Optimal udnyttelse af varmeenergi fra spildevand

FORSKNINGS- OG UDREDNINGSPROJEKT NR. 18

Vandhuset • Godthåbsvej 83 • 8660 Skanderborg • Tlf.nr.: 7021 0055
• Fax: 7021 0056
danva@danva.dk • www.danva.dk

DANVA
Dansk Vand- og Spildevandsforening

ISBN: 978-87-92651-02-0

Titel: F&U rapport r. 18, Optimal udnyttelse af varmeenergi fra spildevand

Udgiver: DANVA
Vandhuset
Danmarksvej 26
8660 Skanderborg

Udarbejdet af:

Niels Bent Johansen, Københavns Energi A/S
Catarina Marcus Møller, Københavns Energi A/S
Carsten Thirsing, Lynettefællesskabet I/S
Kim Rindel, Lynettefællesskabet I/S
Dines Thornberg, Udviklingssamarbejdet
Peter Brøndum, Carsten Steffensen, Sebastian Kristoffersen, Nils Bitsch, Kaare Hvid Hansen, Christian Schou, Mads Klarskov, Grontmij | Carlbro a/s

Finansiering:
Vejledningen er finansieret af
DANVA

Januar 2011

Feasibility study

”Optimal udnyttelse af varmeenergi fra spildevand”

August 2010

Grontmij | Carl Bro A/S
Granskoven 8
2600 Glostrup
Tlf.: 4348 6060
www.grontmij-carlbro.dk

FORORD

I 2009 bevilgede DANVA et feasibility study af genanvendelse af den termiske energi i renset spildevand. Målet med projektet er at undersøge muligheden for at opsamle den termiske energi i renset spildevand og efterfølgende nyttiggøre denne. Feasibility study gennemføres i samarbejde mellem Udviklingssamarbejdet[1] og Grontmij | Carl Bro a/s.

Formålet med feasibility study er at give beslutningstagere et grundlag for den optimale beslutning i forskellige situationer:

- Ved underdimensioneret biologisk kapacitet for at opnå tilstrækkelig rensekvalitet i de måneder af året, hvor temperaturen af tilløbet er lavere end 12 °C. Denne situation kan f.eks. opstå ved sammenlægning af mindre renseanlæg eller byudvikling uden samtidig udvidelse af rensningskapaciteten.
- Optimere udrådningen af slam. Øge biogasudbyttet af nuværende udrådning og kapaciteten af eksisterende installation.
- Fortørre slammet fra de renseanlæg, der ikke har egen forbrænding inden transport til egnet slamforbrænding.

Projektets delmål er:

- At opstille energibalancer for den konventionelle spildevandsrensning og derved undersøge potentiale for optimal energiudnyttelse fra spildevand
- Afdække det praktiske potentiale for energiopsamling fra varmeenergi fra spildevandet og efterfølgende bedst mulig anvendelse
- Fastlægge designkriterier for et demonstrationsanlæg for:
    - Storskala rensningsanlæg med over 200.000 PE årligt
    - Mellemskala rensningsanlæg fra 30.000 til 70.000 PE årligt

Projektet indeholder ikke fremstilling af fysiske prototyper.

[1] Udviklingssamarbejdet er et samarbejde imellem Lynettefællesskabet I/S og Spildevandscenter Avedøre og Københavns Energi.

Indhold

1	**Sammenfatning og nøgletal**	**5**
1.1	Faseopdelt projekt	8
2	**Kortlægning og opsamling af energi**	**10**
2.1	Varmepumper	11
2.2	Opsamling af energi – anbefalet type udstyr	12
3	**Nyttiggørelse af energien**	**13**
3.1	Introduktion	13
3.1.1	Energikvalitet	13
3.1.2	Nyttiggørelsesmuligheder	14
3.2	Salg af fjernvarme	14
3.2.1	Baggrund for scenariet	14
3.2.2	Opsamling af energi	14
3.2.3	Nyttiggørelse	15
3.2.4	Forretningsøkonomi	16
3.2.5	Klimagevinst	16
3.2.6	Udfordringer	17
3.3	Opvarmning af tilgående spildevand	17
3.3.1	Baggrund for scenariet	17
3.3.2	Opsamling af energi	18
3.3.3	Forretningsøkonomi	18
3.3.4	Klimagevinst	18
3.3.5	Udfordringer	18
3.4	Forvarmning af slam inden forbrænding	19
3.4.1	Baggrund for scenariet	19
3.4.2	Opsamling af energi	19
3.4.3	Nyttiggørelse	19
3.4.4	Forretningsøkonomi	19
3.4.5	Klimagevinst	20
3.4.6	Udfordringer	20
3.5	Salg af biogas Rensningsanlæg Lynetten	20
3.5.1	Baggrund for scenariet	20
3.5.2	Opsamling af energi	20
3.5.3	Nyttiggørelse	21
3.5.4	Forretningsøkonomi	21
3.5.5	Klimagevinst	22
3.5.6	Udfordringer	22
3.6	Tørring af slam RD	22
3.6.1	Baggrund for scenariet	22
3.6.2	Opsamling af energi	23

3.6.3	Nyttiggørelse	23
3.6.4	Forretningsøkonomi	23
3.6.5	Klimagevinst	23
3.6.6	Udfordringer	24
3.7	Salg af biogas Spildevandscenter Avedøre	24
3.7.1	Baggrund for scenariet	24
3.7.2	Opsamling af energi	24
3.7.3	Nyttiggørelse	24
3.7.4	Forretningsøkonomi	25
3.7.5	Klimagevinst	25
3.7.6	Udfordringer	25
4	**Interessenter**	**27**
5	**Udfordringer**	**29**
6	**Demonstrationsanlæg**	**30**
6.1	Placering	30
6.2	Designkriterier for opsamling af energi	30
6.3	Aktiviteter og tidsplan	30
7	**Referencer**	**33**
8	**Bilag 1**	**34**
8.1	Rapport	34
8.1.1	Sammenfatning	34
8.1.2	Intern udnyttelse af varmepumpeenergi	37
8.1.3	Referencer	57
9	**Bilag 2**	**60**
9.1	Memo	60
9.1.1	Indledning	60
9.1.2	Kort indføring i varmepumpeprincip	60
9.1.3	Potentielle nyttiggørelsesformer af renset spildevand til fjernvarme	64
9.1.4	Konklusion	67
9.1.5	Referencer	67

1 Sammenfatning og nøgletal

Nærværende Feasibility Study sammenfatter iagttagelser og konkusioner, der er opstået undervejs i projektet.

De involverede rensningsanlæg i Udviklingssamarbejdet råder over en samlet rensningskapacitet på i alt 1.360.000 personækvivalenter.
Spildevandet indeholder store mængder biokemisk og termisk energi. I det traditionelle renseanlæg bliver den biokemiske energi opsamlet i form for produktion af biogas, mens der samtidig bliver anvendt store mængder energi til at rense spildevandet.
Med afsæt i eksisterende viden for rensningsanlæggene i Lynettefællesskabet I/S og Spildevandscenter Avedøre beskrives og formidles, hvorledes spildevandets samlede varmeindhold kan udnyttes gennem forskellige scenarier.

Feasibility study har afdækket en række nøgletal som kan bruges i efterfølgende faser inden fuldskalaimplementering. Nøgletallene afdækker en kombination af tekniske aspekter og økonomiske aspekter.
Energikortlægningen viser, at der er et betydeligt termisk energipotentiale i det rensende spildevand. Erfaringer viser, at det er muligt at udnytte energimængden i det rensede spildevand svarende til en temperatursænkning på 6 °C af vandet i udløbet.

Ved en gennemstrømning på 40 l/sek. kan der opnås en effekt på 1 MW. Dette svarer til en årlig hydraulisk kapacitet på 1.260.000 m^3 vand igennem et rensningsanlæg.
Ved en lavere temperatursænkning skal der en større vandgennemstrømning til for at opnå den tilsvarende effekt.

Den samlede potentielle termiske energi i de tre rensningsanlæg, Rensningsanlæg Lynetten, Rensningsanlæg Damhusåen og Spildevandscenter Avedøre, svarer til en effekt på 113 MW eller 1.000 GWh/år.
Dette svarer til 3,6 PJ/år eller til varmebehovet i ca. 55.000[2] gennemsnitsparcelhuse.
Denne energimængde er ca. 4 gange større end den samlede biokemiske energi i den tilsvarende mængde spildevand.
Ved korrekt anvendelse af den termiske energi fra det rensede spildevand vil det være muligt at opnå, at rensningsanlæg kan blive nettoenergiproducerende enheder. Den endelige størrelse af nettoenergiproduktionen afhænger af nyttiggørelsesformen. Den præcise fastlæggelse således en yderligere bearbejdning for at kunne kvantificeres.

Energien opsamles gennem varmevekslere i en varmepumpekreds. Herved fordamper transmissionsmediet, R717, ammoniak. Med særlige kompressorer vil det være muligt at komprimere transmissionsmediet til et så højt tryk, at det kan kondensere ved ca. 105 °C. Energien ved den høje temperatur bruges til at opvarme vand til forskellig nyttiggørelse, uddybet i afsnit 1.1.

[2] Forbrug i gennemsnitshusstand til varme og opvarmning af varmt vand udgør 18.000 kWh årligt. www.Energitjenesten.dk

Alle nyttiggørelsesscenarierne baserer sig på eldreven varmepumpe drevet med "grøn strøm", og at den termiske energi opsamles fra det rensede spildevand.

Dvs. det er teknisk muligt at opgradere spildvarme fra den rensede vand på rensningsanlæggene til varmt vand med en temperatur op til ca. 90°C. Beregninger viser at med den nuværende afgiftsstruktur er det ikke rentabelt at opgradere spildvarme fra rensningsanlæggene til fjernvarme. Hvis det skal være rentabelt eksempelvis varmeafgiften sænkes eller fjernes helt for fjernvarme produceret fra CO_2 neutrale kilder.

Omkostningerne ved varmepumpeløsninger, ref. 5, erfares at være ca. 5 mio DKK pr nyttiggjort MW når den opsamlede energi nyttiggøres via fjernvarmeforsyningen. Nyere litteratur, ref. 2, angiver et budgetmæssigt nøgletal for varmepumpeløsninger på ca. 3,5 mio DKK/MW nyttiggjort.

Udover muligheden for at sælge den opsamlede varme fra renseanlæggene til fjernvarme er der også set på muligheden for at anvende varmen på renseanlægget og derved frigøre en mere højværdig energiform (eks. biogas eller vand over 100°C fra slamforbrænding). Hvilke muligheder der kunne være interessante for det enkelte renseanlæg afhænger i høj grad af hvilke udfordringer man aktuelt står over for på det pågældende anlæg. Nedenstående tabel sammenfatter de muligheder der er behandlet i under dette projekt.

Udfordring	**Løsning**	**Kommentar**
Der mangler kapacitet et eller flere steder i renseanlæggets biologiske system Kapacitetsmangel overstiger ikke 15%	Anvende en varmepumpe til at opvarme det indgående spildevand med overskudsvarmen fra det rensede spildevand.	Det afhænger meget af de lokale forhold om denne løsning er økonomisk attraktiv. Bla. omkring pladsforhold, strømpris etc.
Rådnetankene mangler kapacitet til at udrådne hele slammængden (primær og sekundær slam) fra rensningsanlægget	Ved hjælp af opsamlet varme ændres rådnetankenes drift fra ca. 37°C til 55°C og der opnås en kapacitetsøgning på minimum 30%.	Om det er økonomisk interessant at anvende varmepumper til opvarmning af rådnetankene afhænger af om biogassen forbruges internt eller eksternt og hvis den forbruges internt om det kan betale sig at sælge overskudsvarmen som fjernvarme
Mulighed for at afsætte biogas til tredje part	Dvs. biogassen anvendes ikke i biogasmotor eller kedel på anlægget. Dette vil ofte betyde at der mangler en opvarmningskilde. Opvarmningen kunne skaffes fra en varmepumpe.	Dette mulighed er interessant hvis, det biogas eksempelvist ønskes anvendt som drivmiddel eller i bygasnet. Ser ud til at være en attraktiv økonomisk løsning, men må afvente udmøntning af Grøn vækst.

Udfordring	Løsning	Kommentar
Ønske om at øge biogasudbytte fra rensningsslammet og samtidigt opnå bedre driftsresultat	Indføre en lavtemperaturshydrolyse, hvilket formentligt øger biogasudbyttet med i størrelsesordenen 20%	Om det er økonomisk interessant at anvende varmepumper til opvarmning af rådnetankene afhænger af om biogassen forbruges internt eller eksternt og hvis den forbruges internt om det kan betale sig at sælge overskudsvarmen som fjernvarme Umiddelbart ser det ud til at en lavtemperaturshydrolyse er økonomisk fordelagtig, men det er kun en ud af flere muligheder
Lettere og billigere håndtering af slam der bortskaffes eksternt	Vakuumtørring af slam på renseanlæg, hvor tørringsvarme genereres via varmepumpe. Vægt af slam kan reduceres fra 300 – 500% afhængigt af tørstof efter koncentrering.	Umiddelbart ser det ud til, at der vil være et positivt driftsbidrag afhængig af transportveje og bortskaffelsesomkostninger. Investeringen skal dog kun overvejes i forbindelse med nybygninger eller større ombygninger da tilbagebetalingstiden for anlægget vil overstige 20 år hvis investeringen betragtes isoleret.
Bedre udnyttelse af varmeenergi fra slamforbrænding	Anvende lavværdig varme til opvarmning af slam inden det skal forbrændes. Eksempelvis ved varme genereret fra varmepumper.	Umiddelbart ser det ud til, at der vil være et positivt driftsbidrag afhængig af transportveje og bortskaffelsesomkostninger. Investeringen skal dog kun overvejes i forbindelse med nybygninger eller større ombygninger da tilbagebetalingstiden for anlægget vil overstige 20 år hvis investeringen betragtes isoleret.

Biogassen repræsenterer en høj lødighed i energi og dermed en høj værdi.
Derfor er den forretningsøkonomisk mest optimale anvendelse af varmeenergien, at optimere biogasproduktionen[3] fra rensningsanlæggenes slamudrådning. Ved en kombination af lavtemperatur hydrolyse efterfulgt af termofil udrådning er det sandsynliggjort, at biogasudbyttet kan øges med ca. 25 – 33 % for de tre rensningsanlæg studiet omhandler.

I en bredere kontekst repræsenterende alle rensningsanlæg i Danmark vurderes det, at biogasudbyttet fra slamudrådning kan forøges med fra 15 – 45 % ved ovennævnte procesindretning.

For de tre omhandlende rensningsanlæg i feasibility study kan følgende nøgletal illustreres for forøgelsen af biomethan udbyttet:

Sted	Nuværende produktion af biomethan[4]	Fremtidig produktion af biomethan
Renseanlæg Lynetten	4 m^3 biomethan/PE	5,3 m^3 biomethan/PE
Renseanlæg Damhusåen	4,5 m^3 biomethan/PE	
Spildevandscenter Avedøre	7 m^3 biomethan/PE	9 m^3 biomethan/PE

Den samlede energianvendelse der skal bruges til optimering af rensningsanlæggets egne udrådningsprocesser eller tørring, udgør en lille mængde af det samlede potentiale, svarende til ca. 1 – 5 % af den samlede disponible termiske energimængde.

1.1 Faseopdelt projekt

Feasibility study er opdelt i fire primære faser:

1. Interessentanalyse
2. Kortlægning af energistrømme og opsamling af energi, dvs.:
    a. Termisk energi
    b. Biokemisk energi

[3] Der indgår 21,6 kg BOD / PE / år.

[4] Der antages at der er ca. 60 % biomethan i hver m^3 biogas

3. Nyttiggørelse og overførsel til nyttiggørelsesstederne i form af:

    a. Salg af energi
        i. Fjernvarme
        ii. Biogas

    b. Anvende energien i egne processer
        i. Reducere udledningsafgifter for N & P ved at hæve indløbstemperaturen til den biologiske rensning i de kolde måneder.
        ii. Øge slamudrådningskapaciteten ved at ændre til termofil udrådning vs mesofil udrådning, evt. suppleret med forudgående hydrolyse
        iii. Reducere antallet af transporter af våd slam ved at fortørre slammet. Dette gælder specifikt for de renseanlæg der ikke har egen slamudrådning

4. Designkriterier for Pilotanlæg / Demonstrationsanlæg.
   Projektet har ikke haft til formål at fremstille prototyper

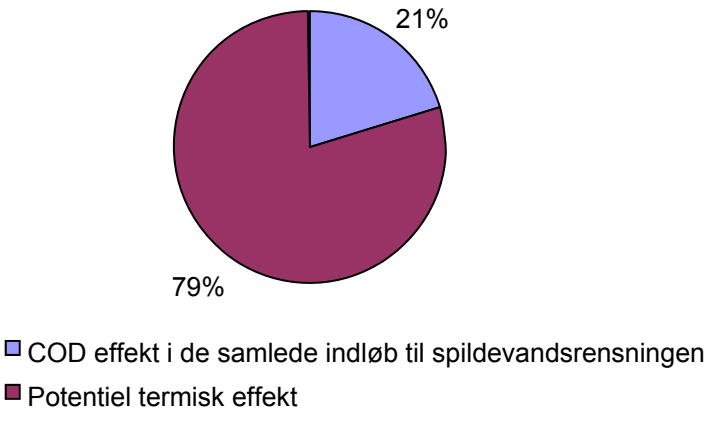
2 Kortlægning og opsamling af energi

Fra varmepumpeanlæg i Helsingborg og i Frederikshavn, der ligeledes har til formål at opsamle termisk energi fra renset spildevand er det erfaret, at det er muligt at uddrage en energimængde af det rensede spildevand svarende til en temperatursænkning på 5 – 6 °C.

Denne temperatursænkning betyder, at det er muligt at opnå en effekt på 1 MW ved et gennemstrømningsvolumen på 40 l/sek. Dette svarer til en årlig hydraulisk kapacitet på 1.260.000 m^3 vand igennem et rensningsanlæg.
Den samlede afløbsmængde fra Renseanlæg Lynetten, Renseanlæg Damhusåen og Spildevandscenter Avedøre er rapporteret til 142.000.000 m^3 i 2008, ref. 6 & 7.

