



Miljøministeriet
Naturstyrelsen

Intelligent udnyttelse af kulstof og energi på renseanlæg

Optimeret rådnetanksdrift

ICEU del 2 – november 2013

**Titel:**

Intelligent udnyttelse af kulstof og energi på rensesanlæg

Udgiver:

Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K
www.mst.dk

År:

2013

Redaktion:

EnviDan A/S;
Rasmus Johansen og Søren Brønd

Foto:

EnviDan A/S; Johan van der Plaats

Illustration:

EnviDan A/S

ISBN nr.

978-87-7091-965-4

Ansvarsfraskrivelse:

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord	4
Sammenfatning	5
Konklusion	8
Summary in English	10
1. Indledning	11
2. Baggrund	12
3. Rådnetanksdrift	14
3.1 Opholdstid, tørstof og temperatur	14
3.2 Omrøring og recirkulering.....	15
4. Optimeret rådnetanksdrift	17
4.1 Nedbrydning af animalsk fedt ved forskellige temperaturer	17
4.1.1 Forsøgsmetode	17
4.1.2 Resultater	18
4.1.3 Delkonklusion	22
4.2 Maksimalt tørstofindhold i rådnetanke	22
4.2.1 Delkonklusion	23
4.3 Rådnetanksdrift med recirkulering af opkoncentreret udrådnet slam	23
4.3.1 Delkonklusion	24
4.4 Høj belastning af rådnetank	25
4.4.1 Delkonklusion	26
4.5 Varmegenindvinding med slam/slamveksler	26
4.6 Efterudrædningspotentialer og afgang til atmosfæren.....	27
4.6.1 Metodebeskrivelse.....	28
4.6.2 Opløselighed af metan i slammet og efterfølgende afgang.....	30
4.6.3 Efterudrædningspotentialer.....	30
4.6.4 Delkonklusion	34
4.7 Udrådning – seriekoblet rådnetanke	35
4.8 Forbedret udrådning via termisk hydrolyse	37
Referencer	38

Bilagsoversigt:

Bilag 1a	Bioprocess Control – Udrådning af fedt
Bilag 1b	Westcome – Udrådning af fedt
Bilag 2a	Traditionel rådnetank - Oversigt
Bilag 2b	Rådnetank med recirkulation - Oversigt
Bilag 3a	Rapport - Afgivelse af metan fra anaerobt stabiliseret slam
Bilag 3b	Bilag - Afgivelse af metan fra anaerobt stabiliseret slam
Bilag 4	Notat - Aldersprofil i forskellige rådnetankskoncepter

Forord

Dette udviklingsprojekt er udarbejdet af den danske rådgivende ingeniørvirksomhed EnviDan A/S og udgivet af Miljøstyrelsen. Kvalitetssikring af projektet er foretaget af Mogens Henze, Professor Emeritus, DTU Miljø.

Projektet er udarbejdet i perioden fra januar 2012 til november 2013.

Udviklingsprojektet omhandler optimeret og intelligent udnyttelse af spildevandets indhold af organisk stof, herunder fokus på at minimere energiforbruget til de biologiske processer samt optimal udnyttelse af renselanlæggets gasproduktion. Ved at betragte spildevand som en ressource er vi et skridt tættere på optimal udnyttelse af spildevandets energipotentiale og det energiproducerende renselanlæg.

Baggrunden for udviklingsprojektet er, at vi står overfor væsentlige klimaforandringer, hvorfor udledningen af drivhusgasser skal reduceres. Regeringen har som ambition, at sikre en reduktion på 40 % af de danske udledninger af drivhusgasser i 2020 i forhold til 1990. Dette gælder ikke mindst for spildevandsområdet, hvor der i håndteringen af vores spildevand anvendes store mængder energi. Omkring 1,5 % af verdens udledning af drivhusgasser stammer fra spildevand [Andersen, 2008].

Udviklingsprojektet er delt op i 4 dele omhandlende intelligent udnyttelse af kulstof og energi på renselanlæg ved henholdsvis optimeret forbehandling, optimeret rådnetanksdrift, optimeret rejektivandsbehandling og optimeret udnyttelse af gasproduktion fra rådnetanksdrift. Med det samlede koncept kaldet "Intelligent Carbon and Energy Utilisation" (ICEU) tages der udgangspunkt i de danske renselanlæg.

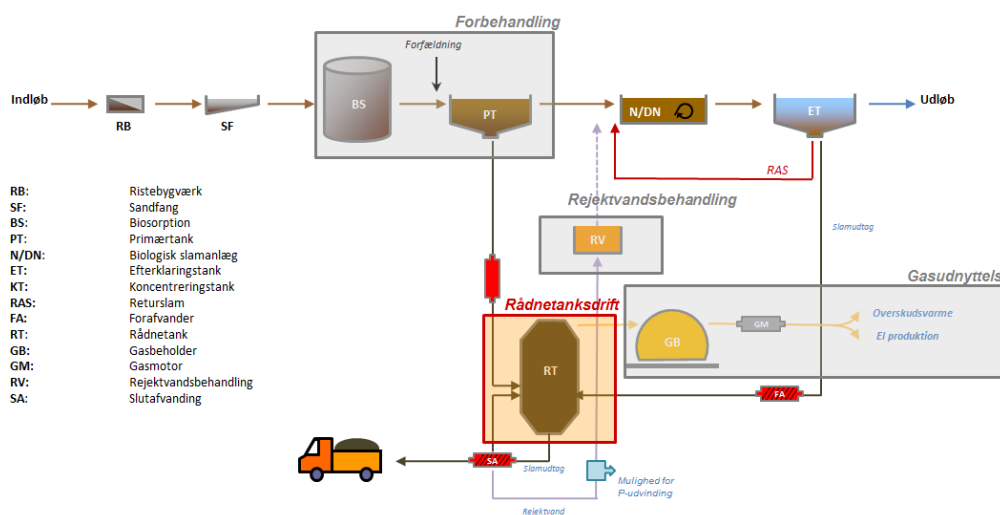
Nærværende rapport udgør delprojekt 3 af EnviDan's udviklingsprojekt "Intelligent Carbon and Energy Utilisation" (ICEU), og omhandler vurdering og dokumentation af teknologier til behandling af ammoniumholdigt rejektivand fra udrådning af spildevandsslam på offentlige spildevandsanlæg.

Udviklingsprojektet er udarbejdet med støtte fra Miljøstyrelsen fra puljen miljøeffektiv teknologi, med journal nr. NST-404-00091.

Sammenfatning

I dette delprojekt under udviklingsprojektet ” Intelligent udnyttelse af kulstof og energi på renselanlæg ” er der specifikt set på følgende punkter i forbindelse med rådnetanksdrift på danske renselanlæg og optimering af denne:

- Konsekvens af temperaturvalg ved drift af rådnetank mht. forbedret nedbrydning af eksempelvis animalsk fedt i forhold til et øget energiinput.
- Maksimalt tørstofindhold rådnetanke kan drives med.
- Dokumentation af optimeringspotentialer ved recirkulering af opkoncentreret udrådet slam til rådnetanken. Der er gennemført energiberegning til dokumentation af behovet for tvungen varmeveksling på afgangssiden af hensyn til varmebalancen.
- Undersøgelse af mængden af metan, der afgasses fra udrådet slam til atmosfæren i en efterfølgende slamhåndtering på renselanlægget. Reduktionspotentialer i udledt metan er dokumenteret ved indførelse af optimeret rådnetanksdrift.



FIGUR 1: DET SAMLEDE KONCEPT ”INTELLIGENT CARBON AND ENERGY UTILISATION” (ICEU) OMHANDLENDE OPTIMERET FORBEHANDLING, RÅDNETKANDSDRIFT, REJEKTVANDSBEHANDLING OG OPTIMERET UDNYTTELSE AF GASPRODUKTION FRA RÅDNETKANDSDRIFT.

18 rådnetanksanlæg med mesofil drift og 5 rådnetanksanlæg med termofil drift på renselanlæg i Danmark indgår i undersøgelsen af den generelle rådnetanksdrift. De indsamlede driftsdata vurderes at være repræsentative for den generelle rådnetanksdrift i Danmark. Det vurderes, at der på ca. 80 % af de danske anlæg er mulighed for at optimere gasproduktionen.

De fleste anlæg har indlagt en pausedrift styring af omrøringen baseret på erfaringsværdier, og det generelle billede er, at der kun er indlagt ganske korte driftspauser på omrøringen, hvor de fleste anlæg har en driftstid på omkring 85 % af tiden. På 5 anlæg er den optagede effekt på omrøringen målt. Den har ligget på 1,3-3,4 W/m³ rådnetanksvolumen. På 4 af de samme 5 anlæg har den optagede effekt på recirkuleringspumpningen ligget på 1,7-11,3 W/m³.

Det kan konstateres at temperaturen har stor betydning for omsætning af animalsk fedt. Q_{10} værdien for udrådning af podemassen er ca. 1,8 beregnet ved 33 °C til 43 °C (Westcome). Q_{10} værdien for udrådning af podemassen er i forsøget udført af Bioprocess Control beregnet til ca. 1,5 beregnet ud fra 35 °C til 43 °C.

Metanudbyttet efter 39 dage ved tilsætning af fedt fraregnet gasudbyttet fra blindprøve er ca. 10 % højere ved 39 og 43 °C i forhold til 35 °C, men metanproduktionen er mest stabil ved 39 °C. Forsøget udført af Westcome viste inhibering ved 39 °C i forbindelse med den 3. dosering af fedt, men ikke ved 43 °C. Det bemærkes, at fedtdoseringen er betydeligt lavere i forsøgene sammenholdt med Bioprocess Control. Fedttilsætningen i de to forsøg forventes, at afdække området svarende til fuldskaladoseringer på de danske anlæg. Resultatet viser, at idet forholdet ikke ændrer sig betragteligt igennem forsøgsperiodens 40 døgn, er der en egentlig afhængighed mellem driftstemperatur og opnåelig tørstofomsætning for fedt også fra 39 til 43 °C. Q_{10} værdien for omsætning af fedt er cirka 2,2 til 2,5 beregnet ved temperatur 33 °C til 43 °C.

Maksimalt tørstofniveau med montering af sidehængte omrørere / ejektortypen er for rådnetanksslam omkring 4-6 % TS. Tophængte omrørere og skaktomrørere vurderes at kunne håndtere et tørstofniveau på ca. 10-12 % TS. Skaktomrøreren vurderes at være den mest økonomiske af disse to ved de høje tørstofkoncentrationer.

Erfaringer fra biogasanlæg med udrådning af gylle viser at tophængte omrørere helst skal monteres med to blade i top og bund og at dette kan holde et tørstofindhold på 10-12 % TS suspenderet. Herved undgås sedimentation i bund af rådnetank og et eventuelt flydelag i toppen. Det har ikke været muligt via litteraturen at finde en endelig størrelse på det maksimale tørstofniveau rådnetanke kan drives med. Skal driften af en forafvanding, slutafovandning samt omrøring i rådnetanken tilgodeses anbefales tørstofindholdet tilpumpet rådnetanken at ligge på maksimalt 8 % og med termisk hydrolyse omkring 10 % på grund af en lavere viskositet og en højere tørstoffreduktion. Det vurderes, at slutafovandningen af udrådet slam er den mest kritiske parameter for tørstofindholdet i rådnetanken, da polymerindblandingen vanskeliggøres ved et højt tørstof. Dette kan resultere i dårligere afvandingsgrad og rejektivandskvalitet.

På grund af høje polymerudgifter til opkoncentrering af udrådet slam på bagsiden af rådnetanken inden recirkulering vurderes, at det ikke er driftsøkonomisk optimalt i forhold til traditionel forafvanding. Kapacitetsforøgelse med opkoncentrering af slam på bagsiden i forhold til traditionel forafvanding i en seriekoblet drift er ligeledes undersøgt. Igen vurderes på grund af stigende polymerudgifter, at det ikke kan svare sig at opkoncentrere slam på bagsiden, idet det ikke er driftsøkonomisk optimalt. Det vurderes, at en kapacitetsforøgelse med recirkulering af udrådet slam kan være relevant i tilfælde af, at der pga. arealdisponering ikke er plads til etablering af en ekstra rådnetank.

Teoretisk ligevægtsberegning af metanfrigivelse, der finder sted ved udpumpning af udrådet slam til lagertank/homogeniseringstank og efterfølgende slutafovandning viser sig at være begrænset, da den for de undersøgte anlæg udgør mellem 0,1-0,2 % i forhold til den årlige metanproduktion. Det er antaget, at alt opløst metan frigives til atmosfæren ved den efterfølgende opbevaring og behandling.

Der kan ligeledes ses helt bort fra gasproduktionen fra en ”kold” efterudrådning svarende til opbevaring af slam i få døgn i lagertank/homogeniseringstank inden slutbehandling.

Efterudrådningen går næsten i stå ved 10 °C, og ved 20 °C er efterudrådningen så langsom, at det ikke er økonomisk rentabelt at etablere ”kolde” efterudrådningstanke, da disse skal være meget store for at sikre den påkrævede høje opholdstid. Emissionens størrelse giver ikke anledning til yderligere tiltag på renseanlæggene for at opsamle den frigivne metan i forbindelse med

udpumpningen fra rådnetankene og den efterfølgende behandling. Undersøgelsen af efterudrådningspotentialer ved mesofil, termofil og seriekoblet termofil- mesofil drift viser, at den seriekoblede TPAD-løsning har den bedste anaerobe stabilisering. Modelleres tabsprofil af fede syrer vurderes dette at være 5-10 procentpoint højere ved drift af en tank sammenholdt med 2 serielle tanke, hvor de to sammenlignede systemers totale volumen er identiske.

På grund af den tidsforsinkelse der er i et serielt system, er dette design ligeledes bedre til at fange ubalancer i driften så som stødbelastninger i forhold til enkelttankssystemer. Dette vil betyde et endnu større periodisk tab ved drift med en tank end de 5-10 procentpoint.

Optimal seriel drift opnås bedst ved opholdstider der kun lige er høje nok til at give en stabil gasproduktion koblet med en efterfølgende mindre tank 10-20 % af det samlede volumen.

