

Rötning med integrerad slamförtjockning för ökad biogasproduktion

Maximilian Lüdtke

Marie Berg

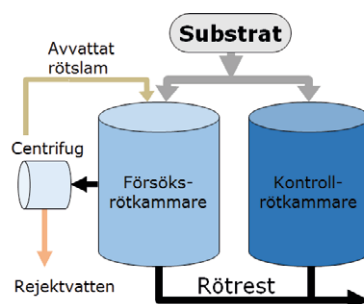
Susanna Berg

Christian Baresel

Sara Söhr

Lars Bengtsson

Erik Levlin



Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten Utveckling (SVU) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten
Rörsnät & Klimat
Avlopp & Miljö
Management

SVU styrs av en kommitté, som utses av styrelsen för Svenskt Vatten AB. För närvarande har kommittén följande sammansättning:

Anna Linusson, ordförande	Svenskt Vatten
Daniel Hellström, utvecklingsledare	Svenskt Vatten
Per Ericsson	Norrsvatten
Tove Göthner	Sveriges Kommuner och Landsting
Tage Hägerman	Smedjebacken
Stefan Johansson	Skellefteå kommun
Kristina Laurell	Formas
Annika Malm	Kretslopp och vatten, Göteborgs Stad
Lisa Osterman	Örebro kommun
Kenneth M. Persson	Sydvatten AB
Carl-Olof Zetterman	SYVAB

Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB
Box 14057
167 14 BROMMA
Tfn 08 506 002 00
Fax 08 506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se
Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Rötning med integrerad slamförtjockning för ökad biogasproduktion
Title of the report:	Increased biogas production in anaerobic digestion through recuperative thickening
Författare:	Maximilian Lüdtke, IVL Svenska Miljöinstitutet; Marie Berg, SYVAB; Susanna Berg, SYVAB, Christian Baresel, IVL Svenska Miljöinstitutet; Sara Söhr, SYVAB; Lars Bengtsson, IVL Svenska Miljöinstitutet; Erik Levlin, IVL Svenska Miljöinstitutet/KTH
Rapportnummer:	2016-06
Antal sidor:	88
Sammandrag:	Vid en organisk belastning på cirka 4,2 kg glödförlust m ⁻³ dag ⁻¹ (cirka +50 % jämfört med normaldrift) gav processen cirka 4 % bättre specifikt metanutbyte jämfört med en parallell kontrollreaktor vid samma belastning. Vid torrsubstanshalter högre än 6,5 % kunde betydande försämring av omrörning och värmeväxling ses.
Abstract:	At an organic loading rate of 4,2 kg volatile solids m ⁻³ dag ⁻¹ (circa +50 % compared to normal operation), the process showed a 4 % increase in specific methane yield compared to a control reactor operated at the same loading rate. A deterioration in stirring and heat exchanger efficiency was observed at dry solids content above 6,5 %.
Sökord:	Rötning, slamförtjockning, uppehållstid, rötkammare, biogas, avvattning
Keywords:	Anaerobic digestion, recuperative thickening, retention time, dewatering, biogas
Målgrupper:	Biogasanläggningar, vattenreningsverk
Omslagsbild:	Vänster till höger: Schematisk processbild, översikt gasuppgraderingen på Himmerfjärdsverket, vy över rötkammartoppen och centrifughuset, dekantercentrifugen som användes under en del av försöken. Foto: Marie Berg och Súsanna Berg, Syvab
Rapport:	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2016
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB
Om projektet	
Projektnummer:	25-111
Projektets namn:	Utvärdering av EXRT-metoden (delprojekt i "VA-verkens bidrag till Sveriges energieffektivisering)
Projektets finansiering:	SYVAB, Energimyndigheten och Svenskt Vatten Utveckling, med ytterligare förstärkning från ett industridoktorandprojekt delat av IVL Svenska Miljöinstitutet, SYVAB och Käppalaförbundet inom ramen för VA-kuster Mälardalen

