



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

EnergiPlus

Afprøvning af nyt koncept for biogasproduktion fra industri-spildevand

MUDP-rapport

April 2018

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion: Henrik Grøttner, SDU

ISBN: 978-87-93710-07-8

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

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	6
Summery	9
1. Indledning	11
1.1 Baggrund	11
1.2 Formål	11
1.3 Tilgang	12
2. Teknologi	13
2.1 Teknologien anaerob membran bio-reaktor	13
2.2 Konkurrerende teknologier	14
2.3 Det afprøvede system	15
2.4 Opbygning af forsøgsanlæg	16
2.4.1 Anaerob procestank	16
2.4.2 Membranfilter	17
2.5 Drift og kontrol-program	18
3. Case-virksomhederne og gennemført testprogram	20
3.1 Bryggeriet Vestfyen	20
3.2 Hudegarveriet Scan-Hide	20
3.3 Levnedsmiddelproducenten, Danrice	21
3.4 Spildevandets sammensætning for case-virksomhederne	21
4. Driftsresultater	22
4.1 Bryggeriet Vestfyen	22
4.1.1 Belastning med organisk stof	22
4.1.2 Opbygning af biomasse	23
4.1.3 Balancen i omsætningen	24
4.1.4 Omsætningens effektivitet / gasudbytte	25
4.1.5 Effektiviteten af rensningen af spildevandet	27
4.1.6 Effektiviteten af membranfiltreringen	29
4.2 Hudegarveriet Scan-Hide	30
4.3 Danrice	30
4.3.1 Opbygning af biomasse	31
4.3.2 Belastning med organisk stof	31
4.3.3 Balancen i omsætningen	32
4.3.4 Omsætningens effektivitet / gasudbytte	33
4.3.5 Effektiviteten af rensningen af spildevandet	34
4.3.6 Effektiviteten af membranfiltreringen	36
4.3.7 Data for opskalering	36
4.4 Sammenfatning af driftsresultater	36
5. Teknisk-økonomisk vurdering	38

5.1	Fordele og ulemper ved lokal rensning og biogasproduktion	38
5.1.1	Dimensionering	39
5.1.2	Energi-balance	40
5.1.3	Driftsomkostninger	41
5.1.4	Investering og tilbagebetalingstid	42
5.2	Sortering af delstrømme hos Bryggeriet Vestfyen	42
5.3	Perspektivering	42
6.	Diskussion og konklusion	44
6.1	Gasudbytte	45
6.2	Afløbskvalitet	45
6.3	Rumbelastning	45
6.4	Hydraulisk opholdstid	46
6.5	Driftsbetingelser	46
6.6	Samlet konklusion	46
	Litteratur	48
	Bilag 1.Kontrol og overvågning	49
	Bilag 2.Membranfiltrering af filtrat fra Scan-Hide	50

Forord

Denne rapport er udarbejdet på baggrund af projektet "EnergiPlus spildevandsrensning", der er gennemført med tilskud fra Miljøministeriets pulje for Grøn Teknologi 2013.

Projektgruppen har bestået af:

Henrik Grüttner, SDU Life Cycle Engineering

Agnieszka Glab, SDU Life Cycle Engineering

Lars Brodersen Holm, RenewEnergy

Hans Christian Andersen, RenewEnergy

Søren Nøhr Bak, Grundfos Biobooster

Bhupendra Poudel, Grundfos Biobooster

Per Elberg Jørgensen, DHI

Følgegruppen har, udover projektgruppen, bestået af

Jóannes J. Gaard, Naturstyrelsen

Thomas Fløe Chemnitz, Danish Crown

Morten Lykkegaard Christensen, Aalborg Universitet

Sammenfatning

Dette projekt har handlet om at afprøve en ny teknologi til effektiv fjernelse af organisk stof fra industrispildevand ved omsætning til biogas i en anaerob membran bioreaktor (anMBR).

For en række virksomhedstyper er den væsentligste udfordring i forbindelse med spildevandsrensning fjernelse af organisk stof, dette gælder f.eks. bryggerier, garverier og mejerier.

Parterne i dette projekt – Renew Energy, Grundfos Biobooster, Syddansk Universitet og DHI – ønskede at afprøve nyudviklet anaerob energi-producerende membran-bioreaktor til erstatning af diverse aerobe energiforbrugende rensprocesser.

Projektets formål var at afprøve og demonstrere et nyt anaerobt membran-bioreaktor system til rensning af industrielt spildevand. Systemet er baseret på Grundfos' roterende membraner (Biobooster-systemet), kombineret med Renew Energy's system for omdannelse af organisk stof til biogas (biogasanlæg).

Afprøvningen foregik i pilotskala – med en bioreaktor på ca. 1 m³ – og systemet blev afprøvet på tre industrier, et bryggeri (Bryggeriet Vestfyens i Assens), et garveri (Scan-Hide nær Svendborg) og en levnedsmiddelforarbejdende industri (Danrice nær Nyborg). På hver industri blev der gennemført en afprøvning af systemet på det samlede spildevand over nogle måneder.

Specifikt havde undersøgelserne til formål:

- at vise at den anaerobe omsætning i det planlagte system fungerer tilfredsstillende - dvs. at der produceres den forventede mængde biogas.
- at vise at membranseparationen fungerer tilfredsstillende - dvs. at der opnås den ønskede renhed af det rensede spildevand, at systemet kan drives med den forventede flux og at nedbrud pga. fouling undgås.
- at undersøge om det samlede system kan give et netto energioverskud, med de forskellige typer spildevand der testes. Med andre ord at energiindholdet i den producerede biogasproduktion overstiger i forbruget af energi til drift af membranfiltreringssystemet mv.¹

Ved hver af afprøvningsne blev systemet derfor afprøvet i forhold til effektiviteten af vandrensningen og produktionen af biogas. Derudover blev der monitoreret for en lang række driftskontrolparametre, herunder især forhold omkring den anaerobe omsætning og membranfiltreringen.

Overordnet viste undersøgelserne gode resultater, men gav ikke overraskende også anledning til en række udfordringer:

På bryggeriet var der en del udfordringer relateret til at opnå en stabil drift af bioreaktoren på grund af en meget varierende belastning. Det lykkedes dog at gennemføre en kortere periode med rimelig stabil drift. Fra denne periode kan det ses at bryggerispildevand er meget velegnet til anaerob omsætning og anMBR-systemet fungerede fint. Ved eventuelle fuldska-

¹ Formålsbeskrivelse fra ansøgningen.

I installationer skal det dog sikres at der etableres en passende udligning af flow og variationerne i koncentration af organisk stof.

Hos garveriet viste det sig, at der var større problemer med hæmning af den anaerobe omsætning end forudset bl.a. på grund af højt indhold af svovl, klorid og ammonium i spildevandet. Det vurderes ud fra laboratorieundersøgelser, at disse udfordringer formodentlig vil kunne håndteres ved en tilstrækkelig lang adaptation/tilpasning af biomassen, men dels var dette ikke formålet med dette projekt, og dels var der ikke nok tid til dette i projektet. På denne baggrund blev det valgt at afslutte undersøgelserne.

Det blev derfor i stedet valgt at gennemføre nogle måneders undersøgelser hos Danrice, hvor systemet kørte uden væsentlige problemer.

Resultaterne fra Vestfyen og Danrice viser:

- At den anaerobe omsætning i det planlagte system fungerede tilfredsstillende - dvs. at der produceres den forventede mængde biogas. På bryggeriet blev der produceret 0,68 Nm³ per kg omsat COD og hos Danrice var tallet 0,64. Ved sammenligning med litteraturen må dette anses for yderst tilfredsstillende. Yderligere viste undersøgelserne en COD-reduktion på henholdsvis 82% og 80%, hvilket må anses for rimeligt tilfredsstillende for et anaerobt system.
- At membranseparationen fungerede tilfredsstillende. Dette kan bl.a. ses af at trykket over membranerne i alle undersøgelserne ikke oversteg 0,5 bar, at der kun var behov for rengøring af membranerne med meget lange intervaller – omkring en måned – og at der på intet tidspunkt blev konstateret tilløb til irreversibel fouling af membranerne.

Med hensyn til spørgsmålet om det samlede system kan give et netto energioverskud, er dette opgjort teoretisk efterfølgende, da det ikke var muligt at gennemføre realistiske forbrugsmålinger på pilotanlægget. Disse opgørelser viser, at energiudbyttet i form af biogas er ca. 25 gange større end forbruget af energi til at drive anlægget.²

Projektet havde yderligere til formål at afklare/belyse konceptets markedspotentiale, idet der skulle identificeres mindst tre brancher, hvor konceptet kan implementeres økonomisk fordelagtigt.³ Der er derfor udført en dimensionering og en analyse af omkostningerne til drift og investering på tre forskellige cases; de to vellykkede test-cases samt Toms fabrikker i Hvidovre.

Disse beregninger viser for alle tre cases et positivt årligt driftsresultat – varierende efter mængden af spildevand samt den afregningsmæssige situation. Det årlige potentielle overskud varierer fra ca. 200.000 kr. til ca. 600.000 kr.

Grundet ganske betydelige etableringsomkostninger bliver tilbagebetalingstiderne dog ikke særligt attraktive. De varierer mellem 6 og 21 år, hvilket ganske sikkert ikke vil være attraktivt for de fleste virksomheder. Der kan således ikke peges på brancher, hvor systemet kan etableres økonomisk rentabelt.

Det vurderes dog, at systemet er et meget relevant alternativ, når en virksomhed har behov for at reducere sin udledning af opløst organisk stof for at reducere belastningen på et kommunalt renseanlæg. I en sådan situation vil systemet dels være et miljømæssigt fornuftigt alternativ til aerob biologisk behandling og yderligere vurderes det, at systemet er både

² Når der omregnes til primær energi, dvs. at elektricitetsforbruget omregnes til mængden af brændværdi der skal til for at producere denne elektricitet. Se tabel 7.

³ Formålsbeskrivelse fra ansøgningen.

teknisk robust og økonomisk konkurrencedygtigt med andre kommercielt tilgængelige anaerobe systemer.

Summary

This project has been about testing a new technology for efficient removal of organic matter from industrial waste water by conversion to biogas in an anaerobic membrane bioreactor (anMBR).

For a number of business types, the main challenge in waste water treatment is the removal of organic matter, for example breweries, tanneries and dairies.

The parties in this project - Renew Energy, Grundfos Biobooster, University of Southern Denmark and DHI - wanted to test the newly developed anaerobic energy-producing membrane bioreactor to replace various aerobic energy-consuming cleaning processes.

The purpose of the project was to test and demonstrate a new anaerobic membrane bioreactor system for the purification of industrial wastewater. The system is based on Grundfos rotary membranes (Biobooster system), combined with Renew Energy's organic conversion system for biogas (biogas plants).

The test was conducted on a pilot scale - with a bioreactor of approx. 1 m³ - and the system was tested on three industries, a brewery (the brewery Vestfyens i Assens), a hide tanning plant (Scan-Hide near Svendborg) and a food processing industry (Danrice near Nyborg). In each industry, the system was tested on the total waste water over some months.

Specifically, the investigations had the purpose:

- To show that the anaerobic turnover in the planned system works satisfactorily - ie That the expected amount of biogas is produced.
- To show that membrane separation works satisfactorily - ie That the desired purity of the purified wastewater is achieved, that the system can be operated with the expected flux and that failure due to fouling is avoided.
- To investigate whether the total system can provide a net energy surplus, with the different types of wastewater being tested. In other words, the energy content of the produced biogas production exceeds the consumption of energy for the operation of the membrane filtration system, etc.

In each of the tests, the system was therefore tested in relation to the efficiency of water purification and the production of biogas. In addition, a wide range of operational control parameters were monitored, in particular regarding the anaerobic reaction and membrane filtration.

Overall, the studies showed good results, but did - not surprisingly - also give rise to a number of challenges:

At the brewery there were a number of challenges related to achieving a stable operation of the bioreactor due to very varying flows and concentration, and consequently a very varying load. However, it was possible to complete a shorter period of reasonable stable operation. From this period it can be seen that brewery water is very suitable for anaerobic circulation and the anMBR system worked well. However, in the case of full scale installations, it is necessary to ensure that the variations in flow and organic matter concentration are properly equalised.

At the tanning industry we had to realise that the problems with inhibition of the anaerobic process were more severe than predicted, among other things, due to high levels of sulphur, chloride and ammonium in wastewater. Based on laboratory studies, it is estimated that these challenges could be addressed by sufficiently long adaptation of the biomass, but this was not the purpose of this project, and on the other hand, there was not enough time for this in the project. Against this background, it was decided to complete the investigations.

Instead, it was chosen to carry out a few months of research at Danrice, where the system ran without significant problems.

The results from Vestfyen and Danrice show:

- That the anaerobic turnover in the planned system worked satisfactorily - ie. That the expected amount of biogas is produced. At the brewery 0.68 Nm³ per kg of COD was produced and in Danrice the number was 0.64. By comparison with the literature, this must be considered extremely satisfactory. In addition, the studies showed a COD reduction of 82% and 80%, respectively, which is considered to be reasonably satisfactory for an anaerobic system.
- The membrane separation worked satisfactorily. This may include It is seen that the pressure across the membranes in all studies did not exceed 0.5 bar, that only the membranes had to be cleaned at very long intervals - about one month - and no evidence of irreversible fouling of membranes was found at all.
- With regard to the issue of the overall system, it can provide a net energy surplus, this is theoretically determined subsequently as it was not possible to carry out realistic consumption measurements at the pilot plant. These inventories show that the energy yield in the form of biogas is about 25 times greater than the consumption of energy to operate the plant.

The project also had the purpose of clarifying / highlighting the concept's market potential, identifying at least three industries where the concept can be implemented economically advantageously. Therefore, a design and analysis of the cost of operation and investment has been carried out in three different cases; the two successful test cases and Tom's factories in Hvidovre.

These calculations show for all four cases a positive annual operating result - varying according to the amount of waste water and the discharge fee situation. The annual potential profit varies from around 200,000 DKK to around 600,000 DKK.

However, due to quite significant establishment costs, payback times are not particularly attractive. They vary between 6 and 21 years, which will certainly be prohibitive for most businesses. There can thus not be an indication of industries where the system can be established economically profitable.

However, it is considered that the system is a very relevant alternative when a company needs to reduce its load of dissolved organic matter to a municipal wastewater treatment plant. In such a situation, the system will be an environmentally sound alternative to aerobic biological treatment, and it is further considered that the system is both technically robust and economically competitive with other commercially available anaerobic systems.

1. Indledning

1.1 Baggrund

For en række virksomhedstyper er den væsentligste udfordring i forbindelse med spildevandsrensning fjernelse af organisk stof, dette gælder f.eks. bryggerier, garverier og mejerier. En af de mest lovende teknologier til rensning af industrielt spildevand med højt indhold af organisk stof er aerobe membran-bioreaktorer. Potentialet af denne teknologi er testet så sent som i 2010, under programmet - "Test af membran bioreaktor-teknologier" udgivet af By og Landskabsstyrelsen under Miljøministeriet, 2010 - som var en del af regeringens handlingsplan for miljøeffektive teknologier /1/. Det blev her fremhævet at teknologiens største udfordring ligger i at nedsætte energiforbruget samt reducere foulingproblemer.

Miljøteknologisk mulighed: Parterne i dette projekt ønskede at udvikle en anaerob energi-producerende membran-bioreaktor til erstatning af diverse aerobe energiforbrugende rensprocesser. Dette sker ved at erstatte den aerobe nedbrydningsproces af organisk stof, som kræver store mængder energi til beluftning af systemet (20-30 KWh per m³), med en anaerob proces, hvorved det organiske stof omdannes til biogas - og således producerer energi frem for at forbruge energi. For at reducere foulingproblemer anvendes Grundfos' roterende membraner, som gør det muligt at renholde ("scrubbe") membranerne med et meget lille energiforbrug.

1.2 Formål

Projektets formål var at udvikle og afprøve et nyt anaerobt membran-bioreaktor system til rensning af industrielt spildevand. Systemet er baseret på Grundfos' roterende membraner, kombineret med Renew Energy's system for omdannelse af organisk stof til biogas (biogasanlæg).

Mål: Det forventedes, at der med systemet kan opnås en meget høj rensningsgrad af spildevandet, med fjernelse af såvel bakterier som organiske mikroforureninger. Desuden forventedes det, at membranfiltreringen kan udføres med et begrænset forbrug af elektricitet, og at der i biogasanlægget genereres så meget energi fra det organiske stof, at der netto kan høstes energi fra systemet i form af biogas.

Projektets mål

- vise at den anaerobe omsætning i det planlagte system fungerer tilfredsstillende
- vise at membranseparationen fungerer tilfredsstillende
- undersøge om det samlede system kan give et netto energioverskud med de to forskellige typer spildevand der planlægges testet (garveri og bryggeri)
- afklare konceptets markedspotentiale

Succeskriterier

- at der produceres den forventede mængde biogas.
- at der opnås den ønskede renhed af det rensede spildevand, at systemet kan drives med den forventede flux og at nedbrud pga. fouling undgås.
- Den påviste biogasproduktion overstiger i energiindhold forbruget af energi til drift af membranfiltreringssystemet mv.
- Der er identificeret mindst tre brancher hvor konceptet kan implementeres økonomisk fordelagtigt.