Konklusion

På baggrund af en undersøgelse af 18 rådnetanksanlæg med mesofil drift og 5 rådnetanksanlæg med termofil drift på renseanlæg i Danmark konkluderes, at samtlige anlæg kun er styret efter en anbefalet opholdstid, idet alle anlæg har et driftspunkt svarende til det anbefalede. Undersøgelsen viser, at mange anlæg har et driftspunkt med et for lavt tørstofindhold og temperatur i forhold til optimum med hensyn til gasproduktion og energiinput til opvarmning. Det vurderes ligeledes, at der generelt er et stort optimeringspotentiale ved at introducere en mere avanceret styring af rådnetanksdriften.

Det konkluderes, at temperaturen har stor betydning for omsætning af animalsk fedt. Metanudbyttet efter 39 dage ved tilsætning af fedt fraregnet gasudbyttet fra blindprøve er ca. 10 % højere ved 39 og 43 °C i forhold til 35 °C, men metanproduktionen er mest stabil ved 39 °C. Udrådningen er sandsynligvis ustabil på grund af akkumulering af langkædede fede syrer (LCFA), hvilket igen kan være forårsaget af en for kort tilvænningsstid til 43 °C. På baggrund af forsøgsresultaterne og litteraturstudier vurderes det optimale temperaturområde for mesofil rådnetanksdrift at ligge mellem 39 – 40 °C i forhold til energiinput (opvarmning) og gasproduktion.

Nedbrydningen af LCFA kan være det ratebegrænsende step i nedbrydningen af komplekse substrater, hvilket kræver en løbende tilpasning og påpasselig dosering af fedtholdigt spildevand for at undgå LCFA akkumulering. Det konkluderes, at det kræver yderligere undersøgelser for bestemmelse af den optimale indfødning af fedt på rådnetanke.

Maksimalt tørstofniveau med montering af sidehængte omrørere / ejektortypen er for rådnetanksslam omkring 4-6 % TS. Tophængte omrørere og skaktomrørere vurderes at kunne håndtere et tørstofniveau på ca. 10-12 % TS. Skaktomrøreren vurderes at være den mest økonomiske af disse to ved de høje tørstofkoncentrationer.

Det har ikke været muligt via litteraturen at finde en endelig størrelse på det maksimale tørstofniveau rådnetanke kan drives med. Det vurderes, at slutaftandingen af udrådet slam er den mest kritiske parameter for tørstofindholdet i rådnetanken, da polymerindblandingen vanskeliggøres ved et højt tørstof. Dette kan resultere i dårligere afvandingsgrad og rejektivandskvalitet. Skal driften af en forafvanding, slutaftanding samt omrøring i rådnetanken tilgodeses anbefales tørstofindholdet tilpumpet rådnetanken at ligge på maksimalt 6-8 % og med termisk hydrolyse omkring 8-10 % på grund af en lavere viskositet og en højere tørstoffreduktion.

Der kan ses bort fra metanfrigivelsen ved udpumpning af udrådet slam til lager- eller homogeniseringstank og efterfølgende slutaftanding for de undersøgte anlæg, da denne udgør mellem 0,1-0,2 % i forhold til den årlige metanproduktion. Laboratorieforsøg med efterudrådning af slam viser, at der ligeledes kan ses helt bort fra gasproduktionen fra en "kold" efterudrådning svarende til opbevaring af slam i få døgn i lagertank/homogeniseringstank inden slutbehandling.

Ud fra teoretiske overvejelser er der fordele ved seriel koblet rådnetanksdrift frem for almindelig CSTR-drift. Ved seriel drift er andelen af partikler med meget kort opholdstid mindre end ved drift af en enkelt rådnetank. Med én tank er der ca. 23 % af slammet med en opholdstid på under 5 døgn, hvor der i et serielt system med en opholdstid i tank 2 på henholdsvis 3 og 5 døgn er 13 % og 11 % af slammet med en opholdstid på under 5 døgn. Modelleres tabsprofilen af fede syrer vurderes dette at

være 5-10 procentpoint højere ved drift af en tank sammenholdt med 2 serielle tanke, hvor de to sammenlignede systemers totale volumen er identiske.

På grund af den tidsforsinkelse der er i et serielt system, er dette design ligeledes bedre til at fange ubalancer i driften så som stødbelastninger i forhold til enkelttankssystemer. Optimal seriel drift opnås bedst ved opholdstider der kun lige er høje nok til at give en stabil gasproduktion koblet med en efterfølgende mindre tank ca. 10-20 % af det samlede volumen.

Summary in English

This research and development project is about intelligent use of carbon and energy resources in raw municipal wastewater. The project evaluates the energy potential in wastewater and potentials in optimizing wastewater treatment plants to become energy neutral or even produce energy in excess.

The project was carried out from September 2012 to November 2013.

Based on a study of 18 digester systems with mesophilic operation and 5 digester systems with thermophilic operation in Denmark, it is concluded that plants generally are controlled by a recommended retention time, since all plants have an operating point corresponding to the recommended. The study shows that many plants have an operating point with a lower dry matter content and a lower temperature than optimum in terms of gas production and energy input for heating. It also found that, in general there is a great optimization potential by introducing a more advanced control of digester operation.

It is found that temperature has a significant impact on the turnover of animal fat. Methane yield after 39 days by the addition of fat is 10% higher at 39 °C and 43 °C compared to 35°C, but methane production is most stable at 39°C. Based on the experimental results and literature studies assessed, the optimal temperature range for mesophilic digester operating is found to be between 39 - 40°C compared to energy input (heating) and gas production.

Degradation of the long-chain fatty acids (LCFA) can be the rate-limiting step in the degradation of complex substrates, which requires a continuous adaptation and careful dosing of fatty wastewater in order to avoid accumulation of LCFA. It is concluded that further studies are needed to determine the optimal feeding of fat to digesters.

It has not been possible through literature to find a maximum level of solids digesters can operate with. It is however assumed that the final dewatering of digested sludge is the most critical parameter for choosing the right level of solids in the digester. If the concentration is too high, it can be hard to mix the polymer into the sludge, resulting in poor dewatering degree. Taking operation of the pre-dewatering, final dewatering, and stirring the digester into consideration the recommended solids content in sludge led to the digester is a maximum of 6-8 %, and by thermal hydrolysis about 8-10 % due to a lower viscosity and a higher dry matter reduction.

Based on theoretical considerations, there are advantages of serial coupled digester operation over ordinary CSTR operation. In serial operation, the share of particles with very short retention time is less than with operation of a single digester. With one tank operation approx. 23% of the sludge has a retention time of less than 5 days, which, in a serial system, with a retention time of respectively 3 and 5 days, is reduced to 13% and 11 %.

The serial system is also more robust to shock loads, compared to the single tank system. Optimal serial operation is achieved with a retention times, that are only just high enough to provide a stable gas production coupled with a subsequent smaller tank approximately 10-20 % of the total volume.

1. Indledning

Nærværende rapport udgør delprojekt 2 af EnviDan's udviklingsprojekt "Intelligent Carbon and Energy Utilisation" (ICEU), og omhandler optimeret rådnetanksdrift.

Formålet med delprojektet er at undersøge og udarbejde anbefalinger til optimeret drift af rådnetanke med hensyn til valg af driftsparametre og rådnetanksdesign.

Rådnetanksdrift og dermed biogasproduktion betragtes som en afgørende enhed for at danske renselanlæg kan blive energineutrale. Forgasning af spildevandsslam er en velkendt og dokumenteret proces, dog vurderes der stadig at være et stort uudnyttet potentiale ved optimeret rådnetanksdrift. Generelt har de fleste renselanlæg med rådnetanke i Danmark kun en simpel styring af rådnetanksdriften baseret på opholdstiden og et temperaturinterval.

I projektet belyses driften af eksisterende danske rådnetanksanlæg, hvorpå optimeringspotentialet undersøges og dokumenteres. Gennem litteraturstudie og indsamlede driftserfaringer fra danske renselanlæg er konsekvensen af temperaturvalg ved drift af rådnetank mht. forbedret nedbrydning af eksempelvis animalsk fedt i forhold til et øget energiinput blevet undersøgt.

da kun den nødvendige mængde organisk stof omsættes i hovedanlægget og en øget mængde COD omsættes til metan i rådnetanken.

Specifikt for delprojektet omhandlende optimeret rådnetanksdrift forventes følgende positive miljømæssige effekter:

- Større gasudbytte ved optimeret rådnetanksdrift
- En større andel af kulstof omdannes til biogas fremfor CO₂
- Renseanlæggets samlede energiregnskab forbedres
- Større driftssikkerhed på rådnetanke på danske renseanlæg

3. Rådnetanksdrift

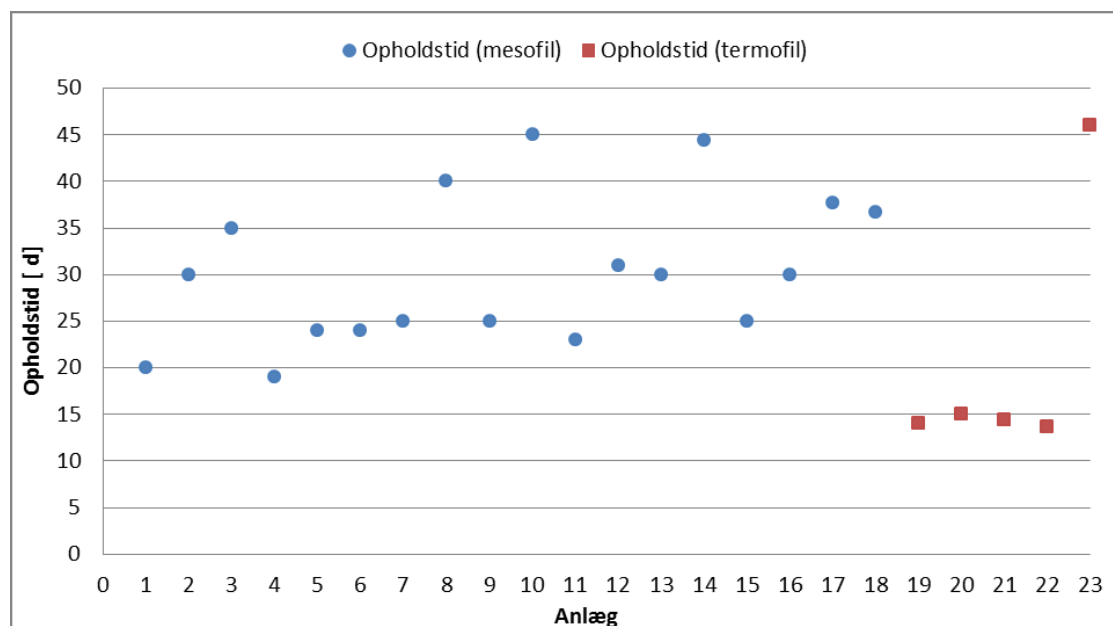
EnviDan har udarbejdet et spørgeskema som er fremsendt til samtlige danske renselanlæg med rådnetank. 23 danske renselanlæg med anaerob udrådning indgår i denne status for rådnetanksdrift på renselanlæg i Danmark. Der er indsamlet data fra 18 rådnetanksanlæg med mesofil drift og 5 rådnetanksanlæg med termofil drift og der er foretaget beregninger og opstillet en række nøgletal, som danner grundlag for vurdering driften.

I Tabel 3.1 fremgår nogle af de væsentligste registrerede driftsparametre for de undersøgte rådnetanke og disse belyses nærmere i de efterfølgende afsnit.

Tabel 3.1: Driftsparametre fra rådnetanke på 23 danske anlæg					
Mesofil drift	Temperatur [°C]	Tørstof ind [% TS]	Tørstof RT [% TS]	Opholdtid [d]	Driftstid omrører [%]
Middel ± stdafv.	38 ±2	6,1 ±1,7	3,5 ±1,3	30 ±8	89 ±17
Termofil drift	Temperatur [°C]	Tørstof ind [% TS]	Tørstof RT [% TS]	Opholdtid [d]	Driftstid omrører [%]
Middel ± stdafv.	54 ±4	5,1 ±0,5	3,6 ±0,4	21 ±14	81 ±33

3.1 Opholdstid, tørstof og temperatur

Hovedparten af rådnetankene drives alene ud fra, at den opnåede opholdstid sikrer en god udrådning. For mesofil drift skal opholdstiden erfaringsmæssigt være omkring 20-25 døgn og for termofil drift kan erfaringsmæssigt opretholdes en god udrådning ved opholdstider højere end 13-15 døgn. På Figur 3.1 ses de forskellige anlægs opholdstider i rådnetanken.

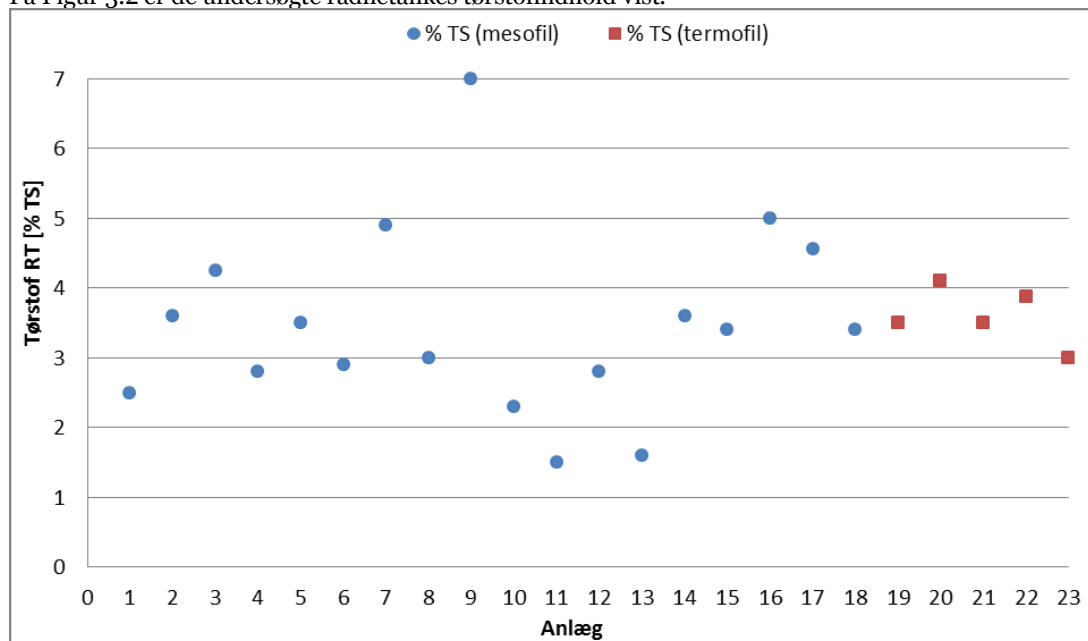


FIGUR 3.1: OPHOLDSTID I RÅDNETANK [ANTAL DAGE].