Förord

År 2005–2013 drev Svenskt Vatten med stöd av Energimyndigheten projektet ”VA-verkens bidrag till Sveriges energieffektivisering”. Inledningsvis gjordes en nulägeskartering av energianvändningen hos deltagande VA-organisationer och redovisades som SVU-rapport 2008-01 ”Nulägesbeskrivning av VA-verkens energianvändning” (Etapp 1 – kostnad av 900 tkr). Etapp 2 påbörjades 2007 och 2,5 mnkr skulle användas för att stödja energibesparande investeringar. I slutet av 2008 startade etapp 3 med 25,5 mnkr i stöd från Energimyndigheten till arbete med energieffektivisering av VA-sektorn. Den tredje etappen hade större fokus på ny teknik, vilket bland annat premierades med en större andel i bidrag av den totala investeringskostnaden. Under projektet testades ny teknik och nya arbetsmetoder för energieffektivisering. Några av dessa ansågs angelägna att följa upp med en fördjupad utvärdering och uppföljning. En metod som framstod som intressant var den EXRT-process som redovisas i denna rapport. De resultat och erfarenheter som redovisas i rapporten baseras framför allt på uppföljning av fullskaledrift vid Himmerfjärdsverket (SYVAB). Investeringsstöd beviljades även till investering vid reningsverket Duvbacken i Gävle (Gästrike Vatten). Då dessa projekt ansågs särskilt intressanta ansökte Svenskt Vatten i samverkan med SYVAB och Gästrike Vatten om ytterligare medel för fördjupad uppföljning 2013–2014. På grund av skäl som redovisas i rapporten så förlängdes projekttiden till 2015-06-30.

Beträffande uppföljningen av EXRT projektet vid Duvbacken har processen inte kunnat köras i tillräckligt stor utsträckning för att ge tillförlitliga resultat för underlag av utvärdering av processen. En anledning till detta var att man på Duvbacken valde att använda befintlig avvattningscentrifug som en integrerad del i EXRT-processen. Programmering och processtyrning för att få detta att fungera visade sig dock mer komplicerat och resurskrävande än förväntat. Resultat från Duvbacken redovisas därför inte i denna rapport.

Det arbete som redovisas i denna rapport har primärt finansierats av SYVAB, Energimyndigheten och Svenskt Vatten Utveckling, med ytterligare förstärkning från ett industridoktorandprojekt delat av IVL Svenska Miljöinstitutet, SYVAB och Käppalaförbundet inom ramen för VA-kluster Mälardalen.

Daniel Hellström

Utvecklingsledare, Svenskt Vatten

Förkortningar

BMP	Biochemical Methane Potential (biokemisk metanpotential), [NL CH ₄ /gVS].
CH ₄	Kemisk beteckning för metan.
COD	Chemical Oxygen Demand, (kemisk syreförbrukning) [mg L ⁻¹].
CO ₂	Kemisk beteckning för koldioxid.
EXRT	EXtended sludge Retention Time (att förlänga uppehållstiden för substrat [slam]).
EXRT-RK	EXRT-rötkammare.
FISH	Fluorescence In Situ Hybridization.
F:M	Food to Microorganism ratio, ett mått på mängden tillgängligt substrat för mikroorganismer.
GC	Gas Chromatography (gaskromatografi).
HRT	Hydraulic Retention Time (hydraulisk uppehållstid), [dagar].
maxOLR	Maximal Organic Loading Rate (maximal? organisk belastning), [kg VS m ⁻³ d ⁻¹].
maxSRT	Maximal Solids Retention Time (fasta ämnens uppehållstid), [dagar].
NL	Normalliter.
N-NH ₄ ⁺	Ammoniumkväve, [mg L ⁻¹].
OLR	Organic Loading Rate (organisk belastning), [kg VS m ⁻³ d ⁻¹].
q-PCR	Quantitative Polymerase Chain Reaction.
REF-RK	Referensrötkammare.
RK	Rötkammare.
SRT	Solids Retention Time (fasta ämnens uppehållstid), [dagar].
STP	Standard Temperature and Pressure (standardtryck och – temperatur), [1 atm, 0 °C].
SS	Suspended Solids (suspenderat material), [mg L ⁻¹].
TOC	Total Organic Carbon, (totalt organiskt kol) [mg L ⁻¹].
TS	Total Solids (Torrsustans), [ton eller % av våtvikt].
VFA	Volatile Fatty Acids (total halt flyktiga fettsyror), [mg L ⁻¹].
VS	Volatile Solids (glödförlust), [ton eller % av TS].
URG	Utrötningsgrad, [%].

