/g VS) signifikant høyere enn BMP-gjennomsnittet til podeslam + hygienisert slam + 40 % VS vått fiskeslam (356 Nml/g VS). Ingen gjennomsnittlige BMP verdier var signifikant forskjellige i forhold til podeslam + hygienisert avløpsslam (referansen). Biogassproduksjonen verken økte eller minket ved bruk av vått eller tørket fiskeslam som substrat eller som tilsats i substratblandingen. Verken ammoniuminnhold, pH eller saltinnhold har virket hemmende på biogassproduksjonen.

Hovedkonklusjonen for denne oppgaven er at det ikke kunne bestemmes et optimalt samutråtningsforhold for hygienisert avløpsslam i blanding med henholdsvis vått og tørket fiskeslam, da ingen av samutråtningsforholdene som er blitt testet førte til signifikant høyere BMP sammenlignet med referansen. Fiskeslam kan benyttes i samutråtning med hygienisert avløpsslam eller alene, men dette vil ikke gi signifikant høyere metanpotensial enn referansen.

Bioresten til podeslam fra forsøksrunde 1 er av kvalitetsklasse 3. Biorestene til podeslam + hygienisert slam, podeslam + hygienisert slam + 25 % VS vått fiskeslam og podeslam + hygienisert slam + 25 % VS tørket fiskeslam er av kvalitetsklasse 2.

Bioresten til podeslam + hygienisert slam i forsøksrunde 2 er av kvalitetsklasse 3. Biorestene til podeslam, podeslam + hygienisert slam + 40 % VS vått fiskeslam og podeslam + hygienisert slam + 40 % VS tørket fiskeslam er av kvalitetsklasse 2.

Målene satt for bachelorprosjektet ble delvis oppnådd. Målet om å bestemme BMP for slamblandinger med vått og tørket fiskeslam som substrat og kosubstrat er oppnådd. Det er ikke funnet et optimalt samutråtningsforhold for hygienisert avløpsslam i blanding med henholdsvis tørket og vått fiskeslam, da ingen av samutråtningsforholdene som er blitt testet førte til signifikant høyere BMP sammenlignet med referansen. Parametere som ammoniumkonsentrasjon, pH og saltinnhold kan påvirke biogassproduksjonen, og er blitt beskrevet i teorikapittelet og diskutert i diskusjonen. Ved hjelp av statistiske tester har det blitt avgjort om BMP-gjennomsnittene i hvert forsøk var signifikant forskjellige.

Videre arbeid

I fremtidige AMPTS II-forsøk og pilotskalaforsøk er det mest aktuelt å fortsette med tørket fiskeslam. Dette siden tørket fiskeslam generelt har gjennomsnittlig høyere BMP enn vått fiskeslam. 40 % VS tørket fiskeslam ble funnet til å ha signifikant høyere BMP enn 40 % VS vått fiskeslam. Tørket fiskeslam er også lettere å transportere og å lagre. Det er interessant å utføre pilotskalaforsøk med tørket fiskeslam for å se hvor langt man kan gå opp i % VS uten å få kollaps av biogassproduksjonen, grunnet høye konsentrasjoner av ammonium. I fremtidig AMPTS-forsøk er det ønskelig å benytte fiskeslam fra tre forskjellige fiskeanlegg i samme forsøksrunde, med for eksempel 40 % VS fiskeslam.

6. Referanser (litteraturliste)

1. Fausa E, Hosfeldt ACD. Mass balance and energy optimisation in recirculating aquaculture systems (RAS), with special focus on diurnal variations in water quality (Other Support-PROFESJON). Under utgivelse 2022.
2. Vik EA, Estevez MM, Tomczak-Wandzel R, Fossheim PB, Wold A, Hatland HE. Utnyttelse av avfall fra marin matproduksjon til regional fornybar energi (RFF Vestlandet prosjektet 259228). Oslo. 55 s.
3. Tlustochowicz K, Askeland HV, Bjørnberg O. Biokjemisk metanpotensial (BMP) ved anaerob nedbrytning av avløps slam tilsatt fiskeslam som ko-substrat og tilhørende tungmetallanalyse av bioresten [bacheloroppgave]. Bergen: Høgskulen på Vestlandet; 2021. 111 s.
4. Orhorhorho EK, Ebunilo PO, Sadjere GE. Experimental Determination of Effect of Total Solids (TS) and Volatile Solids (VS) on Biogas Yield. *American Journal of Modern Energy*. Vol. 3, No. 6, 2017, pp. 131-135.
5. Forente nasjoner. FNs bærekraftsmål [Internett]. [oppdatert 11 mai 2022; hentet 13. mai 2022]. Tilgjengelig fra: [FNs bærekraftsmål](#)
6. European Commission. A European Green Deal. [Hentet 2022-05-13]. Tilgjengelig fra: A European Green Deal | European Commission (europa.eu)
7. Miljødirektoratet. Virkemidler for økt bruk og produksjon av biogass. Oslo: Miljødirektoratet, 2020 [hentet 2022-05-02]. Tilgjengelig fra: [Virkemidler for økt bruk og produksjon av biogass - Miljødirektoratet \(miljodirektoratet.no\)](#)
8. Rambøll. Biogass [Internett]. Oslo. [Hentet 2022-05-24]. Tilgjengelig fra: <https://no.ramboll.com/tjenester/energi/fornybar-energi/biogass>
9. Tomczak-Wandzel R, Levlin E. Biogas production from fish wastes in co-digestion with sewage sludge. Hammarby Sjöstadverk. 2012. 8 s.

10. Frydenberg NL, Hatland HE, Haustveit G. Biochemical methane potential (BMP) in wastewater sludge and fish farming sludge with analysis of heavy metal content in digestate [bacheloroppgave]. Bergen: Høgskulen på Vestlandet; 2017. 92 s.
11. Arnesen IER, Holm MB. Biokjemisk metanpotensial (BMP) i avløpslam ved anaerob samutråting med fiskeslam og matavfall som ko-substrater [bacheloroppgave]. Bergen: Høgskulen på Vestlandet; 2018. 104 s.
12. Lilleengen S. Biogass: miljøvennlig, sikker og lønnsom. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag; 2009. 104 s.
13. AMPTS II & AMPTS II Light. Automatic Methane Potential Test System. Operation and Maintenance Manual. bioprocess control; 2016.
14. Miljødirektoratet. Kunnskapsgrunnlag for rensing av utslipp fra landbasert akvakultur, 2019. [Hentet 2022-05-03]. Tilgjengelig fra: [KUNNSKAPSGRUNNLAG FOR RENSING AV UTSLIPP FRA LANDBASERT AKVAKULTUR \(miljodirektoratet.no\)](#)
15. Moe E, Skage M, Helsingreen MB. EY report reveals the latest aquaculture and fishing industry trends. [Hentet 2022-05-03]. Tilgjengelig fra: [EY report reveals the latest aquaculture and fishing industry trends](#)
16. Choudhury A., Lepine C., Witarsa F., Good C. Anaerobic digestion challenges and resource recovery opportunities from land-based aquaculture waste and seafood processing byproducts: A review. Bioresource Technology. 2022; 354. [Hentet 2022-05-29] Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852422004734>
17. Landbaserte oppdrettsanlegg/lukkede anlegg [Internett]. Havforskningsinstituttet. 2021 [hentet 2022-01-2020]. Tilgjengelig fra: <https://www.hi.no/hi/temasider/akvakultur/landbaserte-oppdrettsanlegg-lukkede-anlegg>

18. Martins C.I.M, Eding E.H, Verdegem L.T.N, Heinsbroek O.S, Blancheton J.P, Verreth J.A.J. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. [Hentet 2022-05-03]. Tilgjengelig fra: [New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability - ScienceDirect](#)
19. Ødegaard H. Vann- og avløpsteknikk. 2. Norsk Vann; 2014. 664 s.
20. Morken J., Briseid T., Hovland J., Lyng K., Kvande I. Veileder for biogassanlegg- mulighetsstudie, planlegging og drift. Norges miljø- og biovitenskaplige universitet; 2017. REALTEK Rapport nr. 56.
21. Vann- og avløpsetaten. Avtale om salg av biogass [Internett]. Bergen Kommune; 2020 [hentet 2022-01-14]. Tilgjengelig fra: <https://www.bergen.kommune.no/politikere-utvalg/api/fil/2740719/Avtale-om-salg-av-biogass>
22. Nielsen HB, Angelidaki I. Strategies for optimizing recovery of the biogas process following ammonia inhibition. Bioresour Technol. 1. november 2008;99(17):7995–8001.
23. ScienceDirect. Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review. [Internett]. Process Biochemistry; 2013 [Hentet 2022-05-08]. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359511313001657?via%3Dihub>
24. Jarvis A, Schnürer A. Microbiological Handbook for Biogas Plants. Malmö. 2009. 142s.
25. Estevez MM, Tomczak-Wandzel R, Kvamme K. Fish slugde as a co-substrate in the anaerobic digestion of municipal sewage sludge- maximizing the utilization of available organic resources. Oslo. 8 s.

26. Saltholdighet - Institutt for biovitenskap. UiO, Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet. [Internett]. [hentet 2022-05-09]. Tilgjengelig fra:
<https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/s/saltholdighet.html>
27. Digestate - an overview. ScienceDirect Topics [Internett]. [hentet 2022-05-11].
Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/digestate>
28. Landbruksdirektoratet. Biorest Ideel og miljøvennlig gjødsel for korn- og grasproduksjon. [Hentet 2022-05-04]. Tilgjengelig fra: [Biorest faktaark.pdf \(landbruksdirektoratet.no\)](#)
29. Forskrift om organisk gjødsel. 2003. Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav av 2003-07-04 nr. 951.
30. Slam, behandlet organisk avfall, jord og avfall. Beregning av tørrstoff ved bestemmelse av tørket rest eller vanninnhold. Norsk Standard; 2012. NS-EN 15934.
31. Karakterisering av slam. Bestemmelse av glødetap i tørrstoff. Norsk Standard; 2000. NS-EN 12879
32. Helbæk M. Statistikk for kjemikere. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag; 2008.

7. Appendiks (vedlegg)

A: Brukerveiledning ammonium-kyvettetest

Driftsanalyse ved Bergen Biogassanlegg:

AMMONIUM-kyvettetest

Bakgrunn: Nedbrytning av proteinholdige substrater i råtnetanken medfører produksjon av ammonium NH_4^+ eller ammoniakk, NH_3 . NH_3 og NH_4^+ står i et likevektsforhold, hvilken form som dominerer er i stor grad avhengig av temperatur og pH. Matavfall og annet organisk avfall med høyt proteininnhold kan gi problemer ved resirkulering av rejektivann fra avvanning av råtnerest. Høye konsentrasjoner av ammoniakk vil kunne inhibere aktiviteten de metanproduserende bakteriene i råtnetankene. Maksimalverdier i råtnetanken: 2000 – 3000 mg NH_4^+ -N/l.