Under forudsætninger af, at det vil være muligt at udnytte energien svarende til en temperatursænkning på 5 – 6 °C, kan den potentielle termiske energi af den samlede afløbsmængde, beregnes til ca. 113 MW svarende til en samlet årlig energiproduktion på ca. 3,6 PJ eller ca. 1.000 GWh.
Ovennævnte størrelser forudsætter en fuldstændig tabsfri overførsel. Imidlertid må der forventes omsætningstab svarende til ca. 15 %. Hermed reduceres den teoretisk tilgængelige termiske energimængde til ca. 850 GWh / år. Dette er sammenligneligt med varmebehovet i ca. 55.000 husstande.

Den disponible termiske energi vil således være ca. fire gange større end den biologiske energi. Dette er afbildet i **Figur 1**.



Figur 1. Illustration af forholdet imellem den biologiske COD effekt og den termiske energi ved udnyttelse af en temperaturdifference på 6 °C.

For Lynettefællesskabet alene vil den årlige potentielle termiske energimængde kunne opgøres til ca. 650 GWh/år, eller 2,7 mio GJ/år. I sammenligning med dette, er der i dag en varmeproduktion, primært fra slamforbrændingen, på ca. 50 GWh/år. Der er således et potentiale i den termiske energi, der er ca. 13 gange større end den i dag nyttiggjorte energi fra deres slamforbrænding.

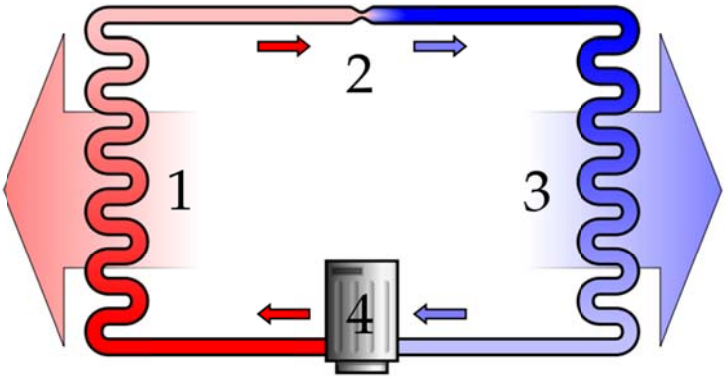
Da dataene er baseret på de faktisk registrerede spildevandsmængder indgår således også ekstra vandmængder opstået ved regnvandsaflastning.

Den disponible termiske energi vil være direkte proportional med den gennemstrømmede vandmængde. Opsamlingen af termisk energi vil således være uafhængig af rensningsanlæggets nominelle biologiske kapacitet og alene afhænge af den hydrauliske kapacitet.

Der vil imidlertid være behov for individuelle tilpasninger ved det specifikke rensningsanlæg, da udløbene oftest vil have forskellig detailudformning.

2.1 Varmepumper

En varmepumpe fungerer populært sagt som et omvendt køleskab der ved hjælp af en kredsproces og et egnet kølemiddel cirkulerer i et lukket system. Figur 2 viser en principskitse af en varmepumpe.



Figur 2. Principskitse af en varmepumpekreds. Med en COP på 4 betyder for hver 1 enhed tilført energi afgiver systemet 4 enheder. 1: Leverede varmeenergi ved ønsket temperaturniveau (Kondensator); 2: Ekspansionsventil (Trykreduktion); 3:Overskudsvarme med lavere temperaturniveau (Fordamper); 4: Drivenergi (Kompressor)

Varmepumpen optager varmeenergien fra et lavt temperaturniveau og omsætter denne varmeenergi til varmeenergi ved et højere temperaturniveau ved hjælp af drivenergi til kompressoren.

Afhængigt af temperaturniveauet på varmekilden og ønsket temperaturniveau på den leverede varmeenergi, vil mængden af den leverede varmeenergifaktor være 2,5 – 8 gange større end den tilførte drivenergi [1]. Denne faktor kaldes COP (Coefficient of performance).

Teknisk set kan varmekredsen vendes, således at varmepumpen leverer kølevand i eksempelvis sommerperioden. Denne mulighed afhænger af de lokale forhold og er ikke diskuteret videre i denne rapport da det ligger udenfor formålet i aktuelle feasibility study.

2.2 Opsamling af energi – anbefalet type udstyr

Til opsamling af den termiske energi anbefales det at der anvendes unikt tilpasset udstyr til svær industribrug.

De primære komponenter vil være:

- Shell / tube varmevekslere, hvor det rensende spildevand strømmer på ydersiden af rør
- Brug af ammoniak som naturligt drivmiddel, R717.
- Højtryksvarmevekslere i et eller to trin. De skal kunne levere output varmeenergi ved en temperatur på op til 105 °C.
- Der skal integreres rensningsfunktion i installationen, der er sammenlignelig med rensningsfunktion anvendt i proceskemiske anlæg. De såkaldte Cleaning In Process, CIP-anlæg.

3 Nyttiggørelse af energien

3.1 Introduktion

3.1.1 Energikvalitet

Energi er i termodynamikken et mål for evnen til at kunne udføre et arbejde.
Energi kan have forskellige former, såsom elektrisk, kemisk, mekanisk eller termisk (varme).
Nogle energiformer kan let omdannes til andre og er gode til at udføre (mekanisk) arbejde. Det gælder især elektrisk og kemisk energi. De har intuitivt en højere kvalitet i kraft af deres fleksibilitet.

Der vil ifølge termodynamikken altid spildes energi til varme, når der udføres et arbejde. Det gælder om at anvende den rigtige energiform på det rigtige sted. Man skal anvende energi med lav kvalitet, hvis det er muligt og dermed spilde mindst mulig energi af høj kvalitet (lav entropidannelse).

Svensk Vatten har i et stort energispareprojekt for den svenske VA-sektor (Se kilde 8) defineret energi-kvalitet ved exergi, som energi ganget med en kvalitetsfaktor. Exergi = Energi * kvalitetsfaktor.
Et forslag til kvantificering af kvaliteten er ifølge SV:

Energiform	Temp.	Kvalitetsfaktor (%)
El og biogas	-	100
Damp	(200°C)	~70
Fjernvarme	70-90 °C	~30
Spildvarme	15 °C	< 5

Som det ses heraf, er den udnytbare energi i spildvarme umiddelbart meget lav.
En energiform med lav exergi har ikke mulighed for at 'opgradere' til højere exergi alene. Det er f.eks. kun fordi en varmepumpe via høj-exergi-form (el) kan tilføre varmen fra afløbsvand mere exergi, at vi kan opgradere denne varme til lidt højere energilødighed.

Det fremgår af ovenstående, at hvis man kan erstatte noget strømforbrug eller gasforbrug på et renseanlæg med varmepumpevarme er der vundet noget i termodynamisk forstand (før de økonomiske vurderinger). Det er ud fra ovenstående, at de forskellige nyttiggørelsesmuligheder er identificeret.

3.1.2 Nyttiggørelsesmuligheder

Som beskrevet i afsnit 2.2 kan spildvarmen fra det rensede spildevand opgraderes til varmt vand på op til 105°C.

I første omgang er der set på muligheden for at afsætte hele denne energimængde eksternt i forbindelse med fjernvarme (afsnit 3.2).

Derudover er det undersøgt om der er muligheder for at afsætte dele af energimængden internt på et rensningsanlæg i forbindelse med kapacitetsøgning på renseanlægget (afsnit 3.3), forbedring af slamudrådningen (afsnit 3.5 og 3.7) eller forbedring af slamtørring/forbrænding (afsnit 3.4 og 3.6).

I både den eksterne og interne anvendelse af varmepumper er der flere andre muligheder at opnå et tilsvarende resultat. Denne rapport fokuserer på hvilke muligheder der er for varmepumper og ikke på en generel sammenligning af de forskellige muligheder.

3.2 Salg af fjernvarme

3.2.1 Baggrund for scenariet

I dette scenarium opsamles den termiske energi fra spildevandet med henblik på salg og nyttiggørelse direkte i fjernvarmenettet. Scenariet indgår som udgangspunktet i overvejelserne forud for det aktuelle feasibility study.

Det termiske potentiale fra de tre rensningsanlæg er tilsammen 113 MW svarende til det årlige varmebehov i ca. 55.000[5] gennemsnitsparcelhuse. Hertil skal adderes tilførte elektriske effekter, som også vil blive nyttiggjort i fjernvarmenettet.
Scenariet er uddybet i ref. 3.

3.2.2 Opsamling af energi

Den termiske energi opsamles i udløbet på rensningsanlægget. Anlægget der opsamler varme, skal specialdesignes til det enkelte rensningsanlæg, da udløbene kan være forskellige.

[5] Forbrug i gennemsnitshusstand til varme og opvarmning af varmt vand udgør 18.000 kWh årligt. www.Energitjenesten.dk

Den termiske energi afhænger alene af den gennemstrømmede mængde og vil kunne udgøre en stabil basisleverance. Det forudsættes, at der nyttiggøres en energimængde svarende til en temperatursænkning på 6 °C. Om sommeren svarer dette til at sænke temperaturen i udløbet fra ca. 20 °C til 14 °C. Om vinteren vil de tilsvarende temperaturer være ca. 9 °C til ca. 3 °C.

Opsamling af den fulde energimængde vil indebære et stort fysisk anlæg til varmepumperne. Den for tiden største kompressor, der kan levere det fornødne tryk til den ønskede høje temperatur har en effekt på ca. 2MW.
Den samlede nyttiggjorte effekt af en varmepumpekreds med kompressoreffekt på 2 MW vil da være ca. 8 MW forudsat en COP på 4. Det betyder, at dette anlæg vil kunne uddrage en effekt på 6 MW fra det rensede spildevand.

3.2.3 Nyttiggørelse

Afhængig af forsyningsselskab er der forskellige nyttiggørelsestemperaturer for fremløbet i fjernvarmen. Københavns Energi specificerer en fremløbstemperatur om sommeren på 75 – 80 °C og 90 – 95 °C om vinteren. Andre forsyningsselskaber specificerer en fremløbstemperatur på ca. 70 – 75 °C året igennem.

Ovennævnte temperaturangivelser betyder, at der skal bruges mere energi om vinteren til at opnå den ønskede højere fremløbstemperatur i forhold til om sommeren.
Om vinteren skal energien tages fra et udgangspunkt på ca. 9 °C og omvarmes til ca. 90 °C. Det betyder, at varmetransmissionsmediet, R717, skal komprimeres til et højere tryk i sammenligning med om sommeren.

Konsekvensen er, at der om vinteren skal tilføres elektrisk energi til kompressoren svarende til ca. 50 % af den termiske energi i spildevandet. Dette svarer til en COP på 3. Om sommeren skal der tilsvarende tilføres en elektrisk energi på 33 % af den termiske energi i spildevandet, svarende til en COP på 4.

Hovedtallene for energiydelsen eksemplificeret på Rensningsanlæg Lynetten er:

Vinter (oktober – april)

Termisk energi i spildevand	58 MW
Tilført elektrisk energi til kompressor	27 MW
I alt leveret energi til fjernvarme	85 MW

Sommer (maj – september)

Termisk energi i spildevand	58 MW
Tilført elektrisk energi til kompressor	19 MW
I alt leveret energi til fjernvarme	77 MW

3.2.4 Forretningsøkonomi

Over et år vil varmepumpens virkningsgrad gennemsnitlig være 3,5. Det er denne værdi, der ligger til grund for den forretningsøkonomiske analyse.
De forretningsøkonomiske aspekter ved scenariet viser, at der er et betydeligt negativt årligt driftsbidrag på ca. -33 mio./kr. ved at fremstille fjernvarme direkte fra renset spildevand.

Der er ved analysen forudsat en afregningspris for leveret varme på 74 kr./GJ og en varmeafgift på 49 kr./GJ. Differencen på 25 kr./GJ skal dække investering, drift og vedligehold.

Resultatet opstår i kombination af de nuværende fastsatte afregningspriser på energi, afgifter på leveret varme og ikke mindst omkostninger til indkøb af elektricitet til drift af kompressoren.

Investeringen i udstyr til opsamling af energi og konvertering til fjernvarme er stor, proportion 200 mio/kr. Imidlertid vil ca. 95 % af investeringen kunne dækkes ved salg af tegningsretter til energibesparelse.

Hvis det skal balancere økonomisk, skal fremføringstemperaturen på fjernvarmen ikke overstige 70 °C, hvorved en forventet gennemsnitlig COP på 4,2 opnås.

3.2.5 Klimagevinst

Den potentielle termiske energi leveret som fjernvarme forudsættes at erstatte fjernvarme fremstillet på enten kul, naturgas eller affald fra de decentrale affaldsforbrændingsanlæg.

Den årlige klimagevinst afhænger af energikilden til den substituerede energi. Klimagevinsten kan for energimængden leveret fra Rensningsanlæg Lynetten opgøres til:

Klimagevinst for Rensningsanlæg Lynetten, 58 MW	*Årlig CO_2 reduktion*	*Ækvivalent årlig værdi af CO_2 kvoter forudsat en kvotepris på 100 kr/tons*
Reduktion af CO_2 emission ved substitution af naturgasbaseret fjernvarme	105.602 ton/år	10.560.185 kr/år
Reduktion af CO_2 emission ved substitution af kulbaseret fjernvarme	176.312 ton/år	17.631.240 kr/år

Klimagevinsten kan realiseres ud fra de CO_2 kvoter der frigøres ved, at der ikke afbrændes fossile brændstoffer, som derved frigør CO_2 kvoter som kan handles.

Klimagevinsten kan dog ikke realiseres fuldt ud, da fjernvarmesystemet i København modtager varmt vand fra affaldsforbrænding[6]. Dvs. erstattes fjernvarmen med spildvarme fra rensningsanlæggene opnås der i værste fald ingen klimagevinst. Derfor er klimagevinsten ikke medtaget i de forretningsøkonomiske overvejelser.

3.2.6 Udfordringer

Forretningsøkonomisk fordelagtig fremstilling af fjernvarme fra renset spildevand udfordres for tiden af:

- Fastsætning af afregningspriser for energi
- Fastlæggelse af afgifter for varmeenergi
- Afgifter på elektricitet

3.3 Opvarmning af tilgående spildevand

3.3.1 Baggrund for scenariet

Ved rensning af spildevand i årets kolde måneder vil den mikrobielle aktivitet være lavere end om sommeren. Dette kan føre til, at rensningsanlæg der i dag er på grænsen af deres kapacitet vil have besvær med at overholde kravværdierne af N og P i det rensede spildevand.

Ved at hæve minimumstemperaturen i den biologiske del af et renseanlæg fra 7 - 12°C, forøges den mikrobielle aktivitet med ca. 50%. Dette betyder generelt en væsentlig forøgelse af renseeffektiviteten, men den specifikke effekt på det enkelte renseanlæg afhænger af mange parametre, bla. af rensegraden

I den aktuelle feasibility study er scenariet regnet igennem for rensningsanlægget på Spildevandscenter Avedøre. Scenariet er uddybet i ref. 1.

[6] Oplyst af Københavns Energi A/S

3.3.2 Opsamling af energi

Energien opsamles, som beskrevet i afsnit 3.1.2. På Spildevandscenter Avedøre skal der tilføres en energimængde på 27 MW for at opvarme spildevandet fra 7 til 12°C. Denne energimængde kan leveres af en varmepumpe med en COP på 7,5 og en afgangstemperatur på ca. 45°C.

3.3.3 Forretningsøkonomi

På SCA[7] er rensegraden så høj, at en øgning i minimumstemperaturen kun vil have en meget begrænset effekt. Det betyder, at N, P og BOD niveauet formentlig kun ville kunne sænkes med op til 10% af vinterperioden. Konsekvensen er, at Spildevandscenter Avedøre forventes at kunne spare ca. 0,5 mio./kr./årligt i udledningsafgifter, Ref. 1 og Ref. 4.

Driftsudgifterne til elektricitet overstiger afgiftsreduktionen væsentligt. Da besparelsen er ringe i forhold til driftsudgifterne, er det ikke isoleret rentabelt at indføre forvarmning af spildevand på Spildevandscenter Avedøre.

På anlæg hvor der imidlertid mangler væsentlig kapacitet, vil effekten af en temperaturøgning i indløbet sandsynligvis være langt større. Løsningen vil da fordelagtigt kunne implementeres i sammenligning med udvidelser af rensningsanlæggets kapacitet.

3.3.4 Klimagevinst

Den specifikke klimagevinst er ikke angivet her, idet den skal ses i sammenligning med alternative måder at forbedre rensningseffektiviteten.

3.3.5 Udfordringer

Scenariets udfordringer er primært af teknisk karakter, idet det alene er en intern flytning af varme, som procesvarme.
Den primære tekniske udfordring forventes at være renholdelsen af varmeveksleren der overfører varme til spildevand, som ikke er biologisk renset.

[7] Spildevandscenter Avedøre

3.4 Forvarmning af slam inden forbrænding

3.4.1 Baggrund for scenariet

Det aktuelle scenarium relaterer sig til afbrænding af slam på Rensningsanlæg Lynetten, der forbrænder slammet fra Rensningsanlæg Damhusåen og Rensningsanlæg Lynetten. Slammet konditioneres inden det afbrændes, dvs. at slammet fortørres og forvarmes. Tørstofindholdet skal være ca. 35 %. Temperaturen af slammet stiger under fortørringen til ca. 85 °C. Slammet leveres efter udrådningen med et tørstofindhold på ca. 20 %.

Til tørringen benyttes i dag hedtvand fra forbrændingen på ca. 170 °C. Som følge af den høje temperatur af hedtvandet, har det en højere anvendelsesgrad til fjernvarme. Det er derfor interessant at se på muligheden for at benytte en varmekilde med en lavere vandtemperatur til at erstatte en del af hedtvandet, så det kan sælges som fjernvarme Scenariet er detaljeret beskrevet i ref. 1.