Innehåll

Förord	3
Förkortningar	4
Sammanfattning	6
Summary	7
1 Bakgrund	8
1.1 Allmän bakgrund	8
1.2 Beskrivning av EXRT-processen	8
1.3 Pilotförsök vid Hammarby Sjöstadsverk	10
1.4 Himmerfjärdsverket	11
1.5 Motiv för användning av EXRT-processen	13
1.6 Projektets mål	14
2 Material och metoder	15
2.1 Installation och idrifttagning av EXRT-processen	15
2.2 Processutformning	16
2.3 Övervakning och utvärdering av processen	17
3 Erfarenheter	21
3.1 Drifterfarenheter	21
4 Resultat	30
4.1 Gasproduktion maxSRT och maxOLR	30
4.2 Rötrestproduktion	31
4.3 Energibalans	34
4.4 Avvattningssegenskaper slutavvattning	37
4.5 Avvattningssegenskaper EXRT-Centrifug	39
4.6 Drift och processtålighet	41
4.7 Aktivitetstester	44
4.8 Förändringar av kvaliteten på rötresten	47
4.9 Mikrobiella förändringar i rötslammet	48
4.10 Kontrollförsök	50
5 Diskussion	51
6 Slutsatser	54
Referenser	56
Bilagor	
A – Uppföljningsschema	57
B – Utvärdering ultraljudsgivare och termiska givare	61
C – Analysresultat från FISH-analys, Vermicon	71
D – Analysresultat – Kvantifiering av metanogener genom qPCR-analys	84

Sammanfattning

Denna rapport beskriver en fullskaleutvärdering av integrerad slamförtjockning för rötkammare med dekantercentrifug. Testen utfördes på Syvabs Himmerfjärdsverk i Stockholm. Tre 4300 m³ rötkammare matades med en blandning av primär- och sekundärslam, samt externt substrat (till största del bestående av utsorterat matavfall och fettavskiljarslam). Rötkammaren som var utrustad med avvattningscentrifugen (EXRT – EXtended sludge Retention Time) jämfördes med de två andra reaktorerna bland annat med avseende på gasproduktion, processtabilitet, och påverkan på omrörning av ökade torrsustanshalter.

Två olika driftsätt testades: maxSRT och maxOLR. I maxSRT matades samtliga reaktorer med samma organiska belastning (OLR – Organic Loading Rate). Målen var att öka specifika gasproduktionen (gas per kilo glödförlust) med 10 % som en följd av den förlängda uppehållstiden, samt att hitta en övre gräns för när ökade torrsustanshalter började påverka omrörning, rundpumpning, och värmeväxling. För maxOLR var målet att visa att en ökning av OLR med minst 40 % var möjlig i jämförelse med referensrötkammaren, utan betydande processtörningar.