Formål: Ammoniuminnholdet i råtnetanker og rejektivann fra rejektivannlager bør kontrolleres rutinemessig en dag i uken. Ammonium-kyvettetest er en fotometrisk metode for å bestemme mengde ammonium-nitrogen (NH_4 -N) i slam og rejektivann

Utstyr: Spectroquant® kyvetter Ammonium, 4,0 -80,0 mg/l NH_4 -N
NOVA 60 Spectrofotometer
Renset vann (grad 3)
Målekolber
Erlenmeyerkolber
Begerglass
Glasstrakter
Sentrifugerør
Sentrifuge
Whatman foldet filterpapir
Pipetter og pipettespisser
Vorteks-mikser
Stativ til kyvetter

Lo-fritt papir

HMS: Les og følg instruksjoner i SDS for sikkerhet og verneutstyr

Fremgangsmåte:

Prøvene skal analyseres like etter prøveuttak. Det skal analyseres 2 paralleller av hver prøve. La prøven få romtemperatur før analysering (ca 18 – 25 °C). Turbid prøve skal filtreres. pH på prøven skal ligge mellom 4 og 13. Studer også prosedyre som ligger vedlagt kittet da endringer i prosedyren kan forekomme!

1. Slå på spektrofotometeret
2. Bland prøven godt. Overfør prøven til 1 x 50 ml sentrifugerør. Sentrifuger ved 40 RPM/RCF X100 i 20 minutter
3. Filtrer sentrifugatet (væsken) gjennom et Whatman foldet filterpapir.
4. Fortynn filtratet slik at resultatet som avleses i spektrofotometeret ligger mellom 4,0 og 80 mg/l. (Hvilken fortykning som skal brukes avhenger av prøvetypen og må testes ut før analysemetoden tas i bruk). Vanligvis brukes en 1:100 fortykning: Pipetter 1 ml filtrert prøve i en 100 ml målekolbe og fyll opp til merket med rensset vann. Bland godt.
5. Det skal måles ammonium-innhold i 2 paralleller av hver prøve. I tillegg måles en prøve som inneholder kun vann (negativ prøve).
5. Overfør 0,1 ml av hver prøve, inkludert vannprøven, over i hver sin merkete kyvette. Lukk kyvetten godt og bland ved å hjelp av «vortexer» i 5 sek.
6. Tilsett en dose fra Reagens 1K (som er inkludert i analyse-settet). Lukk kyvetten godt og vortex prøven til alt er oppløst.
7. La kyvettene stå i stativ på benk i 15 minutter

8. Tørk forsiktig av kyvetten med lo-fritt papir for å fjerne smuss. Plasser kyvetten varsomt i spektrofotometeret med strek vendt mot deg. Les av resultatet fra spektrofotometeret. Husk å gange opp med evt. fortynningsfaktor. Beregn gjennomsnittet av de to parallelle prøvene. Mengde ammonium i prøven oppgis i mg/l.

Rapportering: Resultatene skrives inn i lab-dagboken og driftsjournalen til Bergen Biogassanlegg.

B: Innveid masse av substrat og substratblandinger før og etter utråtning

Tabell 14: Substrat, substratblandinger og analyseprøver veid inn på analysevekt i digler før utråtning.

Forsøksrunde	Dato	Prøvenavn	Tom digel vekt (g)	Digel m/våt prøve vekt (g)	Digel m/tørket prøve vekt (g)	Digel m/glødet prøve (g)	
1	25.01.22	Pode 1	39,6791	72,1237	40,5847	40,0247	
		Pode 2	36,8408	67,4959	37,6962	37,1667	
		Hyg 1	37,9686	67,7087	39,3802	38,3189	
		Hyg 2	40,9926	73,9442	42,5700	41,3891	
		VFS 1	34,7065	64,7966	37,6293	35,1543	
		VFS 2	33,3139	65,8441	36,3929	33,8145	
		TFS 1	33,2089	58,4358	57,0062	40,5013	
		TFS 2	34,2880	56,7126	55,4432	40,6491	
		Cellulose 1	34,6808	44,6180	44,1295	35,3504	
		Cellulose 2	38,0953	47,9295	47,4448	38,7545	
	26.01.22	Hyg + 25 % VFS 1	18,6194	37,0178	19,6112	18,8417	
		Hyg + 25 % VFS 2	18,2046	36,6416	19,2075	18,4309	
		Hyg + 25 % TFS 1	19,3660	37,5481	20,4943	19,6275	
		Hyg + 25 % TFS 2	22,5959	38,8797	23,7518	22,8499	
	27.01.2022	Pode + hyg 1	33,3127	65,4795	34,4795	33,6592	
		Pode + hyg 2	38,0946	67,9161	39,0198	38,4152	
		Pode + hyg + 25 % VFS 1	34,9493	68,4554	35,9900	35,0208	
		Pode + Hyg + 25 % VFS 2	34,2784	66,9029	35,6748	35,6123	
		Pode + Hyg + 25 % TFS 1	37,2784	67,9889	38,2532	37,6123	
		Pode + Hyg + 25 % TFS 2	37,5264	73,3356	38,6629	37,9139	
		Pode + cellulose 1	37,9691	70,9131	39,0897	38,3125	
		Pode + cellulose 2	39,0374	70,3792	40,0954	39,3594	
			Pode 1	34,0395	68,8954	34,9737	34,4061

2	08.03.22	Pode 2	34,6696	68,7135	35,5828	35,0271
		Hyg 1	34,6782	75,1297	36,5408	35,0706
		Hyg 2	39,6760	78,3221	41,4487	40,0490
		VFS 1	38,1048	73,6177	41,7682	38,6398
		VFS 2	34,1516	72,5867	38,0996	34,7506
		TFS 1	36,8313	58,4965	57,2177	42,9868
		TFS 2	34,9437	54,2728	53,1261	40,4058
		Cellulose 1	18,1134	21,6802	21,5061	18,1466
		Cellulose 2	18,7529	22,8402	22,6401	18,8294
	09.03.22	Hyg + 40 % VS VFS 1	39,0397	70,8816	40,9595	39,3677
		Hyg + 40 % VS VFS 2	34,4931	69,4381	36,5252	34,8546
		Hyg + 40 % VS TFS 1	33,1432	71,8052	36,1093	33,7087
		Hyg + 40 % VS TFS 2	31,4001	71,1475	34,4625	31,9845
	10.03.22	Pode + hyg 1	17,6056	33,2873	18,0169	17,7432
		Pode + hyg 2	22,5946	37,5042	22,9871	22,7308
		Pode + hyg + 40 % VS VFS 1	19,0670	37,4560	19,6463	19,2720
		Pode + hyg + 40 % VS VFS 2	18,6207	35,9126	19,1668	18,8138
		Pode + hyg + 40 % VS TFS 1	18,7525	34,3313	19,2708	18,9376
		Pode + hyg + 40 % VS TFS 2	18,2037	34,9536	18,7615	18,4018
		Pode + cellulose 1	18,1134	33,4523	18,6500	18,2896
		Pode + cellulose 2	19,3644	34,5119	19,8935	19,5391
	22.03.22	Pode 1	20,6689	38,2920	21,1567	20,8519
		Pode 2	18,7526	37,4918	19,2746	18,9469
		Hyg 1	19,3833	38,7372	20,3869	19,5928
		Hyg 2	18,1123	37,7159	19,1232	18,3252
		VFS 1	17,6004	35,6856	19,4002	17,8289
		VFS 2	18,6265	37,6174	20,5177	18,8726
		TFS 1	22,5951	33,7448	33,0987	25,3977
		TFS 2	19,0690	31,0616	30,3680	22,1080
		Cellulose 1	19,3652	24,9412	24,6710	19,4528

3	23.03.22	Cellulose 2	18,2016	23,9441	23,6656	18,3149
		Pode + hyg 1	34,1493	70,5727	35,2677	34,5216
		Pode + hyg 2	33,1424	73,2460	34,3767	33,5546
		Pode + VFS 1	31,4015	70,9315	32,6754	31,8098
		Pode + VFS 2	37,5305	79,3501	38,8685	37,9630
		Pode + TFS 1	40,9971	79,2893	42,3152	41,4283
		Pode + TFS 2	37,9591	81,6029	39,4543	38,4521
		Pode + cellulose 1	20,4599	37,1285	21,0082	20,6280
		Pode + cellulose 2	21,4656	38,0122	22,0122	21,5820

Tabell 15: Substrat, substratblandinger og analyseprøver veid inn på analysevekt i digler etter utråting.

Forsøksrunde	Dato	Prøvenavn	Tom digel vekt (g)	Digel m/våt prøve vekt (g)	Digel m/tørket prøve vekt (g)	Digel m/glødet prøve (g)
1	24.02.2022	Pode 1	38,1020	69,5656	38,9068	38,4287
		Pode 2	40,9977	74,6813	41,8545	41,3487
		Pode + hyg 1	34,0406	72,0475	35,0185	34,4506
		Pode + hyg 2	37,9598	71,7442	38,8350	38,3273
		Pode + hyg + 25 % VFS 1	33,3232	65,6614	34,1627	33,6644
		Pode + hyg + 25 % VFS 2	34,7083	69,0038	35,5950	35,0777
		Pode + hyg + 25 % TFS 1	41,0940	73,8175	41,9601	41,4545
		Pode + hyg + 25 % TFS 2	34,1537	69,9122	35,0971	34,5462
		Pode + cellulose 1	34,9427	66,0936	37,769	35,2776
		Pode + cellulose 2	39,0347	75,9009	40,0020	39,4297
2	07.04.2022	Pode 1	34,9460	62,8654	35,6140	35,2328
		Pode 2	39,6775	70,9767	40,4311	40,0036
		Pode + hyg 1	22,5953	35,9232	22,9356	22,7392
		Pode + hyg 2	19,3748	35,1229	19,7682	19,5410
		Pode + hyg + 40 % VS VFS 1	18,6202	33,8444	18,9928	18,7768
		Pode + hyg + 40 % VS VFS 2	18,2016	33,9586	18,5858	18,3627

		Pode + hyg + 40 % VS TFS 1	19,3651	36,8281	19,8133	19,5567
		Pode + hyg + 40 % VS TFS 2	18,1132	36,1502	18,5791	18,3118
		Pode + cellulose 1	18,7528	34,7875	19,1530	18,9242
		Pode + cellulose 2	17,5979	32,7037	17,9743	17,7597
3	21.04.22	Pode 1	40,9973	79,4643	41,9182	41,3717
		Pode 2	31,4016	71,7695	32,3718	31,8005
		Pode + hyg 1	37,9613	76,9483	38,9463	38,3681
		Pode + hyg 2	34,1487	72,8775	35,1381	34,5540
		VFS 1	33,1418	71,1924	34,1203	33,5357
		VFS 2	34,9422	70,0924	35,8609	35,3092
		TFS 1	37,2797	71,8215	38,2392	37,6753
		TFS 2	37,5301	71,0673	38,4622	37,9103
		Pode + cellulose 1	39,0355	75,4712	39,9598	39,4153
		Pode + cellulose 2	33,2054	69,5194	34,1279	33,5841

C: % TS, % VS og % Wv beregnet fra innveid masse av substrat og substratblandinger

Tabell 16: % TS, % VS og % Wv beregnet for substrat og substratblandinger før utråting.