Det fremgår af Figur 3.1, at der på halvdelen af de undersøgte anlæg uanset driftsform anvendes en opholdstid, der svarer til den anbefalede opholdstid til sikring af god udrådning. På den øvrige halvdel af anlæggene drives rådnetankene med en betydelig længere opholdstid.

På alle de undersøgte anlæg er slamopholdstiden (SRT) og den hydrauliske opholdstid (HRT) identiske. Opholdstiden styres alene ud fra den indpumpede slammængde, idet rådnetankene drives med fast vandspejl. For at minimere det nødvendige rådnetanksvolumen og energiindput til opvarmning af rådnetank opkoncentreres både primær slam og det biologiske overskudsslam før indpumpning. Opkoncentreringen sker i koncentreringsstanke eller ved mekanisk forafvandning af slammet ved tilsætning af polymer.

På Figur 3.2 er de undersøgte rådnetankes tørstofindhold vist.



FIGUR 3.2: TØRSTOFINDHOLD I RÅDNETANK [% TS].

De viste tørstofkoncentrationer er målt som udgående tørstof. Generelt anses rådnetankene for at være fuldt opblandede, og derved er det udgående tørstof-indhold det samme som tørstofindholdet inde i rådnetanken.

For enkelte af de undersøgte anlæg er der forbehandling af slammet inden udrådning i form af termisk hydrolyse og ultralyd. Specielt for anlæg med termisk hydrolyse gælder, at tørstofniveauet i rådnetanken er høj, idet energiforbruget til forudgående den termiske forbehandling er minimeret gennem forøgelse af tørstofprocenten. Slam, der har gennemgået en kraftig termisk behandling, er generelt mere homogent og tyndt flydende (lavere viskositet). Dette betyder, at energiforbrug til omrøring i rådnetanken med termisk forbehandling er lavere sammenlignet med samme tørstof, i anlæg der ikke har gennemgået den termiske forbehandling.

Temperaturen har for anlæg med mesofil drift ligget mellem 32 – 40 °C med en middeltemperatur på 38 °C. Temperaturen har for anlæg med termofil drift ligget mellem 47 – 58 °C med en middeltemperatur på 54 °C.

3.2 Omrøring og recirkulering

Omrøringsenhederne i de undersøgte rådnetanke dækker de typer, der er på markedet, som groft kan inddeles i 3 kategorier:

- Tophængt omrører
- Skaktomrører
- Ejektor (omrøring med gas)

De fleste anlæg har indlagt en pausedrift styring af omrøringen baseret på erfaringsværdier, og det generelle billede er, at der kun er indlagt ganske korte driftspauser på omrøringen, hvor de fleste anlæg har en driftstid på omkring 85 % af tiden.

11 ud af de 23 anlæg har meddelt type af omrører implementeret:

- 7 tophængt omrørere
- 2 skakt omrørere
- 2 gasomrørere

Der er ikke indsamlet oplysninger om recirkuleringspumper på de 23 anlæg.

På 5 anlæg er den optagede effekt på omrøringen målt. Den har ligget på 1,3-3,4 W/m³ rådnetanksvolumen. I alle 5 tilfælde er der tale om tophængte omrørere.

På 4 af de samme 5 anlæg har den optagede effekt på recirkuleringspumpningen ligget på 1,7-11,3 W/m³. Enkelte anlæg har erfaret, at recirkuleringspumpningen alene har kunnet holde slammet i rådnetanken omrørt. Nøgletallene viser, at dette ikke umiddelbart er en driftsøkonomisk fordel.

4. Optimeret rådnetanksdrift

I afsnit 3 er en række danske anlæg med rådnetanksdrift undersøgt. Erfaringerne viser generelt, at de fleste anlæg drives fornuftigt ved isoleret betragtning af de enkelte driftsparametre. Da en god udrådning afhænger af mange parametre og disse parametres indbyrdes forhold, er det meget svært at estimere de enkelte undersøgte anlægs optimeringspotentiale ud fra statusgennemgangen alene. Indput- og outputparametre har afgørende betydning for rådnetankens økonomiske optimale driftspunkt. Her tænkes specielt på spildevandssammensætning, forafvanderudstyrets / koncentreringsstankens begrænsninger, polymerforbrug til forafvanding, opholdstid i rådnetank, begrænsninger mht. temperatur og omrøring i rådnetank samt tørstofniveau og polymerforbrug i forbindelse med slutfvanding.

Det er ikke nok alene at fokusere på biogasproduktionen. For at optimere de enkelte dele driftsmæssigt skal det økonomiske aspekt naturligvis inddrages, så der fås et indblik i, hvad den producerede biogas koster ved vurdering af nøgletallet [kr./Nm³ CH₄-produceret].

I dette udviklingsprojekt er det valgt at se på følgende 4 hovedområder:

- Driftstemperaturens indvirkning på animalsk fedts nedbrydningspotentiale
- Maksimalt tørstofindhold i forbindelse med rådnetanksdrift
- Rådnetanksdrift med recirkulering
- Efterudrådningspotentiale og afgang til atmosfæren

Formålet med forsøgene er, at vise temperaturens effekt på det biokemiske metanpotentiale (BMP) og undersøge nedbrydningsprofilen af fedtet over tid. Forsøgene er udført i laboratorieskala af hhv. Bioprocess Control, jf. bilag 1a og Westcome, jf. bilag 1b. Methanpotentialet er bestemt ved tre forskellige temperature niveauer varierende mellem 33 °C og 43 °C.

4.1 Nedbrydning af animalsk fedt ved forskellige temperaturer

Fedttilsætningen i de to laboratorieforsøg forventes at afdække området svarende til fuldskaladoseringer på de danske anlæg, idet forsøgene udført af Bioprocess Control er kørt med en enkelt høj dosering, og forsøgene udført af Westcome er kørt med 3 mindre fedtdoseringer.

Erfaringer viser, at fedt typisk ikke doseres hver dag men i forskellige tømningintervaller (fedtfang, aflevering af eksternt fedt o.l.). Der er ikke i dette projekt foretaget en egentlig analyse af mængden af indpumpet fedt /animalsk fedt på danske rådnetanksanlæg. Det vurderes dog, at en tilførsel af fedt fra fedtfang på 0,5 -1 m³/d ren fedt er i den absolut høje ende på et renseanlæg belastet med ca. 100.000 PE. I begge laboratorieforsøg er der tilsat en samlet mængde fedt svarende til en Innoculum Substrate Ratio (ISR) fra 6-16. 0,5 -1 m³/d ren fedt svarer til en ISR på omkring 40-80 på et typisk 100.000 PE-anlæg forudsat et rådnetanksvolumen på 2.000 m³, et VS-indhold på ca. 1,9 % samt en densitet af fedt på 0,9 t/m³.

4.1.1 Forsøgsmetode

Udrådnet slam fra Lundtofte renseanlæg er i forsøgene benyttet som podemateriale. pH er målt til 7,6. TS og VS er målt til henholdsvis 3,3 % TS og 1,85 % VS (Bioprocess Control). Der er tilsat svinefedt med TS og VS indhold på 100 % (oplyst på varedeklaration). Forsøg udført af Westcome viser samme niveau for parametrene forsøgsusikkerheder taget i betragtning. Der er gennemført forsøg med podemasse og substans ved ISR på 6:1 og 10:1 på basis af VS (Bioprocess Control). ISR er

defineret som forholdet mellem podemassens VS-indhold og substratets VS-indhold. I forsøgene gennemført af Westcome er der doseret fedt af 3 omgange ved et lavere ISR se Tabel 4.1.

Forsøgene har strakt sig over 39-40 dage med kontinuerte målinger i hele perioden. De oplyste gasvolumener er normaliseret til 1 atm og 0 °C (Bioprocess Control) og ca. 1 atm og ca. 20 °C (Westcome). Alle målinger og forsøg er baseret på trippelbestemmelse.

4.1.2 Resultater

I tabellen herunder ses data fra opsætning af laboratorieforsøg foretaget af Westcome.

Tabel 4.1: Doseringstidspunkt og-mængde af animalsk fedt tilsat						
Temperatur	33 °C		39 °C		43 °C	
Forsøg	Standard	Test	Standard	Test	Standard	Test
Gram slam	873	893	863	862	866	896
Gram fedt	-	0,22 / 0,38 / 0,49	-	0,23 / 0,38 / 0,49	-	0,22 / 0,39 / 0,50
ISR		81 / 47 / 36 (16)		75 / 45 / 35 (16)		81 / 46 / 36 (16)
Tilsat døgn	-	5 / 14 / 23	-	5 / 14 / 23	-	5 / 14 / 23

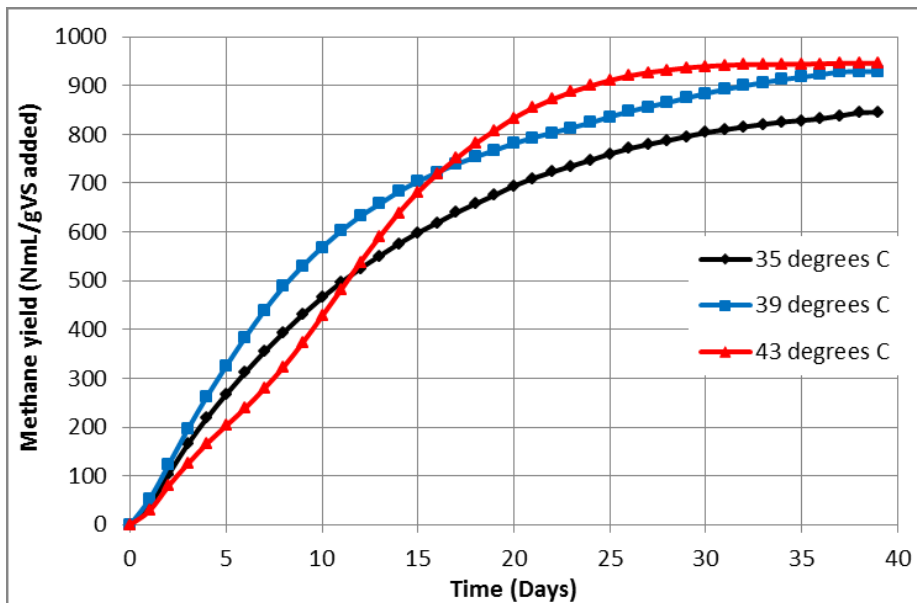
() angiver ISR ved samlet fedttilsætning.

I Tabel 4.2 er resultaterne for udrådning af podemasse karakteriseret ved akkumuleret biogasproduktion til døgn 5, døgn 10 og for hele periodens 40 døgn (Westcome).

Tabel 4.2: Udrådning af podemasse			
Akkumuleret biogas	33 °C	39 °C	43 °C
Ved døgn 5	520	755	1.005
Ved døgn 10	795	1.000	1.385
Ved døgn 40	1.215	1.645	2.285
% af 43 °C ved 5, 10 og 40 døgn (Westcome)	52 / 57 / 53	75 / 72 / 72	-
% af 43 °C ved 39 døgn (Bioprocess Control)	72	84	-

Resultaterne fra Westcome viser, at der er et næsten konstant forhold mellem gasproduktionen ved de forskellige temperaturer igennem forløbet. Q_{10} værdien for udrådning af podemassen er ca. 1,8 beregnet ved 33 °C til 43 °C. Q_{10} værdien for udrådning af podemassen er i forsøget udført af Bioprocess Control beregnet til ca. 1,5 beregnet ud fra 35 °C til 43 °C.

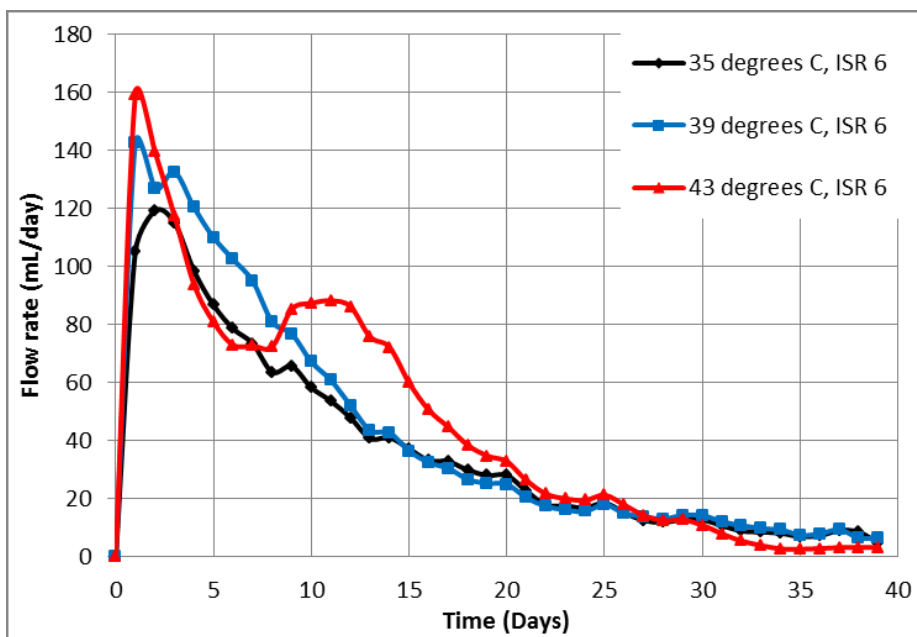
På Figur 4.1 ses det gennemsnitlige metanudbytte/g VS tilført for udrådning af animalsk fedt ved 35, 39 og 43 °C ved ISR på 6 og 10 (Bioprocess Control).