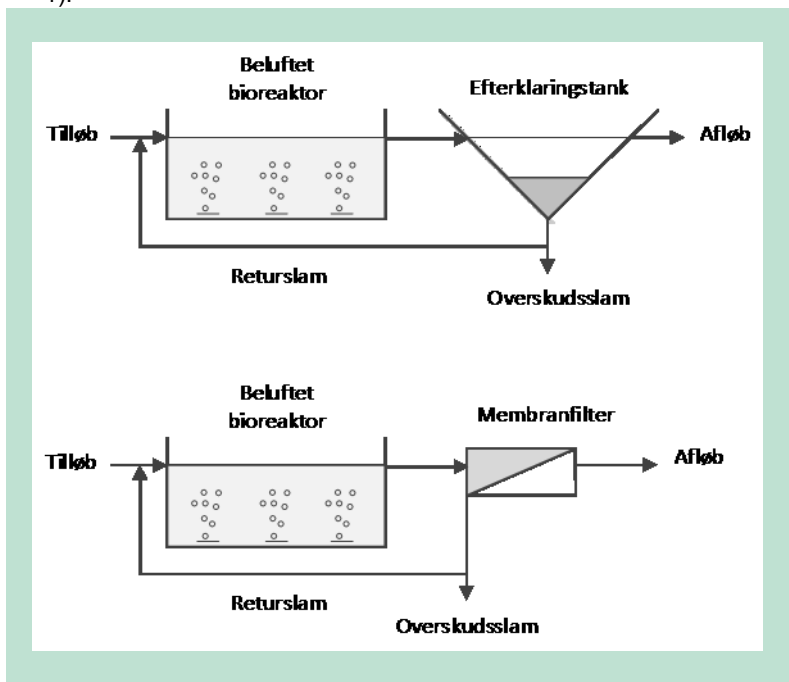
1.3 Tilgang

Det blev valgt at gennemføre afprøvning i pilotskala – med de fordele og ulemper dette måtte give. Blandt fordelene er helt grundlæggende at pilotskala bedre end lab-skala er i stand til at simulere et fuldskaalanlæg. Blandt ulemperne er en betydelig teknisk kompleksitet som indebærer mange fejlkilder – hvilket også gjorde sig gældende i dette projekt.

2. Teknologi

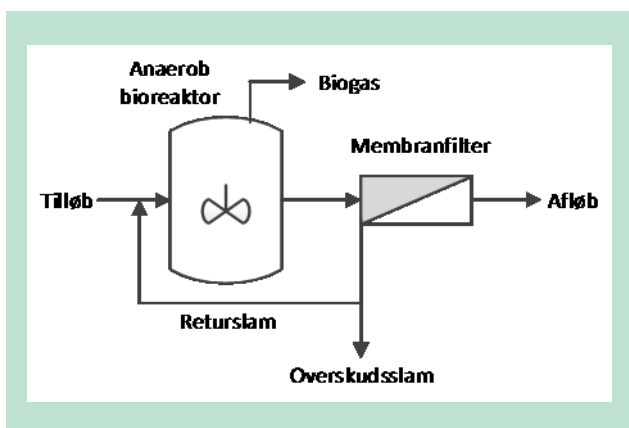
2.1 Teknologien anaerob membran bio-reaktor

Anaerob membran bio-reaktor teknologien (AnMBR) er en videreudvikling af membran bio-reaktor teknologi (MBR), til rensning af spildevand baseret på aktiv slam princippet. MBR-teknologien adskiller sig hovedsageligt fra konventionel aktiv slam teknologi, ved at separationen af slam og rensset vand sker via membranfiltrering i stedet for bundfældning (se Figur 1).



FIGUR 1. Skematisk sammenligning af konventionel aktiv slam teknologi (øverst) og MBR-teknologi (nederst).

AnMBR processen adskiller sig i princippet kun fra MBR processen ved at den biologiske reaktor drives anaerobt, dvs. uden tilførsel af ilt. Der ved sker der en omdannelse af organisk stof i spildevandet til biogas der kan udnyttes som en energiresurse. I Figur 2 er vist en skematisk fremstilling af AnMBR teknologien.



FIGUR 2. Skematisk fremstilling af AnMBR teknologien.

Generelt har anaerob spildevandsrensning i forhold til aerob spildevandsrensning den fordel, at en langt større del af energiindholdet i spildevandets indhold af organiske stof kan udnyttes som energiresurse. Ved aerob rensning "brændes" hovedparten af det organiske materiale af, og ender som CO₂ der udluftes til atmosfæren, og endvidere kræver beluftsprocessen i sig selv et stort energiforbrug. Energiregnskabet for en aerob rensningsproces er derfor typisk langt dårligere end for anaerobe processer hvor hovedparten af det organiske stof omdannes til energirigt biogas, og hvor der ikke medgår energi til beluftning.

En ulempe ved anaerob spildevandsrensning er at afløbskvaliteten typisk er ringere end for aerobe processer, idet aerob nedbrydning af organisk stof som regel er mere tilbunds gående end anaerob nedbrydning. Endvidere fjernes der kun meget lidt kvælstof og fosfor ved anaerob rensning, hvorfor der – afhængig af fødevandets N og P indhold – kan være høje koncentrationer af næringssalte i afløbsvandet.

Anaerob spildevandsrensning baseret på suspenderet kultur og separation af slammet via bundfældning (som i aktiv slam processen) har været forsøgt men uden større succes. Dette skyldes primært at anaerobt slam har dårlige bundfældningsegenskaber hvorfor det er vanskeligt, dels at opretholde en tilstrækkelig høj slamkoncentration i den anaerobe procestank, og dels at opretholde en fornuftig afløbskvalitet. Med introduktion af membranfilteret til separation af slammet, som i AnMBR-processen, kan dette forhold imidlertid ændre sig da membranfilteret udgør en meget effektiv barriere for selv de mindste slampartikler i det anaerobe slam. Herved er det i princippet muligt at holde en høj slamkoncentration i procestanken, og derved opnå en høj renskapacitet pr. volumenenhed reaktor, hvilket er afgørende for økonomien i processen. Endvidere opnås en afløbsstrøm der er helt fri for suspenderet stof.

Den væsentligste ulempe ved AnMBR-processen ligger - som for mange andre membranfiltreringsprocesser - i risikoen for tilstopning eller fouling af membraner. Herved mindskes anlæggets hydrauliske kapacitet, og anlægget kan på et tidspunkt nå et uacceptabelt lavt niveau hvor driften ikke er rentabel. Som ved alle membranfiltreringsprocesser forsøger man derfor via anlægsdesign og driftstiltag at minimere tendensen til fouling. Et typisk tiltag er på forskellig vis at skabe turbulens på membranoverfladen for derved at hindre opbygning af en "slamkage". Dette kan gøres ved at skabe et højt flow på tværs af membranen (crossflow) eller ved at "skure" membranen med gasbobler. Et andet tiltag er at "backflush" membranerne dvs. at pumpe filtreret vand (filtrat) baglæns gennem filteret. Ved mere modstandsdygtig fouling kan det være nødvendigt at foretage en rensning af membranerne ved tilsætning af diverse kemikalier. Dette kan gøres som en del af den almindelige driftsrutine, hvor der med en vis frekvens backflushes med en særlig rensningsvæske der typisk kan bestå af klorin, syrer eller baser opløst i filtrat. Endelig kan det fra tid til anden være nødvendigt med en mere tilbunds gående rensning, hvor membran-kamrene tømmes for slam og fyldes med kemisk rensningsvæske der får lov at reagere i en vis tid, typisk af størrelsen timer.

2.2 Konkurrerende teknologier

I foregående afsnit blev det nævnt, at anaerob spildevandsrensning baseret på suspenderet kultur og separation ved gravitation er problematisk og derfor ikke er særligt udbredt i markedet. Der er imidlertid andre konkurrerende systemer på markedet, dels nogle baseret på separation med membranfilter, dvs. andre AnMBR systemer, og dels nogle systemer baseret på granuleret slam.

Hvad angår AnMBR systemer, synes de væsentligste aktører at være Veolia, GE og ADI. Veolia baserer deres system på multitube crossflow membraner, dvs. membraner der ligesom Grundfos' ikke er afhængig af at renholde membranerne med skuregas. De to andre systemer er baseret på neddykkede membraner der kræver skuregas. Indtil videre forekommer ingen af de konkurrerende AnMBR systemer at have vundet nogen særlig udbredelse, men der synes at være en tendens til stigende interesse i relation til rensning af indu-

strispilevand. Der rapporteres om et meget bredt interval for COD-belastning (OLR), typisk fra 2-3 kg COD/m³ til 15-20 kg COD/m³.

Den anden gruppe af systemer er baseret på en biomasse bestående af såkaldte slamgranuler, som fremkommer ved at drive processen på en helt særlig måde. Slamgranulerne har meget fine bundfældningsegenskaber og separationen af biomassen ved gravitation er derfor ikke et stort problem som ved suspenderede kulturer. Afløbskvaliteten er dog typisk betydeligt ringere end ved AnMBR. De ældste systemer baseret på granuler er de såkaldte UASB (Upflow Anaerobic Sludge Bed) processer.

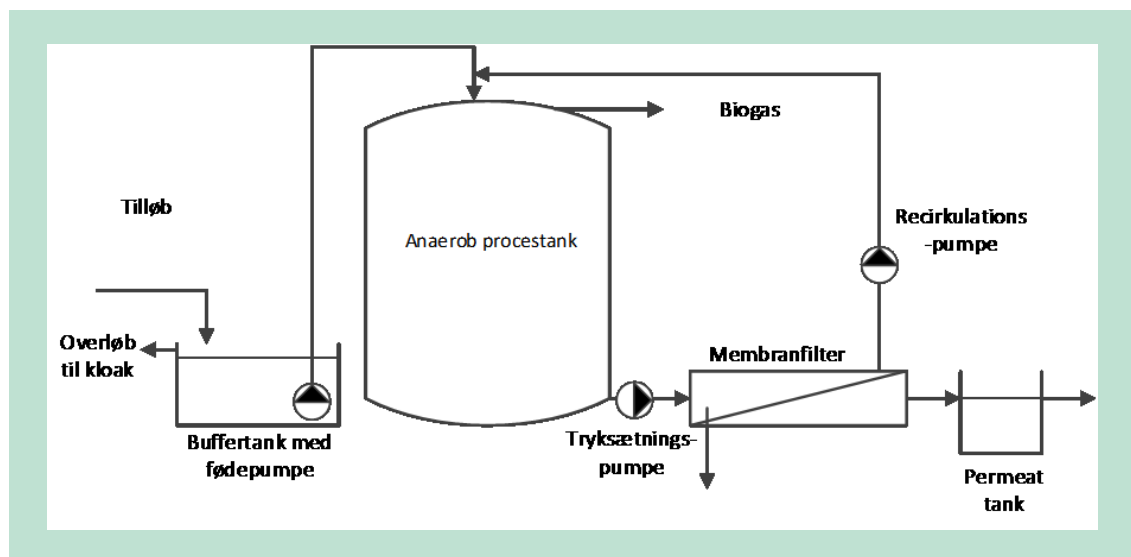
Disse systemer har haft en betydelig udbredelse til rensning af industrispilevand gennem de seneste 20-30 år, men ser nu ud til at være på retur i konkurrencen med de nyere EGSB (Extended Granular Sludge Bed) systemer. Forskellen på de to teknologier er primært en bedre kontakt mellem granuler og spildevand i den anaerobe reaktor. Dette betyder at hvor UASB processen typisk drives med en belastning på 5-10 kg COD/m³, så kan der med EGSB-teknologi opnås betydeligt højere belastninger, i nogle tilfælde op til 20-30 kg COD/m³.

2.3 Det afprøvede system

Projektets teknologiske idé ligger i at kombinere to kendte danske teknologier inden for spildevandsrensning, som ikke tidligere er forsøgt kombineret. De to teknologier som kombineres er:

1. Grundfos Biobooster's eksisterende (men nyudviklede) teknologi til membranfiltrering i forbindelse med membran-bioreaktorer. Teknologien er baseret på roterende keramiske membranfiltre. Dette er en stor fordel sammenlignet med andre AnMBR systemer der eller typisk er afhængig af at skure membranerne med biogas hvilket øger systemernes kompleksitet og behovet for pasning og overvågning.
2. Renew Energy's eksisterende anaerobe bioreaktorer (biogasanlæg), hvori bakterier under iltfrie forhold omdanner organiske forbindelser til biogas. Anlæggene anvendes i dag af f.eks. fødevarerproducenter med store mængder organisk affald.

Princippet i det samlede system er vist i figur 3.



FIGUR 3. Skematisk flowdiagram for det afprøvede AnMBR-anlæg

Anvendelse af membranfiltrering sammen med biogasanlægget gør det muligt at udnytte biogaspotentiallet i spildevandsstrømme med lavere koncentrationer end det normalt har

været muligt ved anaerobe anlæg, idet systemet fastholder og opkoncentrerer den aktive biomasse i reaktoren, men lader vandet passere igennem systemet.

2.4 Opbygning af forsøgsanlæg

Anlægget blev etableret i en container med et forsøgsanlæg projektet overtog fra Carlsberg. Volumen af bioreaktoren var således givet på forhånd, og de øvrige komponenter blev således dimensioneret i forhold til denne.

Design, dimensionering og konstruktion af pilotanlægget blev udført i perioden januar til maj 2015.

I det følgende er givet en mere detaljeret beskrivelse af testanlæggets to hovedkomponenter – den anaerobe procestank og membranfilteret.

2.4.1 Anaerob procestank

Kernen i anlægget er naturligvis den anaerobe procestank som er vist på billedet nedenfor (figur 4). Specifikationer for tanken er vist i tabel 1.

TABEL 1. Nøglespecifikationer for den anvendte anaerobe procestank

Parameter	
Aktivt volumen (m ³)	1,0
Driftstemperatur sætpunkt (°C)	37
Omrøring	Udføres via returpumpning
Gasklokke volumen (m ³)	0,5



FIGUR 4. Foto af den anaerobe procestank fra containeren med forsøgsanlægget.

2.4.2 Membranfilter

Den anden nøgleg Komponent i testanlægget var membranlægget som er afbilledet i figur 5.

Til venstre i billedet ses den buesi der blev brugt til 'grovrensning' af vandet for at beskytte anlægget mod store partikler. Specifikationerne for membranlægget er vist i tabel 2.

TABEL 2. Nøglespecifikationer for det anvendte membranfilter

Parameter	
Membranmateriale	Keramisk
Nominal porrestørrelse (μm)	0,2
Disk diameter (mm)	?
Membranareal pr. disk (m^2)	0,2
Antal diske i modul	I udgangspunktet: 17, men dette er varieret mellem de forskellige tests
Membranareal for modul (m^2)	3,4
Rotationshastighed (rpm)	120-130
TMP (bar)	0,2-0,3
Filtration time (min)	Typisk 2-3
Backwash time (sek)	Typisk 10-15



FIGUR 5. Foto af membranfilteret fra containeren med forsøgsanlægget.

Specielt to ting skal fremhæves ved systemet:

- På grund af rotationen af membranerne opstår der typisk et meget begrænset niveau af fouling på membranerne, hvilket fører til at der kan opereres med et ganske lavt trans-membran-tryk (TMP) – sammenholdt med andre mikrofiltrerings-systemer.
- Foulingen begrænses yderligere af muligheden for at 'bagskylle' systemet (Back-flush), dvs. at vende flowet gennem membranerne kortvarigt.

Andre keramiske membransystemer bruger typisk store energimængder på at sørge for at vandet flyttes forbi membranerne ved at pumpe det rundt.

2.5 Drift og kontrol-program

Udviklingen i opbygning af biomasse og den gradvis forøgede belastning blev fulgt med et ganske omfattende kontrolprogram – jf. tabel 3.

TABEL 3. Analyser og registreringer. Tal i tabellen angiver antal typisk antal analyser per uge.

Analyser	Tilløb	Bioreaktor	Gas	MFU	Filtrat	Metode
pH		2				pH-meter
Temperatur		2				pH-meter
COD	2				2	Hach-Lange
TN	1				1	Hach-Lange
TP	1				1	Hach-Lange
TS		2		2		DS 204
VS		1				DS 204
VFA					1	Titrering
Alkalinitet		1				Titrering
% CH ₄			1			Gaskromatografi
Registreringer						
Flow tilløb	Beregnes					
Flow recirkulation	Logges					
Flow af filtrat	Logges					
Gasvolumen	2					
Transmembrantryk	Logges					
Omdrejningshastighed	Logges					

De vigtigste styringsparametre i forhold til at styre og følge belastningen har været:

- Den organiske stofbelastning målt som kg COD i spildevandet per kg glødetab i reaktoren
- Volumen belastningen målt som kg COD per m³ reaktorvolumen
- Den hydrauliske belastning dvs. m³ spildevand per m³ reaktorvolumen

Af hensyn til balancen i omsætningen i reaktoren er det vigtigt at følge:

- pH og niveauet af frie fede syrer (VFA), idet et fald i pH og en stigning i VFA er udtryk for at gruppen af methanproducerende bakterier har svært ved at følge med og der derfor ophobes mellemprodukter i form af frie fede syrer.
- Bufferkapaciteten i reaktoren der måles som alkaliniteten fortæller om systemets evne til at optage mindre variationer i pH og neutralisere den kulsyre der løbende produceres parallelt med metanen.
- Lejlighedsvis er der kontrolleret for niveauet af næringssaltene kvælstof og fosfor for at tjekke om der er tilstrækkeligt af disse.
- Det er vurderet at niveauet af mikronæringsstoffer er tilstrækkeligt i de undersøgte spildvandstyper.