3.4.2 Opsamling af energi

Opsamling af energi er generelt beskrevet i afsnit 3.1.2. I det aktuelle scenarie skal der anvendes varmt vand ved en temperatur på 80°C til at gennemføre slamtørringen. Ved denne tilgang vil slammet opnå en temperatur på ca. 70°C inden det fødes ind i fortørreren.

Ved denne tilgang skal der anvendes ca. 2% af den disponible termiske energi i det rensede spildevand til opvarmning af slammet.

3.4.3 Nyttiggørelse

Ved at anvende varmeenergi fra det rensede spildevand til fortørring af slam, vil der årligt kunne nyttiggøres yderligere 5.150 MWh eller ca. 18.500 GJ som fjernvarme, svarende til en forøgelse på ca. 10 % af den nuværende leverede mængde.

3.4.4 Forretningsøkonomi

Med de nuværende afregningspriser på varme vil scenariet indebære et positivt driftsbidrag på ca 150.000 kr/år. Isoleret set kan det derfor ikke anbefales at installere slamtørring. Tilbagebetalingstiden er beregnet til at overstige 30 år.
Det anbefales imidlertid at indgå i overvejelserne ved større ændringer i / nyanlæg af slamforbrændingsanlæg.

3.4.5 Klimagevinst

Klimagevinsten afhænger af, hvilken energikilde den erstattede fjernvarme er fremstillet ud fra: Naturgas, kul eller affald.

3.4.6 Udfordringer

Der vil være tekniske udfordringer ved indsættelsen af det beskrevne system. Derfor anbefales det, at et demonstrationsforsøg igangsættes før en fuldskalaløsning implementeres.

3.5 Salg af biogas Rensningsanlæg Lynetten

3.5.1 Baggrund for scenariet

Ved slamudrådningen fremstilles der biogas. Den nuværende driftskapacitet hos Rensningsanlæg Lynetten er ikke tilstrækkelig. Det bevirker, at ikke alt deres slam omsættes i biogasreaktorerne. Dette scenarie belyser to ændringer på det eksisterende biogasanlæg:

1. Indsættelse af et hydrolysetrin
2. Ændring af udrådningstemperatur fra ca. 38° C til 55° C

Den biogas der produceres på Rensningsanlæg Lynetten afbrændes i dag i en kedel. Herfra produceres der varmt vand, som anvendes til opvarmning af de interne processer, eksempelvis biogasreaktorer samt til eksternt salg i form af fjernvarme.

Kølevandet fra kedlen er ideelt til anvendelse som fjernvarme, da det kommer ud med en høj temperatur, derfor afsættes al varme fra kedlen til fjernvarme. Varme til de interne processer kan så komme fra en varmepumpe. Hvis det interne varmebehov dækkes af en varmepumpe, kan biogassen ligeledes anvendes til erstatning for andre energi typer. Der kan produceres strøm, som kan anvendes til bygas eller som drivmiddel i transportformål.

Scenariet er uddybet i Ref. 1.

3.5.2 Opsamling af energi

Opsamling af energi er beskrevet i afsnit 3.1.2. Den fornødne temperatur til hydrolyse på 75 °C kan opnås ved en kombination mellem krydsvarmeveksling og energitilførsel. Der skal netto tilføres en effekt fra varmepumpekredsen på ca. 1800 kW ved 85° C.

Det betyder, at der skal anvendes ca. 3 % af den disponible termiske energi i det rensede spildevand (se afsnit 3.2).

Da emnet for denne rapport er anvendelsen af varmepumpe fokuseres på dette i den følgende beskrivelse selvom forfatterne er klar over at dette er er en blandt flere muligheder for at opvarme reaktorerne.

3.5.3 Nyttiggørelse

Den årlige produktion af biomethan vil stige 33 % til i alt 5.3 millioner m^3 biomethan. Denne biomethan kan så enten nyttiggøres via afbrænding i kedel, afbrænding i gasmotor, bygas eller drivmiddel til transportformål.

Ved at indføre hydrolyse efterfulgt af lavtemperatur termofil udrådning opnås det, at al slam kan udrådnes og den samlede mængde af slam til forbrænding mindskes.

3.5.4 Forretningsøkonomi

Den overordnede forretningsmæssige analyse viser, at der er et betydeligt positivt driftsbidrag ved at fremstille biogas. Driftsbidraget varierer med det præcise valg af udnyttelse. Dette er kort sammenstillet herunder:

Nyttiggørelsesform	Tilbagebetalingstid, år	Værdi af biogas ved anvendelse til formål
Afbrænding i kedel	3,7	10,3 mio. kr.
Afbrænding i gasmotor	2,4	20 mio. kr.
Salg som bygas	1,6	24 mio. kr.
Salg som drivmiddel til transportformål	0,8	41,5 mio. kr.

Med hensyn til anvendelsen til bygas og drivmiddel, så er der ved beregningerne forudsat nogle fremtidige priser. Dette afhænger af, hvilke tilskud der opnås enighed om i forbindelse med implementeringen af ”Grøn Vækst”.

Ovenstående beregninger bygger på forudsætninger om afgiftsmæssig sidestillelse af bygas og biogas og med ækvivalens med alternativomkostninger ved køb af dieselbrændstof til transportformål. Ovenstående indeholder alene den direkte ækvivalentværdi. Der er ikke indeholdt additionelle effekter, som f.eks. værdien af mindre CO_2 emission fra transportsektoren.

3.5.5 Klimagevinst

Klimaeffekten vil være en reduktion af CO_2 emissionen på ca. 12.000 – 14.000 tons / år afhængig af om biomethanen erstatter fossil naturgas eller fossil dieselolie.

3.5.6 Udfordringer

Scenariets udfordringer er en kombination af den politiske vilje til ”Grøn Vækst” og af teknisk karakter.

Afgiftsstrukturen for nyttiggjort biogas er ikke fastlagt endnu. Dog forventes det, at scenarierne hvor biogas nyttiggøres som bygas eller drivmiddel vil give mulighed for en betydelig større driftsindtægt.

Når der ændres fra mesofil til termofil drift i rådnetankene på et biogasanlæg, kan det forekomme, at slammets afvandingsegenskaber ændres. Det er derfor vigtigt, at justere flokkuleringen således, at der ikke overføres en høj koncentration af kolloider til spildevandet, som udledes direkte til recipienten.

Der er også en teknisk udfordring ved renholdelse af varmevekslere når spildevandsslam skal opvarmes til ca. 75 °C. Dette medfører ofte udfældninger på slamsiden, som medfører at effektiviteten af varmevekslingen forringes.

Som følge af at hvert rensningsanlæg er unikt, anbefales det, at der udføres pilotforsøg, hvor den nøjagtige udbyttestigning fastlægges inden en eventuel løsning detailprojekteres.

Alternativer til desintegration af slammet ved hydrolyse og disses effekt anbefales klarlagt inden endelig beslutning tages. Denne vurdering er imidlertid ikke indeholdt i det aktuelle feasibility study.

3.6 Tørring af slam RD

3.6.1 Baggrund for scenariet

Driftssituationen på Rensningsanlæg Damhusåen udgør grundlaget for dette scenarie. Rensningsanlæg Damhusåen har ikke egen slamforbrænding. Slammet transporteres derimod til Rensningsanlæg Lynetten, hvor det forbrændes.

Slammet fra Rensningsanlæg Damhusåen afvandes til et tørstofniveau på ca. 19%, hvorefter det transporteres med lastbil til Rensningsanlæg Lynetten.

På Rensningsanlæg Lynetten indgår slammet i den normale slamkonditionering inden det forbrændes.
Ved at fortørre slammet på Rensningsanlæg Damhusåen inden transport, er det hypotesen, at antallet af daglige slamtransporter kan reduceres.

Samtidig frigives der energi fra slamtørringen på Rensningsanlæg Lynetten til fjernvarme og andelen af støttefyring til slamforbrændingen på Rensningsanlæg Lynetten bliver mindre.

Scenariet er detaljeret beskrevet i Ref. 1.

3.6.2 Opsamling af energi

Opsamling af energi er beskrevet i afsnit 3.1.2. I det aktuelle scenarie skal der anvendes varme ved en temperatur på 75 °C.

3.6.3 Nyttiggørelse

I dette scenarium ses der på indsættelse af en vakuumtørrer, som fungerer ved, at den kan anvende vand ved en forholdsvis lav temperatur på ca. 75°C til tørringen.

Hvis en tørrer indsættes som beskrevet ovenfor, betyder det, at der skal anvendes 0,17 MW. Den mængde, der skal anvendes, udgør ca.1 % af den disponible termiske energi der er til rådighed i det rensede spildevand (Ref. 3).

3.6.4 Forretningsøkonomi

Den forretningsøkonomiske analyse viser, at der opnås et positivt driftsbidrag på ca. 150.000 kr./årligt ved at tørre slammet inden transport. Det største bidrag opnås i form af et mindre transportbehov.
Driftsindtægten vil imidlertid ikke kunne bære afskrivningen af investeringerne.
Det anbefales imidlertid at overveje løsningen ved større ombygninger / nybygninger af afvandingsudstyr eller ved kapacitetsbegrænsninger ved tørreudstyret i forbindelse med slamforbrændingen.

3.6.5 Klimagevinst

Det er ikke muligt at kvantificere, hvor meget støttefyringen med fossile brændstoffer mindskes i denne projektfase, men det vil give anledning til en besparelse og en klimagevinst. Derudover giver den mindre transport med slam ligeledes en klimagevinst på 40 tons CO_2 årligt.

3.6.6 Udfordringer

Det er overvejende sandsynligt, at der vil opstå udfordringer i forbindelse med driften af slamtørreren. Det anbefales, at der udføres et demonstrationsforsøg inden en eventuel fuldskalainstallation, da der så vidt vides ikke er installeret lignende løsninger på danske rensningsanlæg.

3.7 Salg af biogas Spildevandscenter Avedøre

3.7.1 Baggrund for scenariet

Den biogas der produceres på SCA afbrændes i dag i en gasmotor og producerer derfor både strøm og varme. Strømmen leveres til elnettet og det varme vand anvendes til opvarmning af rådnetanke og bygninger. Gasmotorer har et gennemsnitligt tab på ca. 40 – 50 % af den indfyrede energimængde.

Scenariet belyser derfor alternativer til den nuværende anvendelse af gassen hos Spildevandscenter Avedøre.

Scenariet er uddybet i Ref. 1

3.7.2 Opsamling af energi

Opsamling af energi er beskrevet i afsnit 3.1.2. Hvis biogasanlægget ændres som beskrevet ovenfor skal der anvendes en varmepumpekreds, der leverer en effekt på 1300 kW ved 85 °C. Der skal i det aktuelle scenarium anvendes ca. 4 % af den disponible termiske energi i det rensede spildevand (se Ref. 3).

Da emnet for denne rapport er anvendelsen af varmepumpe fokuseres på dette i den følgende beskrivelse selvom forfatterne er klar over at dette er er en blandt flere muligheder for at opvarme reaktorerne.

3.7.3 Nyttiggørelse

Det ville være relevant at indføre seriel drift og en lavtemperatur hydrolyse på SCA's rådnetanke. Dette kan gøres uden investering i nye tanke, men kun i rørforbindelser etc., hvis man samtidigt øger udrådningstemperaturen fra ca. 38°C til 55°C (se Ref. 1).

Den årlige produktion af biomethan vil stige ca. 25% til i alt 2.3 millioner m^3 biomethan. Denne biomethan kan så enten nyttiggøres via afbrænding i gasmotor, bygas eller drivmiddel.

Den termiske energi fra det rensede spildevand anvendes til at opvarme slammet til hydrolyse og biogasreaktorer.

3.7.4 Forretningsøkonomi

Den overordnede forretningsmæssige analyse viser, at der er et betydelig positivt driftsbidrag ved at fremstille biogas. Driftsbidraget varierer med det præcise valg af udnyttelse. Dette er kort sammenstillet nedenfor:

Nyttiggørelsesform	**Tilbagebetalingstid, år**	**Værdi af biogas ved anvendelse til formål**
Afbrænding i gasmotor	3,1	8,1 mio. kr.
Salg som bygas	2,9	10 mio. kr.
Salg som drivmiddel til transportformål	1,4	17,6 mio. kr.

Med hensyn til anvendelse til bygas og drivmiddel, så er der ved beregningerne forudsat nogle fremtidige priser. Dette afhænger af, hvilke tilskud der opnås enighed om i forbindelse med implementeringen af ”Grøn Vækst”.

Ovenstående beregninger bygger på forudsætninger om afgiftsmæssig sidestillelse af bygas og biogas og med ækvivalens med alternativomkostninger ved køb af dieselbrændstof til transportformål. Ovenstående indeholder alene den direkte ækvivalentværdi. Der er ikke indeholdt additionelle effekter som f.eks. værdien af mindre CO_2 emission fra transportsektoren.

3.7.5 Klimagevinst

Ved anvendelsen af biogas til bygas opnås en klimagevinst ved at mindske CO_2 udslippet med 5.000 ækvivalentkvoter og der opnås en betydelig højere klimagevinst på 6000 tons CO_2, hvis biogassen erstatter fossil diesel.

3.7.6 Udfordringer

Scenariets udfordringer er en kombination af den politiske vilje til ”Grøn Vækst” og af teknisk karakter.

Afgiftsstrukturen for nyttiggjort biogas er ikke fastlagt endnu. Dog forventes det, at scenarierne hvor biogas nyttiggøres som bygas eller drivmiddel vil give mulighed for en betydelig større driftsindtægt.

Når der ændres fra mesofil til termofil drift i rådnetankene på et biogasanlæg, kan det forekomme, at slammets afvandingsegenskaber ændres. Det er derfor vigtigt at justere flokkuleringen således, at der ikke overføres en høj koncentration af kolloider til spildevandet, som udledes direkte til recipienten.

Der er også en teknisk udfordring ved renholdelse af varmevekslere, når spildevandsslam skal opvarmes til ca. 75 °C. Dette medfører ofte udfældninger på slamsiden, hvilket medfører at effektiviteten af varmevekslingen forringes.

Som følge af at hvert rensningsanlæg er unikt, anbefales det, at der udføres pilotforsøg, hvor den nøjagtige udbyttestigning fastlægges inden en eventuel løsning detailprojekteres.

Alternativer til desintegration af slammet ved hydrolyse og disses effekt anbefales klarlagt inden den endelige beslutning tages. Denne vurdering er imidlertid ikke indeholdt i det aktuelle feasibility study.

4 Interessenter

Figur 3. viser interessenterne i det aktuelle feasibility study

Figur 3 Illustration af interessenterne i projektet.

Deres rationaler kan kort summeres til:

Interessent	**Rationale**
DANVA	Brancheorganisation for vandsektoren. Sponsor for feasibility study.
KE Varme	Mulig aftager af fjernvarme i nærområdet ved Rensningsanlæg Lynetten. Aftager allerede fjern-varme.

KE Gas	Mulig aftager af biogas til leverance i bygasnettet. Rensningsanlæg Lynetten og Spildevandscenter Avedøre ligger i umiddelbar nærhed af distributionsnettet.
Rensningsanlæg Lynetten og Spildevandscenter Avedøre	Leverandør af energien i form af det rensende spildevand. Indehaver af slamudrådningsprocesser og slamforbrænding. Centrale aktører i spildevandssektoren.
Rådgivere	Vil kunne støtte op om mulige nye forretningsområder
Afløb / Kloakker	Kan fungere som decentrale jordvarmeanlæg. Afkølet renset spildevand bidrager ikke til temperaturstigning hos recipienten
Samfund	Mulighed for at substituere CO_2 belastende energiforsyning med energi fra en hidtil ikke-udnyttet energikilde fra det rensede spildevand. Ved optimal udnyttelse af biogas fra slamudrådning vurderes det muligt at opnå op til ca. seks gange de beregnede mængder biogas fra rensningsanlæg til human spildevand, som angivet i dette aktuelle feasibility study.

5 Udfordringer

De forskellige scenarier for nyttiggørelse har identificeret en række udfordringer, der skal håndteres. Flere af udfordringerne er af teknisk karakter, og direkte knyttet til det aktuelle scenarium. Der er imidlertid nogle udfordringer, der er uafhængige af de belyste scenarier, som anbefales debatteret med henblik på at kunne påvirke rammebetingelserne fremadrettet.

Disse er:

- Afregningspriser på varme leveret til fjernvarmenettet
- Afgift på leveret varme – "Elpatronloven"
- Ejerskab af udstyr og energi i en kombinationsløsning. Vandforsyningsselskaber eller Energiforsyningsselskaber.

6 Demonstrationsanlæg

6.1 Placering

Feasibility study skal munde ud i en anbefaling af placering af et eventuelt demonstrationsanlæg. De belyste scenarier viser, at der er flere muligheder for en hensigtsmæssig placering.

Baseret på den forretningsøkonomiske analyse anbefales det, at arbejde videre med scenarierne, der optimerer slamudrådningen ved hydrolyse efterfulgt af lavtemperatur termofil udrådning.

Som følge af den individuelle driftssituation hos Rensningsanlæg Lynetten og hos Spildevandscenter Avedøre vil det være relevant at arbejde på at implementere en løsning begge steder.

6.2 Designkriterier for opsamling af energi

Designkriterier for mulige anlæg er konceptuelt uafhængig af valg af nyttiggørelse. Det er den gennemstrømmende vandmængde i rensningsanlæggets udløb der er dimensionsgivende.

Til alle forhold i de indgående rensningsanlæg vil det være mest optimalt at anvende udstyr af typen beskrevet i afsnit 2.2.

Det enkelte udstyr til et specifikt rensningsanlæg vil dog skulle tilpasses den eksakte geometri i rensningsanlæggets udløb.

6.3 Aktiviteter og tidsplan

Hvis det vælges at gennemføre et demonstrationsprojekt på biogasudrådning på SCA eller Lynetten, anbefales det, at demonstrationsforsøget deles op i tre underopgaver:

1. Produktion af varmt vand fra det rensede spildevand og opvarmning af spildevandsslam
2. Verifikation af biogaspotentiale ved indførelse af hydrolyse og termofil drift
3. Konceptuelt design af anlægsændringer og forretningsplan

Nedenstående overordnede plan for et demonstrationsforsøg kan anvendes for både Lynetten og SCA.