Resultaten från maxSRT visade att torrsustanshalter över 6,5 % (normal drift: cirka 3,5 %) påverkade värmeväxlingskretsen negativt, och att pumpbarheten i omrörningssystemet minskade omvänt proportionellt med ökade torrsustanshalter. Eventuella skillnader i gasproduktion kunde inte bekräftas på grund av felaktiga gasflödesgivare. Baserat på jämförelser av utröttningsgrader är det dock inte troligt att målet om 10 % ökad specifik gasproduktion kunde nås. De främsta bidragande orsakerna till detta var troligtvis: i) En redan hög utröttningsgrad i referensreaktorn. ii) Den temporära installationen av centrifugen kunde inte genomföras på ett sätt som minimerade kortslutningsströmmar för nytt inkommande substrat. iii) Återkommande driftstopp i pumpar och centrifug på grund av ackumulering av plaster från dåligt utsorterat matavfall gjorde att det var svårt att hålla tillräckligt långa sammanhängande perioder för utvärdering.

Resultaten från maxOLR visade att en OLR-ökning på minst 47 % jämfört med en referensrötkammare kunde uppnås, vilket resulterade i en +45 % ökning av gasproduktion per m³ rötkammarvolym utan processtörningar. Mätt i specifik gasproduktion motsvarade detta -1,5 % jämfört med referensrötkammare vid normal OLR, och +4 % jämfört med en referensrötkammare vid ökad belastning utan centrifug inkopplad. Polymeråtgång vid slutavvattningen dubblerades under maxOLR, det kunde dock inte klarläggas till hur stor del detta berodde på själva experimenten.

Fortsatt forskning på integrerad slamförtjockning och permanenta implementeringar bör fokusera på avvattningsutrustningen och dess installation i syfte att minimera polymeråtgång och påverkan av kortslutningsströmmar.

Summary

This report covers a full-scale evaluation of a recuperative thickening solution for anaerobic digestion using an off-the-shelf decanter centrifuge. The tests were performed at Syvab's wastewater treatment plant Himmerfjärdsverket in Stockholm, Sweden. Three 4 300 m³ reactors were fed with a mix of primary and secondary sludge, and external substrate (mostly source sorted food waste and grease trap fat). The reactor equipped with the dewatering centrifuge (EXRT, Extended Sludge Retention Time) was compared to the two other reactors with regards to gas production, impact of digester dry solids content on stirring and heat exchanger performance, process stability, and more.

Two modes of operation were tested, maxSRT and maxOLR. For maxSRT, all three reactors were fed with the same organic loading rate (OLR). The aims were to increase the gas production with 10 % in the EXRT reactor as a result of prolonged solids retention time, and to find an upper limit for digester dry solids content without significant drops in pumping, stirring, or heat exchanger performance. For maxOLR, the aim was to investigate the possibility to increase the OLR to the EXRT reactor with at least 40 % compared to a reference reactor, without significant process disturbances.

Results from maxSRT revealed that digester dry solids content above 6.5 % (normal operation: circa 3.5 %) impacted the heat exchangers negatively, with circulation pump flows decreasing inversely proportional to increasing solids content. Any changes in gas production could not be confirmed due to faulty gas meters, that later had to be replaced. Based on comparisons of degrees of volatile solids conversion between reactors, it is not likely that the goal of 10 % increased gas production was reached. This was likely due to mainly three factors: i) An already high degree of digestion in the control reactors. ii) Centrifuge installation could not be made to minimize impact of short-circuiting streams from new substrate. iii) Frequent failure of pumps and the centrifuge due to accumulation of plastics from the external substrate, resulting in difficulties in keeping solids retention times high during long enough periods to make a difference.

Results from maxOLR showed that an increased OLR of at least 47 % could be achieved compared to normal operation of a control reactor, resulting in +45 % increased gas production per m₃ of reactor volume, without significant process disturbances. Measured in specific gas production per kilo volatile solids, -1.5 % compared to a reactor operated with normal OLR, and +4 % compared to a reactor operated with increased OLR without the centrifuge. Polymer use at the end dewatering doubled during maxOLR. It is however not clear if this was caused solely by the experiments.

Future research work on recuperative thickening and permanent installations should focus on the dewatering equipment and its installation, so that both polymer usage and short-circuiting is minimized.