Omsætningens effektivitet måles ved:

- Gasudviklingen som funktion af mængden af tilført COD

Effektiviteten af rensningen af spildevandet er opgjort ved:

- Måling af COD i filtratet og sammenholde dette med COD i det tilførte spildevand
- Tilsvarende for kvælstof og fosfor

Effektiviteten af membranfiltreringen måles ved at:

- Opgøre fluxen som funktion af trykket over membranen (Permeabiliteten). Eventuel fouling vil vise sig som en faldende permeabilitet.

Produktionen af overskudsslam kan opgøres ved:

- Måling af tørstof i reaktoren minus fraført tørstof ved udtagning af prøver eller ved udtagning af overskudsslam.

Alle disse forhold er fulgt løbende i driftsperioderne, typisk med to ugentlige analyser – prøveudtagning mandag og torsdag.

Analyserne blev udført på SDU og gjort tilgængelige for de øvrige parter.

3. Case-virksomhederne og gennemført testprogram

Teknologien er afprøvet på følgende tre virksomheder:

- 1) Bryggeriet Vestfyen (perioden fra starten af februar 2015 til slutningen af december 2015)
- 2) Hudegarveriet Scan-Hide (perioden fra midten af marts 2016 til september 2016)
- 3) Levnedsmiddelproducenten, Danrice (perioden fra starten af oktober 2016 til midten af december 2016)

3.1 Bryggeriet Vestfyen

Bryggeriet Vestfyen i Assens producerer øl og diverse læskedrikke baseret på traditionel bryggeriteknik.

Casen var valgt som et eksempel på en virksomhedstype med ret let omsætteligt / uproblematisk spildevand.

Spildevandet opstår i forbindelse med rengøring eller tab af produkter. Der er installeret CIP-rengøringsystemer for størstedelen af produktionen. Flaskevasker anlægget har et betydeligt niveau af indbygget vandgenbrug. Lejlighedsvis kan der også forekomme mindre fejl- eller overskudsproduktioner som afledes til spildevandet.

Bryggeriet afleder spildevandet ubehandlet til Assens Forsynings renseanlæg. Virksomheden betaler alene en volumenafgift for behandlingen – og overholder sin spildevandstilladelse med god margin.

Typisk/gennemsnitlig mængde og sammensætning af spildevandet fremgår af tabel 4.

Det viste sig i forbindelse med undersøgelserne at der er meget store variationer i spildevandet sammensætning, hvilket vanskeliggjorde en stabil belastning af forsøgsanlægget.

3.2 Hudegarveriet Scan-Hide

Scan-Hide garver huder fra kvæg. Dette sker ved en traditionel garvnings-proces med på et ultramoderne anlæg med et betydeligt niveau af vandgenvinding.

Casen blev valgt som et eksempel på en virksomhedstype med ret kompliceret spildevand – og det viste sig at give betydelige problemer at opnå en stabil omsætning i forsøgsanlægget.

Spildevandet opstår ved kassation af de forskellige procesbade samt ved rengøring. I forbindelse med processen anvendes betragtelige mængder svovl, i form af sulfit, og klorid som del af forskellige salte.

Spildevandet forbehandles ved kemisk fældning med jernklorid inden afledning til Svendborg forsynings renseanlæg.

Typisk/gennemsnitlig mængde og sammensætning af spildevandet fremgår af tabel 4.

3.3 Levnedsmiddelproducenten, Danrice

Danrice producerer kogte og frosne produkter baseret på forskellige typer ris og kornprodukter til brug i restauranter og husholdninger.

Virksomheden blev inkluderet i projektet efter at det viste sig at udfordringerne hos Scan-Hide var for store til at kunne løses inden for projektets rammer.

Spildevandet opstår ved rengøring af procesudstyret. Det forbehandles med kemisk fældning med poly- aluminium-sulfat inden udledning til Nyborg forsynings renseanlæg. Vandet til forsøgsanlægget blev udtaget inden denne behandling.

Efter denne behandling overholdes spildevandstilladelsen med god margin.

Der betales volumenafgift og særbidrag for COD.

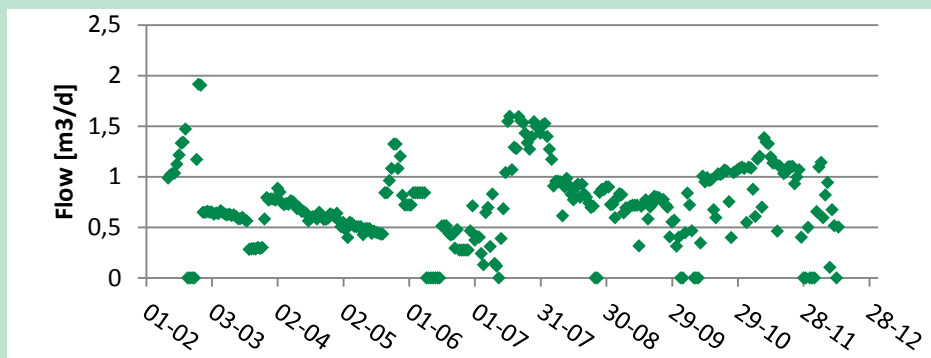
Typisk/gennemsnitlig mængde og sammensætning af spildevandet fremgår af tabel 4.

3.4 Spildevandets sammensætning for case-virksomhederne

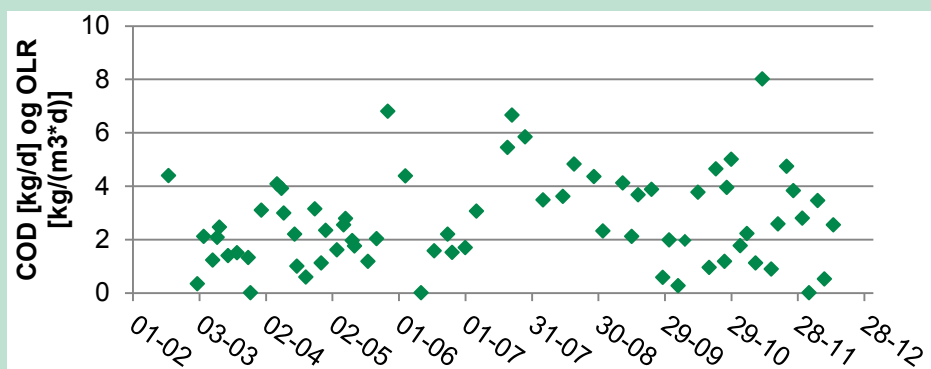
I Tabel 4 er givet en sammenfatning af spildevandets sammensætning for de tre case-virksomheder:

TABEL 4. Dagligt flow og gennemsnitlig sammensætning af spildevandet fra de tre case-virksomheder.

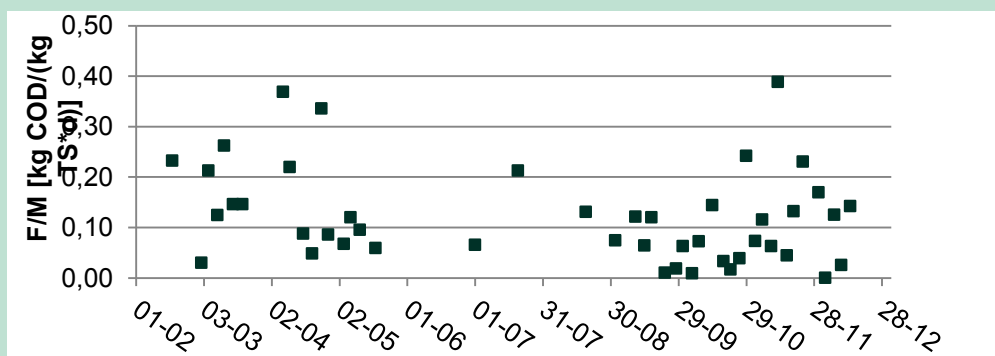
		Bryggeriet Vestfyen	Hudegarveriet Scan-Hide	Levnedsmiddel- virksomheden Danrice
Flow pr. døgn	m ³ /d	234 ± 100	500 ± 100	160 ± 50
COD	mg/l	4.075 ± 2.255	7.190 ± 620	11.307 ± 3.807
Kvælstof	mg/l	43 ± 15	552 ± 40	95 ± 41
Fosfor	mg/l	13 ± 6	40 ± 15	44 ± 18



FIGUR 7. Flow af fødevand til reaktoren



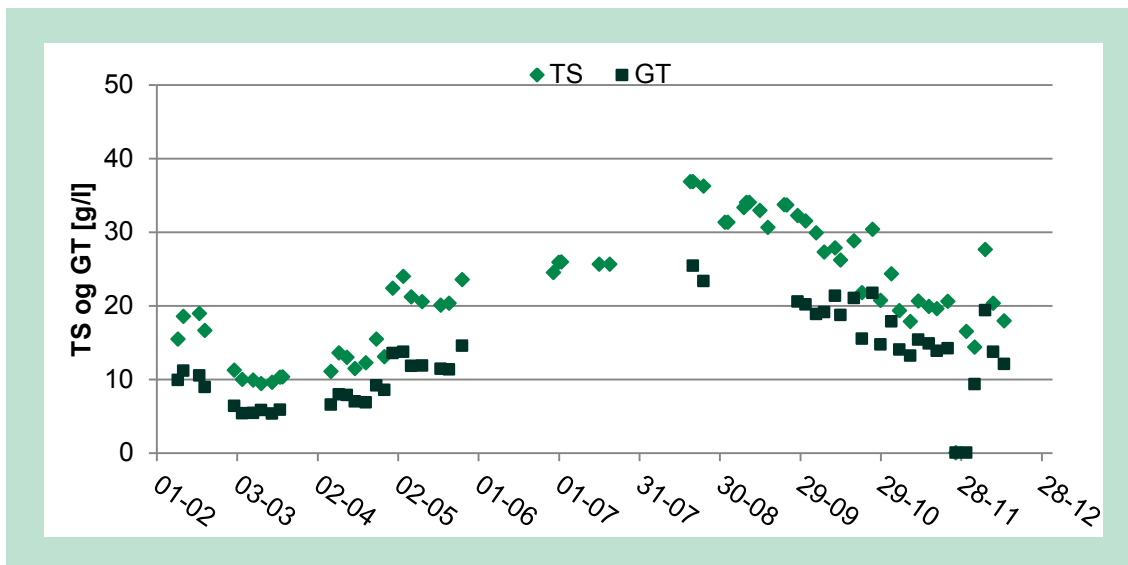
FIGUR 8. COD tilført samt OLR. De to parametre får samme værdi da det aktive reaktor volumen i gennemsnit antages at være 1 m³



FIGUR 9. COD belastning i forhold til biomasse (F/M)

4.1.2 Opbygning af biomasse

Den anaerobe reaktor blev startet op med tilsætning af anaerobt slam fra Elby Mølle Renseanlæg med et tørstof-indhold (TS) omkring 15-20 g/l. I perioden fra starten af marts til slutningen af august blev der ikke udtaget overskudsslam, og koncentration af TS steg i perioden jævnt til et niveau omkring 35 g/l. Herefter blev TS sænket jævnt over en to måneders periode til et niveau omkring den målsatte baseline koncentration på 20 g/l. Udviklingen i TS og GT er vist i figur 10.



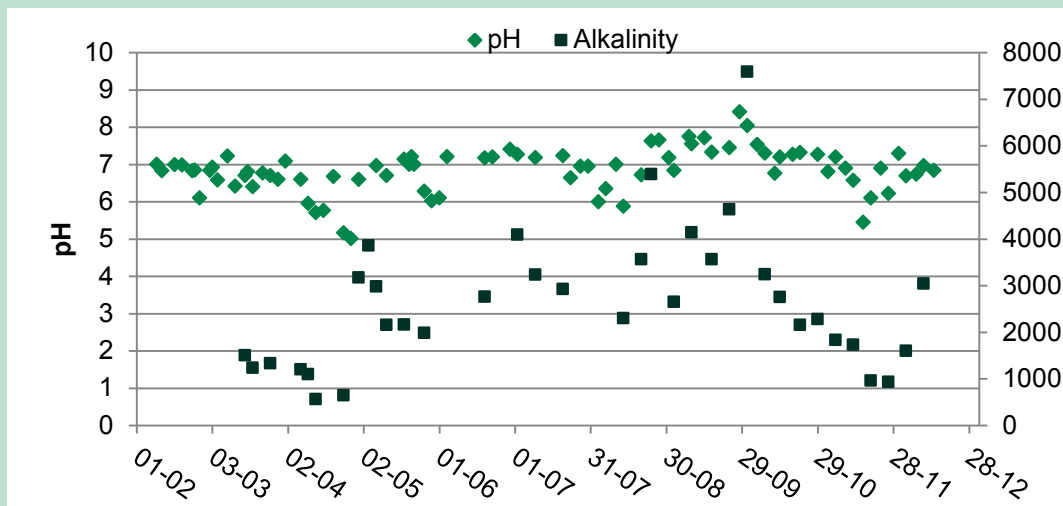
FIGUR 10. Udvikling i koncentration af tørstof (TS) og glødetab (GT) i den anaerobe reaktor.

4.1.3 Balancen i omsætningen

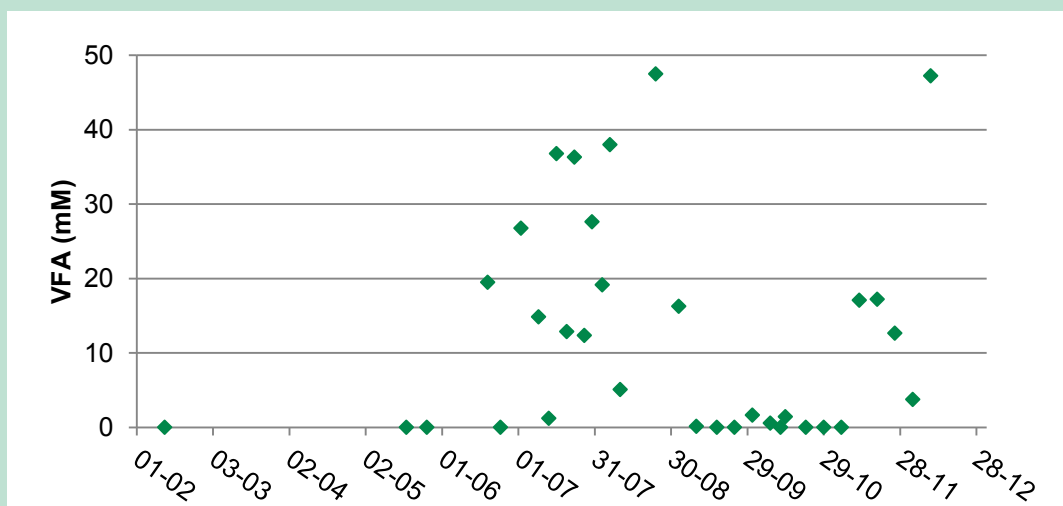
pH, alkalinitet og koncentrationen af flygtige syrer (VFA) er vigtige driftsparametre ved kontrol af den anaerobe biologiske proces, idet de indikerer om der er balance mellem den syredannende bakterie-population og den methandannende population. Ved begyndende ubalance ses typisk en stigning i VFA, et fald i alkalinitet og et fald i pH. pH-faldet kommer ofte sent i et forløb mod ubalance og bør derfor ikke stå alene som driftskontrolparameter, selvom det er den nemmeste parameter at måle kontinuerligt.

Ved stabil drift bør pH ligger på omkring 7. Lidt lavere værdier kan accepteres, men hurtige fald kan være et tegn på ustabilitet. I figur 11 er vist udviklingen i pH og alkalinitet. Som det fremgår af figuren ligger pH typisk omkring 7, idet der dog i perioder ses pH-værdier i området 6-7. Endvidere ses en 3-4 tilfælde med et relativt skarpt pH-fald der tyder på proces ustabilitet. Alkaliniteten ligger typisk i området 2.000-4.000 mg CaCO₃/l, bortset fra en periode i starten af testperioden.

I perioden fra slutningen af september til slutningen af november ses et markant fald i alkaliniteten, hvilket må tolkes som et tegn på begyndende proces-ustabilitet. Koncentrationen af VFA er vist i figur 12. Som det fremgår af figuren varierer koncentrationen betydeligt bortset fra perioden fra starten af september til starten af november hvor koncentrationen er på et konstant lavt niveau. Dette er tegn på en effektiv metandannelse og falder i øvrigt sammen med en periode med god rensegrad for COD (se figur 16).