Ad 1.
Dette delprojekt skal tjene til at sikre, at fastlægge den reelle COP værdi og få identificeret og løst eventuelle udfældningsproblemer i varmeveksleren under opvarmning af spildevandsslam til 75°C.
Dette delprojekt udføres ved at anvende spildvarmen i den rensede vand t il, via en varmepumpe at opvarme en delstrøm af slammet gennem en varmeveksler.

Dette delprojekt burde have deltagelse af følgende parter:

Udviklingssamarbejdet
Rensningsanlægget
Projektleder/koordinator
Firma med konstruktion af varmevekslere som speciale
Firma med konstruktion af varmepumper som speciale

Tidsplan

Tid (måneder)	**Opgave**
2	Design af og overordnet planlægning af demonstrationsforsøg
3	Indkøb og Installation
6	Demonstrationsforsøg
1	Afrapportering

Ad 2.
Dette delprojekt skal fastlægge biogaspotentialet, der skal anvendes i de økonomiske kalkulationer, samt eftervise funktionen af den nye proces ved procesforstyrrelser.
Som minimum skal følgende reaktorkonfigurationer sammenlignes:

a) Nuværende (mesofil)
b) Termofil
c) Mesofil + hydrolyse
d) Termofil + hydrolyse

Procesforstyrrelser kan være ændring i opholdstid i rådnetankene, slamsammensætning, temperatursvingninger etc.

Endvidere skal det ved forsøgene eftervise om det er nødvendigt at tage specielle forholdsregler ved opkoncentrering af det udrådnede slam.

Dette delprojekt burde have deltagelse af følgende parter:

Udviklingssamarbejdet
Rensningsanlægget
Projektleder/koordinator
Forskningsinstitution med speciale i drift af biogasreaktorer

Tidsplan

Tid (måneder)	Opgave
2	Design og overordnet planlægning af demonstrationsforsøg
1	Klargørelse
6	Forsøgskørsel med reaktorer inklusiv stresstests
1	Afrapportering

Ad 3.
Denne del samler resultaterne fra de to andre dele og omsætter dette til et egentligt anlægsdesign i stor skala.

Dette delprojekt burde have deltagelse af følgende parter:

Udviklingssamarbejdet
Rensningsanlægget
Projektleder/Engineering

Tidsplan

Tid (måneder)	Opgave
2	Design og overordnet planlægning af fuldskalaanlæg
½	Risikoafdækning
½	Investeringsbudget
½	Afrapportering

7 Referencer

1. Intern udnyttelse af varmepumpe på rensningsanlæg. Kaare Hvid Hansen & Niels Bitsch, Grontmij | Carl Bro A/S, Marts 2010.
2. Kombination af vindkraft og varmepumpe til Varmeplan Århus, Ea energianalyse, marts 2010
3. Anvendelse af varmepumper til fjernvarme med energi fra renset spildevand. Carsten Steffensen & Kaare Hvid Hansen
4. Bekendtgørelse af lov om afgift af spildevand, LBK nr 636 af 21/08/1998.
5. Rapportering af fase 1, Projektrapportering. Mads Klarskov, Grontmij | Carlbro a/s, januar 2010.
6. Grønt regnskab 2008, Rensningsanlæg Lynetten
7. Grønt regnskab 2008, Spildevandscenter Avedøre
8. http://www.svensktvatten.se/web/Energiprojektet.aspx.

8 Bilag 1

8.1 Rapport

Intern udnyttelse af varmepumpe på rensningsanlæg

6 august 2010
Projekt: 40.3283.08

Udarbejdet af : Kaare Hvid Hansen og Nils Bitsch

Kvalitetssikret af : Boye Mønster Kristensen (Biogas og tørring), Sebastian Kristoffersen (COP værdier) og Mads Klarskov

8.1.1 Sammenfatning

Denne rapport beskæftiger sig med hvilke muligheder der er for at udnytte energi i form af varmt vand fra varmepumper til de interne processer på de tre rensningsanlæg der er dækket af Udviklingsfællesskabet (Spildevandscenter Avedøre, Rensningsanlæg Lynetten og Damhusåens rensningsanlæg) og den forretningsmæssige økonomi i dette.

Hvis varmepumper modtager varmeenergi fra det rensede spildevand med en temperatur på 9 - 20°C, kan den levere varm vand ved en temperatur på op til 90°C (se kilde 25).

Følgende tre områder er identificerede som mulige aftagere af varmt vand:

1. Den biologisk renseproces
2. Rådneprocesssen
3. Processer omkring slamtørring

Beregninger og overvejelser er foretaget ud fra en vurdering af værdien af de forskellige energiformer der kan produceres på et rensningsanlæg.

a) Biogas er den mest værdifulde værditype (anvendelse: drivmiddel, el og varme)
b) Varme i form af vand på minimum 100°C (fjernvarme, industriel opvarmning)
c) Varme i form af vand på op til 100°C (Fjernvarme, opvarmning ved interne processer)

Det kan være både en økonomisk og samfundsmæssig fordel hvis en lavværdig energiform kan erstatte en energiform der har en højere værdi idet dens anvendelsesmuligheder er større.

Nedenstående tabel viser generelle problemstillinger på et renseanlæg hvor det bør overvejes om en varmepumpe skal anvendes som intern varmekilde. Problemstillingerne er mere detaljeret beskrevet i rapporten med udgangspunkt i de tre rensningsanlæg der er dækket af Udviklingssamarbejdet

Afsnit	Udfordring	Løsning	Kommentar
3.1.1	Der mangler kapacitet et eller flere steder i renseanlæggets biologiske system Kapacitetsmangel overstiger ikke 15%	Anvende en varmepumpe til at opvarme det indgående spildevand med overskudsvarmen fra det rensede spildevand.	Det afhænger meget af de lokale forhold om denne løsning er økonomisk attraktiv. Bla. omkring pladsforhold, strømpris etc.
3.2	Rådnetankene mangler kapacitet til at udrådne hele slammængden (primær og sekundær slam) fra rensningsanlægget	Ved at ændre rådnetankenes drift fra ca. 37°C til 55°C opnås en kapacitetsøgning på minimum 30%.	Om det er økonomisk interessant at anvende varmepumper til opvarmning af rådnetankene afhænger af om biogassen forbruges internt eller eksternt og hvis den forbruges internt om det kan betale sig at sælge overskudsvarmen som fjernvarme
3.2	Mulighed for at afsætte biogas til tredje part	Dvs. biogassen anvendes ikke i biogasmotor eller kedel på anlægget. Dette vil ofte betyde at der mangler en opvarmningskilde. Opvarmningen kunne skaffes fra en varmepumpe.	Dette mulighed er interessant hvis, det biogas eksempelvist ønskes anvendt som drivmiddel eller i bygasnet. Ser ud til at være en attraktiv økonomisk løsning, men må afvente udmøntning af Grøn vækst.

3.2	Ønske om at øge biogasudbytte fra rensningsslammet og samtidigt opnå bedre driftsresultat	Indføre en lavtemperaturshydrolyse, hvilket formentligt øger biogasudbyttet med i størrelsesordenen 20%	Om det er økonomisk interessant at anvende varmepumper til opvarmning af rådnetankene afhænger af om biogassen forbruges internt eller eksternt og hvis den forbruges internt om det kan betale sig at sælge overskudsvarmen som fjernvarme Umiddelbart ser det ud til at en lavtemperaturs-hydrolyse er økonomisk fordelagtig, men det er kun en ud af flere muligheder

Afsnit	**Udfordring**	**Løsning**	**Kommentar**
3.3	Lettere og billigere håndtering af slam der bortskaffes eksternt	Vakuumtørring af slam på renseanlæg, hvor tørringsvarme genereres via varmepumpe. Vægt af slam kan reduceres fra 300 – 500% afhængigt af tørstof efter koncentrering.	Umiddelbart ser det ud til, at der vil være et positivt driftsbidrag afhængig af transportveje og bortskaffelsesomkostninger. Investeringen skal dog kun overvejes i forbindelse med nybygninger eller større ombygninger da tilbagebetalingstiden for anlægget vil overstige 20 år hvis investeringen betragtes isoleret
3.3	Bedre udnyttelse af varmeenergi fra slamforbrænding	Anvende lavværdig varme til opvarmning af slam inden det skal forbrændes. Eksempelvis ved varme genereret fra varmepumper.	Umiddelbart ser det ud til, at der vil være et positivt driftsbidrag afhængig af transportveje og bortskaffelsesomkostninger. Investeringen skal dog kun overvejes i forbindelse med nybygninger eller større ombygninger da tilbagebetalingstiden for anlægget vil overstige 20 år hvis investeringen betragtes isoleret

8.1.2 Intern udnyttelse af varmepumpeenergi

Denne rapport beskæftiger sig med muligheder for at udnytte varmepumper til substitution af andre energikilder til dækning af det interne varmebehov på kommunale renseanlæg og om det kan betale sig at tilføre mere varme og således hæve temperaturen for at øge hastigheden af biologiske processer i det aktive slam eller i slamudrådningen.

Varmepumpens fordamperenhed skal som hovedregel tage varme fra renseanlæggets udløb. Der er i det følgende forudsat at temperaturen på det rensede udløbsvand kan sænkes op til 6°C og at varmepumpen kan levere den indvundne energimængde som procesvand med en temperatur på op til 85°C.

På baggrund af de indledende undersøgelser/diskussioner (Møde mellem Dines Thornberg og Mads Klarskov 2009 og fase 1 rapport af 4 februar 2010) er det valgt at arbejde videre med 3 scenarier på ideplan for at se hvilke scenarier der er teknisk mulige og de afledte økonomiske effekter. I det følgende vil være en generel beskrivelse af scenarierne, hvorefter effekterne ved en implementering for Damhusåens renseanlæg (RD), Lynetten (RL) og Spildevandscenter Avedøre (SCA) beskrives hvor det er relevant.

De tre udvalgte scenarier er:

1. Hæve spildevandets indløbstemperatur således at denne aldrig kommer under 12°C. Dette vil forventes at medføre en øget rensekapaciteten i den biologiske rensning
2. Ændre rådnetankenes drift fra mesophile (37°C) til thermofil (ca. 55°C) drift eller udføre en lavtemperatur hydrolyse ved ca. 70°C. Dette for at øge biogasudbyttet eller øge biogasreaktorernes kapacitet
3. Tørre opkoncentreret slam med energi fra varmepumper for at sænke omkostningerne på transport og øge indtægterne fra fjernvarme

For at beregne de økonomiske konsekvenser af scenarierne er der anvendt en indkøbspris på el på 55 øre pr. kWh, en pris på fjernvarmesalg på 0,2 kr pr. kWh ved 90°C, 4,2 kr./m³ ved salg til bygas og 7,5 kr./m³ methan ved erstatning af diesel.

8.1.2.1 Øgning af spildevandets indløbstemperatur

Det er generelt accepteret, at øges indløbstemperatur indenfor det normale driftsområde på kommunale renseanlæg (5 - 30°C) øges hastigheden af de biologiske processer der foregår under renseprocessen (eksempelvis: Nitrifikation, denitrifikation, BOD nedbrydning etc.).

Dvs. hvis man øger temperaturen i indløbet i de kolde måneder så den eksempelvis altid er minimum 12°C vil man kunne øge renseanlæggets nominelle kapacitet. Mangler et renseanlæg kapacitet kan en større ombygning måske undgås eller udsættes hvis indløbstemperaturen øges.

Derudover er der fastsat afgifter på udledningen af det samlede mængde organisk stof og på mængden af enkelte næringsstoffer efter "Lov om afgift af spildevand" § 3. Afgifterne er som følger:

- Total nitrogen: 20 kr/kg
- Total phosphor: 110 kr/kg
- BI5 (modificeret): 11 kr/kg

Baseret på udledningen af renset spildevand havde RL, RD og SCA en udgift på hhv. 14,9 millioner kr, 7,6 millioner kr og 5,6 millioner kr i 2008, disse tal er eksklusiv den spildevandsmængde der blev regnvejrsaflastet. For en mere detaljeret udredning se tabel 1.

Tabel 1. Udgifter for RL, RD og SCA i forbindelse med afgifter på udledning. Data er baseret på grønne regnskab for 2008. Mængderne er angivet for udledningen via renset spildevand og mængderne i det aflastede spildevand er således ikke medtaget

Udledt mængde i 2008	Tons	Enhedspris kr / kg	I alt udledningsafgifter
Lynetten			
Total N	322	20	6440000
Total P	51	110	5610000
BOD	263	11	2893000
			14.943.000
Damhusåen			
Total N	191	20	3820000
Total P	25	110	2750000
BOD	92	11	1012000
			7.582.000
Spildevandscenter Avedøre			
Total N	135	20	2.700.000
Total P	19	110	2.090.000
BOD	75	11	825.000
			5.615.000
I alt udledningsafgifter i 2008			**Kr 28.140.000**

Dette betyder at der er i hvert fald to grunde til at se nærmere på en temperaturøgning af det indkomne spildevand:

1. Ved mangel på kapacitet kan en øgning af indløbstemperaturen måske hindre eller fjerne behovet for en kapacitetsforøgelse (større tankvolumener)

2. Der kan være et økonomisk incitament via udgifterne i forbindelse med "Lov om afgift af spildevand" § 3 til at sænke N, P og BOD koncentrationen i udløbet

De data vi har fået stillet til rådighed viser, at de tre referenceanlæg har en tilstrækkelig kapacitet til at overholde udledningskravene i den normale driftssituation både sommer og vinter.

Når renseanlæggene har tilstrækkelig kapacitet er der kun en meget begrænset effekt på det generelle BOD, N og P niveau hvis temperaturen øges i indløbet til den biologiske rensning (kilde 20 og 21).

Der anses derfor ikke for at være nogen nævneværdig effekt ved at hæve temperaturen i indløbet på Lynetten, Damhusåen eller Spildevandscenter Avedøre. I det følgende (afsnit 8.1.2.1.1) er der derfor kun givet en indikation af potentialet for den kapacitetsforøgelse der kan opnås ved at hæve temperaturen op til 5°C i indløbet i vinterperioden.

Da der går lidt tid fra temperaturen hæves til den biologiske aktivitet øges er det ikke hensigtsmæssigt kun at øge temperaturen ved kraftigt regnvejr (Aflastning af spildevand) for at øge anlæggets rensekapacitet. Derfor er denne mulighed ikke behandlet.

8.1.2.1.1 Kapacitetsforøgelse ved øgning af indløbstemperatur

I dag er det sådan at spildevandets temperatur ikke kontrolleres, men renseanlæggene behandler spildevandet i den biologiske del ved den temperatur det modtages. Om vinteren er det ned til en temperatur på ca. 7°C.

Hvis der trækkes energi ud af det rensede spildevand via en varmepumpe vil det være muligt at opvarme og dermed kontrollere det indgående spildevands temperatur således at indløbstemperaturen til de biologiske processer (aktiv slam anlægget) hæves, så den er minimum ca. 12°C hele året. Dvs. anlæggets designgrundlag kan flyttes fra de nuværende ca. 7°C til ca. 12°C.

Typisk benyttes en vækstmodel eksempelvis en Arrenhius-type funktion (Kilde 22) til at beskrive den mikrobielle aktivitet i det aktive slam. I det følgende er givet et eksempel for denitrifikation (kilde 22):

$$q_D = q_{D,20}\theta^{(T-20)}$$

hvor,
q_D er denitrifikationsraten ved temperaturen T
$q_{D,20}$ er denitrifikationsraten ved temperaturen 20°C
θ er en temperaturafhængig konstant (1,08)
T er temperaturen i denitrifikationsenheden

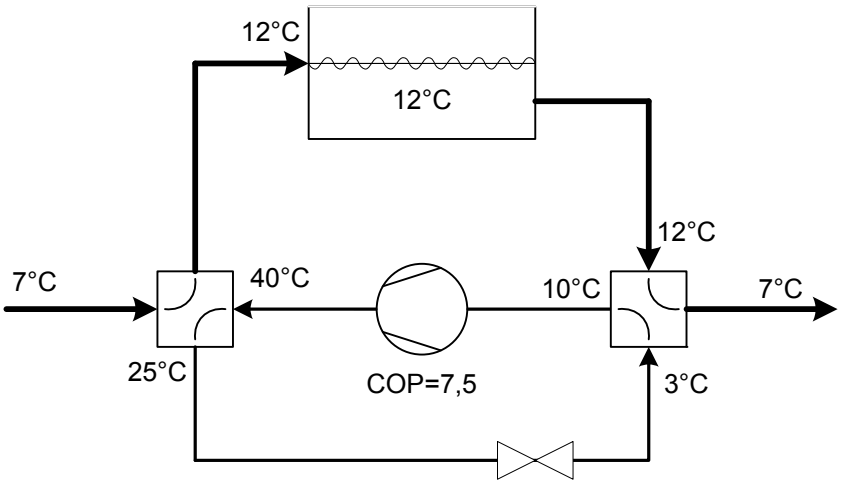
Anvendes ovenstående udtryk betyder det, at den biologiske aktivitet i denitrifikationen er ca. 50% højere ved 12°C i forhold til 7°C. Den umiddelbare konklusion på dette kunne være, at ved at hæve designgrænsen fra 7 til 12°C øges rensekapaciteten med 50%. Men dette er ikke tilfældet, idet der er en række andre parametre der har indflydelse på den endelige kapacitetsstigning.

Den opnåede kapacitetsstigning som følge af en højere minimumstemperatur på et renseanlæg vil blandt andet afhænge af følgende parametre (Kilde 20, 21, 22):

- Den organiske sammensætning og mængde
- Udformningen af reaktorerne (fuldt omrørte, plug flow eller en mellemting)
- Ammoniak koncentration
- Om der er begrænsninger i oxygentilførsel/overførsel
- pH
- Opløselighed af eventuelle inhibitorer
- etc

På anlæg som mangler kapacitet er det en mulighed at hæve indløbstemperaturen ved hjælp af varmepumpeteknologien og dermed øge kapaciteten. For at kunne forudsige de præcise effekter og dermed udføre rentabilitetsberegninger mellem effekten af at hæve indløbstemperaturen og udvide anlægget kræves en nøje analyse af det enkelte anlæg.