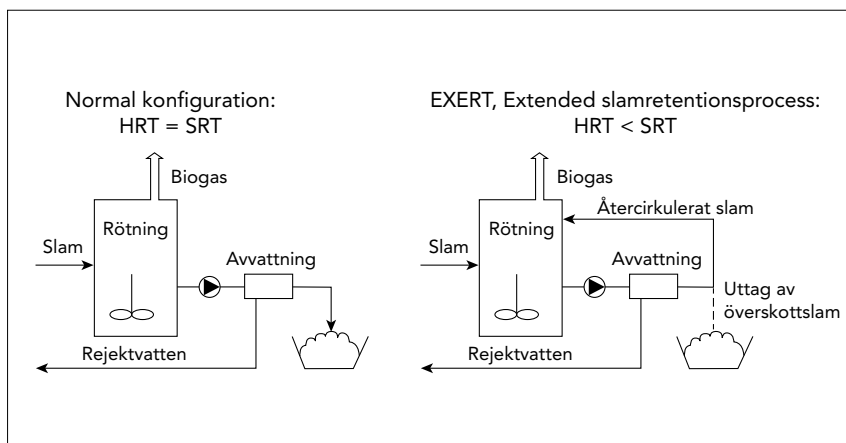
1 Bakgrund

1.1 Allmän bakgrund

Projektet syftade till att öka biogasproduktionen i en rötammare (RK) genom att förlänga uppehållstiden för fasta ämnen (SRT) jämfört med den hydrauliska uppehållstiden (HRT). Detta har åstadkommits med en process kallad Extended Sludge Retention Time (EXRT).

1.2 Beskrivning av EXRT-processen

EXRT-processen ger möjlighet att i viss mån frikoppla den hydrauliska uppehållstiden från fasta ämnens uppehållstid i en rötammare. Tekniken, som är relativt enkel att ta i drift, går ut på att rötslammet avvattnas och återförs till RK medan vattenfasen (rejektet) avlägsnas, se figur 1-1.



Figur 1-1 Rötning vid normal konfiguration ($HRT = SRT$) och rötning med EXRT-processen ($HRT < SRT$).

I detta projekt har en dekantercentrifug använts som avvattningsenhet men även andra tekniker är möjliga, exempelvis andra typer av centrifuger, pressar, och sedimenteringstankar. Slamåterföringen antas göra att koncentrationen av aktiva mikroorganismer per rötammarvolym ökar samtidigt som substratet kan hållas kvar längre tid i rötammaren än vad som annars kunnat uppnås utan recirkulering. Detta skulle i så fall gynna såväl nedbrytning som gasproduktion och möjliggöra rötning vid hydrauliska uppehållstider som annars varit för korta för att förhindra utspolning av mikroorganismer.

EXRT-processen kan styras för att få en önskvärd relation mellan HRT och SRT i rötammaren genom att ändra flödet in till avvattningssteget i förhållande till inflödet av nytt substrat samt genom att justera graden av avvattning. Processen kan köras i två principiellt olika driftsätt som beskrivs nedan.

1.2.1 Driftsätt maxSRT

– driftoptimering för maximalt biogasutbyte

Driftsätt maxSRT (maximal uppehållstid för fasta ämnen) passar bäst för rötkammare som beskickas med en begränsad substratström där det primära målet är att minimera rötrestproduktion och att få ut så mycket gas som möjligt ur sitt begränsade substrat. I driftsätt maxSRT bör vattenhalten i rötkammaren minskas så långt som möjligt utan att problem uppstår till exempel med pumpar och omrörning.

1.2.2 Driftsätt maxOLR

– långtidstest med ökad organisk belastning

Driftsätt maxOLR (maximal organisk belastning) passar bäst för rötkammare som behöver hantera substratmängder utöver designkapacitetet. Möjliga scenarier är till exempel vid temporärt behov att stänga ner en eller flera rötkammare för underhåll eller vid substratöverskott som annars inte kunde rötas. Designkapacitet definieras här som lägsta möjliga HRT för att förhindra utspolning av mikroorganismer eller högsta möjliga organisk belastning (OLR) utan att få processtörningar.