FIGUR 11. Udvikling i pH og alkalinitet i den anaerobe reaktor.



FIGUR 12. Udvikling i koncentration af flygtige fede syrer (VFA) i den anaerobe reaktor.

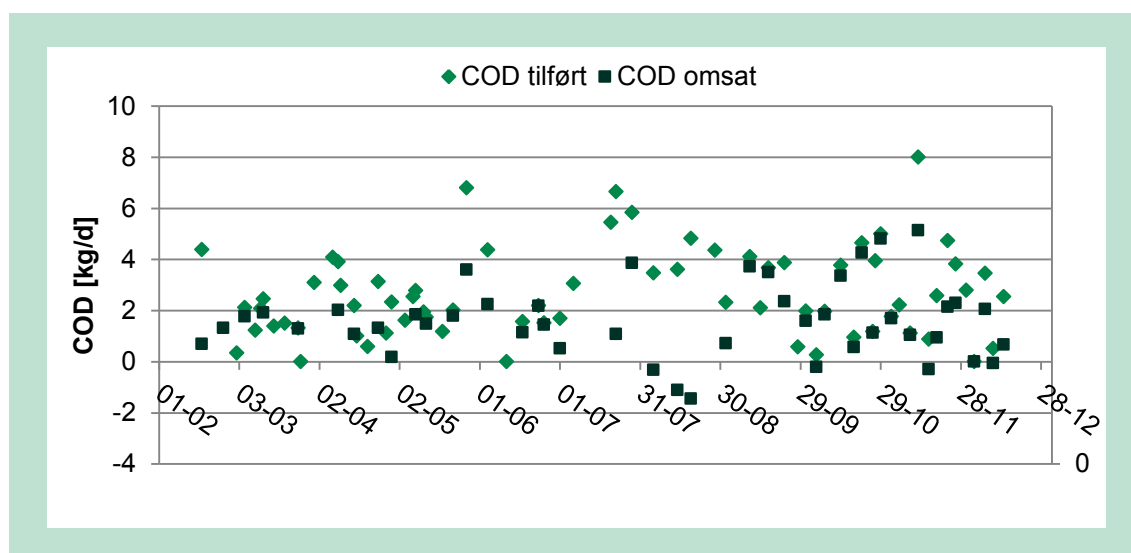
4.1.4 Omsætnings effektivitet / gasudbytte

I figur 13 er vist mængden af COD tilført med fødevandet samt mængden af COD omsat i den anaerobe procestank. Som det fremgår af figuren, og som det også blev nævnt i 4.1.1, er der generelt en stor variation i belastningen med COD. Endvidere fremgår det at der i størstedelen af testperioden også er stor variation i den mængde af den tilførte COD der rent faktisk omsættes i den anaerobe procestank, bort set fra perioden fra slutningen af september til slutningen af november hvor der ses et næsten fuldstændigt sammenfald mellem tilført og omsat COD som udtryk for en effektiv udnyttelse af den tilførte COD. Dette fremgår også af figur 17 hvor dette forhold er vist som en rensegrad for COD. Det skal bemærkes at den negative omsætning af COD, der ses i figur 13 i starten af oktober, primært må antages at skyldes at prøverne i tilløb og udløb fra procestanken er taget på samme tidspunkt, medens afløbsprøven – på grund af den hydrauliske opholdstid - i virkeligheden afspejler den COD der er tilført nogen tid før tilløbsprøven er udtaget.

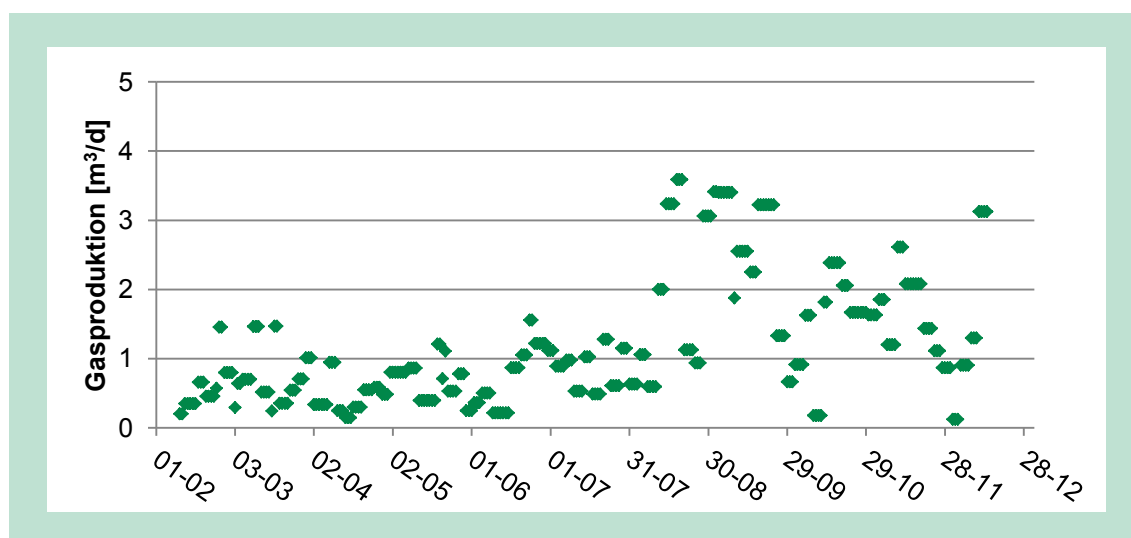
Gasproduktionen fremgår af figur 14. Som det ses ligger gasproduktionen i perioden fra start og frem til starten af august i intervallet 0-1,5 m³/d med en svag stigende tendens gennem

perioden. I resten af testperioden dvs. fra starten af august til midten af december ses et betydeligt højere niveau for gasproduktion der nu typisk ligger i intervallet 0,5-3,5 m³/d dvs. med betydelige udsving. I den periode hvor der opnås en relativt stabil proces (fra starten af september til starten af november) ses en noget mere stabil gasproduktion i intervallet 1-2,5 m³/d, bortset fra et enkelt dyk i dagene 9.-10. september.

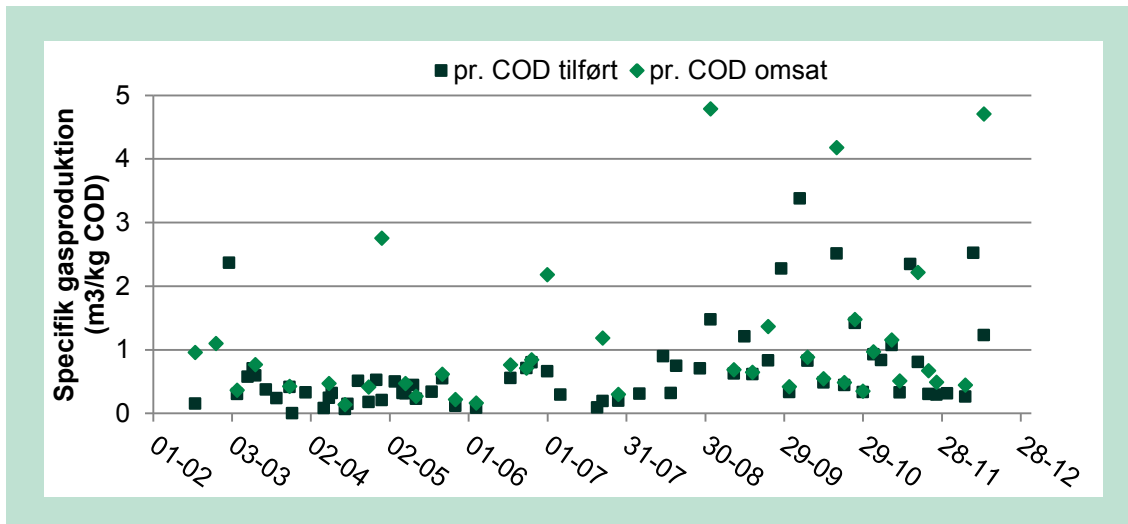
Den specifikke gasproduktion er vist i figur 15, dels i forhold til tilført COD-mængde og dels i forhold til omsat COD-mængde. Som det fremgår ligger den specifikke gasproduktion på et relativt lavt niveau i perioden fra start og frem til starten af august og varierer typisk i intervallet 0,1-0,6 m³/kg COD omsat og lidt lavere i forhold til tilført COD. Herefter øges niveauet men samtidigt se meget store udsving i intervallet 0,4 til knapt 5 m³/kg COD omsat. De meget høje værdier for den specifikke gasproduktion ligger helt uden for normale erfaringsværdier og må antages at skyldes fejlaflæsninger/målinger eller tidsforskydning mellem COD-måling og gasproduktion. Typisk ses ikke specifikke gasproduktioner på over 1 m³/kg COD omsat. I perioden med stabil drift fra starten af september til starten af november, ses relativt stabil specifik gasproduktion i området 0,4-1,0 m³/kg COD omsat. Den specifikke gasproduktion i forhold til tilført COD er næsten den samme, hvilket indikerer en effektiv COD omsætning til biogas.



FIGUR 13. Mængder af COD tilført og omsat.



FIGUR 14. Gasproduktion.



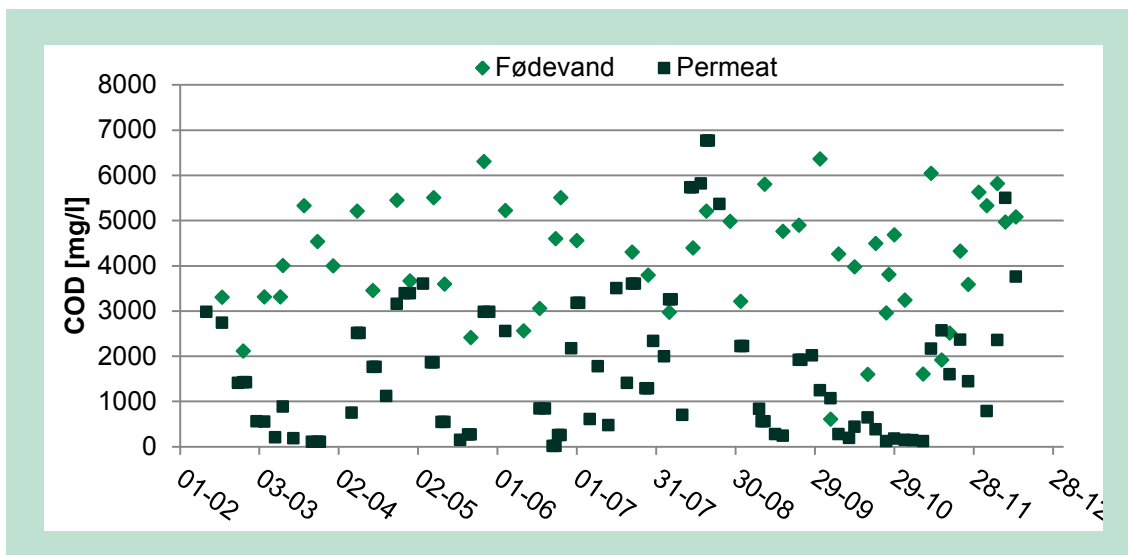
FIGUR 15. Specifik gasproduktion dels pr. COD tilført og dels pr. COD omsat.

4.1.5 Effektiviteten af rensningen af spildevandet

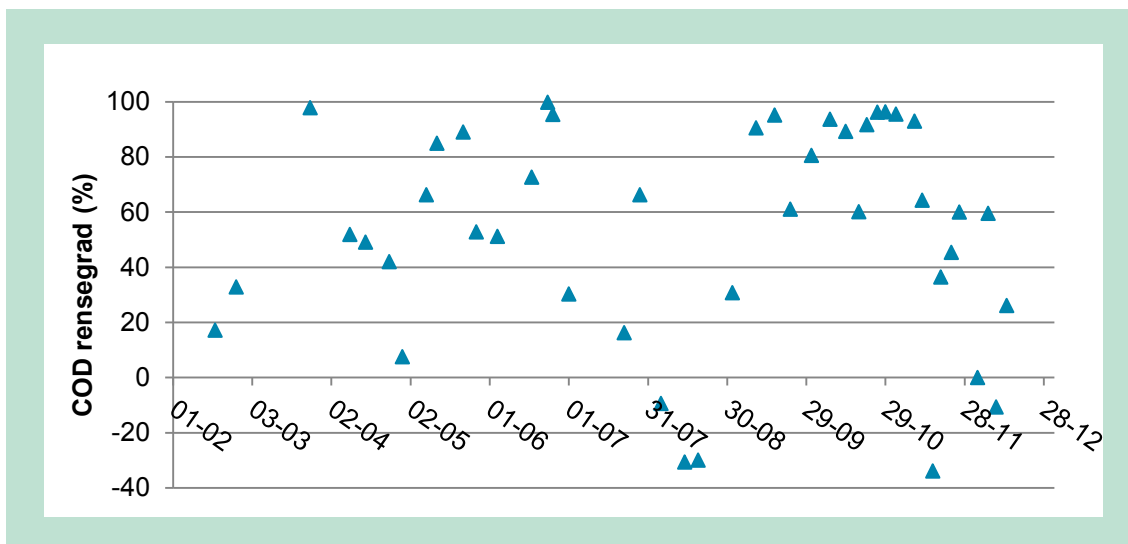
Effektiviteten af rensningen af spildevandet er dels interessant fordi den udtrykker noget om omsætningen af organisk stof til biogas, og dels fordi kvaliteten af afløbet fra det anaerobe MBR anlæg har betydning for eventuel betaling af særbidrag ved tilledning til offentlig kloak, eller for procesforholdene ved slutrensning i eget renseanlæg.

I figur 16 er vist udviklingen i koncentrationer af COD i fødevand til det anaerobe MBR-anlæg samt i filtratet fra membranfilteret. Som det fremgår, er der ofte høje koncentrationer af COD i filtratet hvilket indikerer en ringe omsætning til biogas. Der ses dog også perioder med lave COD koncentrationer i filtratet, herunder specielt i perioden fra starten af september til starten af november, der som tidligere nævnt er en periode med relativt stabil drift og god omsætning af COD til biogas. I denne periode ligger COD koncentrationen i filtratet i intervallet 100-500 mg/l, hvilket må antages at være et typisk niveau for en stabil anaerob MBR fødet med spildevand fra Vestfyen.

I figur 17 er effektiviteten af rensningen for COD vist som en rensegrad, dvs. fjernet COD i % af tilført COD. Som det fremgår, er der i den stabile driftsperiode fra starten af september til starten af november en høj og relativt konstant COD rensegrad.



FIGUR 16. COD koncentration i fødevand og filtrat



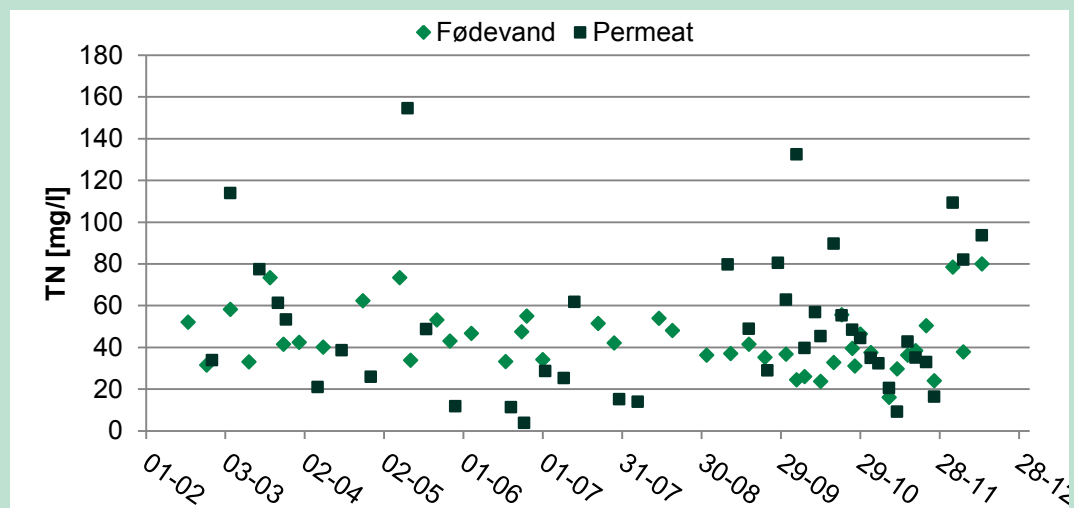
FIGUR 17. Rensegrad for COD

I figur 18 er vist udviklingen i koncentrationer af TN i fødevand og filtrat. Som det fremgår ligger TN i fødevandet typisk i intervallet 30-70 mg/l. Koncentrationen af N i filtratet udviser betydeligt større svingninger end i fødevandet - fra under 20 og til over 120 mg/l – og for en meget stor del af målingerne er TN højere i filtratet end i fødevandet, hvilket i nogle tilfælde kan skyldes tidsforskydningen fra indløb til afløb, men som i de fleste tilfælde ser ud til at skyldes frigivelse af kvælstof fra slammassen i den anaerobe procestank.