Varmepumpekredsen ville i givet fald have en høj effektivitet og kunne udformes som skitseret nedenfor i **Figur 4**



Figur 4. Skitsering af en varmepumpekreds på et stort renseanlæg mellem indløb til biologisk rensning og spildevandets udløb. COP værdier er beregnet ud fra anvendelse af det naturlige kølemiddel R717 (ammoniak). Renseanlæggets størrelse svarer til SCA.

For at opvarme vandet fra 7 til 12°C skal der tilføres følgende mængde energimængde på SCA:

Energi: (1000kg/s*5K*4,18kJ/kgK)/0,775effektivitet = 27,0 MW
Strøm fra varmepumpe: (26,1MW/7,5) = 3,60MW

Hvis det antages at tilløbstemperaturen ligger på mellem 7-12°C fra november til april og der gennemsnitligt skal benyttes halvdelen af varmepumpens effekt til at opretholde en indløbstemperatur på 12°C fås følgende EL udgift:

Udgift til EL: 3kWh/h*0,5*6*30*24*0,55kr/kWh = 4.277.000 kr.

Udover den løbende EL udgift skal der også regnes med en investering i varmepumper og vekslere. Dette skal sammenholdes med investeringen i at udvide renseanlægget med op til 15%.

En anden mulighed er at kombinere muligheden for at udnytte varmepumpen hele året ved at fremstille fjernvarme i sommermånederne hvis det kan erstatte fyring med fossile brændstoffer og så opvarme spildevandet om vinteren for at øge kapaciteten på renseanlægget. Som tidligere omtalt vil effekten være yderst begrænset på udledningsafgifterne på RL, RD og SCA da de pt. Ikke har nogen kapacitetsproblemer. En opstilling af de økonomiske konsekvenser er foretaget i tabel 2. Tabel 2 viser, at det ikke er økonomisk at opvarme spildevandet inden den biologiske rensning på RL, RD og SCA.

Tabel 2. Økonomiske konsekvenser ved at kombinere opvarmning af spildevand før biologisk rensning om vinteren og fjernvarmeproduktion om sommeren. Følgende nøgletal er anvendt (Afregningspris fjernvarme 74 kr/GJ; Varmeafgift 42 kr/GJ ved en gennemsnitlig COP på 4,0 (Kilde 23), Salg af tegningsret for energibesparelse 0,375 kr/kWh, gennemsnitlig EL pris 0,55 kr/kWh.

	RL	**RD**	**SCA**
Termisk energipotentiale fjernvarme sommer (MW)	29,43	14,12	13,28
Termisk energipotentiale fjernvarme sommer (kWh)	257.766.667	123.658.333	116.343.333
Termisk energipotentiale fjernvarme sommer (GJ)	927.960	445.170	418.836
ENGANGSINDTÆGT	**96.662.500**	**46.371.875**	**43.628.750**
Potentiel salg af tegningsret til energibesparelse (kr)	96.662.500	46.371.875	43.628.750
DRIFTSINDTÆGTER	**37.865.400**	**18.185.800**	**17.034.190**
Bruttoindtægter ved salg af energi (kr/år)	85.836.300	41.178.225	38.742.330
Afgift pr leveret varme (kr/år)	48.717.900	23.371.425	21.988.890
Afgiftsreduktion N, P og COD (10% om vinteren)	747.000	379.000	280.750
Netto disponibel til investering og drift (kr/år)			
DRIFTSUDGIFTER	**57.253.037**	**27.465.984**	**25.841.236**
Elforbrug til drift af varmepumpe sommer (kr)	35.442.917	17.003.021	15.997.208
Elforbrug vinter	9.451.444	4.534.139	4.265.922
Ekstra vedligehold (6% af investering) (kr)	12.358.676	5.928.824	5.578.105

NETTO ÅRLIG FORRENTNING TIL INVESTERING	-19.387.637	-9.280.184	-8.807.046
INVESTERINGER	**205.977.930**	**98.813.737**	**92.968.417**
Investering i varmepumpe etc (nøgletal) (kr)	205.977.930	98.813.737	92.968.417
Afskrivning pr år (kr)	13.731.862	6.587.582	6.197.894

8.1.2.1.2 Udnyttelse af varmepumpeenergi i den anaerobe udrådning

8.1.2.1.3 *Indledning*

Baggrunden for dette afsnit er at undersøge om man kan øge biogasudbyttet fra det primære eller sekundære slam ved at tilføre mere varmeenergi til den anaerobe udrådning. Varmeenergien skal kunne tilføres via varmepumper og løsninger skal kunne installeres på slamudrådningen på eksisterende rensningsanlæg således at renseanlæggene opnår en økonomisk gevinst. Afsnit 8.1.2.1.4 til 8.1.2.1.6 er en kort gennemgang af status på slamudrådning og de følgende to afsnit (afsnit 8.1.2.1.7 og 8.1.2.1.8) er en gennemgang af mulighederne på hhv. Spildevandscenter Avedøre og Lynetten.

8.1.2.1.4 *Udrådning af spildevandsslam - generelt*

Typisk udrådnes slammet i biogasanlæg fra både forklaringstankene (primære) og overskudsslammet fra efterklaringstankene (sekundære) på danske renseanlæg i biogasanlæg. Hvis der er kapacitetsbegrænsninger medtages i nogle tilfælde kun dele af det sekundære slam.

Da biogasudbyttet afhænger af mange parametre er det ikke muligt at angive et standardudbytte (Kilde 1, 2, og 10). Typisk ligger metanudbyttet af det tilførte organiske tørstof (VS) dog på omkring 0,33 m^3 metan pr. kg VS for primærslam og 0,1 – 0,2 m^3 metan pr. kg VS på sekundærslam. En typisk reduktion i det organiske tørstof ligger mellem 40 og 60%.

Det faktiske metanudbytte afhænger eksempelvis af forholdet mellem primær og sekundær slam, slamalder for det sekundære slam, sammensætning af spildevand, især industriandel og type. Derudover afhænger biogasudbyttet ligeledes af den valgte udrådningsproces og parametre som eventuel hydrolyse af svært nedbrydelige stoffer, udrådningstemperatur, opholdstid i reaktor, tørstof etc. Dette betyder at de tal der nævnes er behæftet med en vis usikkerhed og bør verificeres i forbindelse med en analyse af de enkelte anlæg

Ud fra erfaringer og litteraturen, så er der to oplagte muligheder for at udnytte energien fra en varmepumpe i forbindelse med udrådning:

1. Ændre udrådningstemperaturen fra mesofil til termofil
2. Udføre en hydrolyse ved ca. 70 °C

En anden procesmæssig ændring der bør tages i betragtning er, at det bør undersøges om driftskonceptet kan ændres fra flere parallelle reaktorer til en totrins seriedrift hvor 75 – 90 % af opholdstiden ligger i trin 1 og den resterende i trin 2. Dette vil i sig selv øge biogasudbytte med 3 – 10% (se bla. kilde 9).

8.1.2.1.5 Ændre udrådningstemperaturen fra mesofil til termofil

Generelt opnås følgende fordele ved at udrådne i det termofile område i forhold til i det mesofile område (kilde 13):

a. De biologiske processer forløber med en højere hastighed, hvorfor der opnås en større udrådningseffektivitet og derved øget kapacitet med samme reaktor volumen
b. En bedre nedbrydning af de langkædede fedtsyrer
c. En mindre biomassedannelse i forhold til produktdannelse
d. En mere effektiv fjernelse af patogener

Ved biogasproduktion i det termofile område er der dog også et par risikofaktorer (kilde 13):

a. Visse stoffers hæmmende virkning er højere i det termofile område end i det mesofile område. Eksempel er stoffer som ammonium og sulfid, men dette vil næppe være et problem for slamudrådningen, da koncentrationer af disse stoffer er relativt lave.
b. Omkostninger til opvarmning er højere end ved mesofil udrådning
c. En forøget dannelse af siloxaner.

Risikoen for hæmning er dog ikke stor. Således udrådnes spildevandsslam termofilt på mange renseanlæg verden over uden at give anledning til problemer. Siloxaner kan efterfølgende fjernes ved en rensning af biogassen.

Ved at ændre udrådningstemperaturen fra mesofil til termofil opnås en 20%-50% højere aktivitet i reaktoren (kilde 4, 8, 10 og 11), hvoraf følger at belastningen på rådnetankene kan øges med ca. 20%-50%. Hvis udrådningstiden holdes konstant øges biogasudbyttet med 5 – 10% med et tilsvarende fald i den slammængde der skal transporteres bort. Gevinsten på udbytte vil afhænge af flere faktorer, men primært om belastning af processen ved mesofil temperatur er høj. Dvs. hvis processen var presset ved mesofil drift, vil udbyttestigningen være mere udtalt ved omlægning til termofil drift. Også fedtinholdet i slammet kan påvirke udbyttegevinsten. Ved højere temperatur er fedt mere "flydende" og dermed tilgængelig for mikroorganismerne. Stigninger ses dog typisk kun når slammet udrådnes mesofilt med en opholdstid tæt på 20 dage eller mindre.

Kilde 11 rapporterer endvidere at når termofil udrådning anvendes kan tørstofindholdet stige med op til 4% i det afvandede slam dog med et højere polymerforbrug til følge. Denne effekt er ikke medregnet i den følgende da det ikk er er valideret at det er en generel trend. Danske erfaringer er, at der kan opstå problemer med kolloider i det dekanterede rejectvand, hvilket medfører øget suspenderet stof (SS) i rensningsanlæggets udløb. Dette kan ofte løses med en tokomponent flokkutering inden slammet afvandes.

Ved vurdering af økonomiske konsekvenser for ændring af udrådning fra mesofil til termofil på de enkelte renseanlæg (se afsnit 8.1.2.1.8) benyttes en konservativ stigning på 30 % i udrådningshastighed.

8.1.2.1.6 *Udføre hydrolyse ved ca. 70° C*

I litteraturen og i praksis er der beskrevet mange løsninger til at gøre det organiske materiale mere tilgængeligt, således at biogasudbyttet øges og slammængden sænkes. Som eksempler kan nævnes:

a. Vådeksplosion (kilde 14), 180°C, 10 bar, brintperoxid i 2-8 min
b. Varmebehandling (kilde 6) 110 - 210°C i 30 min
c. Mekanisk disintegrering af slam (kilde 12); behandling med ultralyd
d. Cambi proces opvarmning, reaktion ved 165°C, 6 bar i 20 minutter (kilde 15)
e. Varmebehandling ved 60 - 80°C i 12 timer – 2 dage (kilde 4, 7 og 16)

Hvis varmepumpeenergi skal anvendes som eneste energikilde ved en hydrolyse, skal hydrolysen foregå ved en maksimum temperatur på 75°C. Dvs. i det resterende beskæftiger vi os med varmebehandlingen pkt. e i ovenstående.

I litteraturen er der fundet forskellige effekter af en hydrolyse af det primære og sekundære slam. Eksempelvist har kilde 7 rapporteret om et øget gasudbytte på 25% og en stigning i VS udnyttelse fra 44 til 54% fra primært slam, ved en hydrolyse ved 70°C i ca. 2 dage. Ifølge kilde 4 stiger biogasproduktionen fra 30 – 144% ved en hydrolyse ved 70°C i 1 – 7 dage, der er en stigning i udbytte fra både primært og sekundært slam. Tilsvarende stiger udbyttet ifølge kilde 16 med 10 – 20% for det primære slam og 40 – 60% fra det sekundære slam ved en 12 timers varmebehandling på mellem 75 og 80°C. Udover hydrolysens effekt på biogasudbyttet vil slammængderne mindskes.

Merudbytter over 50% for en hydrolyse med lang opholdstid skyldes formentlig andre optimeringer end den termiske effekt.

I det følgende regnes med en stigning på 20% i biogasudbytte for en blanding af sekundær og primærslam ved en hydrolyse ved 70°C. Dette tal skal dog verificeres eksperimentelt for hvert enkelt renseanlæg, da der som ovenfor nævnt kan være store variationer fra anlæg til anlæg.

Hydrolysetrinnet kan udformes på flere måder. Billigste metode er formentlig at udføre hydrolysen i en fuldt opblandet tank med en gennemsnitlig opholdstid på min. 48 timer. Udover investeringer i selve hydrolysetrinnet skal der indsættes varmevekslere til at overføre energi fra varmt vand til slam og til genanvendelse af varmen fra det hydrolyserede slam.

8.1.2.1.7 Energibalancer spildevandscenter Avedøre

I dette afsnit anvendes den generelle viden om anaerob udrådning til vurdering af om der er et potentiale på Spildevandscenter Avedøre for at producere mere biogas.

Tabel 1 viser udvalgte produktionsdata for Avedøre's rådnetanke i 2009.

Tabel 1. Driftsdata fra SA 2009.

	Tilførsel til rådnetanke					Biogasproduktion i rådnetanke				
	TS (%)	VS (%)	N (g/ltr)	Primær-slam (ton/dag)	Sekundær slam (ton/dag)	Tempe-ratur (°C)	TS (%)	Reaktor volumen (m^3)	Biogas Prod (m^3/år)	Metan-indhold (%)
Avedøre	3,30	2,56	0,64	311	552	38	2,21	4x6000	3.100.000	Ca. 60

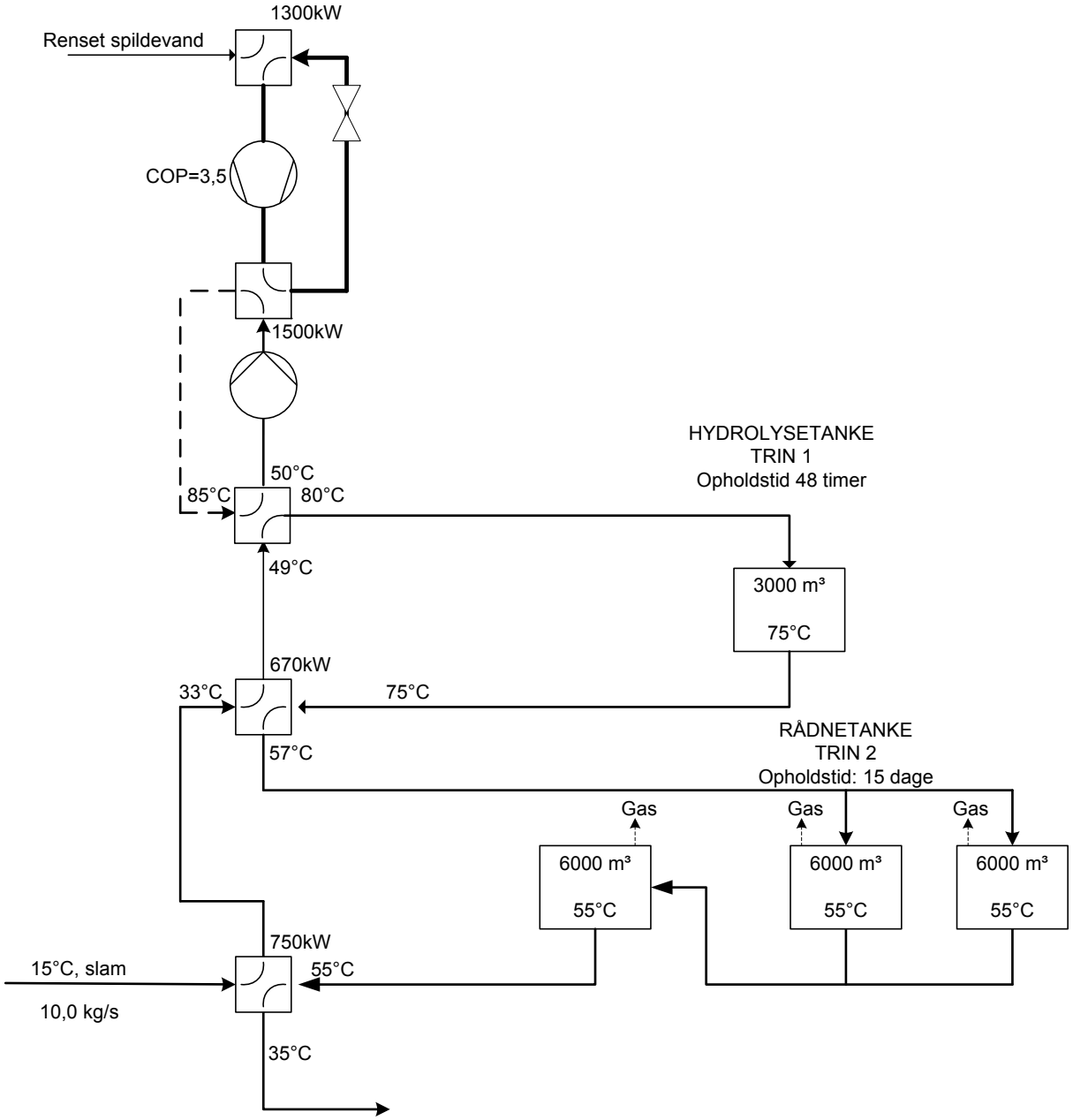
Slammet udrådnes mesofilt med en forholdsvis lang opholdstid i reaktorerne på ca. 28 dage og en VS reduktion på ca. 43%. Der produceres i gennemsnit 0,54 m^3 metan per kg nedbrudt VS og 0,23 m^3 metan per kg tilført VS, dette ligger på et forventet niveau.

Hvis processen ændres til termofil drift, vil der være en øget varmeafgivelse fra reaktorerne og den højere temperatur i reaktoren betyder at slammet skal opvarmes yderligere. Men da opholdstiden i reaktoren i forvejen er forhodsvis lang (28 dage) forventes det ikke at der vil være nogen signifikant effekt fra at gå fra mesofil til termofil drift.