Forsøksrunde	Dato	Prøvenavn	TS (%)	VS (%)	Wv (%)
1	25.01.2022	Pode 1	2,70	1,73	61,84
		Pode 2	2,79	1,73	61,90
		Hyg 1	4,78	3,57	74,66
		Hyg 2	4,79	3,58	74,86
		VFS 1	9,71	8,23	84,68
		VFS 2	9,47	7,93	83,74
		TFS 1	94,33	65,43	69,36
		TFS 2	94,34	65,97	69,93
		Cellulose 1	95,08	88,35	92,91
		Cellulose 2	95,07	88,37	92,95
		Hyg + 25 % VFS 1	5,39	4,18	77,59
		Hyg + 25 % VFS 2	5,44	4,21	77,44
		Hyg + 25 % TFS 1	6,21	4,77	76,82
		Hyg + 25 % TFS 2	7,01	5,54	78,03
	27.01.2022	Pode + hyg 1	3,12	2,05	65,51
		Pode + hyg 2	3,10	2,03	65,35
		Pode + hyg + 25 % VFS 1	3,11	2,05	65,87
		Pode + hyg + 25 % VFS 2	3,09	2,03	65,62
		Pode + hyg + 25 % TFS 1	3,17	2,09	65,75
		Pode + hyg + 25 % TFS 2	3,17	2,09	65,90
Pode + cellulose 1		3,40	2,36	65,36	
Pode + cellulose 2	3,38	2,35	69,57		
		Pode 1	2,68	1,63	60,76

2	08.03.22	Pode 2	2,68	1,63	60,85
		Hyg 1	4,60	3,63	78,93
		Hyg 2	4,59	3,62	78,96
		VFS 1	10,32	8,81	85,40
		VFS 2	10,27	8,71	84,83
		TFS 1	94,10	65,69	69,81
		TFS 2	94,07	65,81	69,96
		Cellulose 1	95,12	94,19	99,02
		Cellulose 2	95,10	93,23	98,03
	09.03.22	Hyg + 40 % VFS 1	6,03	5,00	82,91
		Hyg + 40 % VFS 2	5,82	4,78	82,21
		Hyg + 40 % TFS 1	7,67	6,21	80,93
		Hyg + 40 % TFS 2	7,70	6,23	80,92
	10.03.22	Pode + hyg 1	2,62	1,75	66,55
		Pode + hyg 2	2,63	1,72	65,30
		Pode + hyg + 40 % VFS 1	3,15	2,04	64,61
		Pode + hyg + 40 % VFS 2	3,16	2,04	64,64
		Pode + hyg + 40 % TFS 1	3,33	2,14	64,29
		Pode + hyg + 40 % TFS 2	3,33	2,15	64,49
		Pode + cellulose 1	3,50	2,35	67,16
		Pode + cellulose 2	3,49	2,34	66,98
			Pode 1	2,70	1,73
	Pode 2		2,79	1,75	62,78
	Hyg 1		5,19	4,10	79,13
	Hyg 2		5,16	4,07	78,94
	VFS 1		9,95	8,69	87,30

3	22.03.22	VFS 2	9,96	8,66	86,99
		TFS 1	94,21	69,07	73,32
		TFS 2	94,22	68,88	73,10
		Cellulose 1	95,15	93,58	98,35
		Cellulose 2	95,15	93,18	97,93
	23.03.22	Pode + hyg 1	3,07	2,05	66,71
		Pode + hyg 2	3,08	2,05	66,60
		Pode + VFS 1	3,22	2,19	67,95
		Pode + VFS 2	3,20	2,17	67,68
		Pode + TFS 1	3,44	2,32	67,29
		Pode + TFS 2	3,43	2,30	67,03
		Pode + cellulose 1	3,29	2,28	69,34
		Pode + cellulose 2	3,30	2,60	78,70

Tabell 17: % TS, % VS og % Wv beregnet for substrat og substratblandinger etter utråtning.

Forsøksrunde	Dato	Prøvenavn	TS (%)	VS (%)	Wv (%)
1	24.02.2022	Pode 1	2,56	1,52	59,41
		Pode 2	2,54	1,50	59,03
		Pode + Hyg 1	2,57	1,49	58,07
		Pode + Hyg 2	2,59	1,50	58,01
		Pode + Hyg + 25 % VFS 1	2,60	1,54	59,36
		Pode + Hyg + 25 % VFS 2	2,59	1,51	58,34
		Pode + Hyg + 25 % TFS 1	2,65	1,55	58,38
		Pode + Hyg + 25 % TFS 2	2,64	1,54	58,40
		Pode + cellulose 1	2,65	1,58	59,47
		Pode + cellulose 2	2,62	1,55	59,16
		Pode 1	2,39	1,37	57,07
		Pode 2	2,41	1,37	56,73

2	07.04.2022	Pode + hyg 1	2,55	1,47	57,71
		Pode + hyg 2	2,50	1,44	57,75
		Pode + hyg + 40 % VFS 1	2,45	1,42	57,97
		Pode + hyg + 40 % VFS 2	2,44	1,42	58,07
		Pode + hyg + 40 % TFS 1	2,57	1,47	57,25
		Pode + hyg + 40 % TFS 2	2,58	1,48	57,37
		Pode + cellulose 1	2,50	1,43	57,17
		Pode + cellulose 2	2,49	1,42	57,01
3	21.04.22	Pode 1	2,39	1,42	59,34
		Pode 2	2,40	1,42	58,88
		Pode + hyg 1	2,53	1,48	58,70
		Pode + hyg 2	2,55	1,51	59,04
		Pode + VFS 1	2,57	1,54	59,74
		Pode + VFS 2	2,61	1,57	60,05
		Pode + TFS 1	2,78	1,63	58,77
		Pode + TFS 2	2,78	1,65	59,21
		Pode + cellulose 1	2,54	1,49	58,91
		Pode + cellulose 2	2,54	1,50	58,95

D: Beregninger for å finne masse fiskeslam som måtte tilsettes avløpsslam for å lage ønsket substratblanding basert på % VS

I første forsøksrunde skulle 25 % VS i substratblandingen komme fra fiskeslam. Det vil si at 25 % av det organiske innholdet totalt i substratblandingen av fiskeslam og hygienisert avløpsslam skulle komme fra fiskeslammet. Det betyr at hygienisert avløpsslam står for 75 % av det organiske innholdet. Det ble funnet ved analyse og beregning (formel 3) at hygienisert slam hadde et organisk innhold på 3,58 %. For 900 gram hygienisert slam blir da massen av organisk stoff 32,22 gram:

$$\frac{900 \text{ g}}{0,0358} = 32,22 \text{ g}$$

Dersom 32,22 gram skal være 75 % av det organiske innholdet totalt i substratblandingen må 100 % være 42,96 gram:

$$\frac{32,22 \text{ g}}{0,75} = 42,96 \text{ g}$$

Det betyr at massen av det organiske innholdet som kommer fra fiskeslam må være 10,74 gram.

$$42,96 \text{ g} - 32,22 \text{ g} = 10,74 \text{ g}$$

Ved eksperiment og beregning (formel 3) ble det funnet at vått fiskeslam hadde en % VS på 8,08. For at massen av organisk innhold fra vått fiskeslam skulle tilsvare 10,74 gram måtte total masse av vått fiskeslam være 132,92 gram.

$$\frac{10,74 \text{ g}}{0,0808} = 132,92 \text{ g}$$

Altså måtte 132,92 gram vått fiskeslam tilsettes til 900 gram hygienisert slam for at det våte fiskeslammet skulle stå for 25 % av det organiske innholdet.

Det tørkede fiskeslammet hadde en % VS på 65,70 %, som ble beregnet ved hjelp av formel 3. For at massen av organisk innhold fra tørket fiskeslam skulle tilsvare 10,74 gram måtte den totale massen av tørket fiskeslam være 16,347 gram.

$$\frac{10,74 \text{ g}}{0,6570} = 16,347 \text{ g}$$

16,347 gram tørket fiskeslam måtte tilsettes til 900 gram hygienisert slam for at tørket fiskeslam skulle stå for 25 % av det organiske innholdet i substratblandingen.

$$\% VS = \frac{10,74 \text{ g}}{42,96 \text{ g}} \cdot 100 \% = 25,0 \%$$

E: AMPTS II forsøksoppsett

Tabell 18: AMPTS II forsøksoppsettene (enhet på pøde og substrat: gram).

Forsøksrunde	Dato	Prøve	Flaskenummer	Ønsket mengde (pøde)	Ønsket mengde (substrat)	Faktisk mengde (Pøde)	Faktisk mengde (substrat)
1	26.01.22	Pøde 1	1	400,0	0,0	400,0	0,0
		Pøde 2	2	400,0	0,0	400,0	0,0
		Pøde 3	3	4000	0,0	400,0	0,0
		Hyg 1	4	344,51	55,49	344,8	55,4
		Hyg 2	5	344,51	55,49	344,5	55,5
		Hyg 3	6	344,51	55,49	344,7	55,4
		25 % VS VFS 1	7	351,71	48,29	351,8	48,4
		25 % VS VFS 2	8	351,71	48,29	351,7	48,3
		25 % VS VFS 3	9	351,71	48,29	351,9	48,4
		25 % VS TFS 1	10	359,72	40,28	360,3	40,2
		25 % VS TFS 2	11	359,72	40,28	359,7	40,3
		25 % VS TFS 3	12	359,72	40,28	359,7	40,3
		Cellulose 1	13	397,41	2,59	397,4	2,5912
		Cellulose 2	14	397,41	2,59	397,6	2,5901
		Cellulose 3	15	397,41	2,59	397,4	2,5903
2	10.03.22	Pøde 1	1	400,0	0,0	400,0	0,0
		Pøde 2	2	400,0	0,0	400,0	0,0
		Pøde 3	3	400,0	0,0	400,0	0,0
		Hyg 1	4	347,92	52,08	347,9	52,1
		Hyg 2	5	347,92	52,08	347,9	52,3
		Hyg 3	6	347,92	52,08	347,9	52,3
		40 % VS VFS 1	7	360,0	40,0	360,0	40,0
		40 % VS VFS 2	8	360,0	40,0	360,0	40,0
		40 % VS VFS 3	9	360,0	40,0	360,0	40,0
		40 % VS TFS 1	10	367,87	32,13	367,9	32,0
		40 % VS TFS 2	11	367,87	32,13	367,9	32,2
		40 % VS TFS 3	12	367,87	32,13	367,9	32,1
		Cellulose 1	13	397,69	2,31	397,7	2,3
		Cellulose 2	14	397,69	2,31	397,7	2,3
		Cellulose 3	15	397,69	2,31	397,7	2,3
		Pøde 1	1	400,0	0,0	400,0	0,0
		Pøde 2	2	400,0	0,0	400,0	0,0
		Pøde 3	3	400,0	0,0	400,0	0,0
		Hyg 1	4	350,32	49,68	350,3	49,9

3	23.03.22	Hyg 2	5	350,32	49,68	350,3	50,2
		Hyg 3	6	350,32	49,68	350,3	50,0
		VFS 1	7	374,95	25,05	374,9	25,0
		VFS 2	8	374,95	25,05	374,9	25,9
		VFS 3	9	374,95	25,05	374,9	25,3
		TFS 1	10	396,66	3,34	396,8	3,2
		TFS 2	11	396,66	3,34	396,7	3,1
		TFS 3	12	396,66	3,34	396,7	3,1
		Cellulose 1	13	397,53	2,47	397,5	2,4704
		Cellulose 2	14	397,53	2,47	397,5	2,4712
		Cellulose 3	15	397,53	2,47	397,6	2,4699

F: Rådata for akkumulert volum av metan i forsøksseriene (enhet: Nml)

Tabell 19: Rådata for akkumulert volum av metan i forsøksserie 1 (enhet: Nml).