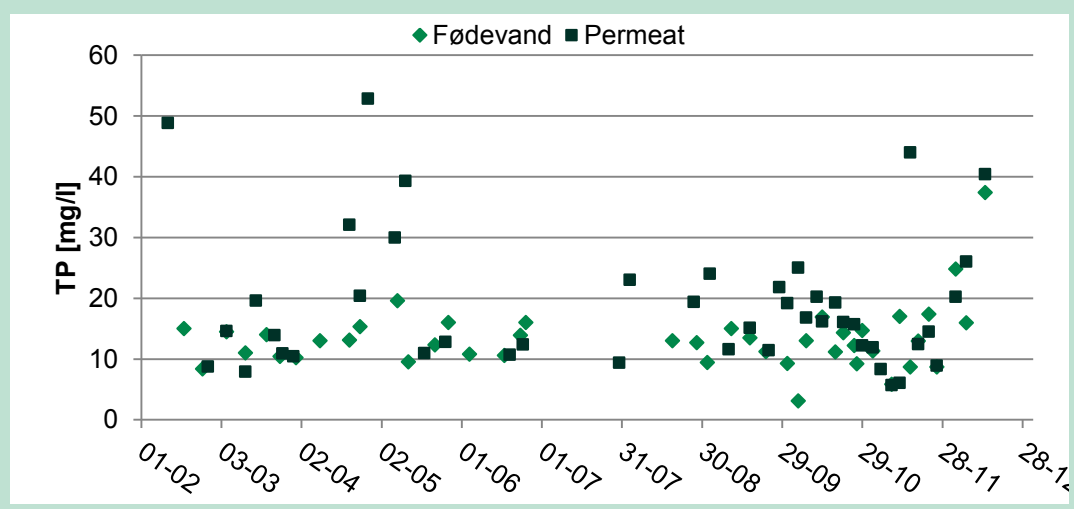
Ud fra data er det vanskeligt at vurdere TN-koncentrationen i filtratet for en stabil driftssituation. En beregning baseret på produktion af overskudsslam og indbygning af kvælstof i den stabile driftsperiode viser, at der ved en COD omsætning på 2 kg/d, en udbyttefaktor på 0,1 kg SS/kg COD indbygges der 12 g N/d når slammet indeholder 6% kvælstof. Hvis det antages at der tilføres 40 g N/d (40 mg N/l og 1 m³ fødevand pr. dag) svarer den indbyggede mængde kvælstof til 30% af den tilførte mængde. TN-koncentrationen i filtratet vil da ligge på 28 mg N/l.

Generelt ses det samme billede for TP (figur 19). Som det fremgår ligger TP-koncentrationen i fødevandet typisk i intervallet 8-20 mg/l, medens der i filtratet ses større

udsving der antageligt skyldes frigivelse af fosfor fra det biologiske slam. En beregning baseret på produktion af overskudsslam og indbygning af fosfor i det biologiske slam viser at der en COD omsætning på 2 kg/d, en udbyttefaktor på 0,1 kg SS/kg COD indbygges der 1,5 g P/d når slammene indeholder 1,5 % kvælstof. Hvis det antages at der tilføres 15 g N/d (15 mg N/l og 1 m³ fødevand pr. dag) svarer den indbyggede mængde fosfor til 10% af den tilførte mængde. TP koncentrationen i filtratet vil da ligge på 13,5 mg P/l.



FIGUR 18. TN-koncentration i fødevand og filtrat.



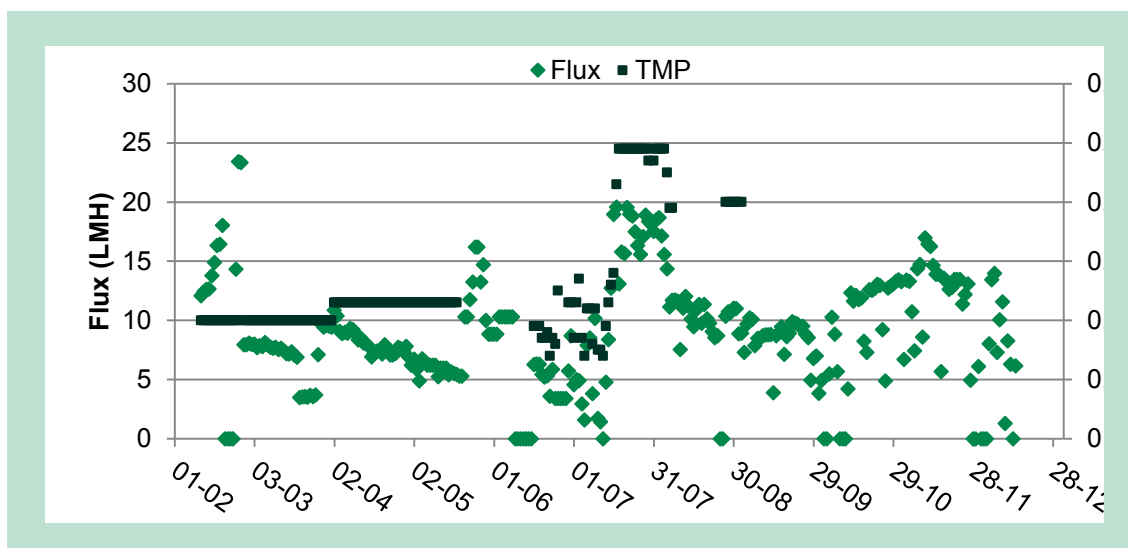
FIGUR 19. TP koncentration i fødevand og filtrat

4.1.6 Effektiviteten af membranfiltreringen

Membranfiltreringsprocessen forløb tilfredsstillende i hele testperioden. Som det fremgår af figur 20 har netto fluxen typisk ligget i intervallet 5-20 LMH. Membranarealet på "membrane filtration unit" (MFU) var 6,8 m², hvilket gav et meget højere flow end der reelt var behov for til testen. Driften blev derfor ændret fra kontinuerlig drift til pause/produktion drift og med meget lav differens tryk (TMP). Typisk filtrering tid var begrænset til 20-30% af tiden over et døgn, for at begrænse feed flow til pilotanlægget. Denne tid blev ændret til 40% på et senere tidspunkt i testforløbet, hvor et højt flow var nødvendigt for reaktortanken. Under filtringsforløbet, blev MFU kørt med en cyklus på 5-6 minutter filtrering og 15 bagskyld.

På trods af at UF filtratproduktionen således var on/off, kørte recirkulationen af den anaerob biomasse hele tiden gennem MFU og tilbage til bioreaktor tanken for at sikre en god opblanding.

I forhold til den flux, der er nødvendig for at komme op på den målsatte COD-belastning af størrelsen 10 kg COD/m³, skal fluxen hæves til lidt mere end det dobbelte. På baggrund af filternes tilsyneladende store kapacitet synes dette ikke at være et problem. Det højeste TMP for MFU under testen var kun 0,5 bar, hvilket gav en flux på 25 LMH. Typisk er disse membraner tryksat mellem 0,4-1,5 bar under drift, hvilket betyder at flux'en nemt kan sættes op, ved at hæve TMP, hvis det ønskes.



FIGUR 20. Udvikling i netto flux og TMP

Under testforløbet blev MFU kørt stabilt med reduceret fouling intensitet. 'Chemical enhance backwash' (CEB) blev udført på MFU med interval for hver 4-6 ugers drift. En 1,5 % lud opløsning (natrium hypochlorite) og en 1 % syre opløsning blev brugt for CEB rensning. Grundet den lave fouling intensitet, blev CEB rensningen intervallet sat ned. Dette kunne også være af den årsag at MFU med filtrate produktion, kun kørte 20-30 % af tiden med lav TMP. CIP (clean in place) af MFU var ikke nødvendigt for at have en høj performance under test forløbet.

Det kan altså konkluderes, at membranfiltreringsprocessen ikke har været en flaskehals under test perioden, men at problemer med opnåelse af stabil drift ved den målsatte belastning skyldes problemer med drift af bioreaktoren.

4.2 Hudegarveriet Scan-Hide

Driftsresultaterne fra Scan-Hide vil ikke blive præsenteret her i rapporten, da forsøgene, som nævnt, blev opgivet på grund af problemer med hæmning og ophobning af uorganisk materiale i reaktoren. I afsnit 4.4 / tabel 5 er resultaterne for den mest optimale periode sammenfattet, men det skal pointeres, at det er uvist, om de konstaterede hæmningsproblemer kan overvindes.

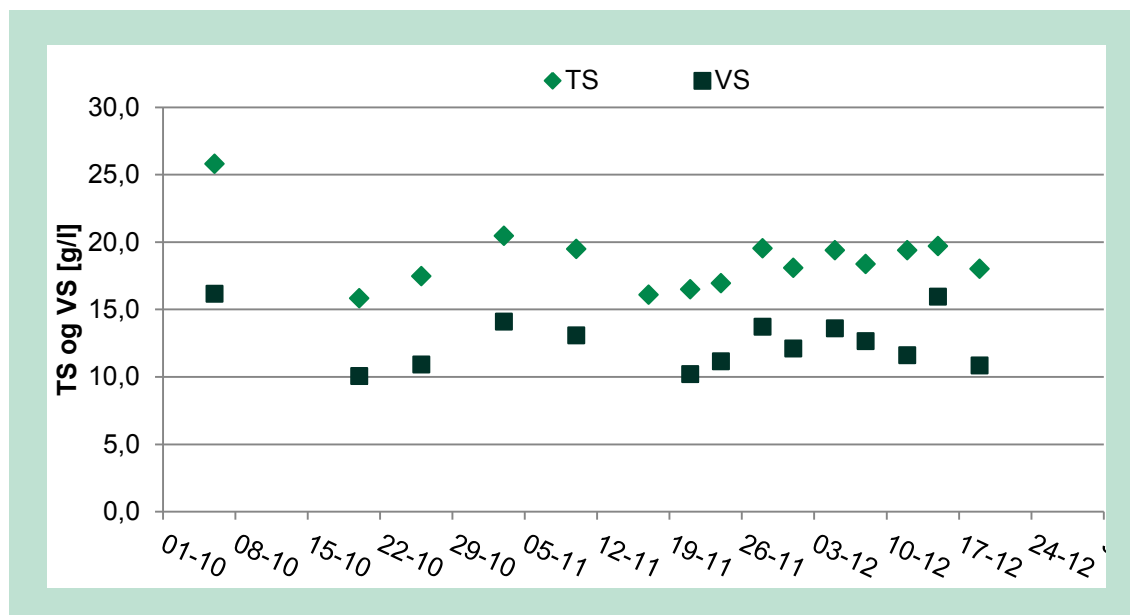
4.3 Danrice

Efter at forsøgene måtte opgives hos Scan-Hide i eftersommeren 2016 blev det besluttet at flytte forsøgsanlægget til Danrice. Forsøgene her blev startet i oktober 2016 med filtreret biomasse/fødeslam fra biogasanlægget ved Foulum

4.3.1 Opbygning af biomasse

Da der kun var kort tid til rådighed for forsøgene blev det besluttet at starte reaktoren med et højt niveau af biomasse. Herved var det muligt at undgå fasen med opbygning af biomasse.

Som det fremgår af figur 21 nedenfor, var biomasse-koncentrationen – i den ret korte testperiode – ret konstant. Tørstofkoncentrationen lå således i intervallet 15-20 g TS/l medens glødetabet lå i intervallet 10-15 g VS/l.

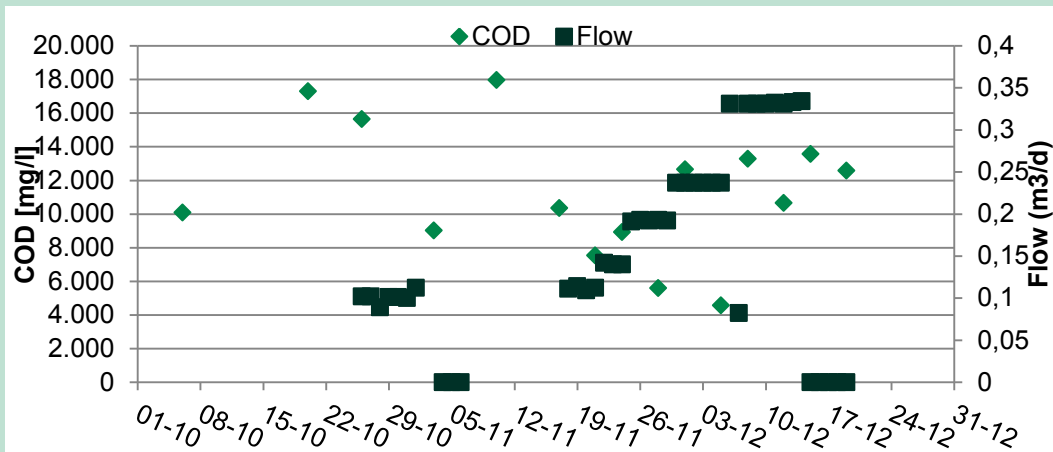


FIGUR 21. Slamkoncentration som total tørstof (TS) og tørstof glødetab (VS).

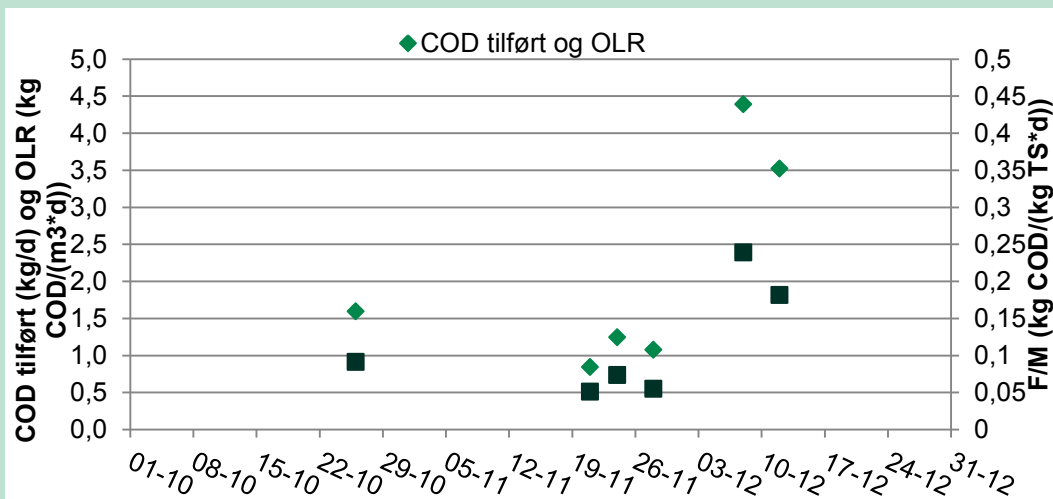
4.3.2 Belastning med organisk stof

Et af formålene med forsøgene var at afklare hvor stor en belastning med organisk stof systemet kan håndtere. I figur 22 er vist koncentrationen af COD i fødevand samt tilløbsflow under test perioden. Som det fremgår, er der stor variation i koncentrationen af COD (4.000 – 18.000 mg/l). Det fremgår videre af figuren at tilløbsflowet efter en indkøringsperioden blev optrappet i en række trin i perioden fra sidst i november til midten af december.

I figur 23 er vist den resulterende COD-belastning, dels direkte som mængden af COD tilført pr. dag, og dels som specifik belastning i forhold til reaktorvoluminet (OLR), og i forhold til mængden af biomasse i reaktoren (F/M). Da reaktorens gennemsnitlige aktive volumen antages at være 1 m³, bliver COD-tilført og OLR ens. Som det fremgår af figur 68 ligger F/M ved starten af perioden med flow-forøgelse lidt over 0,05 kg COD/(kg TS*d), og efter ca. 14 dage er den steget til 0,25, svarende til næsten en femdobling af belastningen på 14 dage. Dette er formentlig baggrunden for de procesproblemer der opstår i slutningen af perioden, hvilket er nærmere beskrevet i de følgende afsnit.