FIGUR 4.1: METANUDBYTTE/G VS TILFØRT FOR UDRÅDNING AF ANIMALSK FEDT VED 3 FØRSKELLIGE TEMPERATURER.

Metanudbyttet er korrigeret for udbyttet stammende fra blindprøve og derfor direkte normeret til udbytte stammende fra omsætning af nedbrudt VS_{fedt}.

På Figur 4.2 ses den daglige metanproduktion ved de 3 forskellige temperaturer (Bioprocesscontrol).



FIGUR 4.2: METANPRODUKTION PR. DAG VED 3 FØRSKELLIGE TEMPERATURER VED UDRÅDNING AF ANIMALSK FEDT.

Det fremgår af metanudbyttet ved 43 °C, jf. Figur 4.1 og Figur 4.2, at der er en mindre inhibering af de metanproducerende bakterier efterfulgt af en stabilisering af udrådningens forløb mod døgn 39, hvorimod gasproduktionen ved 35 og 39 °C er stabil gennem hele forløbet. Udrådningen er sandsynligvis ustabil på grund af akkumulering af langkædede fede syrer (LCFA), hvilket igen kan være forårsaget af en for kort tilvænningsperiode til 43 °C. Denne inhibering er observeret ved 39 °C i forsøgene udført af Westcome i forbindelse med den 3. dosering af fedt, men ikke ved 43 °C. Det bemærkes, at fedtdoseringen er betydeligt lavere i forsøgene sammenholdt med Bioprocess Control.

De opnåede forsøgsresultater underbygger litteraturen, hvor [Ogbonna E. et al., 2013] fandt, at det optimale temperaturområde for mesofil rådnetanksdrift lå mellem 39 – 40 °C i forhold til energiinput (opvarmning) og gasproduktion. [Buffière P. et al., 2013] fandt, at metanproduktionsraten følger Arrhenius lov mellem 28 – 49 °C. Ved en længere tilvænningsperiode ved 43 °C kan det dog ikke afvises, at forsøgsresultaterne vil have vist dette.

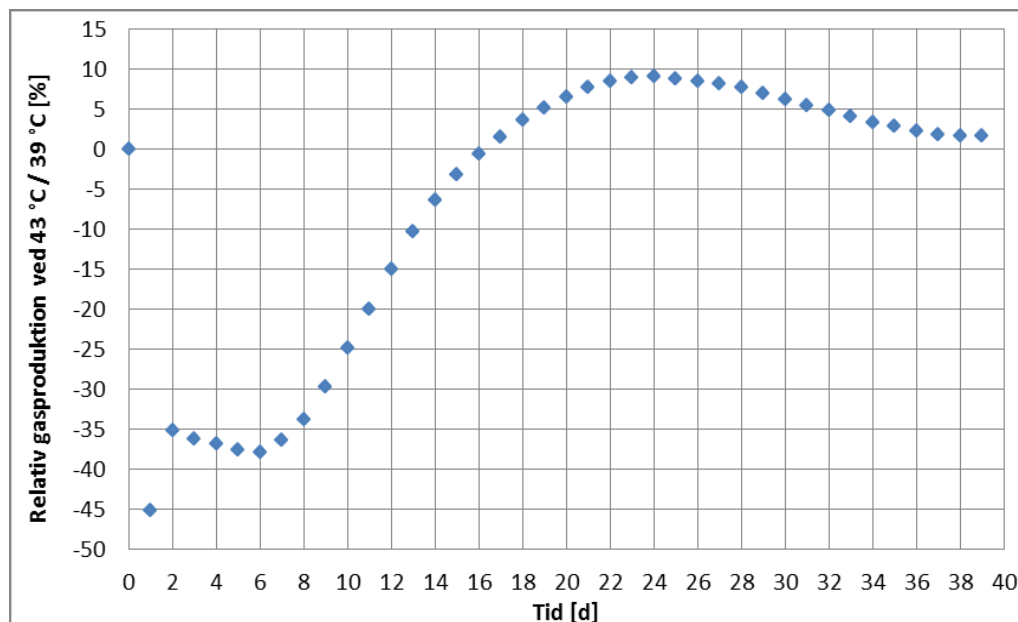
LCFA lave opløselighed, adsorption og inhibering af anaerobe mikroorganismer har ofte givet problemer i anaerobe spildevandssystemer, der modtager høje koncentrationer af fedt. En opdeling af den anaerobe udrådning i et syretrin og et metantrin har vist sig at forbedre fedtomsætningen [Kabouris, C. John et al., 2009]. Nedbrydningen af LCFA kan være det ratebegrænsende step i nedbrydningen af komplekse substrater, hvilket kræver en løbende tilpasning og påpasselig dosering af fedtholdigt spildevand for at undgå LCFA akkumulering. Umættede LCFA kan inhibere ved koncentrationer fra 0,5 kg /m³ [Anette Hejnfelt og Irimi Angelidaki, 2009]. [Luostarinen, S. et al, 2009] fandt at fedt fra fedtfang øgede gasproduktionen op til koncentrationer på 46 % af fedt VS i forhold til total tilført VS ved en hydraulisk opholdstid på 16 døgn og en organisk belastningsrate på 3,46 kg VS/m³/d ved 35 °C. Ved højere fedttilsætninger faldt biogasproduktionen/VS_{tilført}.

Det opnåede gasudbytte efter 39 døgn er som vist i Tabel 4.3 (Bioprocess Control).

Tabel 4.3: Metanudbytte ved tre forskellige temperaturer efter 39 døgn			
	35 °C	39 °C	43 °C
Metanudbytte [Nm ³ /g VS _{tilført}]	845	929	946

GENNEMSNITSVÆRDI FOR ISR=6 OG ISR=10 I FORSØGET UDFØRT AF BIOPROCESS CONTROL.

Metanudbyttet efter 39 dage er ca. 10 % højere ved 39 og 43 °C i forhold til 35 °C, men metanproduktionen er mest stabil ved 39 °C, hvilket er illustreret på Figur 4.3, hvor den relative gasproduktion ved 43 °C er vist i forhold til gasproduktionen ved 39 °C.



FIGUR 4.3: RELATIV GASPRODUKTION VED 43 °C I FORHOLD TIL PRODUKTIONEN VED 39 °C (BIOPROCESS CONTROL).

Udrådningforsøgene med omsætning af animalsk fedt ved 33, 39 og 43 °C udført af Westcome er vist i Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Akkumuleret biogasproduktion døgn 5 og for hele periodens 40 døgn ift. VS_{fedt} tilført.			
L biogas / kg VS	33 °C	39 °C	43 °C
Ved døgn 5 for hver test (gns.)	303 / 509 / 276 (363)	486 / 647 / 123 (419 (567) ¹)	607 / 1.205 / 544 (785)
Ved periode slut	677	671 (914) ¹	1673
% af 43 °C ved 5 og 40 døgn	46 / 40	53 (72) ¹ / 40 (55) ¹	100

¹ Periode 3 udtaget pga. inhibering.

Metanudbyttet er også her korrigeret for udbyttet stammende fra blindprøve og derfor direkte normeret til udbytte stammende fra omsætning af nedbrudt VS_{fedt}. Resultatet viser, at idet forholdet ikke ændrer sig betragteligt igennem forsøgsperiodens 40 døgn, er der en egentlig afhængighed mellem driftstemperatur og opnåelig tørstofomsætning for fedt også fra 39 til 43 °C. Q₁₀ værdien for omsætning af fedt er cirka 2,2 til 2,5 beregnet ved temperatur 33 °C til 43 °C.

4.1.3 Delkonklusion

På basis af resultater opnået ved forsøg i laboratorieskala vurderes, at anaerob omsætning af animalsk fedt i rådnetanke er afhængig af driftstemperaturen. Der er ved laboratorieforsøg beregnet en Q_{10} værdi for omsætning af fedt til cirka 2,2 til 2,5 beregnet ved temperatur 33 °C til 43 °C. Der ses således potentiale for en øget omsætning af animalsk fedt ved at hæve driftstemperaturen i rådnetanke med mesofil drift til omkring 40-43 °C.

4.2 Maksimalt tørstofindhold i rådnetanke

Et større litteraturstudie har ikke resulteret i, at EnviDan gennem dette udviklingsprojekt har kunnet finde en endelig størrelse på det maksimale tørstofniveau rådnetanke kan drives med. Generelt drives de fleste danske rådnetanksanlæg med et indhold af tørstof på 2,5-5 % TS. Enkelte renseanlæg med eksempelvis termisk forbehandling af slammet, hvilket af energihensyn ofte kræver en høj forafvandsgrad, har et tørstofniveau på 5-8 % TS i rådnetanken. Den termiske forbehandling giver til gengæld et mere homogent og lavviskøst slam, der kræver mindre energiinput til omrøring.

En af de bestemmende parametre for tørstofindholdet i rådnetanke vurderes at være effektiviteten af forafvanding- opkoncentrering i koncentreringsstanke eller mekanisk forafvanding. I langt de fleste tilfælde foregår opkoncentreringen via tromleforafvandere eller koncentreringsstanke. Det er erfaringsmæssigt svært at opnå mere end 6-7 % TS ved forafvanding specielt uden, at udgifter til polymer stiger voldsomt i forhold til den opnåede effekt. Dette svarer til en slamkoncentration i rådnetanken på ca. 4-5 % TS pga. tørstofreduktionen i rådnetanken. Niveaue for opkoncentrering via koncentreringsstanke er typisk 4-6 % for primærslam og 2-3 % svarende til en slamkoncentration i rådnetanken på ca. 2-3 % TS.

Forafvanding med dekanter kan erfaringsmæssigt let afvande slammet til 15 % TS, hvilket med omsætningen i rådnetanken giver en tørstofkoncentration i tanken på ca. 10 % TS. I dette tilfælde stilles der store krav til omrøreren for at holde slammassen suspenderet og samtidig sikre en effektiv frigivelse af gassen.

Generelt kan omrørere inddeles i 3 typer:

- Tophængt omrørere (maks. ca. 10-12 % TS)
- Sidehængt omrørere / ejektoromrørere (maks. 4-6 % TS)
- Skaktomrørere (maks. ca. 10-12 % TS)

Omrøringen kan i de fleste tilfælde stort set optimeres til det ønskede tørstofniveau, idet det i stor udstrækning blot er et spørgsmål om effektstørrelse. Sidehængte omrørere og omrørere af ejektortypen er erfaringsmæssigt bedst egnede til omrøring af slam med et tørstofniveau på maksimalt 4-6 % TS, hvor både den tophængte omrører og skaktomrøreren vurderes at kunne håndtere op til 10-12 % TS inde i rådnetanken. Skaktomrøreren vurderes at være den mest økonomiske af disse to ved de høje tørstofkoncentrationer. Erfaringer fra biogasanlæg med udrådning af gylle viser, at tophængte omrørere som minimum bør monteres med to blade i top og bund, og at dette kan holde et tørstofindhold på 10-12 % TS suspenderet. Herved undgås sedimentation i bund af rådnetank og et eventuelt flydelag i toppen.

Rådnetkandsdrift med et tørstofindhold på 10-12 % TS stiller store krav til den efterfølgende håndtering af slammet med hensyn til pumpning og specielt slutaftvanding. Ved slutaftvanding vanskeliggøres polymerindblandingen og ofte udnyttes polymeren ikke optimalt, hvilket øger forbruget og forringer afvandsgraden. Det høje tørstofniveau kan yderligere give anledning til et dårligere rejekt, da shear-påvirkningen under afvandingen får slampartiklerne til at gå i stykker og generere små partikler som ikke indfanges af polymeren. I forbindelse med afvanding af udrådet slam fra renseanlæg er det højeste tørstofindhold på de 23 undersøgte anlæg 4-4,5 % TS indgående på mekanisk afvanderudstyr. Slammets viskositet i dette tilfælde er lavere end normalt, idet slammet har gennemgået en termisk hydrolyse.

4.2.1 Delkonklusion

Det har ikke været muligt via litteraturen at finde en endelig størrelse på det maksimale tørstofniveau rådnetanke kan drives med. Skal driften af en forafvanding, slutafovanding samt omrøring i rådnetanken tilgodeses anbefales tørstofindholdet tilpumpet rådnetanken at ligge på maksimalt 8 % og med termisk hydrolyse omkring 10 % på grund af en lavere viskositet og en højere tørstofreduktion.

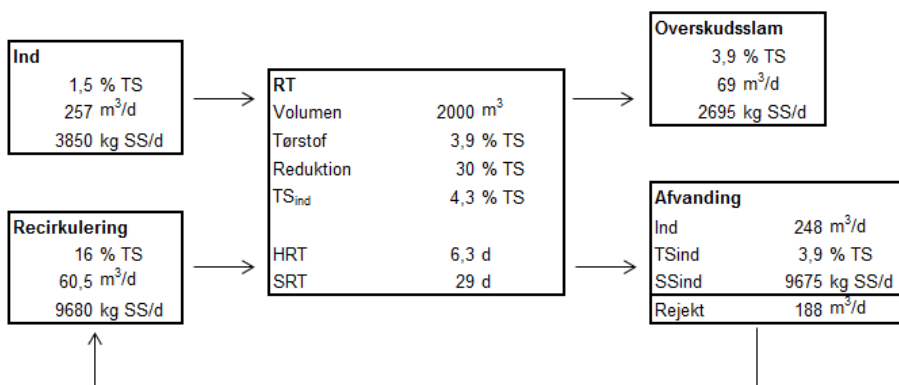
4.3 Rådnetanksdrift med recirkulering af opkoncentreret udrådnet slam

Det ønskes at dokumentere optimeringspotentialer ved recirkulering af opkoncentreret udrådnet slam til rådnetanken. Slam med lavere tørstofindhold (1,5-3 % TS) tilføres rådnetanken, og opkoncentreres derefter med dekanter eller lignende på bagsiden af rådnetanken med brug af polymer. Derefter recirkuleres slamfraktionen til rådnetanken. I dette projekt undersøges ved energiberegning, om metoden fordrer tvungen varmeveksling på afgangssiden af hensyn til varmebalancen. I bilag 2 er flowdiagrammer for de to driftssituationer vist.