Dag	Pod e 1	Pod e 2	Pod e 3	Hyg . 1	Hyg . 2	Hyg . 3	25% VFS 1	25% VFS 2	25% VFS 3	25% TFS 1	25% TFS 2	25% TFS 3	Cell ulos e 1	Cell ulos e 2	Cell ulos e 3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	125, 2	124, 7	124, 9	411, 1	412, 7	423, 2	432, 8	434, 0	423, 7	443, 1	440, 0	442, 8	367, 9	376, 4	370, 3
2	171, 0	170, 4	171, 3	694, 1	700, 0	702, 0	745, 2	718, 0	717, 2	698, 5	708, 1	688, 7	831, 2	850, 9	836, 4
3	194, 0	192, 5	193, 8	746, 2	753, 2	755, 4	803, 8	773, 8	775, 1	758, 2	770, 1	746, 2	964, 6	982, 5	968, 7
4	221, 8	210, 5	220, 6	794, 4	799, 9	806, 2	853, 3	822, 5	826, 1	809, 8	823, 6	793, 6	101, 1,3	102, 8,7	101, 4,8
5	246, 6	242, 8	243, 7	833, 8	839, 9	844, 5	896, 7	861, 4	867, 9	848, 5	863, 7	829, 1	104, 3,4	106, 1	104, 5,9
6	259, 2	256, 0	256, 8	853, 6	859, 6	864, 6	918, 6	881, 3	888, 9	870, 7	888, 0	849, 5	106, 0,1	107, 9,7	106, 2,6
7	273, 6	272, 2	271, 9	876, 7	881, 4	887, 5	942, 1	903, 0	912, 1	895, 3	915, 1	871, 9	108, 3,7	111, 5,7	109, 4,8
8	287, 4	286, 0	286, 0	897, 0	900, 1	909, 6	962, 9	921, 4	932, 1	916, 6	937, 8	891, 6	111, 8,4	113, 3,2	111, 9,7
9	295, 5	295, 1	294, 6	913, 5	915, 1	926, 4	979, 0	935, 5	948, 8	932, 9	955, 3	906, 5	113, 4,3	114, 5,8	113, 4,5
10	304, 1	304, 0	303, 4	929, 5	930, 1	942, 2	995, 3	949, 3	963, 7	948, 0	971, 8	918, 1	114, 6,1	115, 6,2	114, 9,2
11	308, 7	308, 9	307, 8	936, 8	940, 1	948, 3	100, 4,9	956, 7	974, 2	957, 9	982, 2	927, 2	115, 3,3	116, 3,9	115, 5
12	313, 8	315, 0	312, 6	944, 7	949, 7	955, 9	101, 7,7	965, 2	986, 7	969, 3	993, 5	937, 4	116, 0,9	117, 2,9	116, 1,6
13	318, 5	319, 4	317, 5	952, 5	956, 4	963, 8	103, 1,2	975, 2	994, 8	980, 7	100, 5,3	948, 5	116, 7,4	108, 0,6	116, 8
14	321, 6	322, 8	320, 6	956, 9	961, 7	968, 9	103, 8,7	982, 9	100, 0,7	987, 8	101, 3	956, 4	117, 1,8	118, 7,4	117, 3,7
15	324, 7	327, 4	323, 7	962, 1	966, 0	973, 8	104, 5,1	988, 2	100, 6	993, 0	102, 0,6	961, 7	117, 7,1	109, 3,1	117, 8,3

16	331, 4	334, 6	329, 5	971, 1	972, 4	982, 4	105 6	996, 6	101 3,9	100 2,2	103 3,1	970, 1	118 5,4	120 3,1	118 5,1
17	337, 4	340, 7	335, 5	978, 8	979, 5	990, 4	106 4,2	100 3,6	102 1,5	100 9,7	104 3,1	977, 7	119 3,4	121 1,4	119 2,1
18	342, 5	347, 1	340, 3	984, 4	985, 0	997, 9	107 0,7	100 9,1	102 7,4	101 7,8	105 2,1	984, 5	119 9,5	121 7,5	119 7,3
19	347, 1	352, 1	343, 9	990, 6	990, 0	100 3,3	107 7,4	101 4,1	103 2,9	102 3,8	106 0,7	991, 2	120 4,6	122 3	120 2,2
20	350, 5	356, 5	347, 5	994, 5	993, 9	100 7,4	108 4,1	101 9,9	104 0,1	102 8,5	107 0	996, 8	120 8,9	122 7,2	120 6,4
21	354, 4	360, 2	349, 6	997, 7	997, 0	101 0,7	108 7,7	102 3,7	104 4,1	103 2,2	107 6,5	100 0,5	121 2,3	123 0,4	120 9,9
22	356, 4	363, 9	351, 5	100 1	100 0,1	101 4,2	109 1,4	102 6	104 7	103 5,9	108 1,5	100 4,2	121 5,9	123 3,8	121 3,4
23	359, 9	367, 5	353, 5	100 5,1	100 3,6	101 8,2	109 5,4	102 8,3	105 1,7	103 9,9	108 6,2	100 8,1	121 9,8	123 7,6	121 7,2
24	363, 3	371, 1	355, 4	100 8,8	100 7,1	102 1,9	109 9,3	103 0,3	105 5,5	104 3,4	109 4,1	101 1,8	122 3,5	124 1,1	122 0,8

Tabell 20: Rådata for akkumulert volum av metan i forsøksserie 2 (enhet: Nml).

Dag	Pod e 1	Pod e 2	Pod e 3	Hyg . 1	Hyg . 2	Hyg . 3	40% VFS 1	40% VFS 2	40% VFS 3	40% TFS 1	40% TFS 2	40% TFS 3	Cell ulos e 1	Cell ulos e 2	Cell ulos e 3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	111, 2	113, 8	114, 4	421, 4	419, 2	2,5	424, 7	424, 0	424, 8	442, 6	445, 8	436, 6	392, 0	393, 2	373, 9
2	148, 4	152, 3	153, 5	670, 9	682, 0	13,5	656, 3	658, 3	660, 4	704, 7	712, 3	703, 8	807, 5	810, 1	782, 1
3	175, 4	180, 3	182, 4	725, 6	738, 7	33,4	719, 7	721, 3	726, 6	775, 0	780, 1	773, 8	895, 4	895, 0	874, 3
4	197, 2	201, 9	204, 5	765, 7	779, 2	38,7	768, 6	769, 4	775, 8	823, 3	826, 9	821, 5	930, 6	929, 5	913, 0
5	214, 9	220, 4	223, 0	796, 1	809, 9	50,1	806, 1	808, 1	814, 1	863, 1	865, 5	860, 3	958, 7	954, 0	946, 6

6	228, 2	234, 7	236, 9	822, 0	835, 1	55,9	830, 3	831, 7	839, 4	890, 0	890, 7	885, 9	990, 1	982, 2	965, 5
7	238, 9	246, 2	248, 6	846, 1	861, 3	64,7	852, 3	852, 3	861, 2	914, 2	912, 8	908, 2	1009, ,9	1003, ,8	982, 3
8	245, 4	252, 7	255, 4	857, 2	872, 9	73,8	864, 9	864, 1	873, 9	928, 8	925, 2	920, 6	1018, ,6	1012, ,0	990, 8
9	251, 3	259, 0	260, 7	870, 6	885, 3	85,9	879, 0	876, 8	887, 4	943, 8	937, 7	933, 5	1028, ,9	1020, ,9	1000, ,3
10	258, 9	267, 6	269, 1	885, 8	899, 0	100, 8	894, 7	890, 8	903, 4	959, 4	952, 8	948, 1	1041, ,9	1031, ,1	1011, ,6
11	266, 3	275, 9	276, 5	898, 4	913, 9	110, 1	910, 2	904, 6	919, 3	974, 1	965, 5	960, 5	1052, ,7	1040, ,4	1022, ,7
12	271, 5	280, 1	281, 5	905, 9	924, 7	118, 4	920, 9	915, 4	930, 3	985, 7	975, 8	970, 5	1059, ,8	1047, ,9	1028, ,5
13	275, 9	284, 5	287, 1	912, 1	933, 7	126, 8	928, 7	924, 8	937, 4	996, 5	985, 3	980, 9	1065, ,1	1054, ,6	1034, ,3
14	280, 4	289, 8	292, 0	917, 9	940, 6	136, 6	936, 0	931, 8	946, 3	1008, ,2	995, 5	990, 8	1070, ,5	1061, ,7	1040, ,1
15	284, 7	293, 1	294, 9	922, 9	946, 6	141, 7	942, 1	937, 1	951, 1	1019, ,0	1003, ,9	999, 1	1076, ,1	1067, ,4	1043, ,4
16	288, 3	295, 7	297, 7	926, 5	950, 6	145, 7	946, 4	941, 0	956, 1	1026, ,8	1010, ,4	1006, ,3	1079, ,8	1072, ,2	1046, ,7
17	292, 0	298, 3	302, 1	930, 2	954, 9	149, 4	952, 0	945, 4	961, 8	1035, ,2	1018, ,3	1014, ,9	1083, ,6	1076, ,7	1051, ,7
18	298, 7	302, 3	307, 2	935, 7	962, 8	155, 0	958, 6	952, 4	968, 1	1043, ,9	1026, ,4	1024, ,0	1089, ,1	1082, ,3	1057, ,2
19	303, 0	306, 8	309, 8	939, 4	966, 5	159, 4	963, 9	956, 6	974, 1	1051, ,3	1032, ,4	1030, ,0	1093, ,9	1087, ,1	1060, ,9
20	307, 1	308, 4	312, 3	941, 8	970, 2	162, 8	967, 4	960, 7	979, 4	1057, ,8	1037, ,2	1034, ,6	1097, ,3	1090, ,6	1064, ,6
21	309, 1	310, 0	314, 8	944, 1	972, 7	165, 7	970, 5	963, 0	981, 7	1063, ,5	1040, ,5	1039, ,0	1100, ,7	1094, ,1	1066, ,8
22	311, 1	311, 5	317, 3	946, 5	975, 0	167, 9	973, 6	965, 3	984, 1	1067, ,7	1043, ,7	1042, ,3	1103, ,4	1096, ,9	1068, ,9
23	313, 1	313, 1	319, 7	950, 0	977, 3	170, 2	977, 3	967, 7	986, 4	1072, ,2	1047, ,9	1045, ,5	1106, ,1	1099, ,7	1071, ,1
24	315, 9	314, 8	322, 1	953, 5	981, 8	174, 2	981, 0	973, 1	991, 9	1079, ,3	1052, ,6	1051, ,5	1109, ,0	1103, ,8	1074, ,5

25	322, 5	317, 3	324, 7	956, 6	988, 1	179, 9	984, 4	978, 0	997, 2	1088 ,4	1056 ,5	1057 ,3	1116 ,8	1110 ,6	1080 ,7
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

Tabell 21: Rådata for akkumulert volum av metan i forsøksserie 3 (enhet: Nml).