Hydrolyse af slammet kan give et ekstra metanudbytte på omkring 20%. Kombineres dette med at ændre Avedøre til seriel termofil drift vil det være muligt at udforme anlægget således, at der ikke skal investeres i nye tanke. Dvs. de fire 6000 m^3 tanke der står i dag kan benyttes til alle trinene i udrådningen (se Figur **5**).

I figur 2 er det forudsat at man ændrer den ene af de fire eksisterende rådnetanke til en hydrolysetank der opererer ved 75°C. Den (reaktor 1) skal operere som en fuld omrørt tank med et aktivt volumen på ca. 3000 m^3, hvilket svarer til en gennemsnitlig opholdstid på ca. 3,5 døgn.

Reaktor 2 og 3 skal operere som to parallelle termofile udrådningstanke (udrådningstrin 1) hvor opholdstiden vil være ca. 14 dage og reaktor 4 skal operere som andet udrådningstrin med en opholdstid på ca. 7 dage.



Figur 5. Principskitse for hvordan slamudrådningen på Avedøre kunne ændres så den drives som en termofil process med bade hydrolyse og seriel udrådning i vintersituationen.

Det forventede ekstraudbytte ville være i størrelsesordenen (3.100.000*0,6*0,25*) 465.000 m^3 metan/år.
Hvis gassen forbrændes i Avedøres gasmotor vil værdien af strøm (76,5 øre/kWh) medføre en øget indtægt på (465.000 m^3*10kWh/m^3 metan*0,33 elvirkningsgrad*0,765øre/kWh) 1.173.892 kr. pr år.

Fra den nuværende gasmotor dannes der samtidigt (3.565.000 m^3*10kWh/m^3 metan*0,52 varmevirkningsgrad) 18.538 MWh/år varmt vand som kunne tilføres som varme til biogasprocessen. Denne varme ville være gratis, da der ikke er nogen aftagere af varme på Avedøre. Der tilføres i gennemsnit 10 kg slam/s til udrådningen. Dvs. der skal benyttes (10kg/s*4,18kJ/kgK*31K*24*365) = 11.351 mWh/år.

Konklusionen er derfor, at det ser ud til, at Spildevandscenter Avedøre ved at indføre en forhydrolyse og herefter en seriel termofil udrådning kan forøge indtægten på strøm med ca. 1 million kr/år. Dette kræver en investering i nogle rørvarmevekslere, omlægninger af rør og forudsætter at gasmotoren kan klare den øgede biogasmængde. Når slam skal opvarmes til 75°C er der risiko for belægninger bla. fra protein derfor skal varmevekslerne jævnligt rengøres (afhængigt af belægningstype med enten base eller syre).

En anden mulighed for Avedøre er at sælge al biogas som bygas eller opgradere biogassen til et drivmiddel. Det forventes at tilskuddene formentlig ligestilles med biogas til strøm i slutningen af 2010, men dette er ikke besluttet endnu. Dette ville så betyde, at varmebehovet kunne dækkes af en varmepumpe med en COP på 3.5 hvor kondensatorvarmen tages fra det rensede spildevand (se figur 2). Flowet ville være identisk med
Figur **5**, dog skulle der ikke benyttes 90°C varmt vand fra en gasmotor med 85°C varmt vand fra en varmepumpe. Varmepumpen skulle kunne levere 1,5 MW og det ville medføre et strømforbrug på varmepumpen på 430 kWh/h. Økonomiske konsekvenser for SCA er vist i tabel 3.

Tabel 3. Økonomiske konsekvenser for SCA ved indførelse af hydrolyse og forventede økonomiske konsekvenser for SCA ved alternative anvendelsesformer af biogassen. Forventet prise på biogas som bygas er 4,2 kr/m^3 og til transport 7,5 kr/m^3. Dog er tilskudsreglerne ikke besluttet endnu hvorfor prisfastsættelse er usikker. Prisen på opgradering er taget fra kilde 24.

	Kraftvarme	Bygas Kvantificerbare omkostninger	Transport Kvantificerbare omkostninger
Investeringer	**16.450.000**	**17.426.500**	**17.752.000**
Varmepumpe (1,1 MW) incl installation	3.850.000	3.850.000	3.850.000
Slamvekslere, 4 stk	4.600.000	4.600.000	4.600.000
Rør, pumper, Installation og design	8.000.000	8.000.000	8.000.000
Opgradering		976.500	1.302.000
Driftsudgifter - Årligt	**2.776.543**	**3.997.633**	**5.179.663**
El til drift af varmepumpe	1.789.543	1.789.543	1.789.543
Vedligehold, 6 % af investering	987.000	1.045.590	1.065.120
Opgradering		1.162.500	2.325.000
Driftsindtægter - Årligt	**8.161.963**	**9.965.000**	**17.637.500**
Biogas	7.961.963	9.765.000	17.437.500
Anslået besparelse ved mindre slamhåndtering	200.000	200.000	200.000
Netto driftsindtægt	**5.385.420**	**5.967.367**	**12.457.837**
Simpel tilbagebet tid	3,1	2,9	1,4

I tabel 3 er effekter fra håndtering af en mindre slammængde estimeret og en eventuel højere tørstof efter afvanding er ikke indregnet.

Hvis der indføres hydrolyse og termofil drift vil det ikke resultere i et bedre driftsresultat (potentiel indtægt fra EL salg i dag 5.9 millioner kr), men vil resultere i en forbedret udnyttelse af tilgængelige ressourcer.

Der skal dog tages det forbehold at hydrolysepotentialet bør testes eksperimentelt før en eventuel ombygning påbegyndes, så det sikres at potentialet er korrekt estimeret.

Konklusionen er, at det ser ud til at Spildevandscenter Avedøre opnår driftsmæssig status quo ved at indføre seriel termofil drift med hydrolyse

8.1.2.1.8 Lynetten renseanlæg

Renseanlægget Lynetten producerer ca. 405 ton primærslam om dagen med en tørstof på 6,5%. Derudover produceres ca. 825 ton sekundærslam (bioslam) om dagen med en tørstof på 3,5%. I dag fødes de tre biogasreaktorer (tankvolumen 6.000 m^3 pr. stk.) med i alt ca. 900 ton slam om dagen. De 900 ton fordeles på 405 ton primærslam og 495 ton sekundær slam. Dvs. ca. 330 ton sekundær slam går udenom biogasreaktorerne.

I dag er metanindholdet ca. 63% i biogassen og ifølge det grønne regnskab 2008 produceredes der 6.330.381 m^3 biogas pr. år svarende til 3.988.140 m^3 metan.

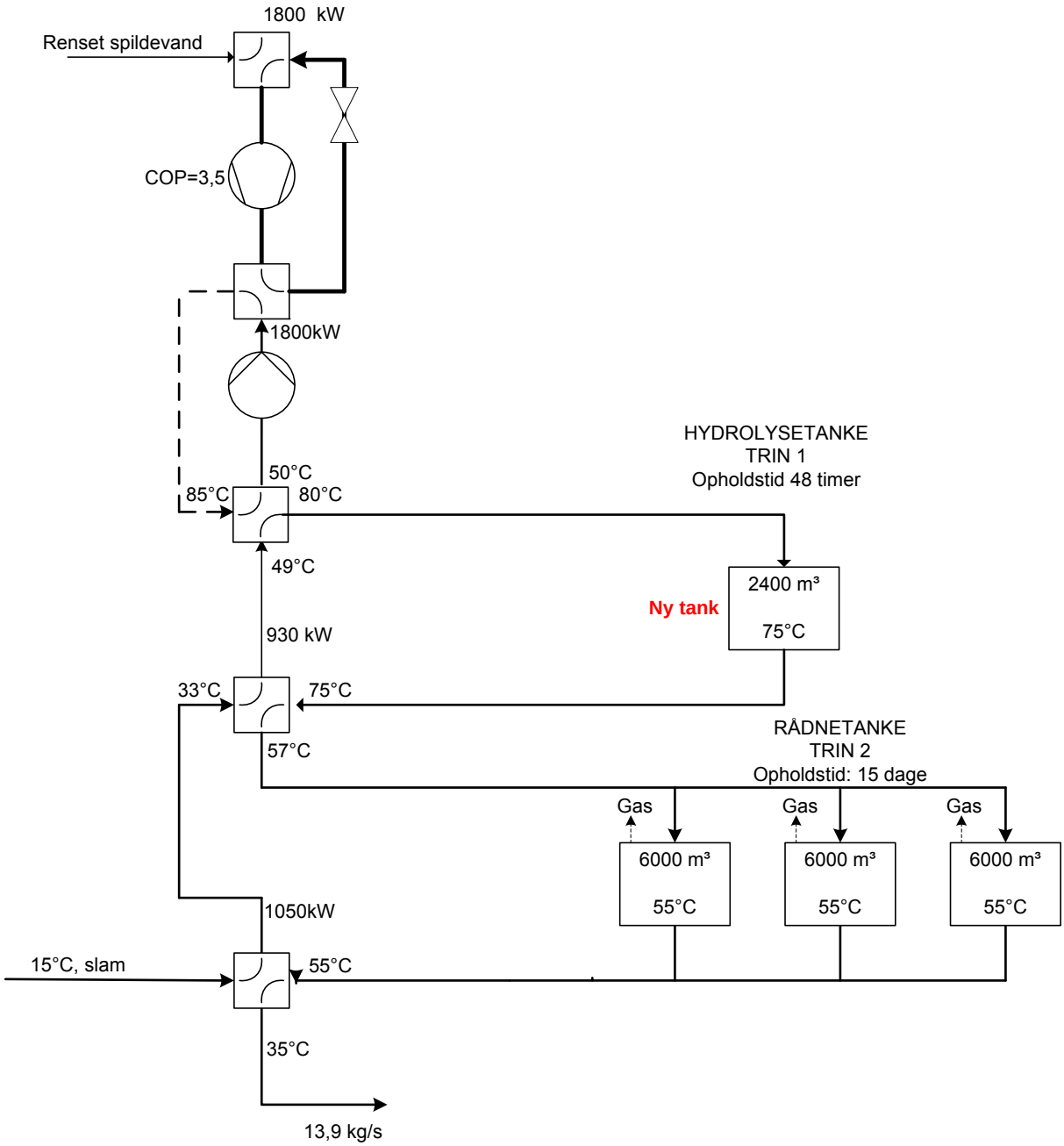
Hvis Lynetten vælger at ændre fra mesofil drift af udrådningstankene til termofil drift vil de formentligt kunne få en lige så effektiv udrådning som nu med en opholdstid på kun 15 dage. Dvs. reaktor kapaciten øges med ca. 33%, hvorfor der kan udrådnes ca. 33% mere slam.

Sænkes opholdstiden fra 20 dage til 15 dage betyder det at der kan behandles ca. (18.000/15) 1200 ton vådt slam pr dag ved termofil drift i forhold til de ca. 900 ton vådt slam der behandles i dag. I det videre regnes med at al slam, dvs. 1230 ton kan behandles ved termofil drift.

Antages det, at der er termofil drift og tilsættes (1230-900) 330 ton slam ekstra til biogasanlægget af den sekundære slam vil biogasproduktionen potentielt kunne øges med: (330.000 kg slam/dag*0,025*0,15m^3 metan/kg VS) 1238 m^3 metan/dag. Dette svarer til stigning i metanproduktionen på ca 11% fra Lynetten. Grunden til at en kapacitetsøgning på ca. 30% kun giver en metanøgning på 11% er, at Lynetten allerede udrådner al den primære slam. Den primære slam giver, jf. afsnit 8.1.2.1.4, et højere biogasudbytte end den ekstra sekundære slam der udrådnes som følge af kapacitetsforøgelsen.

For at kunne opvarme 1230 ton slam pr dag til termofil drift skal der tilføres en energimængde der svarer til en ekstra opvarmning af slammet på 31°C. Dvs. der skal tilføres ca. (1.230.000kg/(24*3600)*4,18 kJ/kgK*12K) 714kW for at opvarme al slammet fra mesofil til termofil drift. Dette kan klares med en varmepumpe med en COP på 3,5, dvs strømforbruget ville være: (714/3,5) 204 kWh/h.

Fjernes 50% af VS fra de ekstra 330 ton sekundære slam der kan udrådnes efter indførsel af termofil drift, betyder det at slammængden reduceres med (330 ton slam/dag x 0,025%VS X 0,5 effektivitet x 368) 1505 ton/år



Figur 6 Principskitse for hvordan slamudrådningen på Lynetten kunne ændres så den drives som en termofil process med hydrolyse som gennemsnitsbetragtning med en indgående slamtemperatur på mellem 10 og 20°C.

Hvis der ønskes en bedre udrådning af slammet kunne der indføres en hydrolyse på Lynetten. Implementeringen af en sådan hydrolyse kunne se ud som anført i figur 3. Dvs. på Lynetten skal der investeres i rørvarmevekslere, nye rørføringer, varmepumpe, hydrolysetank og evt. ekstra isolering af tanke. Det ekstra biogasudbytte antages at være på 20% dvs. ((3.988.140 m^3 metan/år+1238m^3 metan/dag*365)*0,2) 888.122 m^3 metan/år. I dette eksempel regnes der med, at en varmepumpe erstatter egen opvarmning af biogasreaktorer fra biogasmotor. Varmen fra biogasmotoren går i stedet til fjernvarme. I dag anvendes 48 MWh pr dag til eget forbrug, det anslås at minimum halvdelen går til opvarmning af biogasreaktorerne. Dvs. 24 MWh kan sælges som fjernvarme. Derudover reduceres slammængden med 1505 tons/år.

De økonomiske konsekvenser ved indførelse af termofil drift og hydrolyse er anskueliggjort i tabel 4. Netto driftsindtægterne skal sammenlignes med en potentiel driftsindtægt fra varmesalg i dag på 6,3 millioner kr.

Tabel 4. Økonomiske konsekvenser for RL ved indførelse af hydrolyse og forventede økonomiske konsekvenser for RL ved alternative anvendelsesformer af biogassen. Forventet pris på biogas som bygas er 4,2 kr/m^3 og til transport 7,5 kr/m^3. Dog er tilskudsreglerne ikke besluttet endnu, hvorfor prisfastsættelse er usikker. Prisen på opgradering er taget fra kilde 24.

	Varmesalg (kr)	Kraftvarme (kr)	Bygas (kr)	Transport (kr)
Investeringer	**23.700.000**	**36.700.000**	**25.937.815**	**26.683.754**
Varmepumpe (1,8 MW) incl installation	6.300.000	6.300.000	6.300.000	6.300.000
Hydrolysetank (2.400 m3) incl installation	4.800.000	4.800.000	4.800.000	4.800.000
Slamvekslere, 4 stk	4.600.000	4.600.000	4.600.000	4.600.000
Rør, pumper, Installation og design	8.000.000	8.000.000	8.000.000	8.000.000
Opgradering	0	1.000.000	2.237.815	2.983.754
Gasmotor-2,4 Mwe	0	12.000.000	0	0
Driftsudgifter - Årligt	**3.899.829**	**4.679.829**	**7.735.676**	**10.474.336**
El til drift af varmepumpe	2.477.829	2.477.829	2.477.829	2.477.829
Vedligehold, 6 % af investering	1.422.000	2.202.000	2.593.782	2.668.375
Opgradering			2.664.066	5.328.132
Driftsindtægter - Årligt	**10.277.011**	**19.998.188**	**24.130.154**	**41.712.990**
Biogas	8.525.011	18.246.188	22.378.154	39.960.990
Ekstra fjernvarmesalg ved anvendelse af varmepumpe	1.752.000	1.752.000	1.752.000	1.752.000
Netto driftsindtægt	**6.377.183**	**15.318.359**	**16.394.478**	**31.238.654**
Simpel tilbagebetalingstid	3,7	2,4	1,6	0,9

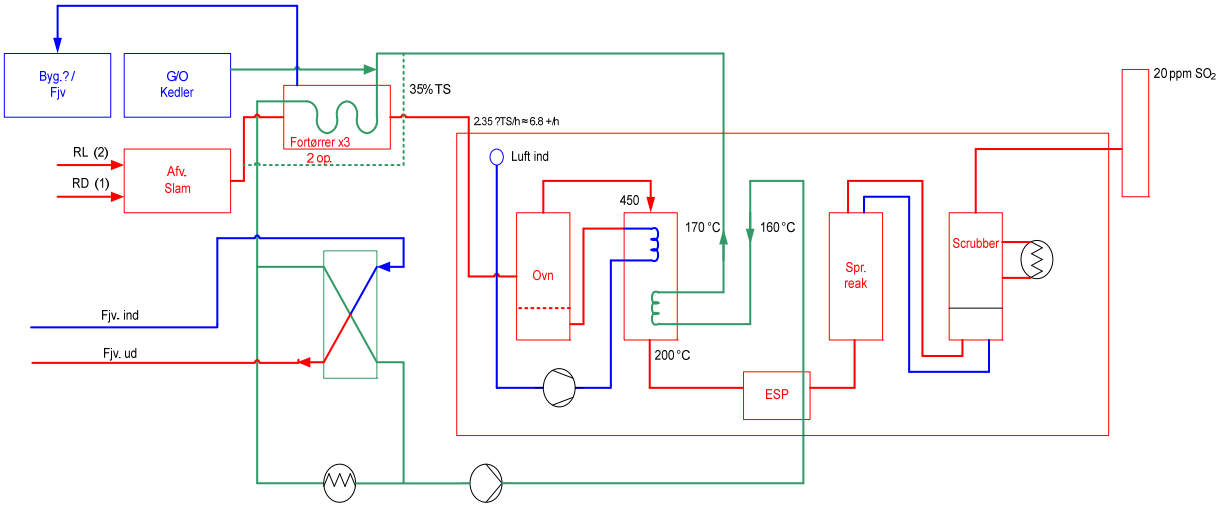
Konklusionen er, at hvis der skal ændres på Lynetten er det relevant at inddrage om den nuværende kedel skal ændres til gasmotor eller gasses skal afsættes på anden vis. Dette fordi indtægten ved fjernvarme er relativ lille i forhold til indtægten fra en biogasmotor. Ellers viser det sig at både en ændring til termofil drift og en kombination af hydrolyse og termofil drift vil give et positivt bidrag til driftsindtægterne før investeringer beregnes. Der skal dog tages det forbehold, at hydrolysepotentialet bør testes eksperimentelt før en eventuel ombygning påbegyndes, så det sikres at potentialet er korrekt estimeret

8.1.2.2 Slamtørring

8.1.2.2.1 Indledning

Som tidligere nævnt er de tre referenceanlæg alle udstyret med biogasanlæg som udrådner alt det primære slam. Det sekundære slam udrådnes ligeledes helt eller delvist. Efter udrådningen koncentreres slammet op til en tørstof på ca. 20%. Slammet fra alle tre referenceanlæg brændes, men for at slam skal kunne brænde, uden at der skal støttefyres med andre brændstoffer (biogas, olie eller naturgas) skal tørstof minimum være 35%.