Der er taget udgangspunkt i driftsdata som vist i Tabel 4.5 til beregning af nødvendig recirkuleringsflow i forbindelse med opkoncentrering af slam efter rådnetanken.

Tabel 4.5 Driftsdata – udgangspunkt ved traditionel rådnetanksdrift	
Flow [m ³ /d]	70
Tørstof [% TS]	~5,5
Tilført slam [kg SS/d]	3.850
Opholdstid, (HRT) [d]	28-29
Tørstofreduktion i rådnetank [%]	30
Tørstof ud af rådnetank [% TS]	~3,9

I det følgende er antaget, at tørstofniveauet efter afvanding i det recirkulerede slam er 16 % TS og det indgående tørstof er 1,5 % TS. På Figur 4.4 er opstillet afstemt massebalance med recirkulering af udrådnet slam, således tørstofniveau og opholdstid fastholdes fra udgangspunktet, jf. Tabel 4.5.



FIGUR 4.4: MASSEBALANCE FOR RÅDNETANKSDRIFT MED RECIRKULERING AF OPKONCENTRERET UDRÅDNET SLAM

I massebalancen vist på Figur 4.4 er der set bort fra SS i rejeckt vand fra afvandingen (ca. 100 kg SS/d).

I Tabel 4.6 er gennemført en beregning af polymerudgifter til forafvanding til 5,5 % TS (traditionel drift) sammenlignet med opkoncentrering og recirkulering af udrådnet slam fra bagsiden af

rådnetanken. Her er illustreret 2 scenarier, hvor der i det ene er kalkuleret med 1,5 % TS i det tilførte slam og i det andet er kalkuleret med 3 % TS i det tilførte slam svarende til slam fra en koncentreringsstank.

Tabel 4.6: Driftsudgifter til afvanding og opkoncentrering af udrådnet slam i forbindelse med anaerob udrådning.			
Drift	Forafvanding 5,5 % TS	Afvanding efter rådnetank 16 % TS (1,5 % TS tilført)	Afvanding efter rådnetank 16 % TS (3 % TS tilført)
Polymerforbrug [kg aktiv pol./t TS]	3	8-9	8-9
Polymeromkostning. [mio. kr./år]	0,2	1,4-1,6	~0,5

Som det fremgår af Tabel 4.6 stiger polymerudgifterne voldsomt med faktor 7 til 8 svarende til en stigning på 1,0 til 1,2 mio.kr./år ved opkoncentrering af udrådnet slam i tilfælde af at det tilførte slam er 1,5 % TS og det recirkulerede slam er 16 % TS. Hvis det tilførte slam er 3 % TS og det recirkulerede opkoncentrerede udrådnet slam er 16 % TS stiger polymerudgifterne med en faktor 2,5 eller med ca. 0,3 mio. kr./år.

På grund af de stigende polymerudgifter vurderes, at det ikke kan svare sig at opkoncentrere på bagsiden, idet det ikke er driftsøkonomisk optimalt. Af samme grund er der ikke gennemført en varmebalance med varmegenindvinding på bagsiden af rådnetanken (recirkuleringen) med slam/slamveksler.

Der er foretaget en varmeberegning for tørstofniveau i indgående strøm, hvor varmeproduktion fra gasmotor er lig med varmebehovet. I varmebehovet er indregnet varmetab til omgivelser fra rådnetank. Det er fundet, at varmeproduktionen har energi til opvarmning af den indgående strøm, såfremt tørstofniveauet er mindst 3,5 % TS ved benyttelse af belastningsdata som i Tabel 4.5 set som gennemsnit over året. I vinterdrift, hvor varmebehovet er størst, skal tørstofniveauet være knap 5 % TS for, at varmebehovet ikke overstiger varmeproduktionen.

4.3.1 Delkonklusion

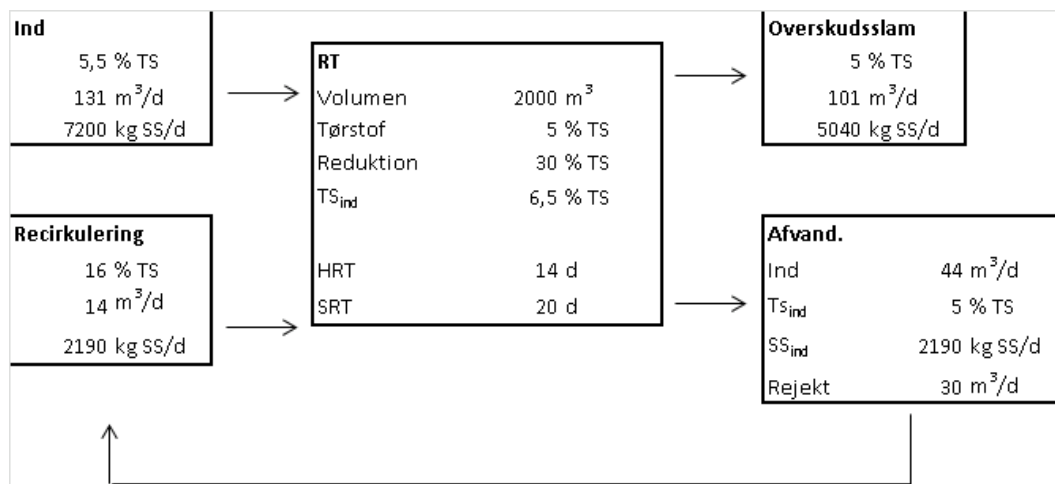
På basis af opstillede teoretiske massebalancer vurderes en recirkulering af opkoncentreret udrådnet slam ikke at være driftsøkonomisk optimalt. Dette skyldes et voldsomt forhøjet polymerforbrug.

4.4 Høj belastning af rådnetank

Samme rådnetanksanlæg er i dette beregningsscenarie udsat for en meget høj belastning, hvor en kapacitetsforøgelse er påkrævet. Der er foretaget en sammenligning af årlige omkostninger mellem 2 driftsscenarier. I det ene tilfælde ses på driftsoptimering ved etablering af mindre seriekoblet rådnetank, og i det andet tilfælde ses på driftsoptimering ved etablering af recirkulering af opkoncentreret udrådnet slam på eksisterende rådnetanksvolumen. Der er taget udgangspunkt i driftsdata som vist i Tabel 4.7 i forbindelse med den økonomiske sammenligning.

Tabel 4.7: Driftsdata – udgangspunkt ved traditionel rådnetanksdrift	
Flow [m ³ /d]	120
Tørstof [% TS]	~6,0
Tilført slam [kg SS/d]	7.200
Opholdstid, (HRT) [d]	16-17

I det følgende er antaget, at tørstofniveauet efter afvanding af udrådnet slam recirkuleres med 16 % TS og det indgående tørstof efter forafvanding er 5,5 % TS. På Figur 4.5 er opstillet afstemt massebalance med recirkulering af opkoncentreret udrådnet slam, således opholdstiden løftes til 20 d, hvilket anses for at være acceptabelt for en mesofil drift. I massebalancen er der set bort fra SS i rejektivand fra afvandingen (ca. 30 kg SS/d).



FIGUR 4.5: MASSEBALANCE FOR RÅDNETANKSDRIFT MED RECIRKULERING AF OPKONCENTERET UDRÅDNET SLAM.

Dette scenarie sammenlignes med en seriekoblet rådnetank med 20 % af det samlede volumen i den nye tank svarende til en samlet hydraulisk opholdstid på 20 d. Der er kalkuleret med levetider for bygningsdele på 25 år og levetider for maskin- og el-dele på 10 år. Der er benyttet en rentefod på 3 % p.a..

Som det fremgår af Tabel 4.8 øges polymerudgifterne betragteligt ved recirkulering af opkoncentreret udrådnet slam i forhold til traditionel forafvanding i den seriekoblede drift.

Tabel 4.8 Sammenligning af investeringsbehov, polymeromkostninger samt årlige omkostninger ekskl. varmegenindvinding		
	Etablering af rådnetank i serie [mio. kr./år]	Recirkulering [mio. kr./år]
Investering	3	0,8 ¹
Driftsomkostninger (polymer)	~0,45 (3,5 kg aktiv polymer/t. TS)	~0,8 (3,5 og 8 kg aktiv polymer/t. TS)
Afskrivning	~0,3	0,1
Årlige omkostninger	~0,75	~0,9

4.4.1 Delkonklusion

På grund af de stigende polymerudgifter (0,35 mio.kr./år) vurderes, at det ikke kan svare sig at opkoncentrere udrådet slam, idet det ikke er driftsøkonomisk optimalt. Såfremt der ønskes varmegenindvinding på recirkulationsløsningen skal yderligere tillægges omkostninger til en slam/slamveksler. En sådan investering gør blot løsningen med seriekoblingen mere attraktiv. Det vurderes, at en kapacitetsforøgelse med recirkulering af udrådet slam kan være relevant i tilfælde af, at der pga. arealdisponering ikke er plads til etablering af en ekstra mindre rådnetank.

4.5 Varmegenindvinding med slam/slamveksler

I dette afsnit er der set på varmebalancer i forbindelse med traditionel rådnetanksdrift med og uden varmegenindvinding for at belyse eventuelle fordele ved etablering af varmegenindvinding. Der er benyttet samme belastningsdata som i Tabel 4.5 og nærværende varme- og energiberegninger er baseret på aktuelle driftsdata som vist i Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Driftsdata : Energi- og varmeberegning				
	Sommer	Vinter		Vinter - ekstrem
Lufttemp. [°C]	15	0		-15
Dage [d]	185	165		15
Temp. RT [°C]	39	38		37
Primærslam [°C]	15	8		
Bioslam [°C]	15	7		
Fedt mm [°C]	16	7		
	[m ³ /d] / [m ³ /år]	[% TS]	[t TS/år]	[t COD/år]
Ind – RT	~70 / 25.865	5,5	1.428	1.698
Ud – RT		~3,7	958	770
	Biogas [Nm³/år]	Metanindhold [%]		Metan [Nm³/år]
Gasproduktion	~500.000	65		325.000

Erfaringer fra danske renselanlæg viser typisk, at det kun er muligt at udnytte gasmotoren 85-90 % af tiden oftest pga., at kapacitet af gaslageret og / eller gasmotorens kapacitet ikke passer til den aktuelle gasproduktion. Det betyder, at der i driften er perioder, hvor der tilføres varme fra supplerende gaskedel.

I nedenstående varmeberegninger, Tabel 4.10, er der kalkuleret med en virkningsgrad på 87 % for gaskedel, 37 % og 46 % for gasmotorens virkningsgrad for henholdsvis el og varme. Ved varmegenindvinding er der kalkuleret med en marginal bedre udrådning (1,5 procentpoint) ved at løfte den gennemsnitlige rådnetankstemperatur knap 2 °C til 40 °C.

Her fremgår det, at varmegenindvindingen reducerer varmemeforbruget med ca. 380 MWh/år i det beregnede scenarie, hvilket udgør 80 % af den samlede økonomiske besparelse.

Tabel 4.10 Varmeberegning	
Slam/vand veksler – tilgang RT	
Drift gasmotor [d]	320
Drift gaskedel [d]	45
Samlet varmeproduktion [MWh/år]	~1.560
Samlet varmebehov [MWh/år]	~900
Varmeoverskud [MWh/år]	~660
Samlet el-produktion [MWh/år]	~990
Med varmegenindvinding og forbedret udrådning ved 40 °C	
Drift gasmotor [d]	320
Drift gaskedel [d]	45
Samlet varmeproduktion [MWh/år]	~1.585
Samlet varmebehov 50 % varmegenindvinding [MWh/år]	~520
Varmeoverskud [MWh/år]	~1.060
Samlet el-produktion [MWh/år]	~1.005
Produktionsforøgelse	
El-produktion [MWh/år]	15
Varmeproduktion [MWh/år]	23
Reduktion af varmeforbrug [MWh/år]	~380
Værdi af forøget el-produktion (760 kr./MWh) [kr./år]	~10.000
Værdi af varmeproduktion (225 kr./MWh) [kr./år]	90.000
Værdi af reduceret slammængde (500 kr./t) [kr./år]	15.000
Samlet besparelse [kr./år]	115.000

4.6 Efterudrådningspotentiale og afgang til atmosfæren

EnviDan ønsker at undersøge mængden af metan, der afgasses fra udrådnings slam til atmosfæren i den efterfølgende slamhåndtering, da metan er en af de kraftigere drivhusgasser. Reduktionspotentialen i udledt metan ønskes ligeledes dokumenteret ved indførelse af optimeret rådnetanksdrift.

Er metanafgivelsen efter overførslen fra rådnetanken af en sådan størrelsesorden, at der kan produceres yderligere energi i form af biogas fra slammet, vil der være en potentiel økonomisk gevinst for renselanlægget. Metan har desuden en drivhuseffekt, der er ca. 23 gange større end CO₂ (Hansen et al. 2006). En betydelig afgivelse af metan fra det anaerobt stabiliserede spildevandsslamm vil derfor være et potentielt miljømæssigt problem.

Det er således relevant at undersøge størrelsesordenen af metanafgivelsen fra anaerobt stabiliseret spildevandsslamm efter udtagelse fra rådnetanken. I denne forbindelse har EnviDan i et samarbejde med 2 studerende fra Ingeniørhøjskolen Aarhus Universitet gennemført en undersøgelse af efterudrådningspotentialet fra 3 danske renselanlæg med forskellig driftsformer af anaerobt udrådning. Der er udarbejdet en rapport som afsluttende bacheloropgave til diplomingeniøruddannelsen bioprocesteknologi på Ingeniørhøjskolen, Aarhus Universitet. I bilag 3 fremgår hele rapporten inkl. rapportbilag.