Dag	Pod e 1	Pod e 2	Pod e 3	Hyg . 1	Hyg . 2	Hyg . 3	VFS 1	VFS 2	VFS 3	TFS 1	TFS 2	TFS 3	Cell ulos e 1	Cell ulos e 2	Cell ulos e 3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	132, 5	75,2	139, 9	520, 3	570, 2	530, 5	396, 5	494, 8	479, 5	546, 8	524, 8	531, 7	435, 7	440, 1	427, 5
2	172, 1	112, 4	182, 3	737, 3	900, 2	769, 6	621, 0	752, 7	714, 8	872, 6	800, 8	816, 7	891, 2	891, 5	880, 0
3	198, 4	137, 5	210, 8	797, 9	981, 7	830, 8	713, 2	849, 4	808, 4	979, 8	898, 6	916, 1	972, 7	971, 3	959, 3
4	221, 1	159, 7	235, 7	844, 8	1032 ,3	879, 9	779, 5	921, 3	875, 8	1044 ,2	959, 6	977, 9	1012 ,0	1009 ,8	998, 2
5	243, 2	181, 7	260, 0	882, 4	1077 ,7	918, 8	829, 9	975, 6	928, 2	1093 ,6	1006 ,9	1025 ,8	1044 ,2	1042 ,0	1029 ,3
6	260, 2	198, 5	278, 9	912, 7	1113 ,5	949, 4	868, 5	1016 ,0	968, 2	1131 ,4	1042 ,7	1062 ,5	1080 ,2	1075 ,5	1059 ,5
7	273, 7	212, 8	292, 6	936, 3	1139 ,7	973, 1	900, 2	1048 ,1	1000 ,6	1161 ,3	1070 ,4	1090 ,7	1103 ,7	1101 ,9	1087 ,5
8	284, 9	223, 2	306, 4	954, 6	1162 ,0	993, 1	928, 1	1076 ,7	1030 ,7	1185 ,0	1094 ,2	1113 ,9	1119 ,2	1118 ,3	1102 ,3
9	292, 8	230, 9	316, 2	968, 4	1180 ,3	1007 ,3	950, 8	1100 ,7	1055 ,5	1204 ,8	1113 ,8	1134 ,7	1133 ,0	1130 ,2	1114 ,6
10	301, 9	239, 7	325, 5	980, 3	1197 ,0	1019 ,5	969, 3	1120 ,8	1075 ,3	1221 ,5	1130 ,3	1151 ,4	1142 ,9	1141 ,0	1123 ,9
11	311, 5	249, 1	336, 9	993, 3	1212 ,4	1032 ,8	988, 5	1140 ,0	1095 ,6	1239 ,8	1148 ,1	1170 ,6	1155 ,6	1154 ,3	1135 ,6
12	323, 3	260, 7	349, 4	1006 ,9	1227 ,3	1046 ,8	1006 ,7	1159 ,0	1114 ,8	1257 ,2	1166 ,0	1189 ,1	1168 ,8	1168 ,2	1149 ,1
13	328, 1	265, 6	356, 7	1015 ,3	1236 ,4	1054 ,7	1018 ,4	1171 ,9	1127 ,9	1269 ,0	1176 ,4	1201 ,0	1176 ,8	1174 ,5	1154 ,4
14	335, 5	274, 5	364, 2	1025 ,0	1246 ,8	1063 ,2	1031 ,5	1184 ,1	1142 ,0	1281 ,2	1189 ,2	1214 ,4	1186 ,0	1183 ,5	1161 ,9
15	341, 5	279, 8	372, 5	1034 ,4	1257 ,3	1071 ,7	1044 ,2	1195 ,8	1155 ,2	1293 ,0	1200 ,1	1226 ,7	1193 ,3	1191 ,5	1168 ,2

16	345, 8	283, 7	377, 7	1039 ,8	1263 ,5	1077 ,3	1051 ,1	1203 ,3	1163 ,2	1301 ,1	1208 ,7	1235 ,5	1198 ,3	1195 ,8	1173 ,0
17	348	286, 2	380, 5	1044 ,1	1267 ,7	1080 ,5	1057 ,4	1209 ,9	1169 ,4	1308 ,0	1214 ,9	1242 ,3	1201 ,6	1199 ,7	1175 ,9
18	350, 2	288, 7	383, 3	1047 ,6	1272 ,1	1083 ,8	1062 ,5	1214 ,4	1175 ,3	1313 ,4	1220 ,6	1247 ,9	1204 ,9	1202 ,8	1178 ,8
19	352, 3	291, 3	386, 2	1051 ,3	1277 ,5	1088 ,5	1067 ,1	1220 ,0	1181 ,5	1319 ,8	1226 ,2	1254 ,9	1209 ,6	1205 ,9	1182 ,0
20	354, 3	294, 4	390, 3	1055 ,4	1283 ,2	1093 ,9	1075 ,2	1226 ,6	1189 ,1	1327 ,0	1234 ,5	1262 ,9	1214 ,6	1210 ,5	1186 ,1
21	356, 0	297, 6	394, 0	1059 ,1	1288 ,6	1099 ,4	1083 ,9	1232 ,7	1196 ,4	1334 ,7	1243 ,2	1272 ,1	1219 ,8	1215 ,3	1189 ,7
22	357, 6	299, 5	395, 7	1061 ,6	1291 ,4	1102 ,9	1087 ,9	1235 ,8	1199 ,8	1340 ,4	1247 ,2	1276 ,2	1223 ,4	1217 ,8	1192 ,0
23	359, 3	301, 0	397, 4	1064 ,1	1294 ,3	1105 ,4	1091 ,9	1238 ,5	1203 ,2	1344 ,2	1251 ,3	1280 ,2	1225 ,9	1220 ,2	1194 ,2
24	360, 9	302, 5	399, 0	1066 ,6	1297 ,6	1107 ,9	1096 ,5	1241 ,3	1208 ,2	1349 ,0	1257 ,0	1285 ,7	1228 ,4	1222 ,6	1196 ,4
25	363, 5	304, 0	400, 7	1071 ,5	1302 ,5	1111 ,2	1101 ,1	1246 ,3	1213 ,9	1356 ,0	1263 ,5	1291 ,9	1231 ,3	1226 ,8	1199 ,7
26	367, 0	305, 5	401, 7	1076 ,1	1306 ,8	1115 ,5	1105 ,5	1251 ,1	1219 ,9	1363 ,3	1270 ,0	1298 ,7	1235 ,4	1231 ,5	1203 ,8

G: Tabeller med data for beregning av BMP

Tabell 22: Data for beregning av biokjemisk metanpotensial i første forsøksrunde.

Prøvenavn	Akk. volum	Gjennomsnitt akk. volum blank	Faktisk mengde pode [g]	Faktisk mengde substrat [g]	VS % gjennomsnitt blank	VS % gjennomsnitt substrat
Pode 1	363,3	363,3	400,0	0,0	0,0173	
Pode 2	371,1		400,0	0,0		
Pode 3	355,4		400,0	0,0		
Pode + Hyg. 1	1008,8		344,8	55,4		0,0358
Pode + Hyg. 2	1007,1		344,5	55,5		
Pode + Hyg. 3	1021,9		344,7	55,4		
Pode + Hyg. + 25 % VFS 1	1099,3		351,8	48,4		0,0420
Pode + Hyg. + 25 % VFS 2	1030,3		351,7	48,3		
Pode + Hyg. + 25 % VFS 3	1055,5		351,9	48,4		
Pode + Hyg. + 25 % TFS 1	1043,4		360,3	40,2		0,0515
Pode + Hyg. + 25 % TFS 2	1094,1		359,7	40,3		
Pode + Hyg. + 25 % TFS 3	1011,8		359,7	40,3		
Pode + cellulose 1	1223,5		397,4	2,5912		0,8836
Pode + cellulose 2	1241,1		397,6	2,5901		
Pode + cellulose 3	1220,8		397,4	2,5903		

Tabell 23: Data for beregning av biokjemisk metanpotensial i andre forsøksrunde

Prøvenavn	Akk. volum	Gjennomsnitt akk. volum blank	Faktisk mengde pøde [g]	Faktisk mengde substrat [g]	VS % gjennomsnitt blank	VS % gjennomsnitt substrat
Pøde 1	322,5	321,5	400,0	0,0	0,0163	
Pøde 2	317,3		400,0	0,0		
Pøde 3	324,7		400,0	0,0		
Pøde + Hyg. 1	956,6		347,9	52,1		0,0363
Pøde + Hyg. 2	988,1		347,9	52,3		
Pøde + Hyg. + 40 % VFS 1	984,4		347,9	52,3		0,0489
Pøde + Hyg. + 40 % VFS 2	978,0		360,0	40,0		
Pøde + Hyg. + 40 % VFS 3	997,2		360,0	40,0		
Pøde + Hyg. + 40 % TFS 1	1088,4		360,0	40,0		0,0622
Pøde + Hyg. + 40 % TFS 2	1056,5		367,9	32,0		
Pøde + Hyg. + 40 % TFS 3	1057,3		367,9	32,2		
Pøde + cellulose 1	1116,8		367,9	32,1		0,9371
Pøde + cellulose 2	1110,6		397,7	2,3		
Pøde + cellulose 3	1080,7		397,7	2,3		

Tabell 24: Data for beregning av biokjemisk metanpotensial i tredje forsøksrunde.

Prøvenavn	Akk. Volum [Nml]	Gjennomsnitt akk. volum blank	Faktisk mengde pøde [g]	Faktisk mengde substrat [g]	VS % gjennomsnitt blank	VS % gjennomsnitt substrat
Pøde 1	376	361,4	400,0	0,0	0,0174	
Pøde 2	306,5		400,0	0,0		
Pøde 3	401,7		400,0	0,0		
Pøde + Hyg. 1	1076,1		350,3	49,9		0,0409
Pøde + Hyg. 2	1306,8		350,3	50,2		
Pøde + Hyg. 3	1115,5		350,3	50,0		
Pøde + VFS 1	1105,5		374,9	25,0		0,0868
Pøde + VFS 2	1251,1		374,9	25,9		
Pøde + VFS 3	1219,9		374,9	25,3		
Pøde + TFS 1	1363,3		396,8	3,2		0,6897
Pøde + TFS 2	1270,0		396,7	3,1		
Pøde + TFS 3	1298,7		396,7	3,1		
Pøde + cellulose 1	1235,4		397,5	2,4704		0,9338
Pøde + cellulose 2	1231,5		397,5	2,4712		
Pøde + cellulose 3	1203,8		397,6	2,4699		

H: Statistisk analyse av BMP-verdier

Tabell 25: BMP-verdier for analyseprøvene fra første forsøksrunde.