For at opnå dette tørstof niveau køres slammet gennem en tørreenhed, jf Figur 7. I de typiske tørreenheder opvarmes slammet med hedtvand fra slamforbrændingen med en temperatur på mellem 160 og 200°C. Herved opvarmes slammet fra ca. 10 - 20°C til over 85°C hvorved vand fordampes så tørstof stiger til 35% (Værdien er oplyst af Rambøll som er i gang med at designe ny slamforbrændingsenhed på Lynetten).



Figur 7 Konceptuel illustration af slam- og energistrømme på slamforbrændingsanlægget ved Renseanlæg Lynetten.

Der skal fjernes ca. 430 kg vand per tons slam der tilføres tørreren. Derfor er det interessant om der findes teknologier hvor lavenergi varme på ca. 80°C kan benyttes til opvarmning/fordampning af slam hvorved en større del af energien fra slamforbrændingen kan benyttes til fjernvarme med en fremføringstemperatur på ca. 90°C. I undersøgelsen indgår også overvejelser om økonomien i en sådan løsning.

For at kunne fordampe større mængder vand ved en slamtemperatur på ca. 70°C kan man med fordel benytte sig af vakumtørring som beskrives nedenfor.

8.1.2.2.2 Vakumtørring

Vakuum-tørring af slam kan foretages ved temperaturer på 60-80 ºC (ved 0,1-0,2 bar). Dvs. der er to store energiforbrugere i vakumtørring, en varmekreds til opvarmning af slam og en vakumpumpe som sænker trykket i tørreren således at vand koger ved en lavere temperatur. Vakumpumpen fjerner ligeledes de gasser der umiddelbart ikke kan rekondenseres.

8.1.2.2.3 Tørringsudstyr på markedet

Der findes flere forskellige typer af vakumtørringsudstyr på det danske marked og nedenfor er listet et udvalg af typer:

1. Vakuum-tromletørrer/skivetørrer, anvendt i pilotforsøg. Ingen referencer på anlæg i drift på rensningsanlæg. Udstyr kan leveres af AB Torkapparater, Sverige eller Haarslev Industries (Continuous Condi Drier). Temperaturer 60-80ºC.
2. Vakuum assisted filter press, i kommerciel drift. F.eks. Siemens J-Vap (Tidl. U.S. Filter, USA). Temperaturer 60-80ºC.

Der findes også tørringsudstyr som ikke baserer sig på vakumtørringsprincippet med ved at fordampe vandet ved dets normale kogepunkt. Nogle eksempler er nævnt nedenfor:

a. “Paddle dryer”, i kommerciel drift på rensningsanlæg. leverandør Komline-Sanderson. Opvarmes med damp eller olie. Har ifølge leverandør termisk effektivitet omkring 98%.
b. ”Disc drier” (svarer i store træk til ”paddle dryer”), i kommerciel drift på rensningsanlæg. Leverandør Haarslev Industries (Tidl. Atlas-Stord). Opvarmes med damp. Har formentlig termisk effektivitet som paddle-dryer, dvs. 98%.

I forbindelse med varmepumper, der kan levere vand op til 80ºC er det 1) og 2) der er relevante.

8.1.2.2.4 Status på vakumtørring i Skandinavien

Der er ingen lav-temperatur vakuum-tørringsanlæg i drift i Skandinavien. Der er tidligere udført pilotforsøg med vakuum-tørring af slam i Danmark (18), Finland og Sverige (19). Forsøgene er udført i temperaturområderne 30-80ºC, se **Figur 8** herunder, hvor sammenhængen mellem tryk og fordampningstemperatur er vist. Der skal dog erfaringsmæssigt anvendes en større drivende temperaturforskel for at kompensere for nedsat varmeoverførsel, utætte pakninger m.m.

De udførte forsøg har teknisk set været vellykkede og har bekræftet at:

- Teknikken hører til de driftøkonomisk mest rentable
- Teknikken har en høj CO_2 -reduktion

Det konkluderes også at der er behov for:
Yderligere pilotforsøg
og/eller:
Fuld-skala demonstrationsanlæg

Figur 8. Sammenhæng mellem vandtemperatur og tryk.

8.1.2.2.5 Scenarier i forbindelse med referenceanlæg

I dag drives slamforbrændingen på de tre referenceanlæg på følgende måde:

- Koncentreret slam (ca. 20% TS) fra Damhusåen transporteres med lastbil til Lynetten renseanlæg hvor det tørres til ca. 35% TS sammen med slam fra lynetten renseanlæg. Herefter brændes slammet

- På Spildevandscenter Avedøre tørres og forbrændes slammet lokalt

I forbindelse med de tre referenceanlæg er der identificeret to scenarier der kunne være interessante at foretage en mere detaljeret gennemgang af.

I det første scenarie undersøges spørgsmålet om der er en fordel ved at opvarme slammet på Lynetten fra de ca. 20°C slammet har når det er koncentreret til ca. 70°C inden slammet går ind i fortørreren. Dette scenarie er beskrevet i afsnit 8.1.2.2.6.

Det andet interessante scenarie er, om det kan betale sig at tørre slam fra Damhusåens Renseanlæg lokalt således at fortørringen på Lynetten bliver mindre varmekrævende. Begge muligheder betyder, at der vil være en mulighed for at udnytte en højværdi varme til andre formål. Da Lynetten leverer fjernvarme ved 90°C har de en mulighed for at udnytte denne højværdi varme. Dette scenarie er beskrevet i afsnit 8.1.2.2.7.

8.1.2.2.6 Opvarmning af slam inden tørring

En mulighed er at forvarme slammet på Lynetten inden det går ind i fortørreren fra en temperatur på ca. 20°C til ca. 70°C. Dette vil betyde at en større del af hedtvandet fra slamforbrændingen kan benyttes til fjernvarme.

Eksempel på energiregnskab ved opvarmning af slam til 70°C inden fortørring:

Daglig slammængde Lynetten, 20% TS:	254 t (50,7 t TS)
Energibehov ved opvarmning til 70°C, energieffektivitet 90%, netto: (254.000kg/dag/(24*3600)s/dag)*4kJ/kgK*50K)/0,90	652 kWh/h
Elforbrug ved brug af varmepumpe, COP-faktor 3,8: (652kWh/h/3,5)	172 kWh/h
El-udgift til varmepumpe: (172kwh/h*0,55 kr/kWh*365*24)	828.696 kr
Salg af sparet hedtvand til fjernvarme (95% effektiv): ((254.000kg/dag/(24*3600)s/dag)*4kJ/kgK*50K)*0,95*24*365*0,2kr/kWh	978.606 kr
Øget driftsindtægt pr år (3000-2350)*365	149.910 kr

Umiddelbart virker driftsindtægten til at være lille i forhold at der skal investeres i en forholdsvis stor varmepumpe og vekslere. Derudover må forventes vedligehold af vekslere. Konklusionen må være, at dette ikke er attraktivt med de nuværende priser på strøm og fjernvarme.

8.1.2.2.7 Scenarie 2 tørring af slam på Damhusåens rensningsanlæg inden det sendes videre til forbrænding på lynetten renseanlæg

Eksempel på økonomiske effekter ved tørring af slam til 85% TS på RD er vist i tabel 5 ved en daglig slamproduktion der i dag bortkøres til Lynetten på 79 t (15,2 t TS).

Tabel 5. Økonomiske konsekvenser af slamtørring på RD. Investeringerne i slamtørringsanlæg (3,3 t/time slam m. 19% TS tørret til 85% TS) er baseret på data fra kilde18 og 19

	Kvantificerbare omkostninger (kr)	Ikke kvantificerbare data
Investeringer	**23.737.000**	
Varmepumpe	2.737.000	
Bygning, fundament, el og tilslutninger	1.000.000	
Transportører, slamfødeudstyr	3.000.000	
Maskinanlæg (tørrer, kondensor, vakuumpumpe)	15.000.000	
Diverse omkostninger	2.000.000	
Driftsudgifter - Årligt	**2.686.001**	
El til drift af varme- og vakumpumpe	1.261.781	
Vedligehold, 6 % af investering	1.424.220	
Driftsindtægter - Årligt	**2.827.261**	
Besparelse ved bortkørsel af mindre volumen, 4x14 t á 1300 kr (5200 kr x365)	1.898.000	Miljømæssigt (støj, røg og trængsel) spares dagligt fire tunge transporter gennem København (4x26,4 km).
Besparelse på tørring på Lynetten, sælges til fjernvarme	929.261	
Netto driftsindtægt	**141.260**	

Ved tørring af slammet dannes der ca. 2,5 ton vanddamp i timen. Dette kondenseres og da kondensatet vil have et meget lavt tørstofindhold forventes det (efter varmegenvinding f.eks. ved opvarmning af rådnetank) delvist at kunne erstatte vandværksvand til tekniske anvendelser som f.eks. køling og rengøring. Denne mulige besparelse er ikke prissat.

Prissætning af besparelsen ved mindre bortkørsel af slam er anslået.

Ovenstående grove overslag, hvor forrentning af investering og udgifter til drift- og vedligehold ikke er medregnet, antyder at det for tiden næppe er rentabelt at lægge tørringen af slam fra Damhusåens Renseanlæg lokalt i stedet for på Lynetten.

Miljømæssigt (støj, røg og trængsel) er det ikke uvæsentligt, at der dagligt spares fire tunge transporter gennem København (4x26,8 km).

I forbindelse med andre anlæg, hvor slammet køres over længere afstande til forbrændingsanlæg eller udbringning på marker, kan denne faktor have større betydning.

8.1.2.2.8 Konklusion

Det ser ud til at en foropvarmning af slammet før fortørreren med energi fra en varmepumpe på RL og en vakuumtørring af slam på Damhusåen begge vil give et lille positivt difrag til driftsindtjeningen. Begge scenarier har dog forholdsvis høje investeringer, hvilket betyder at de først er interessante når anlæggene skal fornys eller ændres.

8.1.3 Referencer

1. Bolzonella D, PAvan P, Battistoni P and Cecchi F. 2005. Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge: influence of the solid retention time in the wastewater treatment process. Process Biochemistry, 40, 1453-1460

2. Zhao HW and Viraraghavan T. 2004. Analysis of the performance of an anaerobic digestion system at the Regina wastewater treatment plant. Bioresource Technology, 95, 201 – 207

3. Song YC, Kwon SJ and Woo JH. 2004. Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic- and thermophilic digestion. Water Research, 28, 1653 – 1662

4. Gavala HN, Yenal U, Skiadas IV, Westermann P and Ahring BK. 2003. Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature. Water Research, 27, 4561 – 4572

5. Rubia MA, Romero LI, Sales D and Perez M. 2005. Temperature conversion (mesophilic to thermophilic) of municipial sludge digestion. Environmental and Energy Engineering, 51 2581 - 2586

6. Mottet A, Steyer JP, Deleris S, Vedrenne F, Chauzy J and Carrere H. 2009. Kinetics of thermophilic batch anaerobic digestion of thermal hydrolysed waste activated sludge. Biochemical Engineering Journal, 46, 169 – 175.

7. GE H, Jensen PD and Batstone DJ. 2010. Pre-treatment mechanisms during thermophilic-mesophilic temperature phased anaerobic digestion of primary sludge. Water Research, 44, 123 – 130.

8. El-Hadj TB, Dosta J and Mata.Alvarez J. 2007. Start-up and HRT influence in thermophilic and mesophilic anaerobic digesters seeded with waste activated sludge. Chem, Biochem. Eng, 21, 145 – 150.

9. Angelidaki I and Boe K. 2009. Serial CSTR digester configuration for improving biogas production from manure. Water Research, 43, 166 – 172.

10. Zabranska J et al. 1999. The activity of anaerobic biomass in thermophilic and mesophilic digesters at different loading rates. Wat Sci Technol, 40, 231 – 236.

11. Dansk Vand nr. 4 Juni 2008

12. Sundin AM. 2008. Disintegration of sludge – a way of optimizing anaerobic digestion. 13th European Biosolids & Organic Resources conference & workshop.

13 Hansen KH, Angelidaki I og Ahring BK. 1996. Omsætning af svinegylle I thermofile biogasanlæg. Delrapport "Metoder til forøgelse af gasudbyttet fra de tungt omsættelige dele af det organiske stof i danske biogasanlæg og undersøgelser over svinegylles udrådningsegenskaber" (Eksamensprojekt) finansieret af Energistyrelsens Forskningsprogram EFP-95 j. nr. 1383/95-0002.

14. Wang G, Gavala HN, Skiadas IV and Ahring BK. 2009. Wet explosion of wheat straw and codigestion with swine manure: Effect on the methane productivity. Waste Management, 29, 2830 – 2835.

15. www.cambi.no

16. Skøtt T. Biogasanlæg: Markant større gasproduktion med hydrolyse. Maj 2009. Nyhedsbrev om forskning I bioenergi nr. 2, side 2-3.

17. Jørgensen PJ. 2008. Biogas – Grøn Energi. Kommunikationscenter for naturvidenskab og jordbrug. Planenergi

18. Energistyrelsen: Energieffektiv vakuumtørring af slam med fjernvarme. Rapport, Cowi, Juni 2000

19. Värmeforsk: Demonstration af vakuumtorkteknikken på skogsindustrielt slam. Rapport, Anders Eklund, Januar 2003

20. Pöpel HJ and Fischer A. 1998. Combined influence of temperature and process loading on the effluent concentration of biological treatment. Wat. Sci. Tech., 38, 129 – 136.

21. Salvetti R, Azzellino A, Canziani R and Bonomo L. 2006. Effects of temperature on tertiary nitrification in moving-bed biofilm reactors. Water Reaearch, 40, 2981 – 2993.

22. U.S. EPA. 1993. Manual: Nitrogen removal. EAP/625/R-93/010, US EPA, Washington, D.C.

23. Kombination af vindkraft og varmepumpe til Varmeplan Århus, Ea energianalyse, Marts 2010

24. Jensen TK. 2009. Opgradering af biogas til naturgaskvalitet. Gasteknik nr. 4.

25. Steffensen C, Hansen KH. 2010. Anvendelse af varmepumper til fjernvarme med energi fra renset spildevand. Grontmij | Carl Bro.

9 Bilag 2

9.1 Memo

Anvendelse af varmepumper til fjernvarme med energi fra renset spildevand

6. august 2010
Projekt: 40.3283.08

Udarbejdet : Carsten Steffensen og Kaare Hvid Hansen

Kvalitetssikring : Sebastian Kristoffersen og Mads Klarskov

9.1.1 Indledning

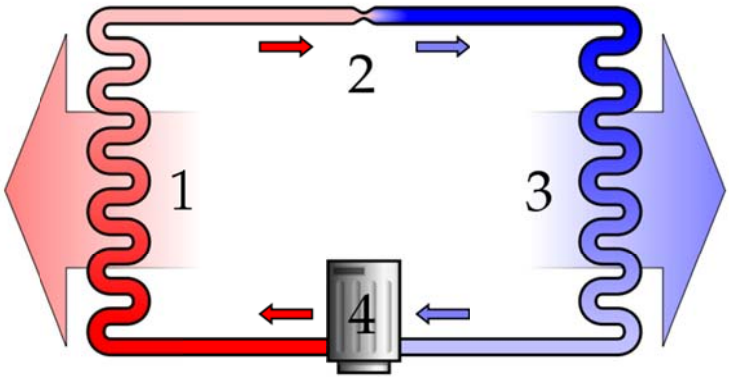
Formålet med dette memo er, at evaluere mulighederne for at anvende energien i renset spildevand til fjernvarme via en opgradering af temperaturen med en varmepumpe.

Først beskrives kort varmepumpens funktion og baggrunden for valg af kølemiddel. Herefter beskrives mulighederne for at anvende energien i det rensede spildevand til fjernvarme på Renseanlægget Lynetten (RL), Renseanlægget Damhusåen (RD) og Spildevandscenter Avedøre (SCA). Samt mulighederne for at anvende løsningerne generelt på spildevandsanlæg.

9.1.2 Kort indføring i varmepumpeprincip

9.1.2.1 Indledning

En varmepumpe fungerer populært sagt som et omvendt køleskab der ved hjælp af en kredsproces og et egnet kølemiddel cirkulerer i et lukket system. Figur 1 viser en principskitse af en varmepumpe.