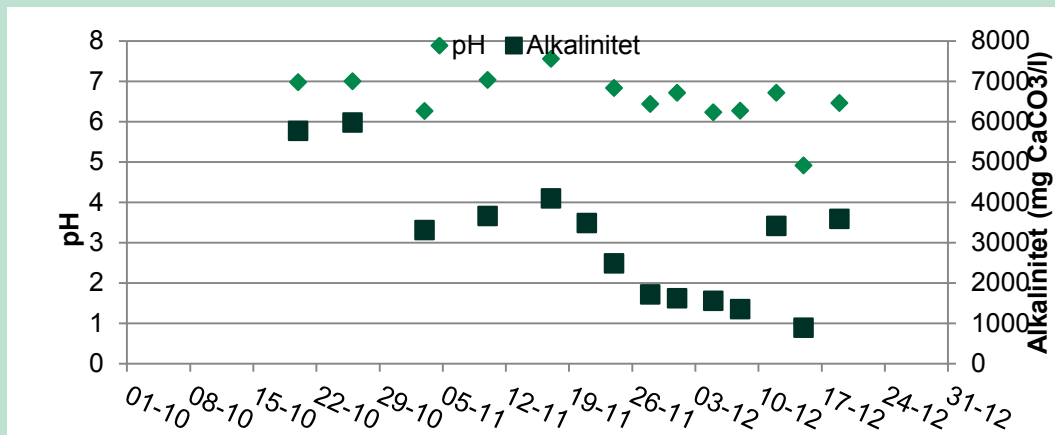
FIGUR 22. COD-koncentration i fødevand samt tilløbsflow



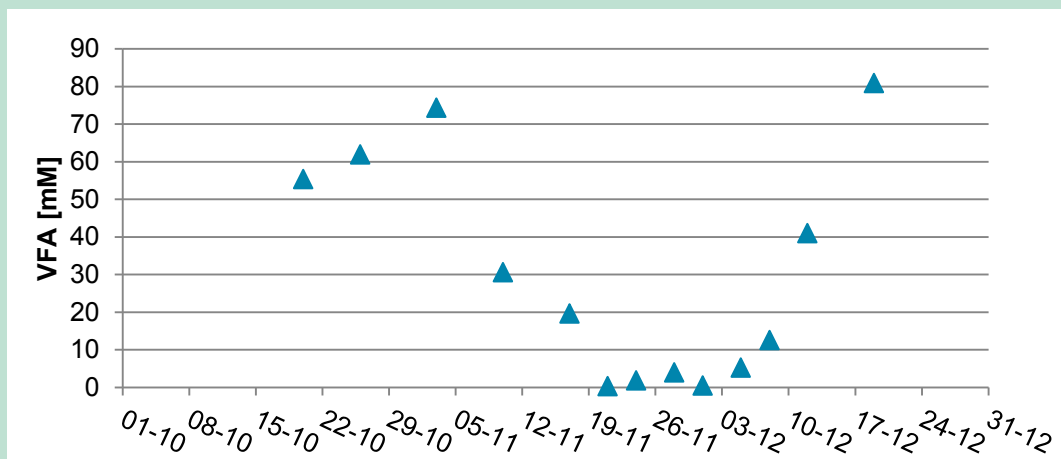
FIGUR 23. COD tilført samt belastning med COD i forhold til reaktør volumen (OLR) og i forhold til slamkoncentration (F/M).

4.3.3 Balancen i omsætningen

Konsekvensen af den hurtige øgning i belastningen var at det var vanskeligt at fastholde passende pH og alkalinitet i reaktoren – jf. figur 24, på trods af dosering af base når pH faldt under et vist set-punkt. Det høje alkalinitetsniveau i starten af perioden skyldes podeslam-mets høje bufferkapacitet, men denne spises op efterhånden som processen skrider frem. Niveauet af fri syrer (VFA) må ikke være for højt da dette indikerer at methandannerne ikke kan følge med i omsætningen af COD. Som det fremgår af figur 25, er VFA-koncentrationen fint lav under perioden 18/11-5/12, men her efter stiger den markant som tegn på ubalance i processen.



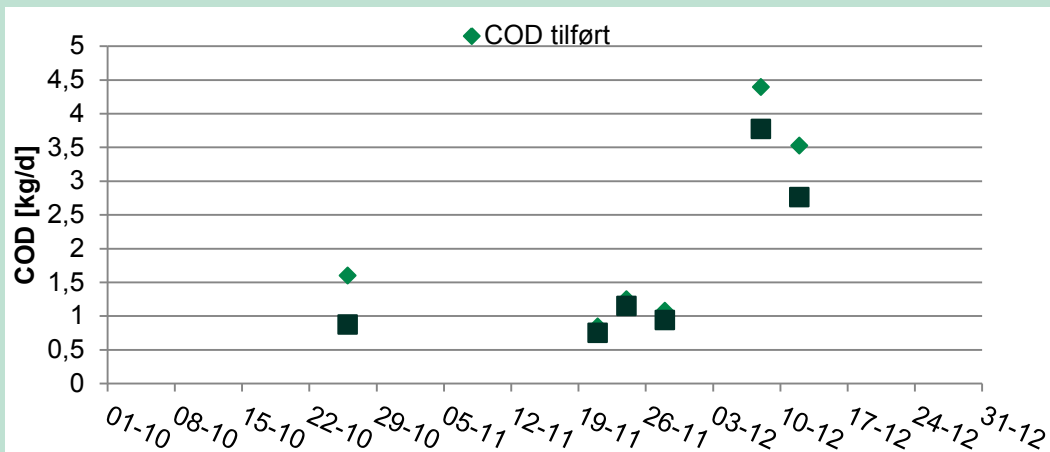
FIGUR 24. pH og alkalinitet i reaktor.



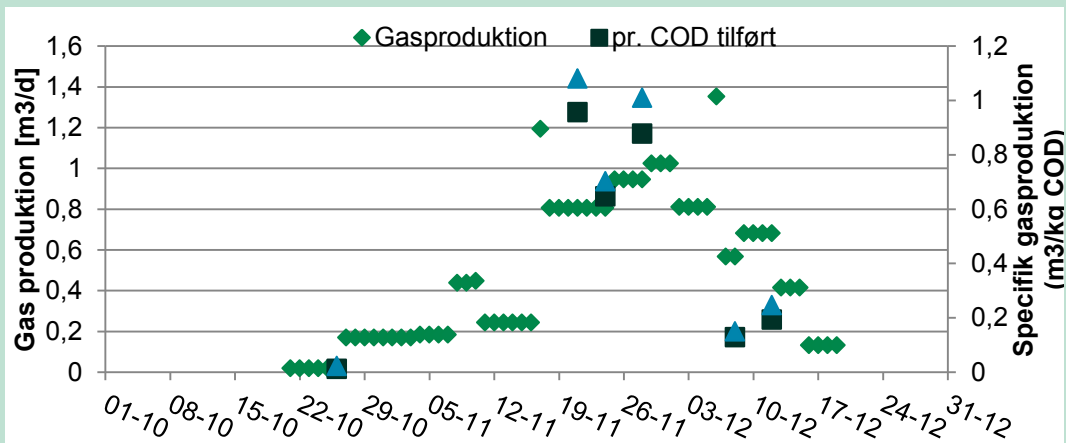
FIGUR 25. Koncentration af flygtige fede syrer (VFA) i reaktor.

4.3.4 Omsætningens effektivitet / gasudbytte

Konsekvensen af de ikke-optimale betingelser for de methandannende bakterier var at udnyttelsen af det tilførte organiske materiale blev gradvis dårligere. Dette fremgår blandt andet af figur 26, hvor det ses at der i starten og slutningen af perioden er betydelig forskel mellem Den COD-mængde der tilføres og omsættes. Endvidere ses det af figur 27, at gasproduktionen tilsvarende er lav i starten og slutningen af perioden, medens den er høj i perioden 18/11-5/2. I figur 27 er endvidere vist den specifikke gasproduktion dels pr. mængde tilført COD og dels pr. mængde omsat COD. Som det fremgår, er den specifikke gasproduktion høj i perioden med stabil drift.



FIGUR 26. Mængder af COD tilført og omsat

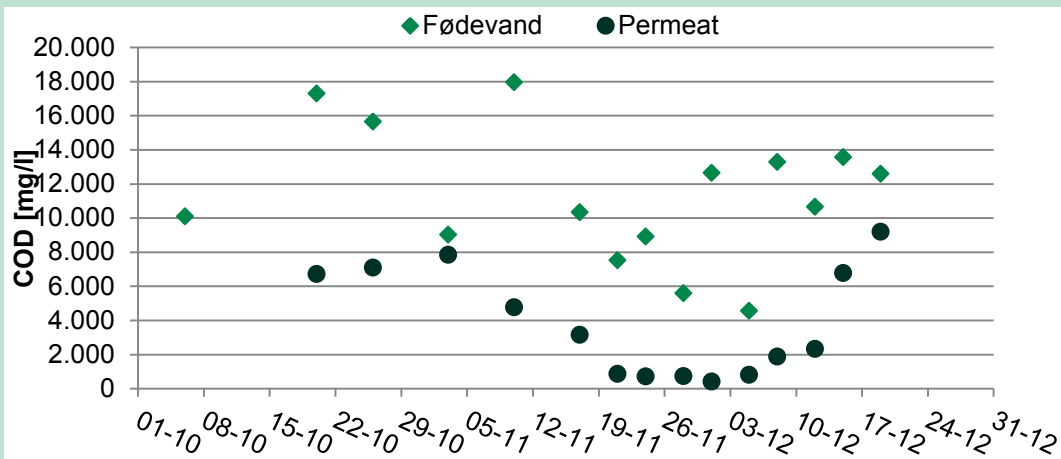


FIGUR 27. Gasproduktion og specifik gasproduktion (dels pr. COD tilført dels pr. COD omsat)

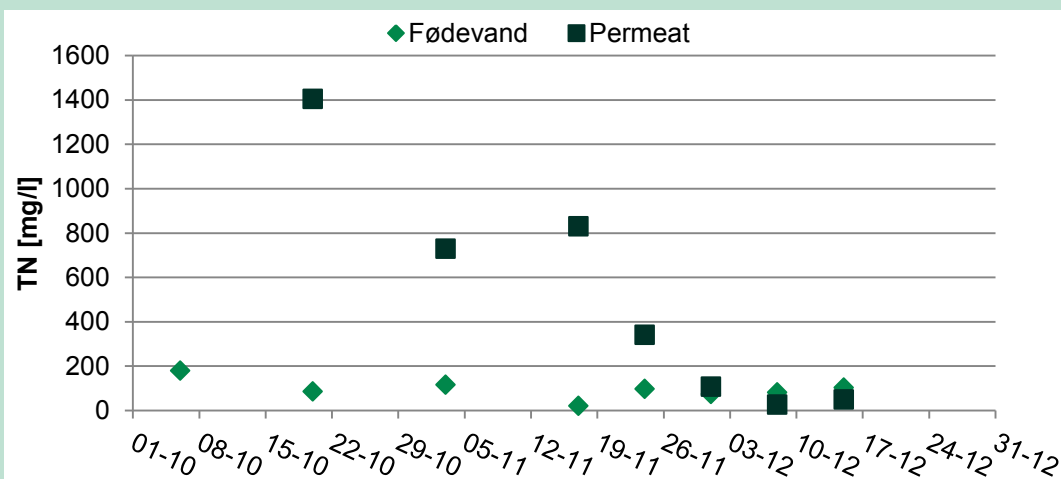
4.3.5 Effektiviteten af rensningen af spildevandet

På samme måde som de specifikke gasudbytte faldt, blev rensningseffektiviteten målt - på COD - også dårlig til sidst i forløbet – jf. figur 28. Koncentrationen af TN og TP er vist i henholdsvis figur 29 og 30.

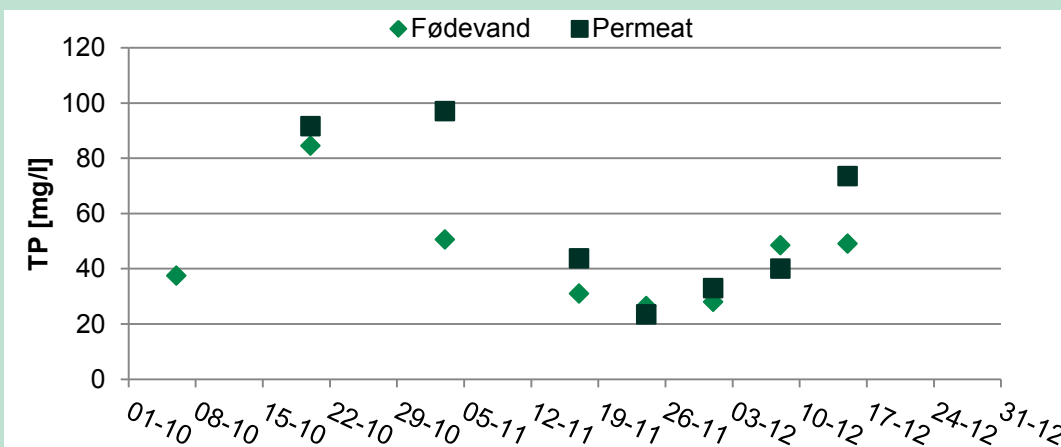
Med hensyn til TN ses det at koncentrationen i starten er højere i filtratet end i fødevandet. Det skyldes at der var en høj koncentration af TN i podeslammet som så gradvist udvaskes indtil koncentrationen i filtratet er på niveau med – og til sidst under – fødevandet. Faktisk kan der for denne type spildevand være en risiko for at processen i perioder kan udsættes for kvælstofmangel, hvilket i givet fald må korrigeres med tilsætning af en kvælstofkilde.



FIGUR 28. COD-koncentration i fødevand og filtrat



FIGUR 29. TN-koncentration i fødevand og filtrat



FIGUR 30. TP-koncentration i fødevand og filtrat

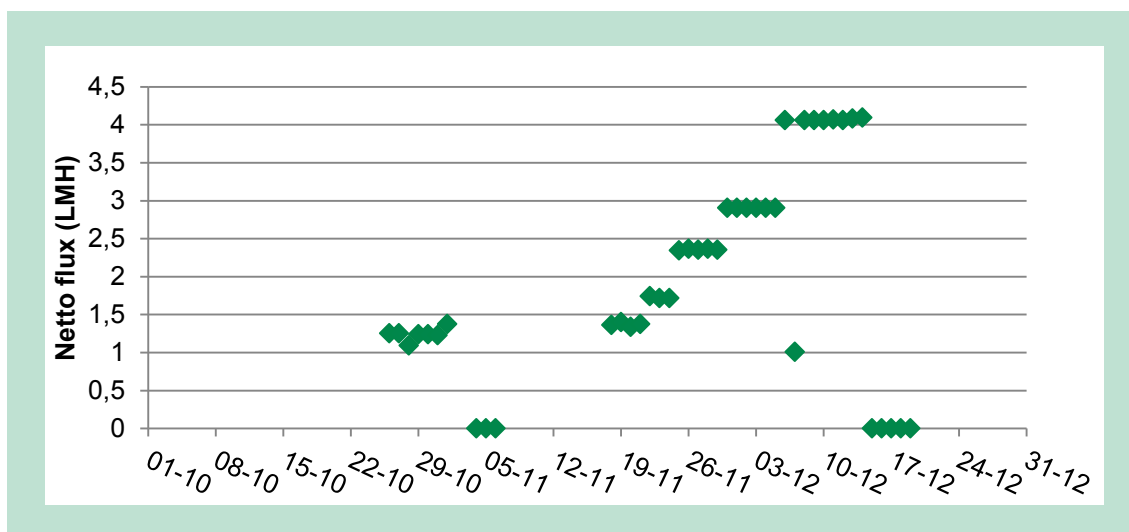
Hvad angår TP, ser der ud til at være rigeligt i fødevandet til at sikre processen mod fosfor-mangel.

4.3.6 Effektiviteten af membranfiltreringen

Efter afslutning af ScanHide testforløbet blev der udført en kemisk rensning (CIP) af membranerne, som herefter blev brugt til Danrice.

Differenstrykket på MFU under test forløbet var mellem 0,15-0,2 bar. Ligesom hos Vestfyn, er filtrat-produktionen fra MFU kørt som on/off drift. Filtrat-produktionen fra MFU var on mellem 20 og 50 % af tiden. Når der var et højere krav til flow til bioreaktoren, blev 'on-tiden' for filtrat-produktionen forhøjet gradvis, uden at TMP forhøjes på MFU.

I figur 31 er vist fluxen gennem testperioden. I forhold til den flux der er nødvendig for at komme op den målsatte COD-belastning af størrelsen 10 kg COD/m³, skal fluxen hæves til lidt mere end det dobbelte. På baggrund af perioder hvor anlægget blev drevet med recirkulation af filtrat, og dermed med en betydeligt højere flux, synes dette ikke at være et problem.



FIGUR 31. Netto flux gennem testperioden

Siden TMP var meget lav på MFU'en var fouling ikke et problem. Over hele test forløbet på Danrice blev, CEB udført hver 4. uge som en fast rutine. CEB var udført efter samme procedure som ved Vestfyn. Denne CEB rutine på MFU var meget lavere end hvad der på forhånd var antaget nødvendigt. Det ønskede flow for testen var meget lavt, som følge af højt koncentreret spildevand. Derfor blev MFU ikke kørt til grænsen under test forløbet. Dette er naturligvis en del af forklaringen på den meget begrænsede fouling af membranerne.

Det kan altså konkluderes, at, på trods af u hensigtsmæssige forhold i bioreaktoren, har membranerne i hele perioden fungeret uproblematisk.

4.3.7 Data for opskalering

I forhold til opskalering fra de gennemførte forsøg hos Danrice kan der udtrækkes et sæt data fra perioden med stabil drift fra slutningen af november til begyndelsen af december. Disse data er præsenteret i tabel 5.

4.4 Sammenfatning af driftsresultater

I tabel 5 har vi sammenfattet de vigtigste driftsresultater for de tre case-virksomheder.