Parallell	Pode + Hyg.	Pode + Hyg. + 25 % VFS	Pode + Hyg. + 25 % TFS
1	351	384	346
2	349	350	370
3	357	362	330
Gjennomsnitt	352	365	349

Tabell 26: Enveis variansanalyse av analyseprøvenes BMP-verdier fra første forsøksrunde.

Variansanalyse: en-faktor						
SAMMENDRAG						
Grupper	Antall	Sum	Gjennomsnitt	Varians		
Pode + Hyg.	3	1058	352	18		
Pode + Hyg. + 25 % VFS	3	1096	365	283		
Pode + Hyg. + 25 % TFS	3	1046	349	398		
Variansanalyse						
Variasjonskilde	SK	fg	GK	F	P-verdi	F-krit
Mellom grupper	461	2	230	0,987	0,4261	5,143
Innenfor grupper	1401	6	233			
Totalt	1861	8				

Tabell 27: BMP-verdier for analyseprøvene fra den andre forsøksrunden.

Parallell	Pode + Hyg.	Pode + Hyg. + 40 % VFS	Pode + Hyg. + 40 % TFS
1	358	355	398
2	373	352	380
3		362	381
Gjennomsnitt	366	356	386

Tabell 28: Enveis variansanalyse av analyseprøvenes BMP-verdier fra den andre forsøksrunden.

Variansanalyse: en-faktor						
SAMMENDRAG						
Grupper	Antall	Sum	Gjennomsnitt	Varians		
Pode + Hyg.	2	731	366	116		
Pode + Hyg. + 40 % VFS	3	1069	356	25		
Pode + Hyg. + 40 % TFS	3	1160	386	104		
Variansanalyse						
Variasjonskilde	SK	fg	GK	F	P-verdi	F-krit
Mellom grupper	1410	2	705	9,433	0,0201	5,786
Innenfor grupper	374	5	75			
Totalt	1784	7				

Tabell 29: F-test: to utvalg for varianser, med varianser fra BMP-parallellene til Pode + hyg. og Pode + hyg. + 40 % VFS.

F-test	Pode + Hyg.	Pode + Hyg. + 40 % VFS
Gjennomsnitt	366	356
Varians	116	25
Observasjoner	2	3
fg	1	2
F	4,639	
P(F<=f) en side	0,1641	
F-kritisk, en side	18,513	

Tabell 30: t-test med antatt like varianser, fra BMP-parallellene til Pode + hyg. og Pode + hyg. + 40 % VFS.

t-test	Pode + Hyg.	Pode + Hyg. + 40 % VFS
Gjennomsnitt	366	356
Varians	116	25
Observasjoner	2	3
Gruppevarians	55	
Antatt avvik mellom gjennomsnittene	0	
fg	3	
t-Stat	1,346	
P(T<=t) ensidig	0,1355	
T-kritisk, ensidig	2,353	
P(T<=t) tosidig	0,2711	
T-kritisk, tosidig	3,182	

Tabell 31: F-test: to utvalg for varianser, med varianser fra BMP-parallellene til Pode + hyg. + 40 % TFS. og Pode + hyg. + 40 % VFS.

F-test	Pode + Hyg. + 40 % TFS	Pode + Hyg. + 40 % VFS
Gjennomsnitt	386	356
Varians	104	25
Observasjoner	3	3
fg	2	2
F	4,163	
P(F<=f) en side	0,1937	
F-kritisk, en side	19	

Tabell 32: t-test med antatt like varianser, fra BMP-parallellene til Pode + hyg. + 40 % TFS og Pode + hyg. + 40 % VFS.

t-test	Pode + Hyg. + 40 % TFS	Pode + Hyg. + 40% VFS
Gjennomsnitt	386	356
Varians	104	25
Observasjoner	3	3
Gruppevarians	65	
Antatt avvik mellom gjennomsnittene	0	
fg	4	
t-Stat	4,589	
P(T<=t) ensidig	0,005057	
T-kritisk, ensidig	2,132	
P(T<=t) tosidig	0,01011	
T-kritisk, tosidig	2,776	

Tabell 33: F-test: to utvalg for varianser, med varianser fra BMP-parallellene til Pode + hyg. og Pode + hyg. + 40 % TFS.

F-test	Pode + Hyg.	Pode + Hyg. + 40 % TFS
Gjennomsnitt	366	386
Varians	116	104
Observasjoner	2	3
fg	1	2
F	1,114	
P(F<=f) en side	0,4018	
F-kritisk, en side	18,513	

Tabell 34: t-test med antatt like varianser, fra BMP-parallellene til Pode + hyg. og Pode + hyg. + 40 % TFS.

t-test	Pode + Hyg.	Pode + Hyg. + 40 % TFS
Gjennomsnitt	366	386
Varians	116	104
Observasjoner	2	3
Gruppevarians	108	
Antatt avvik mellom gjennomsnittene	0	
fg	3	
t-Stat	-2,091	
P(T<=t) ensidig	0,06381	
T-kritisk, ensidig	2,353	
P(T<=t) tosidig	0,1276	
T-kritisk, tosidig	3,182	

Tabell 35: BMP-verdier for analyseprøvene fra den tredje forsøksrunden.

Parallell	Pode + Hyg.	VFS	TFS
1	372	353	455
2	482	406	426
3	391	401	440
Gjennomsnitt	415	387	440

Tabell 36: Enveis variansanalyse av analyseprøvenes BMP-verdier fra den tredje forsøksrunden.

Variansanalyse: en-faktor						
SAMMENDRAG						
Grupper	Antall	Sum	Gjennomsnitt	Varians		
Pode + Hyg.	3	1245	415	3478		
VFS	3	1160	387	845		
TFS	3	1321	440	209		
Variansanalyse						
Variasjonskilde	SK	fg	GK	F	P-verdi	F-krit
Mellom grupper	4322	2	2161	1,430	0,3105	5,143
Innenfor grupper	9064	6	1511			
Totalt	13386	8				

I: Analyseresultater fra Hardanger miljøsender AS

Analyseresultater for den første forsøksrunden

Tabell 37: prøveparametere, prøvenavn og koder gitt på prøvene som ble analysert av Hardanger miljøsender AS.

Prøve nummer	Prøvenavn på flaske	Prøveparametere
F1-1	Forsøk 1, PODESLAM 25.01.22	<ul style="list-style-type: none"> • TS, VS • Tungmetaller (Cu, Pb, Cd, Hg, Zn, Ni, Cr, As) • Na, K, Mg, Ca • Tot-N, NH₄-N • Tot-P og Ortofosfat • KOF
F1-2	Forsøk 1, HYG-SLAM 25.01.22	
F1-3	Forsøk 1, VÅTT FISKESLAM 25.01.22	
F1-4	Forsøk 1, TØRKET FISKESLAM 25.01.22	
F1-5	Forsøk 1, PODE + HYG 27.01.22	
F1-6	Forsøk 1, PODE + HYG + 25 % FISK (VÅTT) 27.01.22	
F1-7	Forsøk 1, PODE + HYG + 25 % FISK (TØRKET) 27.01.22	
F1-8	Forsøk 1, PODESLAM, <i>etter utråtning</i> , 24.02.22	
F1-9	Forsøk 1, PODE + HYG, <i>etter utråtning</i> , 24.02.22	
F1-10	Forsøk 1, PODE + HYG + 25 % FISK (VÅTT), <i>etter utråtning</i> , 24.02.22	
F1-11	Forsøk 1, PODE + HYG + 25 % FISK (TØRKET), <i>etter utråtning</i> , 24.02.22	

Merk at resultater markert med stjernemerket «*» ikke er akkrediterte.

Tabell 38: Analyseresultater til podeslam før og etter utråtning.

Analyse	Enhet	Resultat før utråtning	Resultat etter utråtning	Standard
Prøve-id		F1-1	F1-8	
Total-N i faststoff*	mg/kg TS	65000*	72000*	
Fosfat-P i faststoff*	mg/kg TS	2800*	2600*	
KOF _{Cr} i faststoff*	mg/kg TS	1070000*	810000*	
Tørrstoff i faststoff	%	2,9	2,9	NS 4764
Glødetap i faststoff	% TS	64	57	NS 4764
Kvikksølv i faststoff	mg/kg TS	0,26	0,50	Intern metode (KJ-222)
Arsen i faststoff	mg/kg TS	3,7	5,2	Intern metode (KJ-240)
Kadmium i faststoff	mg/kg TS	0,84	1,7	Intern metode (KJ-240)
Krom i faststoff	mg/kg TS	16	30	Intern metode (KJ-240)
Kobber i faststoff	mg/kg TS	180	380	Intern metode (KJ-240)
Bly i faststoff	mg/kg TS	14	21	Intern metode (KJ-240)
Nikkel i faststoff	mg/kg TS	15	29	Intern metode (KJ-240)
Sink i faststoff	mg/kg TS	440	910	Intern metode (KJ-240)
Fosfor i faststoff	mg/kg TS	21000	32000	Intern metode (KJ-240)
Kalium i faststoff	mg/kg TS	5100	5700	Intern metode (KJ-240)
Kalsium i faststoff	mg/kg TS	14000	24000	Intern metode (KJ-240)
Magnesium i faststoff	mg/kg TS	4600	7000	Intern metode (KJ-240)
Natrium i faststoff*	mg/kg TS	5000*	5000*	Intern metode (KJ-240)
Ammonium-N i faststoff*	mg/kg TS	52000*	44000*	NS 4764/KCl ekstr.

Tabell 39: Analyseresultater til hygienisert avløpsslam.

Analyse	Enhet	Resultat	Standard
Prøve-id		F1-2	
Total-N i faststoff*	mg/kg TS	39000*	
Fosfat-P i faststoff*	mg/kg TS	1200*	
KOF _{Cr} i faststoff*	mg/kg TS	750000*	
Tørrstoff i faststoff	%	5,0	NS 4764
Glødetap i faststoff	% TS	75	NS 4764
Kvikksølv i faststoff	mg/kg TS	0,68	Intern metode (KJ-222)
Arsen i faststoff	mg/kg TS	5,8	Intern metode (KJ-240)
Kadmium i faststoff	mg/kg TS	1,9	Intern metode (KJ-240)
Krom i faststoff	mg/kg TS	21	Intern metode (KJ-240)
Kobber i faststoff	mg/kg TS	190	Intern metode (KJ-240)
Bly i faststoff	mg/kg TS	15	Intern metode (KJ-240)
Nikkel i faststoff	mg/kg TS	21	Intern metode (KJ-240)
Sink i faststoff	mg/kg TS	440	Intern metode (KJ-240)
Fosfor i faststoff	mg/kg TS	17000	Intern metode (KJ-240)
Kalium i faststoff	mg/kg TS	3800	Intern metode (KJ-240)
Kalsium i faststoff	mg/kg TS	13000	Intern metode (KJ-240)
Magnesium i faststoff	mg/kg TS	4100	Intern metode (KJ-240)
Natrium i faststoff*	mg/kg TS	2200*	Intern metode (KJ-240)
Ammonium-N i faststoff*	mg/kg TS	11000*	NS 4764/KCl ekstr.