I driftsätt maxOLR strävar man till skillnad från driftsätt maxSRT inte mot att få hålla så lång SRT som möjligt i rötkammaren utan mot att hålla den organiska belastningen så hög som möjligt i syfte att producera största möjliga mängd gas utan att utspolning av mikroorganismer sker, och utan att betydande processtörningar uppkommer.

1.2.3 Val av driftsätt

I en fullskalig implementation kan EXRT-processen anpassas till en kombination av driftsätt maxSRT och maxOLR beroende på anläggnings-specifika variationer inom följande fem områden:

Infrastruktur

- Kapacitet på pumpar och omrörning i rötkammare för att hantera ökad torrsustans och viskositet.
- Kapacitet i eventuell uppgraderingsenhet (fordonsgas) eller annan form av nyttogörande av ökad gasproduktion till exempel direkt pipeline till gasförbrukare, gasturbin, gaspanna, bränslecell, kraftvärmeverk.

Kapacitet för rening av rejektvatten

- Från slutavvattning.
- Från EXRT-processen.

Designkapacitet

- Hur nära rötkammaren ligger sin designkapacitet definierad som lägsta möjliga HRT för att förhindra att utspolning av mikroorganismer sker eller högsta möjliga OLR utan att få processtörningar.

Substrat

- Metanpotential och nedbrytningshastighet.
- Kostnad/intäkt för omhändertagande.
- Variation i tid med avseende på tillgång och kvalitet.

Hantering av rötrest

- Avsättningsmöjligheter inkl. kostnad eller intäkt.
- Metanslip från rötrest.
- Transporter: fordonstyp, bränsletyp och sträcka.

Kortfattat kan sägas att det ofta bör vara ekonomiskt och miljömässigt fördelaktigt för en anläggning att ta emot större mängder substrat trots att det innebär något lägre utröttningsgrad (URG) och metanproduktion mätt per ton behandlat substrat. Detta då marginalvinsterna för totalt ökad metanproduktion både ekonomiskt och miljömässigt i de flesta fall antas överstiga marginalkostnaderna för ökad hantering av rötrest och eventuellt ökat metanslip.

1.3 Pilotförsök vid Hammarby Sjöstadswerk

EXRT-tekniken har tidigare testats i form av driftsätt maxSRT i pilotskala vid Hammarby Sjöstadswerk under vintern 2010/2011 och gett mycket lovande resultat. Hammarby Sjöstadswerk som drivs av IVL Svenska Miljöinstitutet och KTH är en forsknings- och pilotanläggning där nya och innovativa metoder för avloppsvattenrening och biogasproduktion tas fram och testas. Vid EXRT-projektet på Hammarby Sjöstadswerk var det övergripande målet att öka utröttningsgraden till över 60 procent och minska uppehållstiden, HRT, från 20 till 10 dagar.

EXRT-processen visade under försökstiden ökad produktion av biogas och minskade slammängder. Processen klarade även av en ökning av den organiska belastningen utan att uppvisa de hämningar som normalt förekommer. Hydrauliska uppehållstiden minskade till 10,6 dagar medan de fasta ämnenas uppehållstid, ökade till 218 dagar med 78,7 procent minskning av glödförlust i rötresten. Emellertid var den organiska belastningen på 0,69 kilo VS $\text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ relativt låg jämfört med slamrötning vid Henriksdals reningsverk med 1,5 kilo VS $\text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$. För att öka belastningen hämtades därför externt slam från Henriksdals reningsverk. Vid ökning av den organiska belastningen från 2,05 till 3,15 kilo VS $\text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ visade mätning av biogasproduktionen att biogasutbytet ökades med 73 procent, med en maximal produktion av 14,5 kubikmeter per dag och metanhalten ökade med 10,5 procent till det högsta värdet på 63 procent. Specifik gasproduktion vid standardtryck och -temperatur, var 0,65 $\text{Nm}^3/\text{kg VSin}$.