TABEL 5. Sammenfatning af de vigtigste driftsresultater

Parameter	Enhed	Bryggeriet Vestfyen	Hudegarveriet Scan-Hide	Danrice
Koncentration af aktiv biomasse	kg GT/m ³	17,8	6	12,7
Organisk stofbelastning i forhold til biomasse (F/M)	kg COD/ (kg GT*d)	0,17	1,2	0,12
Organisk stofbelastning i forhold til volumen (OLR)	kg COD/(m ³ *d)	2,8	7,2	2,2
Hydraulisk Op-holdstid	t	30	-	112
Gasudbytte	Nm ³ /kg CODtilført	0,56	0,32	0,56
Gasudbytte	Nm ³ /kg CODomsat	0,68	-	0,64
% metan i gassen		76 %		73 %
COD-reduktion	%	82	60	80
Flux på membran-anlægget	l/(m ² *h)	9,6	3	2,6
Transmembrantryk	bar	0,15–0,4	0,2-0,3	0,2 – 0,3
Disse resultater blev opnået i perioden		1/10/15 – 12/11/15	21/03/16 – 12/05/16	10/11/16 – 15/12/16

5. Teknisk-økonomisk vurdering

I forhold til det afprøvede koncepts markedspotentiale er det naturligvis afgørende at forstå;

- i hvilket omfang systemet kan erstatte den eksisterende rensning,
- hvad omkostningerne til at introducere de beskrevne koncepter vil være, samt
- hvordan den samlede driftsøkonomi vil se ud efter introduktionen af systemet

For at belyse disse forhold er der for hver test-industri – eksklusiv Scan-Hide – samt en enkelt anden case-industri etableret et teknisk-økonomisk scenarie, der beskriver, hvorledes et anMBR kan dimensioneres og hvilke besparelser det vil kunne give, at etablere et sådant anlæg. I det følgende beskrives disse forhold for Bryggeriet Vestfyen, Danrice og Toms i Hvidovre.

5.1 Fordele og ulemper ved lokal rensning og biogasproduktion

Typisk vil et anMBR-anlæg med fordel kunne etableres som en 'for-rensnings-teknologi' der høster energien fra det overskud af organisk stof, der måtte være i spildevandet. Dermed ligger det også implicit, at systemet sjældent vil kunne levere den samlede rensning, men må suppleres med yderligere slutrensning – for eksempel på et kommunalt renseanlæg.

Det skal pointeres, at konceptet ikke lægger op til at skabe problemer for de kommunale renseanlæg, som måske har et behov for tilførsel af en vis mængde opløst organisk stof for at drive deres denitrifikation. Men i nogle situationer vil der være så stort et overskud af organisk stof i det industrielle spildevand at dette med fordel kan udnyttes, uden at dette skaber problemer for de kommunale renseanlæg – især efter at nye kvælstoffjernelsesprocesser som Anamox kommer mere og mere i spil. Systemet vil dermed potentielt kunne flytte udnyttelsen af en del af det organiske stof i spildevandet fra renseanlægget til de industrier, der udleder det. Eller udtrykt på en anden måde; systemet vil potentielt kunne bruges til at konvertere en omkostning til særbidrag på grund af et højt indhold af COD til en indtægt i form af sparede energjudgifter.

Som det er beskrevet i afsnittet om teknologien (kap. 3), vil den potentielt kunne ændre et behov for energi til beluftning af spildevandet til en produktion af biogas.

anMBR skal bruges til for-rensning af højt koncentrerede strømme

Det er også vigtigt at understrege at et anMBR-anlæg er særligt velegnet til de mere højt-koncentrerede spildevandstrømme. Det er derfor væsentligt, at der forud for etableringen gennemføres en analyse af de forskellige spildevandsstrømme som derefter sorteres i forhold til deres potentielle nyttevirkning i anMBR-anlægget. En sådan analyse er i forbindelse med projektet udført for Bryggeriet Vestfyen for at illustrere tilgangen – se nærmere i afsnit 5.2.

I praksis vil det naturligvis afhænge af den konkrete situation, hvilken form for slutbehandling af spildevandet der skal gennemføres og hvilken disponering af overskudsslammet, der skal bringes i spil.

Vandet fra et anMBR-system vil være helt fri for partikler større end 0,2 µm, og det vil derfor være velegnet for en yderligere membranfiltrering med f.eks. omvendt osmose. Dermed vil vandet potentielt kunne opgraderes til en genanvendelig kvalitet. Denne option er belyst i et enkelt lille eksperiment udført med det rensede vand fra Scan-Hide – se bilag 2. Dette aspekt er dog ikke uddybet nærmere.

5.1.1 Dimensionering

De centrale forhold for dimensionering af et anlæg til de forskellige case-industrier er illustreret i tabel 6.

TABEL 6. Dimensionering af anMBR-anlæg til de forskellige case-industrier.

Dimensionering		Vestfyen	Danrice	Toms	Kilde
Belastning:					
Spildevandets indhold af COD	mg/l	13.000	12.000	7.000	Målt + oplyst af virksomheden
Dagligt flow (efter udligning)	m ³ /d	140	110	120	
Daglig mængde COD	kg COD/d	1.820	1.320	840	Målinger
Forudsætninger - anaerob reaktor					
Biomassekoncentration i reaktor	kg MLSS/m ³	25	25	25	Antagelse 1
Belastning i forhold til biomasse (F/M-ratio)	kg COD/kg MLSS*d	0,40	0,40	0,40	Antagelse 2
Volumenbelastning	kg COD/m ³ *d	10	10	10	Beregnet
Beregnet reaktorvolumen mv.:					
Volumen af reaktortank	m ³	200	145	92	Beregnet
Volumen til membranfiltrering	m ³ /d	182	132	84	Beregnet
Filtrate volumen	m ³ /d	140	110	120	Beregnet
Hydraulisk opholdstid	timer	34	32	18	Beregnet
Forudsætninger – membranfiltrering					
Flux	l/m ² *t	25	25	25	Antagelse 3
	m ³ /m ² /d	0,6	0,6	0,6	Beregnet
Beregnet membranareal mv.:					
Nødvendigt membranareal	m ²	233	183	200	Beregnet
Areal per membran-enhed (MFU)	m ²	34	34	34	Beregnet
Antal membran-enheder	stk	7	5	6	Beregnet

Dimensioneringen er baseret på tre centrale antagelser:

- Det er antaget at systemet kan opereres med en biomassekoncentration på ca. 25 kg suspenderet stof (MLSS) per m³ (Antagelse 1)
- Det antages at denne mængde biomasse kan belastes med ca. 0,40 kg COD per kg MLSS per dag (Antagelse 2), og
- Det antages at membransystemet kan levere en flux på ca. 25 l per m² per time (Antagelse 3).

Disse antagelser underbygges i det følgende:

Antagelse 1: Biomasse-koncentrationen

Idet membransystemet tilbageholder alle mikroorganismene i reaktoren er det principielt muligt at opbygge en meget høj biomasse-koncentration. I de gennemførte test gjorde den begrænsede tid det ikke muligt at nå at opbygge denne koncentration, da der blev startet med en begrænset mængde 'podeslam' – undtagen i den sidste test hos Danrice, hvor vi klogt af skade startede med en større mængde.

Ifølge et review af Gao et al. (2014) /2/ opererer de i litteraturen beskrevne anMBR fuldskal-anlæg med biomasse-koncentrationer omkring 10 til 50 g/L. En antagelse på 25 g/L er derfor et rimeligt konservativt estimat. Ifølge samme reference har de fleste laboratorie- og pilotanlægsundersøgelser opereret med betydeligt lavere koncentrationer, ligesom denne undersøgelse.

Antagelse 2: Belastningen

I de gennemførte test var de højeste belastninger på o,12 og o,17 kg COD/kg GT af biomassen hos Vestfyen og Danrice. Igen handlede det om at der var begrænset tid til at opbygge specielt andelen af methandannende bakterier, som var den begrænsende faktor – jf. omtalen i kap. 4.

Ifølge Gao et al. er en belastning på 0,2-0,3 kg COD per kg biomasse fundet på flere fuldskalaanlæg. En antagelse på 0,4 er således relativt højt sat, men anses af projektteamet for fuldt realistisk såfremt den fornødne tid til indkøring er til stede.

Antagelse 3: Fluxen

Pilotanlægget var dimensioneret til en flux på 30 L/m²/time. Denne flux blev ikke opnået på grund af de beskrevne begrænsninger med at få belastningen op, men er ifølge Grundfos fuldt realistisk, når det tages i betragtning, at der ikke sås nogen former for problematisk fouling af membranerne.

5.1.2 Energi-balance

I tabel 7 er beregnet hvor stort et nettooverskud af energi det forventes at der kan høstes på de fire case-anlæg.

TABEL 7. Energibalancel for de analyserede cases

Energibalancel		Vestfyen	Danrice	Toms	Kilde
Energiforbrug til drift af membransystem	kWh/m ³	0,8	0,8	0,8	Grundfos
	kWh/d	112	88	96	Beregnet
Målt som primær energi	MJ/d	1.008	792	864	Beregnet
Forventet biogasudbytte	m ³ n biogas/kg COD _{indløb}	0,56	0,56	0,50	Måling
	m ³ n biogas/d	1.020	740	420	Beregnet
Andel methan	%	60 %	70 %	70 %	Måling/ antagelse
	m ³ n methan/d	710	520	300	Beregnet
Energiudbytte målt som primær energi	MJ/d	28.800	20.500	11.700	Beregnet
Netto energioverskud	MJ/d	27.300	19.700	10.800	Beregnet
Energi til drift i forhold til energiudbyttet		1:28	1:26	1:14	

Den centrale antagelse er her at anlægget kan drives med et energiforbrug på 0,8 kWh/m³. Dette tal er oplyst af Grundfos på baggrund af deres mange erfaringer med drift af aerobe MBR-systemer og betragtes af Grundfos som et konservativt estimat.

Biogas-udbyttet per kg COD er baseret på de gennemførte undersøgelser – jf. tabel 5 - og det samme gælder metan-andelen i den producerede biogas.

Som det fremgår, kan der for alle cases høstes et betragteligt energioverskud fra denne type spildevandsrensning. Den økonomiske værdi af biogassen afhænger naturligvis af anvendelsen.

I beregningerne af indtjeningspotentialet nedenfor er det antaget at virksomhederne udnytter biogassen ved afbrænding i eksisterende kedelanlæg – ved etablering af en ekstra brænder.

5.1.3 Driftsomkostninger

Interessen for etablering af anMBR-systemer vil naturligvis i sidste ende afhænge af økonomien, og derfor er driftsøkonomien søgt estimeret for de fire cases i tabel 8.

TABEL 8. Estimeret driftsøkonomi for de tre cases

Driftsomkostninger		Vestfyen	Danrice	Toms	Kilde
UDGIFTER					
Energiforbrug til drift af membransystem	kWh/d	112	88	96	Beregnet
Pris per kWh	kr/kWh	0,80	0,80	0,80	Antagelse
Pris per dag	kr/d	90	70	77	Beregnet
Omkostninger til kemikalier (anslået)	kr/år	10.000	10.000	10.000	Antagelse
	kr/d	43	43	43	Beregnet
Biomasseproduktion/overskudsslam:					
Omsætning af COD / rensningseffektivitet	%	85 %	85 %	85 %	Antagelse
Mængde omsat COD per dag	kg COD/d	1.547	1.122	714	Beregnet
Udbyttefaktor for slamproduktion	kg TS/kg COD	0,1	0,1	0,1	Antagelse
Produceret mængde slamtørstof	kg TS/d	155	112	71	Beregnet
Afvandet til 25 % TS	m ³ /d	0,6	0,4	0,3	Beregnet
Typisk omkostning til transport	kr/m ³	50	50	50	Antagelse
Samlet omkostning til bortskaffelse af slam	kr/d	31	22	14	Beregnet
Samlede driftsomkostninger	kr/d	163	135	134	Beregnet
	kr/år	57.000	47.000	47.000	Beregnet
INDTÆGTER					
Forventet gasudbytte	m ³ n methan/d	710	520	300	Beregnet
Værdi af 1 m³ methan	kr/m ³ methan	1,10	1,10	1,10	Antagelse
Værdi af biogasproduktion	kr/d	785	570	320	Beregnet
	kr/år	275.000	199.000	113.000	Beregnet
Sparede omkostninger til afledning (se separate opgørelser)	kr/år		442.000	131.000	Beregnet
Netto indtjeningspotentiale	kr/år	222.000	597.000	200.000	Beregnet
	kr/år	630	440	200	Beregnet

Som det fremgår, forventes etablering af et anMBR-system i alle tre cases at kunne give et ikke-uvæsentligt driftsoverskud.

5.1.4 Investering og tilbagebetalingstid

Investeringerne til etablering af anMBR-systemer er desværre ikke uvæsentlige. I tabel 9 er angivet en overslagsmæssig beregning for de tre cases.

TABEL 9. Estimerede etableringsomkostninger for de tre cases

		Vestfyen	Danrice	Toms	Kilde
INVESTERING (anslået)					
Tanke	kr.	910.000	660.000	420.000	Antagelse
Membrananlæg	kr.	1.373.000	1.078.000	1.176.000	Grundfos
Diverse (tilslutning/styring osv.)	kr.	2.275.000	1.650.000	1.050.000	Antagelse
Samlet investering	kr.	4.560.000	3.390.000	2.650.000	Beregnet
TILBAGEBETALING					
Simpel tilbagebetaling	år	21	6	13	Beregnet

Beregning af simpel tilbagebetalingstid for de tre cases giver alle temmelig lange tilbagebetalingstider som næppe vil være fristende for de fleste virksomheder. Mest lovende er Danrice, som med en tilbagebetalingstid på 6 år nærmer sig det realistiske.

5.2 Sortering af delstrømme hos Bryggeriet Vestfyen

Som nævnt ovenfor, er det vigtigt at analysere hvilke strømme der med fordel kan behandles i et anMBR-system. Hos Vestfyen findes en række forskellige spildevandsstrømme knyttet til de forskellige processer på bryggeriet – jf. tabel 10.

TABEL 10. Typisk sammensætning for de enkelte strømme på Bryggeriet Vestfyen.

Spildevandsstrømme	Volumen (m3/år)	% af samlet volumen	Typisk COD koncentration (mg/l)	Ton COD per år	% af total COD	Til an-MBR-systemet
Rengøring af bryghuset	18.000	21%	8.100	146	20%	Ja
Rengøring af gæringstanke (CIP)	14.000	16%	3.300	46	9%	Nej
Flaskevask	23.800	28%	500	12	2%	Nej
Rengøring af sodavandsproduktion	27.750	32%	7.200	200	29%	Ja
Øl	2.000	2%	140.000	280	40%	Ja
Totalt	85.500		8.000	684		
Totalt til anMBR	47.800	56%	13.100	626	92%	

Som det fremgår, er nogle af strømmene ganske 'tynde' med hensyn til indholdet af organisk stof, og disse strømme skal naturligvis ikke ind og belaste membransystemet i anMBR-systemet. Derimod skal det sikres, at det lille spild af færdigt øl, der desværre ikke kan undgås, bliver opsamlet effektivt og ledt til biogasanlægget.

Denne analyse kan naturligvis raffineres yderligere, og skal holdes op imod omkostningerne til at etablere et nyt separat system til opsamling og transport af vandet til anMBR-systemet.

5.3 Perspektivering

Det kan sammenfattes, at en lang række forhold afgør hvornår anaerob spildevandsbehandling med biogasproduktion er attraktivt for en virksomhed:

- Karakteren og koncentrationen af det organiske stof i spildevandet, da dette vil være afgørende for hvor meget af det organiske stof der kan omsættes til biogas.

- Tilstedeværelsen af andre stoffer i spildevandet som skal fjernes - f.eks. mængden af kvælstof – da dette vil afgøre hvor store omkostninger der skal påregnes til supplerende rensning
- Afløbskravene
- Omkostningerne til afledning af vandet – især om der betales særbidrag for organisk stof.
- Om virksomheden selv kan nyttiggøre den producerede biogas i deres egen varmeproduktion.

Yderligere vil det naturligvis være afgørende, om virksomheden er indstillet på at etablere genanvendelse af vandet efter rensning. I de gennemførte beregninger er dette alternativ ikke belyst, men som nævnt, vil filtratet fra anlægget være velegnet til yderligere filtrering med eksempelvis omvendt osmose. Herved vil der kunne produceres et osmose-permeat som vil tilfredsstille mange mulige anvendelser - eventuelt efter yderligere 'polering' med UV eller lignende for at sikre den hygiejniske kvalitet. Dette vil naturligvis ændre de økonomiske beregninger, idet denne tilgang vil reducere volumen af vandforbruget og spildevandsafledningen, men samtidig introducere ekstra omkostninger til vandbehandlingen.

6. Diskussion og konklusion

Projektets formål var som nævnt at afprøve og demonstrere et nyt anaerobt membranbioreaktor system til rensning af industrielt spildevand.