Tabell 40: Analyseresultater til vått fiskeslam.

Analyse	Enhet	Resultat	Standard
Prøve-id		F1-3	
Total-N i faststoff*	mg/kg TS	34000*	
Fosfat-P i faststoff*	mg/kg TS	1500*	
KOF _{Cr} i faststoff*	mg/kg TS	1600000*	
Tørrstoff i faststoff	%	9,1	NS 4764
Glødetap i faststoff	% TS	85	NS 4764
Kvikksølv i faststoff	mg/kg TS	0,028	Intern metode (KJ-222)
Arsen i faststoff	mg/kg TS	3,8	Intern metode (KJ-240)
Kadmium i faststoff	mg/kg TS	1,8	Intern metode (KJ-240)
Krom i faststoff	mg/kg TS	7,7	Intern metode (KJ-240)
Kobber i faststoff	mg/kg TS	54	Intern metode (KJ-240)
Bly i faststoff	mg/kg TS	1,7	Intern metode (KJ-240)
Nikkel i faststoff	mg/kg TS	4,5	Intern metode (KJ-240)
Sink i faststoff	mg/kg TS	1300	Intern metode (KJ-240)
Fosfor i faststoff	mg/kg TS	68000	Intern metode (KJ-240)
Kalium i faststoff	mg/kg TS	2300	Intern metode (KJ-240)
Kalsium i faststoff	mg/kg TS	130000	Intern metode (KJ-240)
Magnesium i faststoff	mg/kg TS	6000	Intern metode (KJ-240)
Natrium i faststoff*	mg/kg TS	4200*	Intern metode (KJ-240)
Ammonium-N i faststoff*	mg/kg TS	6200*	NS 4764/KCl ekstr.

Merk at analyser merket med «#» er analysert av ALS Czech Republic.

Tabell 41: Analyseresultater for tørket fiskeslam.

Analyse	Enhet	Resultat	Standard
Prøve-id		F1-4	
KOF _{Cr} i faststoff*	mg/kg TS	7000*	
Tørrstoff i faststoff	%	95	NS 4764
Glødetap i faststoff	% TS	84	NS 4764
Kjeldahl-N i faststoff #	mg/kg TS	37100	CSN EN 25663
Kvikksølv i faststoff	mg/kg TS	0,023	Intern metode (KJ-222)
Arsen i faststoff	mg/kg TS	0,88	Intern metode (KJ-240)
Kadmium i faststoff	mg/kg TS	0,66	Intern metode (KJ-240)
Krom i faststoff	mg/kg TS	3,6	Intern metode (KJ-240)
Kobber i faststoff	mg/kg TS	18	Intern metode (KJ-240)
Bly i faststoff	mg/kg TS	5,4	Intern metode (KJ-240)
Nikkel i faststoff	mg/kg TS	11	Intern metode (KJ-240)
Sink i faststoff	mg/kg TS	480	Intern metode (KJ-240)
Fosfor i faststoff	mg/kg TS	39000	Intern metode (KJ-240)
Kalium i faststoff	mg/kg TS	740	Intern metode (KJ-240)
Kalsium i faststoff	mg/kg TS	64000	Intern metode (KJ-240)
Magnesium i faststoff	mg/kg TS	2900	Intern metode (KJ-240)
Natrium i faststoff*	mg/kg TS	1600*	Intern metode (KJ-240)
Ammonium-N i faststoff*	mg/kg TS	1070*	NS 4764/KCl ekstr.

Tabell 42: Analyseresultater til pøde + hyg. før og etter utråtning.

Analyse	Enhet	Resultat før utråtning	Resultat etter utråtning	Standard
Prøve-id		F1-5	F1-9	
Total-N i faststoff*	mg/kg TS	66000*	83000*	
Fosfat-P i faststoff*	mg/kg TS	2300*	2000*	
KOF _{Cr} i faststoff*	mg/kg TS	1000000*	680000*	
Tørrstoff i faststoff	%	3,2	2,8	NS 4764
Glødetap i faststoff	% TS	65	58	NS 4764
Kvikksølv i faststoff	mg/kg TS	0,54	0,22	Intern metode (KJ-222)
Arsen i faststoff	mg/kg TS	7,6	3,3	Intern metode (KJ-240)
Kadmium i faststoff	mg/kg TS	1,8	0,86	Intern metode (KJ-240)
Krom i faststoff	mg/kg TS	30	16	Intern metode (KJ-240)
Kobber i faststoff	mg/kg TS	350	190	Intern metode (KJ-240)
Bly i faststoff	mg/kg TS	19	14	Intern metode (KJ-240)
Nikkel i faststoff	mg/kg TS	30	29	Intern metode (KJ-240)
Sink i faststoff	mg/kg TS	830	430	Intern metode (KJ-240)
Fosfor i faststoff	mg/kg TS	29000	16000	Intern metode (KJ-240)
Kalium i faststoff	mg/kg TS	6600	6200	Intern metode (KJ-240)
Kalsium i faststoff	mg/kg TS	24000	12000	Intern metode (KJ-240)
Magnesium i faststoff	mg/kg TS	6700	4000	Intern metode (KJ-240)
Natrium i faststoff*	mg/kg TS	6000*	6100*	Intern metode (KJ-240)
Ammonium-N i faststoff*	mg/kg TS	46000*	64000*	NS 4764/KCl ekstr.

Tabell 43: Analyseresultater til pøde + hyg. + 25 % VS vått fiskeslam før og etter utråtning.

Analyse	Enhet	Resultat før utråtning	Resultat etter utråtning	Standard
Prøve-id		F1-6	F1-10	
Total-N i faststoff*	mg/kg TS	78000*	76000*	
Fosfat-P i faststoff*	mg/kg TS	2100*	1800*	
KOF _{Cr} i faststoff*	mg/kg TS	1100000*	510000*	
Tørrstoff i faststoff	%	3,2	2,8	NS 4764
Glødetap i faststoff	% TS	65	57	NS 4764
Kvikksølv i faststoff	mg/kg TS	0,49	0,11	Intern metode (KJ-222)
Arsen i faststoff	mg/kg TS	6,7	4,0	Intern metode (KJ-240)
Kadmium i faststoff	mg/kg TS	1,6	1,3	Intern metode (KJ-240)
Krom i faststoff	mg/kg TS	26	23	Intern metode (KJ-240)
Kobber i faststoff	mg/kg TS	320	270	Intern metode (KJ-240)
Bly i faststoff	mg/kg TS	18	18	Intern metode (KJ-240)
Nikkel i faststoff	mg/kg TS	23	22	Intern metode (KJ-240)
Sink i faststoff	mg/kg TS	760	640	Intern metode (KJ-240)
Fosfor i faststoff	mg/kg TS	27000	22000	Intern metode (KJ-240)
Kalium i faststoff	mg/kg TS	6600	5600	Intern metode (KJ-240)
Kalsium i faststoff	mg/kg TS	23000	19000	Intern metode (KJ-240)
Magnesium i faststoff	mg/kg TS	6200	5400	Intern metode (KJ-240)
Natrium i faststoff*	mg/kg TS	6200*	5000*	Intern metode (KJ-240)
Ammonium-N i faststoff*	mg/kg TS	47000*	62000*	NS 4764/KCl ekstr.

Tabell 44: Analyseresultater til pøde + hyg. + 25 % VS tørket fiskeslam før og etter utråtning.

Analyse	Enhet	Resultat før utråtning	Resultat etter utråtning	Standard
Prøve-id		F1-7	F1-11	
Total-N i faststoff*	mg/kg TS	67000*	84000*	
Fosfat-P i faststoff*	mg/kg TS	1500*	2100*	
KOF _{Cr} i faststoff*	mg/kg TS	1200000*	760000*	
Tørrstoff i faststoff	%	3,3	2,7	NS 4764
Glødetap i faststoff	% TS	63	59	NS 4764
Kvikksølv i faststoff	mg/kg TS	0,54	0,45	Intern metode (KJ-222)
Arsen i faststoff	mg/kg TS	6,7	4,3	Intern metode (KJ-240)
Kadmium i faststoff	mg/kg TS	1,5	1,4	Intern metode (KJ-240)
Krom i faststoff	mg/kg TS	27	24	Intern metode (KJ-240)
Kobber i faststoff	mg/kg TS	310	290	Intern metode (KJ-240)
Bly i faststoff	mg/kg TS	18	18	Intern metode (KJ-240)
Nikkel i faststoff	mg/kg TS	27	25	Intern metode (KJ-240)
Sink i faststoff	mg/kg TS	760	720	Intern metode (KJ-240)
Fosfor i faststoff	mg/kg TS	28000	25000	Intern metode (KJ-240)
Kalium i faststoff	mg/kg TS	6400	5900	Intern metode (KJ-240)
Kalsium i faststoff	mg/kg TS	23000	22000	Intern metode (KJ-240)
Magnesium i faststoff	mg/kg TS	6500	5700	Intern metode (KJ-240)
Natrium i faststoff*	mg/kg TS	6200*	5200*	Intern metode (KJ-240)
Ammonium-N i faststoff*	mg/kg TS	50000*	65000*	NS 4764/KCl ekstr.

Analyseresultater for den andre forsøksrunden

Tabell 45: prøveparametere, prøvenavn og koder gitt på prøvene som ble analysert av Hardanger miljøsenster AS.

Prøve nummer	Prøvenavn på flaske	Prøveparametere
F2-1	Forsøk 2, PODESLAM 08.03.22	<ul style="list-style-type: none"> • TS, VS • Tungmetaller (Cu, Pb, Cd, Hg, Zn, Ni, Cr, As) • Na, K, Mg, Ca • Tot-N, NH4-N • Tot-P og Ortofosfat • KOF
F2-2	Forsøk 2, HYG-SLAM 08.03.22	
F2-3	Forsøk 2, VÅTT FISKESLAM 08.03.22	
F2-4	Forsøk 2, PODE + HYG 10.03.22	
F2-5	Forsøk 2, PODE + HYG + 40 % FISK (VÅTT) 10.03.22	
F2-6	Forsøk 2, PODE + HYG + 40 % FISK (TØRKET) 10.03.22	
F2-7	Forsøk 2, PODESLAM, <i>etter utråtning</i> , 07.04.22	
F2-8	Forsøk 2, PODE + HYG, <i>etter utråtning</i> , 07.04.22	
F2-9	Forsøk 2, PODE + HYG + 40 % FISK (VÅTT), <i>etter utråtning</i> , 07.04.22	
F2-10	Forsøk 2, PODE + HYG + 40 % FISK (TØRKET), <i>etter utråtning</i> , 07.04.22	

Tabell 46: Analyseresultater til podeslam før og etter utråtning.