Formålet med rapporten er at undersøge, hvor meget metan der afgives fra det anaerobt stabiliserede spildevandsslamm, efter slammet udtages fra rådnetanken. Ud fra eksperimentelt arbejde vil følgende undersøges ved hhv. 10 og 20 °C:

1. Hvor meget metan afgives der fra det anaerobt stabiliserede slam ud fra en teoretisk beregning af opløst metan i væskefasen af det udpumpede udrådnede slam?
2. Hvor meget metan produceres i kort lagring af det udrådnede slam inden slutbehandling og hvad er efterudrådningspotentialet?

3. Hvordan udvikler forholdet sig mellem afgivet metan og den totale gasmængde afgivet?

Der indsamles anaerobt stabiliseret slam fra tre jyske spildevandsrensaneanlæg. Anlæggene er udvalgt for hhv. at repræsentere en termofil-, en mesofil- og en seriekoblet termo-mesofil udrådningstype. Der er ikke lagt vægt på andre parametre i udvælgelsesprocessen end udrådningstypen.

Stegholt Renseanlæg er det største offentlige spildevandsrensaneanlæg i Aabenraa Kommune og modtager udelukkende husholdningsspildevand. Anlægget har en termofil rådnetank. Der er et kontinuert flow af slam til og fra rådnetanken på ca. 60 m³/d. Det tilførte slam består af 90 % biologisk slam og 10 % primær slam.

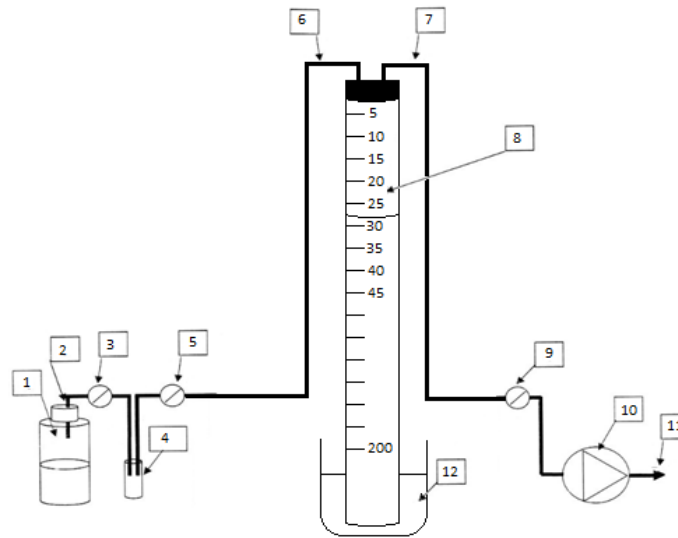
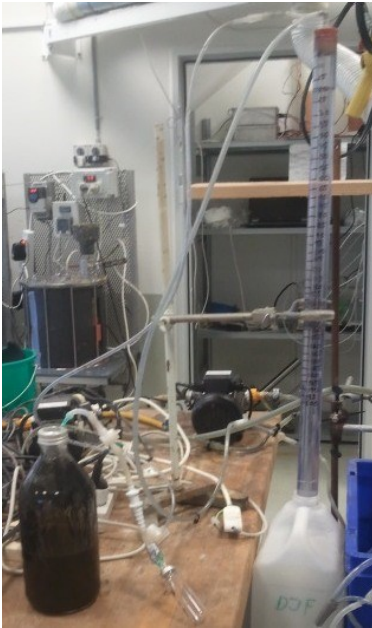
Herning Renseanlæg modtager spildevand fra både husholdning og industri, hvor hver andel udgør ca. 50 %. Der er to seriekoblede rådnetanke på anlægget først en termofil og derefter en mesofil rådnetank. Der er et kontinuert flow til og fra tankene på ca. 200 m³/d. Det tilførte slam består af 45 % biologisk slam og 55 % primær slam.

Thisted Renseanlægget tilføres 1/3 spildevand fra husholdning og 2/3 fra industri, der primært udgøres af et slagteri. Anlægget har en mesofil rådnetank, som tilføres slam 5 dage om ugen, da belastningen af anlægget i høj grad afhænger af aktiviteten på slagteriet. Dette giver et gennemsnitligt flow ind og ud af rådnetanken på 70 m³/d. Slammet består af 67 % primær slam og 33 % biologisk slam. Nedenfor i Tabel 4.11 ses en oversigt over driftsparametrene for de tre rensaneanlæg.

Tabel 4.11 Opsummering af overordnede driftsparametre for de tre rensaneanlæg				
Parametre	Stegholt RA	Herning RA		Thisted RA
Udrådningstype	Termofil	Termofil	Mesofil	Mesofil
Temperatur [°C]	49-53	53	30-34	39
Biogasproduktion [m ³ /år]	317.550	1.051.200		625.780
Metanindhold [%]	62	65		Ca. 62
Kapacitet [PE]	83.000	150.000		130.000
Belastning [PE]	45.000-50.000	150.000		100.000
Spildevandskarakteristik	Husholdning	50 % industri / 50 % husholdning		67 % industri / 33 % husholdning
Total slamalder [d] (procetank)	13,7 -15	13,5-17,2		18,9-26
Opholdstid i rådnetank [d]	18-22	13-15	13-15	22-24
Udpumpet slammængde [m ³ /d]	60	200	200	70
Tørstof ud [% TS]	~3,7	~2,7	~2,5	~3,5
Omrøringsstype i rådnetank	Mekanisk omrøring og recirkulation (24 h/d).	Mekanisk omrøring fra toppen og ca. 2/3 ned i tanken.	Mekanisk omrøring fra toppen og ca. 2/3 ned i tanken.	Recirkulering af slam, der blandes med en gasstrøm, recirkuleret fra tanken.

4.6.1 Metodebeskrivelse

Forsøgene udføres på laboratoriefaciliteterne på Biogasanlægget ved AU Foulum. Det afgivne gasvolumen fra slammet samt indholdet af metan og CO₂ måles. Det anaerobt stabiliserede slam inkuberes ved 10 og 20 °C. 10 °C svarer til middeltemperaturen i Danmark på årsbasis, mens 20 °C er et gennemsnits temperatur for en varm sommer (Danmarks Meteorologiske Institut 2012). Gasvolumenerne af metan og CO₂ blev målt vha. fortrængning af surt vand i en søjle. Opstillingen ses på Figur 4.6



FIGUR 4.6: TIL VENSTRE FOTO AF OPSTILLINGEN TIL VOLUMENMÅLING. TIL HØJRE: ILLUSTRATION AF OPSTILLINGEN TIL VOLUMENMÅLINGEN AF OVERTRYKKET FRA PRØVEFLASKEN. 1: PRØVEFLASKE, 2: UDTAG FRA PRØVEFLASKEN, 3: VENTIL MELLEM PRØVEFLASKE OG GC-GLAS, 4: GC-GLAS, 5: VENTIL MELLEM GC-GLAS OG SØJLEN, 6: INDLØB TIL SØJLEN, 7: UDLØB FRA SØJLEN, 8: PLASTIKSØJLE INDEHOLDENDE SURT VAND (PH 2), 9: VENTIL MELLEM SØJLE OG PUMPE, 10: PUMPE, 11: UDLØB FRA SYSTEMET, 12: BEHOLDER MED SURT VAND (PH 2).

Det gasovertryk, der dannes i prøveflaskerne pga. biologisk aktivitet, udtages fra flaskerne ved at stikke en kanylenål igennem lågets membran. Derefter strømmer gassen gennem et GC-glas til opsamling af gasprøve. Efter GC-glasset strømmer gassen videre til en plastiksøjle indeholdende surt vand (pH 2). Gassen fortrænger vandsøjlen, og herefter kan volumen af gassen aflæses på søjlen. Vandet er surt, for at undgå at CO₂ indgår i syre-base reaktioner med det. For at afgive så meget gas som muligt fra slammet blev prøveflaskerne rystet forud for volumenmålingen. Gassen, der bliver opsamlet i GC-glasset, analyseres efterfølgende for metan- og CO₂ indhold ved brug af en gaschromatograf.

Det anaerobt stabiliserede slam blev indsamlet i én-liters glasflasker med membranlæg. Der blev påfyldt ca. 500 ml slam i hver prøveflaske. Slamprøverne blev under transporten mellem renseanlæggene og forsøgsfaciliteterne kølet i bokse med køleelementer. Prøveflaskerne blev efterfølgende inkuberet ved hhv. 10 og 20 °C i forsøgsperioden. Målingerne blev foretaget ved 20 °C og et tryk på 1 atm, volumenet af metan er angivet ved disse forhold.

I et pilotforsøg blev kørt et testforsøg med og uden gennemblæsning med nitrogen i prøveflasker inden prøveudtagning for at reducere iltindholdet i prøveflaskernes headspace. Ved 10 °C var der ikke en statistisk signifikant forskel på den akkumulerede mængde metan mellem prøveflaskerne ved 10 °C. Der kan således ikke umiddelbart observeres en forskel på, om der er skyllet med nitrogen ved 10 °C. Ses der imidlertid på flaskerne ved 20 °C, er der afgivet mere metan i flaskerne skyllet med nitrogen end i dem, der ikke blev. Denne observation er testet statistisk signifikant fra døgn 11.

Endvidere blev det observeret, at for en given temperatur resulterer skylning med nitrogen i et større metanindhold i biogassen. Dette er statistisk signifikant fra døgn 9 til døgn 60 for 20 °C og fra døgn 18 til og med døgn 46 ved 10 °C. Effekten af skylningen skyldes formodentligt, at de methanogene mikroorganismer er obligat anaerobe, samt at ilt kan medføre biologisk oxidation af

slammet og dermed CO₂ produktion. Mindre ilt i prøveflaskerne medfører således, at der dannes mere metan. I forsøgene med efterudrødning af slam fra de 3 udvalgte renseanlæg er der ikke tilsat kvælstof.

4.6.2 Opløselighed af metan i slammet og efterfølgende afgang

Opløseligheden af gasser i væske som funktion af gassens partialtryk over væsken kan i ligevægt beskrives gennem Henrys lov:

$$C_{\text{gas}} = k_H \cdot P_{\text{gas}}$$

k_H er Henrys konstant,

P_{gas} er partialtrykket af gassen over væsken

C_{gas} er koncentrationen af gassen opløst i væsken.

k_H er stofs specifik og afhænger af temperaturen. Ved 25 °C er k_H for metan opløst i rent vand 714 $\frac{\text{l}\cdot\text{atm}}{\text{mol}}$ [Sander 1999], [Lide and Frederikse, 1995], [Wilhelm, Battino, et al., 1977].

Til omregning af k_H til en anden temperatur end 25 °C benyttes nedenstående ligning. [Sander 1999].

$$k_H(T) = k_H(T^0) \cdot e^{-C \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^0}\right)}$$

C er en temperaturafhængig konstant (1600-1900 K) [Lide and Frederikse, 1995], [Wilhelm, Battino, et al., 1977], [Dean, 1992]

Metanindhold og udpumpet slammængde oplyst i Tabel 4.11 for de enkelte renseanlæg benyttes til teoretisk beregning af den metanfrigivelse, der finder sted ved udpumpning af udrådet slam til lagertank/homogeniseringsstank og efterfølgende slutaftvanding. Det antages, at alt opløst metan frigives til atmosfæren ved den efterfølgende opbevaring og behandling. I Tabel 4.12 fremgår den teoretisk beregnede metanemission fra de 3 undersøgte renseanlæg ved 10 °C.

Tabel 4.12 Beregnet metanemission fra de undersøgte 3 renseanlæg ved 10 °C.			
Renseanlæg	Temperatur [°C]	Metanemission [Nm ³ CH ₄ /år]	Andel af gasproduktion [% årlig produktion]
Stegholt	~53	270	0,1
Herning RA	~34	1.300	0,2
Thisted RA	~39	400	0,1

I beregningen Tabel 4.12 benyttes $C = 1.700$ K.

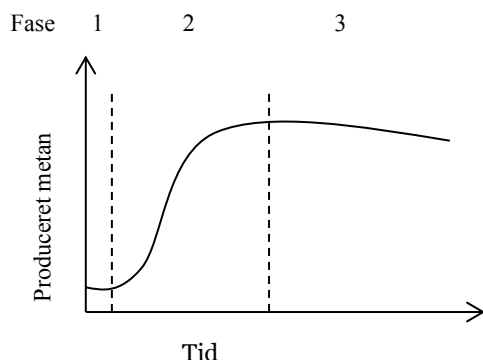
Opløseligheden af gas i en væske stiger med stigende tryk og falder med stigende temperatur.

Diffusion af gas i en væske falder med stigende væskeviskositet [Harrison 2003]. Spildevandsslams viskositet er større end vands og stiger med stigende partikkelkoncentration [Sanin 2002]. Det er derfor sandsynligt, at slammet vil være overmættet med metan, og at de beregnede værdier derfor er en anelse underestimeret. Alligevel er metanemissionen begrænset, da den for de undersøgte anlæg udgør mellem 0,1-0,2 % i forhold til den årlige metanproduktion.

Emissionens størrelse giver ikke anledning til yderligere tiltag på renseanlæggene for at opsamle den frigivne metan i forbindelse med udpumpningen fra rådnestankene og den efterfølgende behandling.

4.6.3 Efterudrødningspotentiale

Et forventet grafisk forløb for metanproduktionen i den anaerobe stabilisering i en batch reaktor er vist på Figur.4.7 nedenfor.