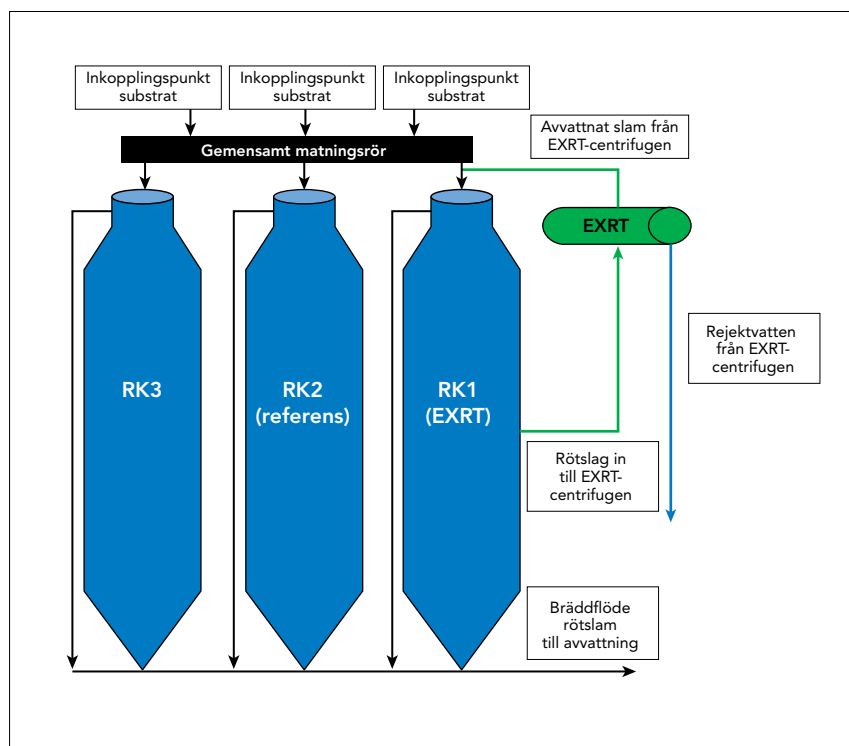
Biokemisk metanpotentialtest (BMP) utfördes för att undersöka hur EXRT-processen påverkade aktiviteten i den anaeroba metanbildningen. BMP-tester används normalt för att mäta i satsvis rötning av anaerob nedbrytbarhet för ett visst substrat, som blandas med ett så kallat inokulat (även kallat ymp), som är en redan etablerad rötkultur som innehåller mikroorganismer och startar den anaeroba nedbrytningsprocessen som därefter blir självgående. Två olika rötslam användes som inokulat. Inokulat från Hammarby Sjöstadswerk (förkortas härnäst som IS) som var behandlat med EXRT-processen samt obehandlat inokulat från Henriksdal (förkortas härnäst som IH). Vid BMP-tester med ett inokulat till substrat förhållandet 2:1 per viktbaserat på VS-innehåll, var produktionen av metan (CH_4) i normalliter (NL) 0,29 NL/gVS med IS och 0,33 NL/gVS med IH.

I andra BMP-tester med samma mängd av substrat och inokulat för varje prov, hade IS en högre metanpotential än IH, 0,31 NL/gVS och 0,29 NL/gVS respektive. Alla BMP-tester med Hammarby Sjöstadsverkets inokulat producerade en större volym av total ackumulerad gas. Detta tyder på att den anaeroba kulturen som odlats i rötammaren på Hammarby Sjöstadsverk tålde en högre organisk belastning och att detta rötslam hade en högre potential att producera biogas, mätt per g VS.