Overordnet havde undersøgelserne til formål:

- at vise at den anaerobe omsætning i det planlagte system fungerer tilfredsstillende - dvs. at der produceres den forventede mængde biogas.
- at vise at membranseparationen fungerer tilfredsstillende - dvs. at der opnås den ønskede renhed af det rensede spildevand, at systemet kan drives med den forventede flux og at nedbrud pga. fouling undgås.
- at undersøge om det samlede system kan give et netto energioverskud, med de forskellige typer spildevand der testes. Med andre ord at energiindholdet i den producerede biogasproduktion overstiger i forbruget af energi til drift af membranfiltreringssystemet mv.⁴

Dette blev af projektgruppen omsat til en række mere konkrete succeskriterier⁵:

1. Maksimering af netto energi-udbytte, dvs. bedst mulige balance mellem minimering af elforbrug og maksimering af gasproduktion. Et tilfredsstillende gasudbytte for det aktuelle spildevand ligger på niveauet 0,35 Nm³ CH₄ pr. kg COD tilført. Fuldskala-energiforbruget er vanskeligt/umuligt at fastlægge/demonstrere ved de aktuelle forsøg i lille pilotskala, men kan estimeres ud fra BioBooster's erfaringer med fuldskala filteranlæg.
2. Opnåelse af bedst mulig afløbskvalitet – under hensyntagen til 1. – og mindst en afløbskvalitet der fritager virksomheden for særbidrag. Afskæringsværdier for særbidrag vil typisk ligge omkring:
 - COD: 500 mg/l
 - TN: 60 mg/l
 - TP: 15 mg/l
3. Opnåelse af en organisk rumbelastning der mindst svarer til det belastningsinterval der opereres med for de førende konkurrenter i markedet, dvs. 10-30 kg COD/(m³*d) (under antagelse af et spildevand med relativt let omsætteligt COD og høj COD-fjernelse). 10 kg COD/(m³*d) sættes som mål for "baseline" belastning.
4. Opnåelse af en hydraulisk opholdstid der ikke overstiger den der opereres med for de førende konkurrenter i markedet, dvs. omkring 8h (under antagelse af et spildevand med relativt let omsætteligt COD og høj COD-fjernelse).
5. Identifikation af de driftsbetingelser der sikrer en rimelig problemfri drift – for kombinationen anaerob reaktor og membraner – og dermed minimering af resurser til overvågning og pasning, herunder kombination af reaktorbelastning, og driftsbetingelser for membranlægget (TMP, rotationshastighed, frekvens af backflushing, frekvens af CIP (dvs. fokus på drift med mindst mulig fouling).

⁴ Formålsbeskrivelse fra ansøgningen.

⁵ Internt notat af Per Elberg Jørgensen / DHI dateret 30.1pril 2014: 'Målsætninger for forsøg/demonstration'

Disse ambitioner/succeskriterier diskuteres nedenfor i forhold til de opnåede resultater.

6.1 Gasudbytte

Resultaterne viser, at i de perioder hvor den anaerobe omsætning fungerede tilfredsstillende - dvs. at processen var i god balance – blev der produceret den forventede mængde biogas. På bryggeriet blev der produceret 0,68 Nm³ biogas per kg omsat COD og hos Danrice var tallet 0,64 (jf. tabel 5). Med et gennemsnitligt methan-indhold på henholdsvis 76 % og 73 % svarer dette til henholdsvis 0,51 og 0,46 Nm metan per kg omsat COD for bryggeriet og Danrice.

Som vist i tabel 7 bliver energioverskuddet for de forskellige beregningscases i alle tilfælde mange gange det energiforbrug, der kræves for at drive processen. For bryggeriet og Danrice er energiudbyttet omkring 25 gange det forbrugte, mens det hos Toms ligger noget lavere på grund af en noget lavere COD-koncentration i spildevandet.

Samlet må det konkluderes, at den anaerobe proces må forventes at være en attraktiv behandlingsform for de undersøgte/vurderede typer spildevand set i forhold til gasudbytte.

6.2 Afløbskvalitet

Undersøgelserne viste en COD-reduktion på henholdsvis 82 % og 80 % hos bryggeriet og Danrice, hvilket må anses for rimeligt tilfredsstillende for et anaerobt system. Hos garveriet var det, som nævnt, ikke muligt at opnå balance i processen inden for den tid, der var til rådighed.

Jf. figur 16, 17 og 18 var afløbskvaliteten ved undersøgelserne hos bryggeriet meget varierende. I perioden med stabil drift (fra start november 2015 til midt december 2015) ses dog en tilfredsstillende afløbskvalitet med COD-koncentrationer under 1000 mg/l, kvælstof under 40 mg/l og fosfor under 20 mg/l.

Tilsvarende resultaterne kan findes for Danrice for de perioder med optimal drift – jf. figur 28, 29 og 30.

Samlet vurderes det, at der med en stabil drift af systemet vil kunne opnås afløbskvaliteter, der vil gøre, at koncentrationerne kommer under der typiske grænser for særbidrag. Dette er derfor forudsat i de økonomiske beregninger.

6.3 Rumbelastning

Som det fremgår ved sammenligning med resultaterne i tabel 5 er de opnåede rumbelastninger (OLR) væsentlig under, hvad vi havde håbet at opnå. Tallene ligger på henholdsvis 2,8 og 2,2 kg COD per m³ per dag for bryggeriet og Danrice – som skal sammenholdes med en ambition på 10. Dette hænger naturligvis sammen med problemerne med at opnå stabil drift af den anaerobe omsætning, hvilket førte til at der var behov for at køre med reduceret belastning, samt det forhold at koncentrationen af aktiv biomasse i reaktoren lå under det planlagte.

Ser vi i stedet på den organiske stoffbelastning i forhold til biomassen ('food to mass' eller F/M), var det defineret, at succeskriteriet burde være en belastning på 4 kg COD/(m³ * d) ved 25 kg MLSS/m³ - svarende til en F/M ratio på 0,15 kg COD/(kg SS*d).

I perioden med stabil drift var biomassekoncentrationen hos bryggeriet omkring 18 kg SS/m³ og det tilsvarende F/M forhold svarende til 0,17 kg COD/(kg SS*d) – jf. tabel 5. Tilsvarende kunne F/M hos Danrice opgøres til ca. 0,12 kg COD/(kg SS*d).

Ambitionerne om et F/M-forhold på 0,15 blev således mere eller mindre opfyldt, mens ambitionerne om en rumbelastninger ikke blev opfyldt.

Det vurderes dog af projektpartnerne, at der ikke vil være problemer med at opnå målsætningen om en rumbelastning på mindst 10 kg COD per m³ per dag, såfremt der opbygges en højere koncentration af biomasse i reaktoren og det sikres, at der tilføres en rimelig jævn belastning af spildevand. Der er absolut ingen tegn på, at dette vil give problemer for membransystemet.

6.4 Hydraulisk opholdstid

Som en direkte konsekvens af at rumbelastningen ikke kunne bringes på det ønskede niveau, kom den hydrauliske opholdstid naturligvis heller ikke helt på det ønskede niveau.

Som for diskussionen af rumbelastningen, ser vi ingen hindringer for at køre systemet med en højere biomassekoncentration og dermed øge belastningen, således at også den hydrauliske opholdstid reduceres.

6.5 Driftsbetingelser

Dette punkt havde til formål at identificere de driftsbetingelser der sikrer en rimelig problemfri drift – for kombinationen anaerob reaktor og membraner – men især med fokus på membranerne. Som beskrevet flere steder i denne rapport, har membransystemet virket upåklageligt ved alle de gennemførte test-kørsler, hvilket til dels hænger sammen med at de på intet tidspunkt er blevet belastet særligt hårdt. Grundet problemerne med at opbygge biomassen i reaktoren, har stofbelastningen på membranerne i gennemsnit ikke været særlig høj og tilsvarende har den hydrauliske belastning i størstedelen af tiden været ret begrænset. Alligevel tør vi godt konkludere at membransystemet har været overraskende robust. Det forhold, at vi kunne stoppe og starte filtreringerne i dagevis, uden at være nødt til at gennemføre rensninger at systemet, viser hvor robust membransystemet er.

De driftsbetingelser der blev fastlagt fra starten – jf. tabel 2 - viste sig at fungere glimrende hele vejen igennem. Med dagens viden ville vi nok have dimensioneret membransystemet mere 'snært', så vi havde kunnet komme tættere på systemet begrænsninger, men vi er overbeviste om at membran-systemet er endog særdeles effektivt i kombination med en anaerob reaktor, hvilket Grundfos også har konstateret i andre sammenhænge. Specielt blev det i forbindelse med afprøvning af BioBooster membranfiltrerings-systemet til afvanding af rådnetanksslam konstateret at systemet fungerer find med ca. 6% tørstof – altså ca. den dobbelte koncentration af det afprøvede i nærværende projekt /4/.

6.6 Samlet konklusion

Det kan sammenfattende konkluderes, at resultaterne fra afprøvningerne hos Bryggeriet Vestfyen og Danrice viser:

- At den anaerobe omsætning i det planlagte system fungerede tilfredsstillende - dvs. at der produceres den forventede mængde biogas. På bryggeriet blev der produceret 0,68 Nm³ per kg omsat COD og hos Danrice var tallet 0,64. Ved sammenligning med litteraturen må dette anses for yderst tilfredsstillende. Yderligere viste undersøgelserne en COD-reduktion på henholdsvis 82% og 80%, hvilket må anses for rimeligt tilfredsstillende for et anaerobt system.
- At membranseparationen fungerede tilfredsstillende. Dette kan bl.a. ses af at trykket over membranerne i alle undersøgelserne ikke oversteg 0,5 bar, at der kun var behov for rengøring af membranerne med meget lange intervaller – omkring en

måned – og at der på intet tidspunkt blev konstateret tilløb til irreversibel fouling af membranerne.

Med hensyn til spørgsmålet om det samlede system kan give et netto energioverskud, er dette opgjort teoretisk efterfølgende, da det ikke var muligt at gennemføre realistiske forbrugsmålinger på pilotanlægget. Disse opgørelser viser, at energiudbyttet i form af biogas er ca. 25 gange større end forbruget af energi til at drive anlægget⁶.

Projektet havde yderligere til formål at afklare/belyse konceptets markedspotentiale, idet der skulle identificeres mindst tre brancher, hvor konceptet kan implementeres økonomisk fordelagtigt⁷. Der er derfor udført en dimensionering og en analyse af omkostningerne til drift og investering på tre forskellige cases: De to vellykkede test-cases samt Toms fabrikker i Hvidovre.

Disse beregninger viser for alle fire cases et positivt årligt driftsresultat – varierende efter mængden af spildevand samt den afregningsmæssige situation. Det årlige potentielle overskud varierer fra ca. 200.000 kr. til ca. 600.000 kr.

Grundet ganske betydelige etableringsomkostninger bliver tilbagebetalingstiderne dog ikke særligt attraktive. De varierer mellem 6 og 21 år, hvilket ikke vil være attraktivt for de fleste virksomheder. Der kan således ikke ud fra de gennemførte analyser peges på brancher, hvor systemet kan etableres økonomisk rentabelt.

Det vurderes dog, at systemet kan være et relevant alternativ, når en virksomhed har behov for at reducere sin udledning af opløst organisk stof til et kommunalt renseanlæg. I en sådan situation vil systemet dels være et miljømæssigt fornuftigt alternativ til aerob biologisk behandling og yderligere vurderes det, at systemet er både teknisk robust og økonomisk konkurrencedygtigt med andre kommercielt tilgængelige anaerobe systemer.

⁶ Når der omregnes til primær energi, dvs. at elektricitetsforbruget omregnes til mængden af brændværdi der skal til for at producere denne elektricitet. Se tabel 7.

⁷ Formålsbeskrivelse fra ansøgningen.

Litteratur

1. **Test af membran bioreaktor-teknologier** (2010). By- og Landskabsstyrelsen, ISBN 978-87-92617-48-4
2. Gao, W., Liao, B. & Hai, F. Ibney (2014). **Anaerobic MBRs**. In F. Ibney. Hai, K. Yamamoto & C. Lee (Eds.), **Membrane Biological Reactors: Theory, Modeling, Design, Management and Applications to Wastewater Reuse** (pp. 335-377). United Kingdom: IWA Publishing.
3. Chen. Y., J. J. Cheng, & K. S. Creamer (2007). **Inhibition of anaerobic digestion process: A review**. Bioresource Technology 99 (2008) 4044–4064.
4. **anMBR Anaerob Membranfiltrering** (2014). Vandsektorens Teknologiuudviklingsfond.

Bilag 1. Kontrol og overvågning

TABEL 11. E+ -forsøgsanlæg, Bryggeriet Vestfyn

Kontrolpunkt	Hvor/hvordan	Hvor ofte	Hvem
Kontrol af spildevandstilførsel til bue-si/palletank		Dagligt	Vestfyn
Kontrol af spildevand retur	Kontroller at pumpe der pumper filtratet tilbage til spildevandstanken fungerer. Kasse på gulvet under bue-si må ikke være ved at løbe over.	Dagligt	Vestfyn
Kontrol af niveau i reaktor	Kontroller væskenniveauet i reaktoren. Er niveauet under 1,75 mærket kontaktes Renew som stopper MFU.	Dagligt	Vestfyn
Aflæse gasmåler	Aflæs målerstand på gasmåler og indfør aflæsning i skema	1 gang per dag	Vestfyn
Aflæse pH	Udtag reaktorprøve ved MFU'en. Mål pH med håndholdt pH meter indfør aflæsning i skema. Er værdien under 6,5 kontaktes Renew	1 gang per dag	Vestfyn
Udtagning af prøver (fødevand, reaktor-mix, filtrat, koncentrat, gas)	Se separat skema	2 gange per uge	Hans (Renew)/
Kontrol gas-klokke	Kontroller at den ikke er løbet tør for vand	1 gang per uge	Hans (Renew)
Aflæse skemaer	Aflæse skemaer i anlægget og indfør date i dataopsamlingsfilen	1 gang per uge	Laura
Rengøring af bue-si	Buesien overspules med vand-slangen og det opsamlede tørstof i bunden af sien opsamles og bortskaffes	Hver uge	Hans (Renew)
Kontrol/justering af fødepumpe/tilførsel til bio-reaktor	Kontrolleres online		
Kontrol af bio-reaktor (temp. m.v.)	Kontrolleres online		
Kontrol af membransystem (TMP, RPM)	Kontrolleres online		
Kontrol/justering af returføring af koncentrat	Kontrolleres online		
Udtag af overskudsslam	Kontrolleres online		

Renew Energy kan kontaktes på tlf.: 62172883 eller 62220001
HG+LBH 09-02-2015

Bilag 2. Membranfiltrering af filtrat fra Scan-Hide

Med det formål at belyse effekten af 'polering' af vandet med nano-filtrering (NF) og omvendt osmose (RO) er der udført et lille forsøg med filtrat fra Scan-Hide.

Forsøget blev udført d. 12. maj 2016 på et lille lab-anlæg (0,18 m² membranoverflade). Filtreringerne blev udført ved at opsamle 100 ml filtrat/permeat ved hvert trykniveau. Filtratet/permeatet blev derefter analyseret for en række typiske spildevandsparametre.

Resultater:

TABEL 12. Forsøg med nano-filtrering af filtrat fra Scan-Hide:

Transmembrantryk [bar]	Tid [h]*	Flux [l/(m ² *h)]	Permeabilitet [l/(m ² *h*bar)]
8	0,037	14,9	1,87
9	0,032	17,2	1,92
10	0,030	18,7	1,87
11	0,024	23,5	2,14
12	0,020	27,4	2,28
13	0,020	27,4	2,11
14	0,018	31,7	2,27

*Tiden angiver hvor lang tid det tog at opsamle 100 ml

TABEL 13. Forsøg med omvendt osmose filtrering af filtrat fra Scan-Hide:

Transmembrantryk [bar]	Tid [h]*	Flux [l/(m ² *h)]	Permeabilitet [l/(m ² *h*bar)]
15	0,051	10,9	0,73
20	0,031	17,7	0,88
25	0,022	25,0	1,00
30	0,018	30,8	1,03
35	0,014	38,5	1,10

*Tiden angiver hvor lang tid det tog at opsamle 100 ml

TABEL 14. Resultaterne af de kemiske analyser:

Prøve	COD [mg/l]	TP [mg/l]	TN [mg/l]	NH ₃ , NH ₄ [mg/l]
Filtrat fra pilot anlæg	3900	13,6	590	470
Filtrat fra NF	1120	0,05	430	390
Permeat fra RO	97	0	32	28
% reduktion med NF	71%	100%	27%	17%
% reduktion med RO	98%	100%	95%	94%

Kommentarer:

Filtreringerne opfører sig som forventet – stigende flux og permeabilitet ved stigende tryk. En del COD og kvælstof fjernes ved nano-filtrering, men for virkelig at opnå en markant reduktion kræves omvendt osmose.

EnergiPlus - Afprøvning af nyt koncept for biogasproduktion fra industrispildevand

Denne rapport er udarbejdet på baggrund af projektet "EnergiPlus spildevandsrensning", der er gennemført med tilskud fra Miljøministeriets pulje for Grøn Teknologi 2013.



Miljøstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø

www.mst.dk