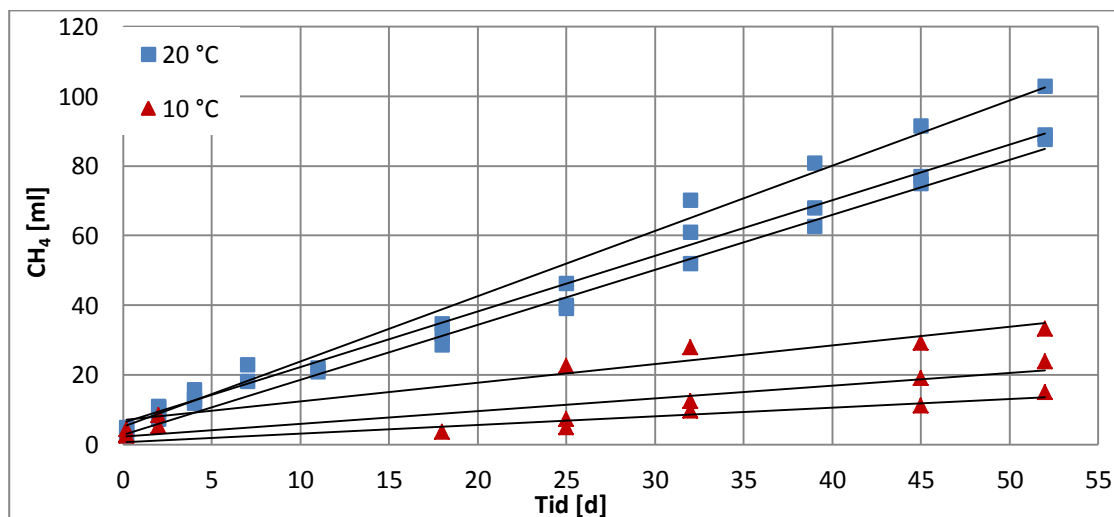


FIGUR 4.7: FORVENTET GRAFISK FORLØB FOR DEN TIDSMÆSSIGE UDVIKLING I PRODUKTIONEN AF METAN I EN BATCH REAKTOR. 1: OPSTARTSFASEN, 2: DEN EKSPONENTIELLE FASE, 3: AFSLUTTENDE FASE [BITTON 2011].

I opstartsfasen tilpasser mikroorganismene sig til miljøet. I fase 2 stiger metanproduktionen eksponentielt, og i den afsluttende fase aftager produktionen af metan grundet manglende substrat i form af lettilgængeligt organisk materiale. I dette projekt forventes, at metanproduktion i anaerobt stabiliseret spildevandsslam kan beskrives grafisk som i fase 3 på Figur 4.7, når det udledes fra rådnetanken til slamlagertanken. Af denne årsag forventes den tidsmæssige udvikling for metanafgivelsen fra slammet i forsøget at være faldende med nogenlunde konstant rate. Med samme argument forventes det, at den akkumulerede mængde metan afgivet fra slammet over forsøgsperioden kan beskrives lineært.

4.6.3.1 Stegholt Renseanlæg

Gennem forsøgsperioden var det ikke muligt at registrere afgivet metan fra prøveflaskerne inkuberet ved 10 °C ved døgn 4, 7, 11 og 39. På Figur 4.8 ses den akkumulerede mængde afgivet metan i ml over en periode på 52 døgn samt tilhørende tendenslinjer.



FIGUR 4.8: DEN AKKUMULEREDE MÆNGDE AFGIVET METAN FOR STEGHOLT RENSEANLÆG VED 10 OG 20 °C.

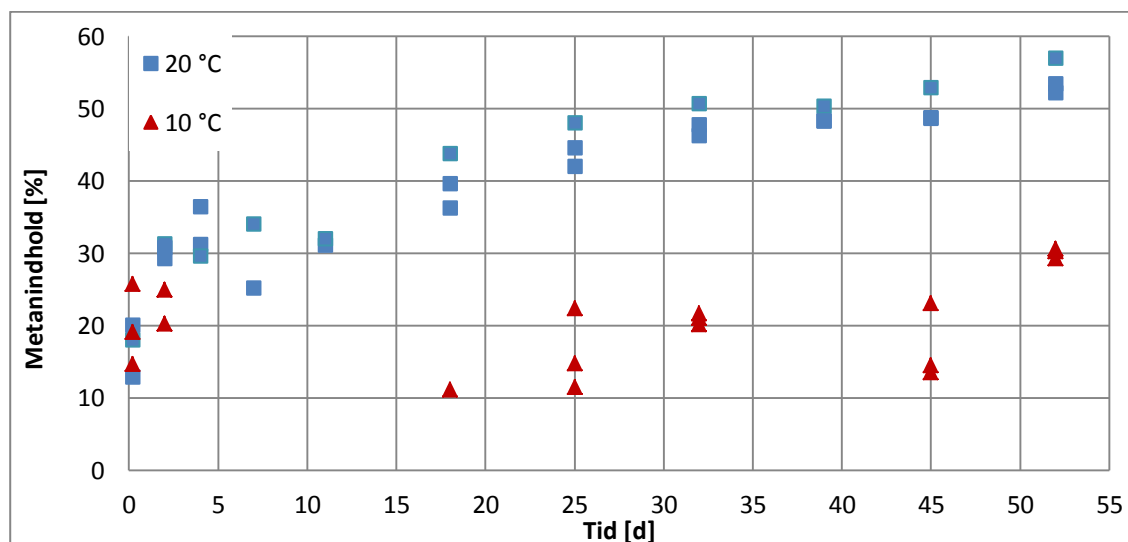
Af Tabel 4.13 fremgår tendenslinier og tilhørende regressionskoefficient for den akkumulerede metanmængde ved henholdsvis 10 °C og 20 °C.

Tabel 4.13 Tendenslinjer for akkumuleret metanudvikling ved 10 °C og 20 °C.		
Temperatur [°C]	Tendenslinje $y=ax+b$	R ² -værdi
10	0,5+7	0,95
	0,4+2,3	0,91
	0,2+0,7	0,89
20	1,9+5	0,98
	1,6+6	1,00
	1,6+2,8	0,99

Hældningen for tendenslinjen angiver teoretisk, hvor meget metan der dannes pr. døgn ved den givne temperatur. Skæringen med y-aksen angiver, hvor meget metan der teoretisk var opløst i slammet ved indsamling fra renseanlægget. Med ligningen for tendenslinjen blev beregnet hvor meget metan der årligt afgives fra en slamlagertank. Beregningerne er baseret på en opholdstid på 3 døgn i slamlagertanken og en tilførsel på 60 m³/d svarende til døgnudtaget fra rådnetanken på Stegholt renseanlæg.

Ved 10 °C produceres mellem 25-65 m³ CH₄/år og ved 20 °C produceres mellem 210-250 m³ CH₄/år i forbindelse med efterudrådningen. Q10 angiver ændringen i aktiviteten ved en temperaturforøgelse på 10 °C. Denne er beregnet til 4,6 ud fra en gennemsnitsbetragtning af de to trippelbestemmelser.

Beregningen ved 10 °C giver det mest reelle billede af metanafgivelsen over året, da temperaturen bedst repræsenterer den årlige middeltemperatur i Danmark. Den afgivne metanmængde er meget lille i forhold til den mængde metan der produceres i rådnetanken på Stegholt renseanlægget (~197.000 m³ CH₄/år). På Figur 4.9 ses metan-forholdet som funktion af tiden for de seks prøveflasker.



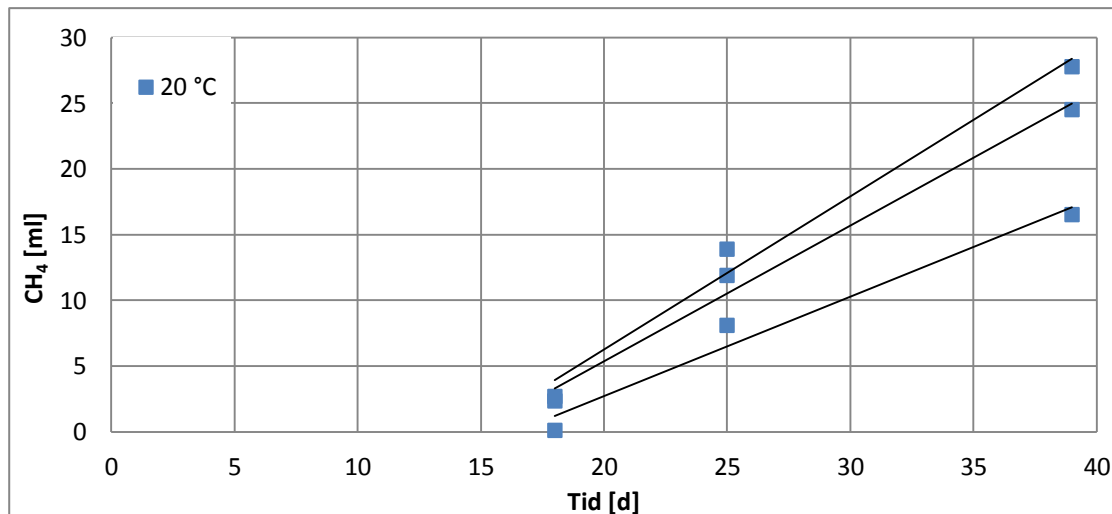
FIGUR 4.9: UDVIKLINGEN I METANINDHOLD I BIOGASSEN FRA STEGHOLT RENSEANLÆG VED 10 OG 20 °C OVER EN PERIODE PÅ 52 DØGN.

Metanindholdet i prøveflasker inkuberet ved 10 °C udviser ikke en tydelig tendens over forsøgsperioden. For prøveflaskerne inkuberet ved 20 °C, ses derimod et stigende metanindhold. Stigningen i metanindholdet ved 20 °C skyldes sandsynligvis en opformering af en ny metanogen bakteriekultur tilpasset det nye temperaturområde. Da de metanogene mikroorganismer er obligat

anaerobe, vil tilstedeværelse af ilt i starten af forsøgene sandsynligvis hæmme metanproduktionen. Det bemærkes, at metanindholdet efter 52 døgn ligger på 52-57 % altså ikke lang fra metanindholdet fra rådnetanksanlæg (62-65 %). Det forventes, at dette niveau opnås ved en længere opholdstid i prøveflaskerne.

4.6.3.2 Herning Renseanlæg

Gennem forsøgsperioden har det ikke været muligt at registrere afgivet metan fra prøveflaskerne inkuberet ved 10 °C. På Figur 4.10 ses den akkumulerede mængde afgivet metan i ml over en periode på 39 døgn samt tilhørende tendenslinjer.



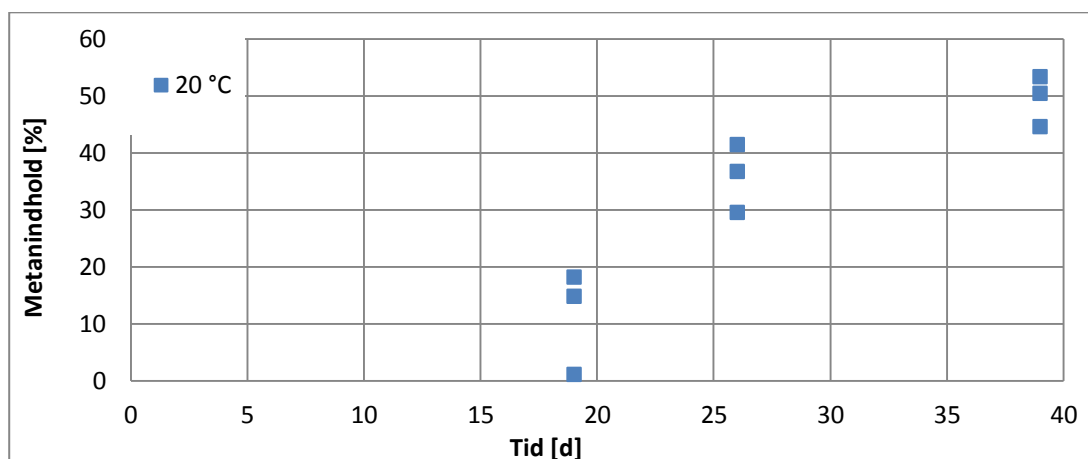
FIGUR 4.10: DEN AKKUMULEREDE MÆNGDE AFGIVET METAN FOR HERNING RENSEANLÆG VED 20 °C.

Af figuren ses, at der først blev registreret metan ved døgn 18. Det udgående slams glødetab fra Stegholt og Herning Renseanlæg har begge ligget på ca. 52 % af TS. Det formodes, at det organiske indhold i slammet fra Herning, der har gennemgået en termofil og efterfølgende mesofil udrådning inden udtag, er af en mere svært nedbrydelig karakter. Herved optræder der en forsinkelse i gasproduktionen.

Tabel 4.14 Tendenslinier for akkumuleret metanudvikling ved 20 °C og tilhørende regressionskoefficient		
Temperatur [°C]	Tendenslinie $y=ax+b$	R ² -værdi
20	1,2-17	0,98
	1,0-15	0,99
	0,8-12	0,97

På grund af en sen gasproduktion (fra døgn 18 ved 20 °C) og ingen produktion ved 10 °C er der ikke en metanemission fra en opbevaring inde slutbehandling, men kun emissionen svarende til metanfrigivelsen fra væskefasen forårsaget af ligevægtforskydningen.

På Figur 4.11 ses metanindholdet i biogassen fra Herning Renseanlæg som funktion af tiden. Stigningen i metanindholdet ved 20 °C skyldes sandsynligvis en opformering af en ny metanogen bakteriekultur tilpasset det nye temperaturområde. Den sene metanproduktion vurderes i dette tilfælde primært at skyldes en mere svært nedbrydelig organisk fraktion som output fra den seriekoblede udrådningskonstellation. Tilstedeværelsen af ilt i starten af forsøgene kan ligeledes hæmme metanproduktionen.



FIGUR 4.11: UDVIKLINGEN I METANINDHOLD I BIOGASSEN FRA HERNING RENSEANLÆG VED 20 °C OVER EN PERIODE PÅ 39 DØGN.

Det bemærkes, at metanindholdet efter 39 døgn ligger på 44-53 %, hvor metanindholdet fra rådnetanksanlæg typisk ligger på 62-65 %. Det forventes, at dette niveau opnås ved en længere opholdstid i prøveflaskerne.

4.6.3.3 Thisted Renseanlæg

Da analyseresultater for både tørstofs- og glødetabsprocent var ens i ind- og udgående slam fra rådnetanken samt at det udtagne slam havde en lysebrun farve, tyder det på en væsentlig kortslutningsstrøm i den udtagne slamprøve. Data er derfor ikke behandlet nærmere i rapporten, men der henvises til bilag 3, hvor data er behandlet.