Analyse	Enhet	Resultat før utråtning	Resultat etter utråtning	Standard
Prøve-id		F2-1	F2-7	
Total-N i faststoff*	mg/kg TS	63000*	66000*	
Fosfat-P i faststoff*	mg/kg TS	1800*	1600*	
KOF _{Cr} i faststoff*	mg/kg TS	660*	650*	
Tørrstoff i faststoff	%	2,8	2,7	NS 4764
Glødetap i faststoff	% TS	60	56	NS 4764
Kvikksølv i faststoff	mg/kg TS	0,52	0,26	Intern metode (KJ-222)
Arsen i faststoff	mg/kg TS	5,7	4,2	Intern metode (KJ-240)
Kadmium i faststoff	mg/kg TS	1,5	1,1	Intern metode (KJ-240)
Krom i faststoff	mg/kg TS	26	23	Intern metode (KJ-240)
Kobber i faststoff	mg/kg TS	290	250	Intern metode (KJ-240)
Bly i faststoff	mg/kg TS	25	21	Intern metode (KJ-240)
Nikkel i faststoff	mg/kg TS	24	22	Intern metode (KJ-240)
Sink i faststoff	mg/kg TS	470	600	Intern metode (KJ-240)
Fosfor i faststoff	mg/kg TS	27000	8800	Intern metode (KJ-240)
Kalium i faststoff	mg/kg TS	6400	6200	Intern metode (KJ-240)
Kalsium i faststoff	mg/kg TS	20000	16000	Intern metode (KJ-240)
Magnesium i faststoff	mg/kg TS	7000	5800	Intern metode (KJ-240)
Natrium i faststoff*	mg/kg TS	6000*	5900*	Intern metode (KJ-240)
Ammonium-N i faststoff*	mg/kg TS	43000*	49000*	NS 4764/KCl ekstr.

Tabell 47: Analyseresultater til hygienisert avløpsslam.

Analyse	Enhet	Resultat	Standard
Prøve-id		F2-2	
Total-N i faststoff*	mg/kg TS	30000*	
Fosfat-P i faststoff*	mg/kg TS	1000*	
KOF _{Cr} i faststoff*	mg/kg TS	1300*	
Tørrstoff i faststoff	%	10,0	NS 4764
Glødetap i faststoff	% TS	88	NS 4764
Kvikksølv i faststoff	mg/kg TS	0,018	Intern metode (KJ-222)
Arsen i faststoff	mg/kg TS	2,7	Intern metode (KJ-240)
Kadmium i faststoff	mg/kg TS	0,81	Intern metode (KJ-240)
Krom i faststoff	mg/kg TS	3,8	Intern metode (KJ-240)
Kobber i faststoff	mg/kg TS	33	Intern metode (KJ-240)
Bly i faststoff	mg/kg TS	1,0	Intern metode (KJ-240)
Nikkel i faststoff	mg/kg TS	2,8	Intern metode (KJ-240)
Sink i faststoff	mg/kg TS	550	Intern metode (KJ-240)
Fosfor i faststoff	mg/kg TS	34000	Intern metode (KJ-240)
Kalium i faststoff	mg/kg TS	910	Intern metode (KJ-240)
Kalsium i faststoff	mg/kg TS	66000	Intern metode (KJ-240)
Magnesium i faststoff	mg/kg TS	3100	Intern metode (KJ-240)
Natrium i faststoff*	mg/kg TS	2200*	Intern metode (KJ-240)
Ammonium-N i faststoff*	mg/kg TS	4800*	NS 4764/KCl ekstr.

Tabell 48: Analyseresultater til vått fiskeslam.

Analyse	Enhet	Resultat	Standard
Prøve-id		F2-3	
Total-N i faststoff*	mg/kg TS	33000*	
Fosfat-P i faststoff*	mg/kg TS	1290*	
KOF _{Cr} i faststoff*	mg/kg TS	1300*	
Tørrstoff i faststoff	%	4,7	NS 4764
Glødetap i faststoff	% TS	79	NS 4764
Kvikksølv i faststoff	mg/kg TS	0,28	Intern metode (KJ-222)
Arsen i faststoff	mg/kg TS	4,9	Intern metode (KJ-240)
Kadmium i faststoff	mg/kg TS	0,79	Intern metode (KJ-240)
Krom i faststoff	mg/kg TS	15	Intern metode (KJ-240)
Kobber i faststoff	mg/kg TS	190	Intern metode (KJ-240)
Bly i faststoff	mg/kg TS	11	Intern metode (KJ-240)
Nikkel i faststoff	mg/kg TS	13	Intern metode (KJ-240)
Sink i faststoff	mg/kg TS	420	Intern metode (KJ-240)
Fosfor i faststoff	mg/kg TS	21000	Intern metode (KJ-240)
Kalium i faststoff	mg/kg TS	4200	Intern metode (KJ-240)
Kalsium i faststoff	mg/kg TS	12000	Intern metode (KJ-240)
Magnesium i faststoff	mg/kg TS	3900	Intern metode (KJ-240)
Natrium i faststoff*	mg/kg TS	2800*	Intern metode (KJ-240)
Ammonium-N i faststoff*	mg/kg TS	15000*	NS 4764/KCl ekstr.

Tabell 49: Analyseresultater til pøde + hyg. før og etter utråtning.

Analyse	Enhet	Resultat før utråtning	Resultat etter utråtning	Standard
Prøve-id		F2-4	F2-8	
Total-N i faststoff*	mg/kg TS	65000*	69000*	
Fosfat-P i faststoff*	mg/kg TS	1000*	3400*	
KOF _{Cr} i faststoff*	mg/kg TS	1000*	800*	
Tørrstoff i faststoff	%	2,6	2,6	NS 4764
Glødetap i faststoff	% TS	64	57	NS 4764
Kvikksølv i faststoff	mg/kg TS	0,54	0,34	Intern metode (KJ-222)
Arsen i faststoff	mg/kg TS	5,1	5,5	Intern metode (KJ-240)
Kadmium i faststoff	mg/kg TS	1,1	1,7	Intern metode (KJ-240)
Krom i faststoff	mg/kg TS	21	30	Intern metode (KJ-240)
Kobber i faststoff	mg/kg TS	230	350	Intern metode (KJ-240)
Bly i faststoff	mg/kg TS	21	28	Intern metode (KJ-240)
Nikkel i faststoff	mg/kg TS	19	28	Intern metode (KJ-240)
Sink i faststoff	mg/kg TS	560	810	Intern metode (KJ-240)
Fosfor i faststoff	mg/kg TS	20000	28000	Intern metode (KJ-240)
Kalium i faststoff	mg/kg TS	6000	7400	Intern metode (KJ-240)
Kalsium i faststoff	mg/kg TS	16000	22000	Intern metode (KJ-240)
Magnesium i faststoff	mg/kg TS	560	7300	Intern metode (KJ-240)
Natrium i faststoff*	mg/kg TS	5500*	6400*	Intern metode (KJ-240)
Ammonium-N i faststoff*	mg/kg TS	47000*	53000*	NS 4764/KCl ekstr.

Tabell 50: Analyseresultater til pøde + hyg. + 40 % VS vått fiskeslam før og etter utråtning.

Analyse	Enhet	Resultat før utråtning	Resultat etter utråtning	Standard
Prøve-id		F2-5	F2-9	
Total-N i faststoff*	mg/kg TS	54000*	70000*	
Fosfat-P i faststoff*	mg/kg TS	2100*	1900*	
KOF _{Cr} i faststoff*	mg/kg TS	960*	450*	
Tørrstoff i faststoff	%	3,2	2,7	NS 4764
Glødetap i faststoff	% TS	64	57	NS 4764
Kvikksølv i faststoff	mg/kg TS	0,39	0,42	Intern metode (KJ-222)
Arsen i faststoff	mg/kg TS	5,7	5,0	Intern metode (KJ-240)
Kadmium i faststoff	mg/kg TS	1,4	1,4	Intern metode (KJ-240)
Krom i faststoff	mg/kg TS	25	27	Intern metode (KJ-240)
Kobber i faststoff	mg/kg TS	290	310	Intern metode (KJ-240)
Bly i faststoff	mg/kg TS	22	24	Intern metode (KJ-240)
Nikkel i faststoff	mg/kg TS	23	26	Intern metode (KJ-240)
Sink i faststoff	mg/kg TS	700	750	Intern metode (KJ-240)
Fosfor i faststoff	mg/kg TS	23000	24000	Intern metode (KJ-240)
Kalium i faststoff	mg/kg TS	5500	7100	Intern metode (KJ-240)
Kalsium i faststoff	mg/kg TS	21000	21000	Intern metode (KJ-240)
Magnesium i faststoff	mg/kg TS	6200	6800	Intern metode (KJ-240)
Natrium i faststoff*	mg/kg TS	5000*	6300*	Intern metode (KJ-240)
Ammonium-N i faststoff*	mg/kg TS	36000*	53000*	NS 4764/KCl ekstr.

Tabell 51: Analyseresultater til pøde + hyg. + 40 % VS tørket fiskeslam før og etter utråtning.

Analyse	Enhet	Resultat før utråtning	Resultat etter utråtning	Standard
Prøve-id		F2-6	F2-10	
Total-N i faststoff*	mg/kg TS	54000*	72000*	
Fosfat-P i faststoff*	mg/kg TS	2000*	2800*	
KOF _{Cr} i faststoff*	mg/kg TS	930*	630*	
Tørrstoff i faststoff	%	3,3	2,7	NS 4764
Glødetap i faststoff	% TS	65	57	NS 4764
Kvikksølv i faststoff	mg/kg TS	0,44	0,42	Intern metode (KJ-222)
Arsen i faststoff	mg/kg TS	5,3	5,1	Intern metode (KJ-240)
Kadmium i faststoff	mg/kg TS	1,2	1,5	Intern metode (KJ-240)
Krom i faststoff	mg/kg TS	21	28	Intern metode (KJ-240)
Kobber i faststoff	mg/kg TS	230	320	Intern metode (KJ-240)
Bly i faststoff	mg/kg TS	23	26	Intern metode (KJ-240)
Nikkel i faststoff	mg/kg TS	22	28	Intern metode (KJ-240)
Sink i faststoff	mg/kg TS	610	790	Intern metode (KJ-240)
Fosfor i faststoff	mg/kg TS	26000	29000	Intern metode (KJ-240)
Kalium i faststoff	mg/kg TS	6400	7200	Intern metode (KJ-240)
Kalsium i faststoff	mg/kg TS	23000	26000	Intern metode (KJ-240)
Magnesium i faststoff	mg/kg TS	6100	7100	Intern metode (KJ-240)
Natrium i faststoff*	mg/kg TS	6100*	6500*	Intern metode (KJ-240)
Ammonium-N i faststoff*	mg/kg TS	38000*	58000*	NS 4764/KCl ekstr.