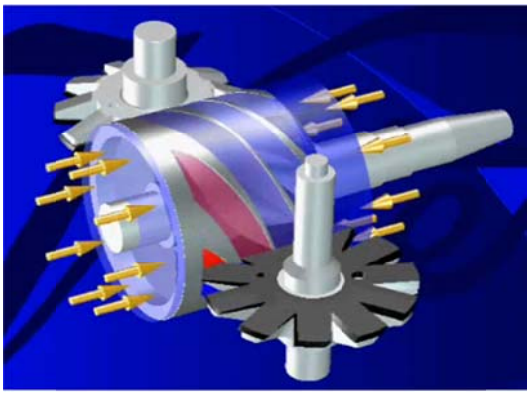
Figur 1. Principskitse af en varmepumpekreds. Med en COP på 4 betyder for hver 1 enhed tilført energi afgiver systemet 4 enheder termisk energi. 1: Leverede varmeenergi ved ønsket temperaturniveau (Kondensator); 2: Ekspansionsventil (Trykreduktion); 3: Opvarmning med overskudsvarme ved lavere temperaturniveau (Fordamper); 4: Drivenergi (Kompressor)

Varmepumpen optager varmeenergien fra et lavt temperaturniveau og omsætter denne varmeenergi via kredsprocessen og under tilføjelse af drivenergi (kompressoren) til varmeenergi ved et højere temperaturniveau, som kan anvendes til opvarmningsformål. I et køleskab bliver det lave energiniveau (varmekilden) omsat til varmeenergi via kredsprocessen og under tilføjelse af drivenergi (kompressoren) til varmeenergi ved et højere temperaturniveau. Denne højere varmeenergi bliver dog ikke udnyttet i et køleskab til varmeformål, men bliver bortledt på bagsiden af køleskabet. Overskudsvarme med lavere temperaturniveau fra industrielle processer kan varmegenvindes med varmepumpeanlæg og derved give mulighed for genanvendelse af varmeenergien med gode resultater. Afhængigt af temperaturniveauet på varmekilden og ønsket temperaturniveau på den leverede varmeenergi, vil mængden af den leverede varmeenergi være 2,5 – 8 gange større end den tilførte drivenergi [1]. Denne faktor kaldes COP (Coefficient Of Performance).

Det er teknisk muligt, at vende kredsen om, således at der kan leveres kølevand i stedet for vand til fjernvarme. Dette vil medføre en mindre ekstraomkostning grundet mindre designændringer. Endvidere er det ikke muligt at designe varmepumpen således, at den har optimal ydeevne for både opvarmning og køling. Det er dog ikke diskuteret yderligere i det følgende, da et behov for køling vil være betinget af lokale forhold og ligger udenfor scope af dette projekt.

Varmepumper til dansk privat opvarmning vurderes at udgøre omkring 40.000 enheder, hvorimod det svenske private markeder udgøre en faktor 10 gange så mange [2].

Effektive kompressorer på markedet i dag er for højere output temperaturer typisk twin skrue kompressorer. Men kompressorfabrikanten Vilter opererer med single skruekompressorer som er en åben kompressortype, det er ikke et særligt karakteristika for single screw kompressoren. Single skruekompressorens opbygning resulterer i, at den har nogle andre fordele end twin skruekompressoren. På nedenstående illustration (figur 2) ses det, hvordan single skruen er stabiliseret i forhold til aksiale kræfter. I begge ender af aksen er der sugetryk hvilket bevirker at de aksiale kræfter er afbalanceret.



Figur 2. Illustration af en single skruekompressor

Med single skrue er muligt at opnå væsentlig højere afgangstryk, trykforhold og trykforskel end med en almindelig twin skrue kompressor. Dette gør single skruekompressoren særdeles velegnet til varmepumpebrug, da det på den måde er muligt at konstruere en simpel varmepumpe i et stadie med en høj effektivitet.

9.1.2.2 Forskel/fordele – ulemper på et og totrins varmepumper

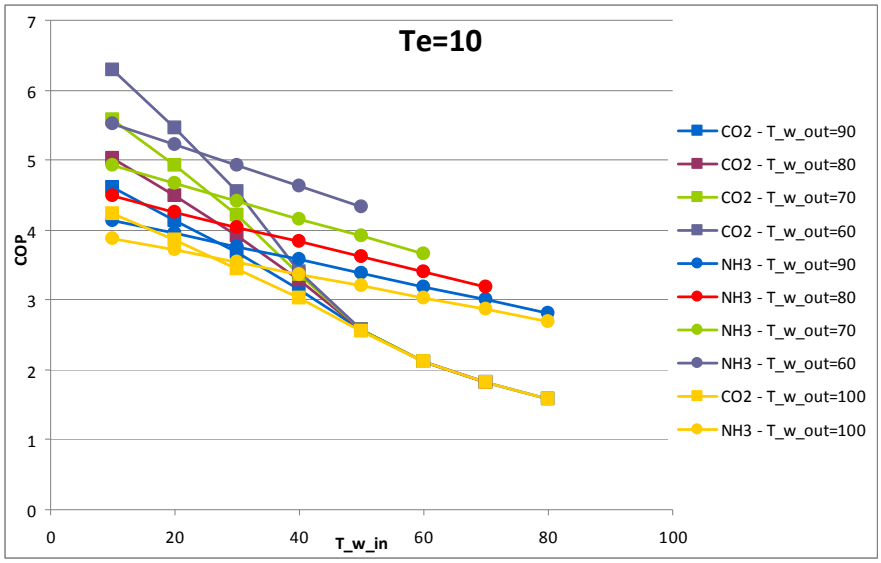
Ved behov for højere temperatur typisk over 75-80 grader kan det være formålstjenligt at benytte to kompressionstrin fordi det sætter høje krav til køling af olien, da temperaturen af denne typisk ikke bør være for høj for olien kan "cracke". Det ændrer ikke stort på COP, men investeringsmæssigt. Kompression i et trin med høje kompressionsforhold (Pud/Pind) medfører høje afgangstemperaturer, som kan være skadelig for olien. Ved for høj temperatur begynder olien at cracke. Investeringsmæsssigt er totrins varmepumper relativ dyre, men det kan være nødvendigt af hensyn til valg af standard komponenter som systemerne typisk bygges op af. En anden løsning kan være direkte brug af single skrue kompressor af typen Vilter som i et og samme trin kan levere kompression ved høje temperaturer >85°C. Twin skrue kan også bruges, men man skal vurdere afgangs gassens temperatur i begge tilfælde.

9.1.2.3 Kølemiddel valg

Ozonlagseffekt og drivhuseffekt på grund af utilsigtet udslip til atmosfæren af kølemiddeltyperne CFC, HCFC og HFC er baggrunden for, at man ikke ønsker at anvende dem i fremtidige nye kølesystemer. Klimaforskere har de seneste årtier fokuseret meget på disse kølemidlers drivhuseffekt og påvirkning af ozonlaget. Verden over har politikerne lyttet til forskningsresultaterne og forholdt sig til de scenarier, der er blevet opstillet. De pågældende kølemidler kaldes ofte syntetiske, fordi de fremstilles af kemikalieproducenter, mens deres fremtidige alternativer ofte kaldes naturlige, fordi de eksisterer i naturen i forvejen. I Danmark har politikere og myndigheder valgt at regulere og udfase kølemidler med betydelig indflydelse på ozonlag og drivhuseffekt. Kølemidler af typen CFC er total forbudt. End ikke gamle anlæg med CFC som kølemiddel er tilladt. HCFC med betydelig ozonlagseffekt er ikke længere tilladt i nye køleinstallationer. Kølemidler med betydelig drivhuseffekt er pålagt en adfærdsregulerende afgift, og det blev forbudt at anvende kølemiddel af HFC-typen til nye kølesystemer med mindre end 150 g kølemiddelfyldning efter 1/1-2006 og med mere end 10 kg kølemiddelfyldning efter 1/1-2007.

Verdenssamfundet arbejder på at reducere forbruget af kølemidler med ozonlags- og drivhuseffekt, og i Europa har EU-kommissionen fastlagt ensartede regler for anvendelse af industrielle drivhusgasser såsom HFC.
Naturlige kølemidler har ingen eller ubetydelig ozonlagseffekt og drivhuseffekt. Typebetegnelsen HC står for HydroCarboner. Det er disse naturlige kølemidler alle arbejder intensivt på at anvende i fremtidens kølesystemer. De mest anvendte kølemidler af disse typer er p.t. Propan og Ammoniak (NH_3) [3].

CO_2 og NH_3 anses for værende et fremtidssikret kølemedie, som foruden at være et naturligt kølemiddel også kan opnå høje COP værdier. En sammenligning på COP værdier af CO_2 og NH_3 som kølemiddel er vist i Figur 3.

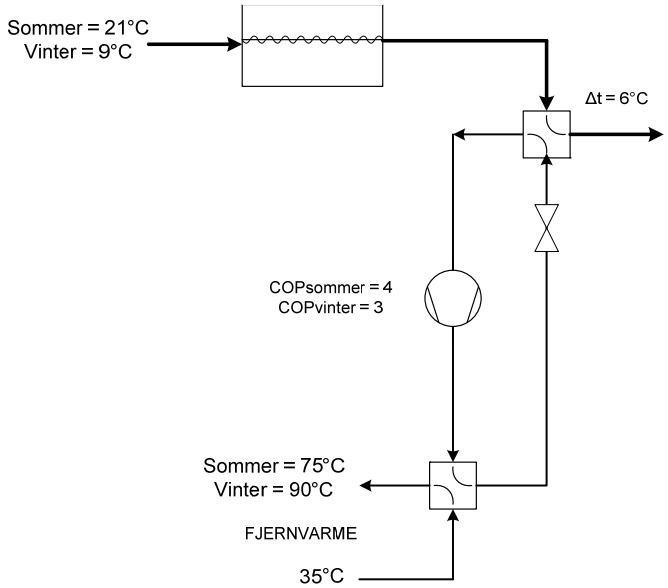


Figur 3. Grafen viser sammenhæng mellem COP ind og udgangstemperatur for vand med NH_3 og CO_2 med isentropisk virkningsgrad på 0,7. Te = 10 er ved en fordampningstemperatur på 10°C. Betingelserne vist i grafen er ikke identiske med forholdene anvendt i fjernvarmescenariet.

Ud fra figur 3 ses det eksempelvist at hvis indgangstemperaturen for vand er på 20°C og udgangstemperatur på 70°C med NH_3 og fordampningstemperatur på 10°C giver en COP på ca. 4,7, men for CO_2 giver COP ca. 5. Tilsvarende øges udgangstemperaturen til 90°C ved samme betingelser falder COP værdien til 4,0 og 4,1 med hhv. NH_3 og CO_2 som kølemiddel.

9.1.3 Potentielle nyttiggørelsesformer af renset spildevand til fjernvarme

Erfaringer fra andre spildevandsudnyttelsesprojekter (Helsingborg [5] og Frederikshavn [6]) viser at det er muligt at udnytte energien spildevandet til fjernvarme via en opgradering i en varmepumpe. En principskitse af et system kunne se ud som vist i figur 4.



Figur 4. Principskitse for udnyttelse af energien i renset spildevand til fjernvarme.

Det har vist sig, at der kan udnyttes en energimængde der temperaturmæssigt svarer til en sænkning på mellem 5-6 grader. Udnyttes dette potentiale fuldt (6°C) giver de tre spildevandscentre følgende kapaciteter:

- RL 58 MW, ved 2,3 m^3/s
- RD 28 MW, ved 1,1 m^3/s
- SCA 26 MW, ved 1,0 m^3/s

Anlæg af disse størrelser er og dimensioner er overordentlige store og vil antage byggearealer mellem 1500 og 3000 m^2. Hertil kommer pumpestationer og brønde samt afledningsfaciliteter. Anlægsinvesteringerne indeholder bygningsdele og anlægsfaciliteter, undtaget fjernvarmetilslutninger fra varmepumpestationen til fjernvarmeledningen.

Tilslutningen til spildevandet vil typisk være ved eksisterende pumpestationer, som skal udbygges med opsamlingsbrønde eller brug af eksisterende pumpebrønde. Anlæg i denne størrelse forudses at være beliggende forholdsvis tæt på spildevandet. Det gør ingen nævneværdig forskel på vandtemperaturen hvis spildevandet benyttes før eller efter efterklaringstanke, da varmetab og varmeoptag er stort set ens. I tabel 1, er de økonomisk effekter af en installation af varmepumper på RL, RD og SCA vist. Det er forudsat, at fremføringstemperaturen i fjernvarmen skal være 90°C i vinterperioden og 75°C i sommerperioden, således som det er i dag på RL. Dette betyder, at varmepumpens COP vil være på 3,0 om vinteren og på 4,0 om sommeren. Dvs. den gennemsnitlige COP vil være omkring 3,5.

Tabel 1. Økonomiske effekter af installation af varmepumper til opgradering af energien fra renset spildevand til fjernvarme med en fremføringstemperatur på 90°C om vinteren og 75°C om sommeren. I investeringen er der ikke taget hensyn til tilslutning til fjernvarmenet. Følgende nøgletal er anvendt (Afregningspris fjernvarme 74 kr/GJ; Varmeafgift 49 kr/GJ ved en gennemsnitlig COP på 3,5 [4], Salg af tegningsret for energibesparelse[8] 0,375 kr/kWh, gennemsnitlig EL pris 0,55 kr/kWh.

	RL	RD	SCA
Termisk energipotentiale (MW)	58,85	28,23	26,56
Termisk energipotentiale (kWh)	515.533.333	247.316.667	232.686.667
Termisk energipotentiale (GJ)	1.855.920	890.340	837.672
ENGANGSINDTÆGT	**193.325.000**	**92.743.750**	**87.257.500**
Potentiel salg af tegningsret til energibesparelse (kr)	193.325.000	92.743.750	87.257.500
DRIFTSINDTÆGTER	**59.654.571**	**28.618.071**	**26.925.171**
Bruttoindtægter ved salg af energi (kr/år)	176.577.531	84.709.491	79.698.507
Afgift pr leveret varme (kr/år)	116.922.960	56.091.420	52.773.336
DRIFTSUDGIFTER	**93.371.057**	**44.792.872**	**42.143.153**
Elforbrug til drift af varmepumpe (kr)	81.012.381	38.864.048	36.565.048
Ekstra vedligehold (6% af investering) (kr)	12.358.676	5.928.824	5.578.105
NETTO ÅRLGT TIL FORRETNING AF INVESTERING (kr)	**-33.716.485**	**-16.174.800**	**-15.217.981**
INVESTERINGER	**205.977.930**	**98.813.737**	**92.968.417**
Investering i varmepumpe etc (nøgletal) (kr)	205.977.930	98.813.737	92.968.417
Afskrivning pr år (kr)	13.731.862	6.587.582	6.197.894

Ud fra tabel 1 ses det, at ved den nuværende afgiftsstruktur er det ikke økonomisk fordelagtigt at udnytte energi fra det rensede spildevand til fjernvarme.

Med den nuværende afgiftsstruktur skal fremføringstemperaturen være på omkring 65°C (se tabel 2) før der er en rimelig økonomi i at udnytte energien fra det rensede spildevand til fjernvarme. En så forholdsvis lav temperatur kan formentlig ikke udnyttes direkte til fjernvarme. Kan strømmen af varmt vand fra varmepumpeløsningen lokalt kombineres med en forbrænding af eksempelvis affald, kunne energien herfra udnyttes til kun at øge temperaturen de sidste 15 - 30°C og herved undgå afbrænding af fossile brændstoffer til fjernvarme.

[8] Forsyningsselskaber har forpligtet sig til at levere energibesparelser. Udnyttelse af spildvarme fra rensningsanlæg til fjernvarme udgør en sådan energibesparelse i forhold til generering af fjernvarme med fossile brændstoffer. Det vurderes endvidere, at med indførelsen af de nye regler for energibesparelse (virkning fra 2011) har en tegningsret ved udnyttelse af spildvarme til fjernvarmeformål en værdi på 0,375 øre/kWh

Tabel 2. Økonomiske effekter af installation af varmepumper til opgradering af energien fra renset spildevand til fjernvarme, hvor fremføringstemperaturen er hhv. 75°C og 65°C. I investeringen er der ikke taget hensyn til tilslutning til fjernvarmenet. Følgende nøgletal er anvendt (Afregningspris fjernvarme 74 kr/GJ; Varmeafgift 42 kr/GJ ved en gennemsnitlig COP på 4,0 (75°C); Varmeafgift 39 kr/GJ ved en gennemsnitlig COP på 4,5 (65°C); [4], Salg af tegningsret for energibesparelse 0,375 kr/kWh, gennemsnitlig EL pris 0,55 kr/kWh.

	Generel case 75°C	General case 65°C
Termisk energipotentiale (MW)	11,42	11,42
Termisk energipotentiale (kWh)	100.000.000	100.000.000
Termisk energipotentiale (GJ)	360.000	360.000
ENGANGSINDTÆGT	**37.500.000**	**37.500.000**
Potentiel salg af tegningsret til energibesparelse (kr)	37.500.000	37.500.000
DRIFTSINDTÆGTER	**14.811.429**	**16.200.000**
Bruttoindtægter ved salg af energi (kr/år)	34.251.429	34.251.429
Afgift pr leveret varme (kr/år)	19.440.000	18.051.429
DRIFTSUDGIFTER	**16.147.260**	**14.619.482**
Elforbrug til drift af varmepumpe (kr)	13.750.000	12.222.222
Ekstra vedligehold (6% af investering) (kr)	2.397.260	2.397.260
NETTO ÅRLGT TIL FORRETNING AF INVESTERING (kr)	**-1.335.832**	**1.580.518**
INVESTERINGER	**39.954.338**	**39.954.338**
Investering i varmepumpe etc (nøgletal) (kr)	39.954.338	39.954.338
Afskrivning pr år (kr)	2.663.623	2.663.623

9.1.4 Konklusion

Med den nuværende afgiftsstruktur er det ikke økonomisk attraktivt at anvende en varmepumpe til at udnytte energien fra det rensede spildevand direkte til fjernvarme. Hvis der skal være et incitament til at anvende varmepumper til CO_2 neutral generering af fjernvarme, kunne man vælge at sænke eller fjerne varmeafgiften når der anvendes grøn strøm, fra eksempelvis biogasmotorer, vindmøller, havmøller etc.

En økonomisk attraktiv løsning kunne være at kombinere varmepumpeløsningen med eksempelvist et affaldsforbrændingsanlæg, således at forbrændingsanlægget opvarmer vandet de sidste 15 – 30°C til den endelige fjernvarmekvalitet.

9.1.5 Referencer

[1] Teknologisk Institut http://www.varmepumpeinfo.dk/8403
[2] Nordisk folkecenter for Vedvarende energi - http://www.folkecenter.net/default.asp?id=33379
[3] HFC-Fri Køling - http://www.hfc-fri.dk
[4] Kombination af vindkraft og varmepumpe til Varmeplan Århus, Ea energianalyse, Marts 2010

[5] Optimal udnyttelse af varmeenergi fra spildevand (Rapportering af fase 1) Februar 2010. Ved mads Klarskov.