4.6.4 Delkonklusion

Mængden af afgasset metan er teoretisk beregnet ud fra Henrys lov beskrivende gas-væskeligevægte indikerer, at emissionen er negligerbar i forhold til gasproduktionen i rådnetanken (0,1-0,2 % af den samlede produktion). Det er således ikke økonomisk rentabelt at etablere løsninger til opsamling af det strippede metan. Dette gælder uanset, om der er tale om mesofil eller termofil drift.

Der kan ligeledes ses helt bort fra emissioner fra en "kold" efterudrådning svarende til opbevaring af slam i få døgn i lagertank/homogeniseringstank inden slutbehandling. Efterudrådningen går næsten i stå ved 10 °C og ved 20 °C er efterudrådningen stadig så langsom, at det ikke er økonomisk rentabelt at etablere "kolde" efterudrådningstanke, da disse skal være meget store for at sikre den påkrævede høje opholdstid. Testudrådninger (efterudrådning af gylle fra biogasanlæg) ved lav temperatur viser, at metanudviklingen under danske klimatiske forhold, stort set går i stå når gyllen lagres ved omgivelsestemperatur [Rena Angelidaki et al, 2004].

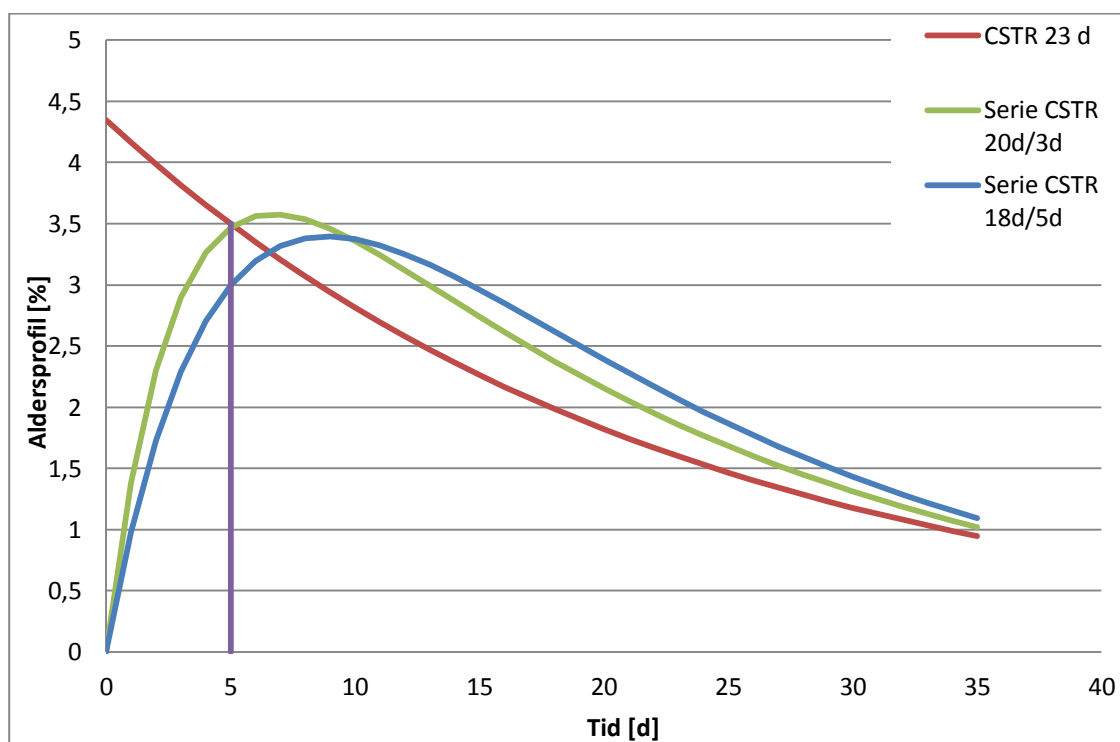
Der er i 2010 udledt ca. 1.200 kton CO₂-ækvivalenter fra affaldssektoren i Danmark [Nielsen et al. 2011]. Omregnes den gennemsnitlige metanafgivelse fra Stegholt, Herning og Thisted Renseanlæg ud fra den teoretiske gas-væskeligevægt til CO₂-ækvivalenter svarer den til ca. 10,5 tons CO₂/år for et gennemsnits rådnetanksanlæg i Danmark. Det miljømæssige aspekt er derfor heller ikke særlig interessant i forbindelse med metanafgivelsen fra det anaerobt stabiliserede spildevandsslam. Det konkluderes, at der var en betydelig forskel i efterudrådningen af slam fra Stegholt og Herning Renseanlæg.

Efter ca. 40 døgn og ved 20 °C er der produceret 23 og 71 ml CH₄ som gennemsnit af trippelbestemmelsen fra henholdsvis Herning og Stegholt Renseanlæg. Efterudrådningen af slammet fra Herning Renseanlæg udgør derved kun ca. 1/3 af den opnåede metanproduktion fra

Stegholt, der har undergået en termofil udrådning med 18-22 døgn opholdstid, hvilket anses for at være ca. 1,5 gange den påkrævede opholdstid.

4.7 Udrådning – seriekoblet rådnetanke

Udrådningssprocessen på Herning Renseanlæg foregår i to seriekoblede reaktorer (TPAD-system, Temperature Phased Anaerobic Digestion) med et termofilt 1. trin med en opholdstid på ca. 14 døgn og et mesofilt 2. trin også med ca. 14 døgn opholdstid. Idet glødetabet i det udrådnede slam begge lå på ca. 52-53 % vurderes den markant mindre efterudrådning fra Herning at kunne tilskrives fordelene ved seriel drift sammenlignet med almindelig total opblandet CSTR-reaktor (Complete Stirred Tank Reactor). Da omsætning af partikulært materiale kun afhænger af tiden, er det derfor relevant at beskrive de forskellige aldersprofiler i forskellige rådnetankskoncepter. Aldersprofilen beskriver hvor mange procent af det tilførte slam, der har en bestemt opholdstid inde i rådnetanken. Der er stor forskel i aldersprofilen mellem en almindelig CSTR-drift og en seriel CSTR-drift, jf. Figur 4.12



FIGUR 4.12: SAMMENLIGNING AF FORSKELLIGE ALDERSPROFILER VED CSTR OG SERIEL-CSTR – SAMLET OPHOLDSTID PÅ 23 D SVARENDE TIL MESOFIL DRIFT.

Ved seriel drift er andelen af partikler med meget kort opholdstid mindre end ved drift af en enkelt rådnetank. Med én tank er der ca. 23 % af slammet med en opholdstid på under 5 døgn, hvor der i et serielt system med en opholdstid i tank 2 på henholdsvis 3 og 5 døgn er 13 % og 11 % af slammet med en opholdstid på under 5 døgn. (Dette beregnes som arealet under kurven til venstre for den lilla linje). Dette bliver endnu mere udpræget i et termofilt system med kortere opholdstid (15 døgn). Her er der med en tank ca. 34 % af slammet med en opholdstid på under 5 døgn, hvor der i et serielt system med en opholdstid i tank 2 på henholdsvis 3 og 5 døgn er 21 % og 18 % af slammet med en opholdstid på under 5 døgn. Den samlede opholdstid i det serielle system er 15 døgn. Modelleres tabsprofilen af fede syrer vurderes dette at være 5-10 procentpoint højere ved drift af en tank sammenholdt med 2 serielle tanke, hvor de to sammenlignede systemers totale volumen er identiske, jf. Bilag 4.

På grund af den tidsforsinkelse der er i et serielt system, er dette design ligeledes bedre til at fange ubalancer i driften så som stødbelastninger i forhold til enkelttanksystemer. Dette vil betyde et endnu større periodisk tab ved drift med en tank end de 5-10 procentpoint. Optimal seriel drift opnås bedst ved opholdstider der kun lige er høje nok til at give en stabil gasproduktion koblet med en efterfølgende mindre tank 10-20 % af det samlede volumen.

4.8 Forbedret udrådning via termisk hydrolyse

Der findes flere metoder til forbehandling af biologisk overskudsslam inden udrådning. For at forbedre hydrolysegraden og derved omsætningen af det biologiske overskudsslam kan slammet udsættes for forskellige forbehandlingsmetoder som f.eks.

- termisk hydrolyse
- ultralydsbehandling
- trykbehandling
- tilsætning af enzymer

Der er 4 af de undersøgte renselanlæg med rådnetanksdrift i Danmark, hvor der er installeret forbehandling af det biologiske slam med ultralyd eller tryk. Der er i øjeblikket ikke tilstrækkelig dokumentation for disse teknologiers effekt. Typisk garanteres et forbedret gaspotentiale på op til 20 %.

Af de 23 undersøgte renselanlæg med rådnetank er der ingen med tilsætning af enzymer og dermed ingen erfaringer med dette.

Der er to af de undersøgte renselanlæg med rådnetanksdrift i Danmark, der har termisk hydrolyse i form af et CAMBI-anlæg. Her behandles slammet ved højt tryk (6-8 bar) og temperatur (140-160 °C) inden den anaerobe udrådning. På begge anlæg er der opnået en tørstofreduktion på ca. 50 %.

I de seneste år er der kommet nogle nye termiske hydrolyseprocesser, hvor hydrolyseprocessen er mellem to rådnetanke. Slammet behandles først i en rådnetank, hvor ca. 30 % af tørstoffet omdannes. Omsætningen i dette trin er primært den mere lettilgængelige organiske fraktion. Herefter afvandes det udrådnede slam for at reducere mængden af slam, der skal behandles i hydrolyseanlægget. Hydrolyseprocessen foregår fra omkring 70 -160 °C afhængigt af hvilket system der vælges, idet der er flere varianter på markedet. I dette trin hydrolyseres den tilbageblevne svært omsættelige fraktion. I en efterfølgende varmeveksling genindvindes energi, der blandt andet benyttes til forvarmning af slam og opvarmning af rådnetanke. Ved hjælp af veksling afkøles slammet herved til den nødvendige temperatur for at opretholde den ønskede procestemperatur i den anden rådnetank. Der kræves derved ikke nogen yderligere opvarmning af den anden rådnetank. Det endelige slamprodukt er hygiejniseret. Energieffektiviteten er forbedret i forhold til de traditionelle termiske hydrolyseprocesser, men investeringsomkostninger og drift vurderes stadig at være meget høj i forhold til det ekstra gaspotentiale, der opnås. EnviDan har på baggrund heraf valgt at afgrænse dette udviklingsprojekt til ikke at omfatte termisk hydrolyseprocesser.

Referencer

BITTON, G., 2011. Wastewater Microbiology. 4. ed. ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Blackwell ISBN 9780470630334.

Buffière P. et al. 2013. Kinetics of primary sludge digestion at various temperatures. Proceedings of 13 th World Congress on Anaerobic Digestion – International Water Association. SUEZ Environment, CIRSEE, France.

Dean, 1992. Lange's Handbook of Chemistry, McGraw-Hill, Inc., 1992.

HANSEN, T.L., SOMMER, S.G., GABRIEL, S. and CHRISTENSEN, T.H., 2006. Methane Production during Storage Of Anaerobically Digested Municipal Organic Waste, vol. 35, no. J. Environ. Qual., pp. 830-836 DOI 10.2134/jeq2005.0239.

HARRISON, R.G., 2003. Bioseparations Science and Engineering. New York, N.Y.: Oxford University Press ISBN 9780195123401.

Hejnfelt, A. og Angelidaki, I. 2009. Anaerobic digestion of slaughterhouse by-products. Biomass and Bioenergy (33); page 1046-1054.

Kabouris, C. John et al., 2009. Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Digestion of Municipal Sludge and Fat, Oil, and Grease. Water Environment Research, May 2009; 81,5; ProQuest Science Journals page 476- 485.

Lide and Frederikse, 1995. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 76th Edition, D. R. Lide and H. P. R. Frederikse, ed(s)., CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, 1995.

Luostarinen, S. et al, 2009. Increased biogas production at Wastewater Treatment Plants through co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a met processing plant. Bioresource Technology 100 (2009) page 79-85.

NIELSEN, O., et al., 2011. Projection of Greenhouse Gas Emissions 2010 to 2030. NERI Technical Report no. 841. National Environmental Research Institute Aarhus University - Denmark, September 2011 ISBN 978-87-7073-251-2.

Ogbonna E. et al. (2013) Answering the Case for Optimum Mesophilic Reaction Temperature. Poster from proceedings of 13 th World Congress on Anaerobic Digestion – International Water Association. University of Hertfordshire, College Lane, Hatfield, Hertfordshire, UK.

Rena Angelidaki et al, 2004. Kortlægning og dokumentation af procesforhold på danske biogasanlæg, Miljø & Ressourcer DTU, under Energistyrelsens udviklingsprogram for vedvarende energi.

SANDER, R., 1999. Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry. Version 3 ed. Germany: Air Chemistry Department Max-Planck Institute of Chemistry.

Wilhelm, Battino, et al., 1977. Wilhelm, E.; Battino, R.; Wilcock, R.J., Low-pressure solubility of gases in liquid water, Chem. Rev., 1977, 77, 219-262.

Bilag 1a: Bioprocess Control – Udrådning af fedt



Bilag 1b: Westcome – Udrådning af fedt



Bilag 2a: Traditionel rådnetank - Oversigt



Bilag 2b: Rådnetank med recirkulation - Oversigt



Bilag 3a: Rapport - Afgivelse af metan fra anaerobt stabiliseret slam



Bilag 3b: Bilag - Afgivelse af metan fra anaerobt stabiliseret slam

Bilag 4: Notat - Aldersprofil i forskellige rådnetankskoncepter



Intelligent udnyttelse af kulstof og energi på renseanlæg

Del 2 – Optimeret rådnetanksdrift



Miljøministeriet
Naturstyrelsen

Haraldsgade 53
DK - 2100 København Ø
Tlf.: (+45) 72 54 30 00

www.nst.dk