1.4 Himmerfjärdsverket

1.4.1 Ursprunglig rötningsprocess

Himmerfjärdsverket har tre stycken långsmala rötammare som är cirka 50 meter djupa och cirka 12 meter i diameter med en konisk botten. Varje rötammare har en aktiv volym på cirka 4 300 kubikmeter styck, det vill säga en total rötammarevolym på cirka 12 900 kubikmeter. För följande avsnitt, se figur 1-2 som visar en icke skalenlig skiss av den ursprungliga processkonfigurationen (bortsett från den utrustning och de flöden som är markerade med EXRT).



Figur 1-2 Rötningsprocess vid Himmerfjärdsverket. Beskickning till rötammarna sker via ett gemensamt matningsrör. EXRT-centrifugen är kopplad till rötammare 1.

Rötammarna på Himmerfjärdsverket matas med tre olika typer av substrat: primärslam, sekundärslam och externt substrat. Primär- och sekundärslam kommer från reningsverkets egna processer medan det externa substratet kommer från ett antal olika leverantörer. Slurry av utsorterat matavfall

utgör det största bidraget av organiskt material i den sistnämnda strömmen. Ungefärlig fördelning mätt i organisk belastning för dessa tre substratströmmar finns redovisat årsvis i tabell 1-1.

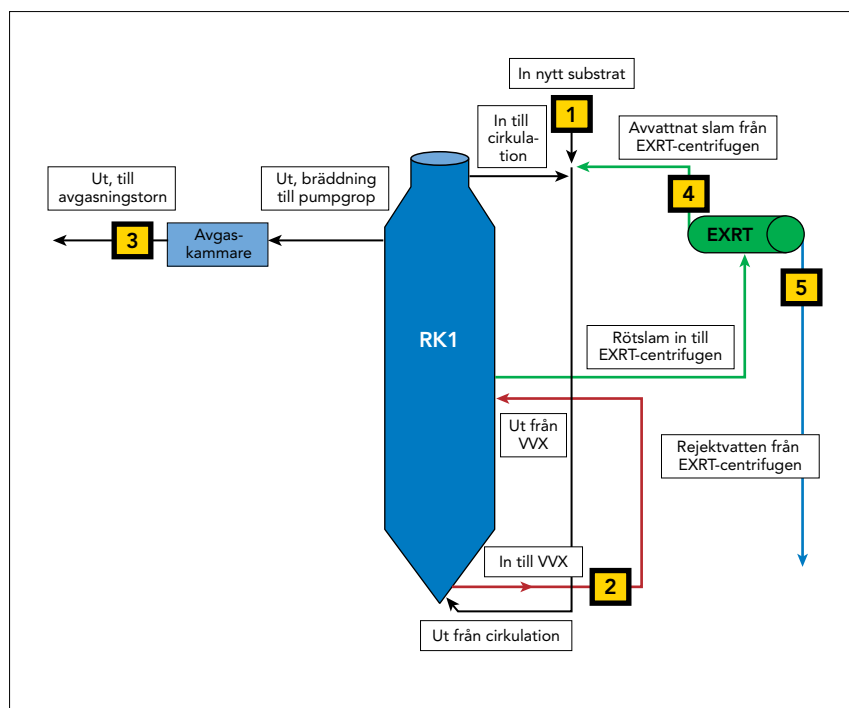
Beskickning sker genom ett gemensamt matningsrör där verkets tre substratströmmar kan kopplas in på flera olika positioner beroende på verkets behov av att underhålla pumpar och givare. Det är även möjligt att koppla fler strömmar till samma position.

Tabell 1-1 Årlig OLR till total RK-volym fördelat på substrat uttryckt i $[\text{kg VS m}^{-3}\text{d}^{-1}]$ och [%].

Substrat	2011		2012		2013		2014		2015*	
Primärslam	1,0	38 %	1,1	39 %	1,0	35 %	1,2	44 %	1,3	46 %
Sekundärslam	0,6	21 %	0,6	21 %	0,7	24 %	0,6	20 %	0,7	25 %
Externt substrat	1,1	41 %	1,1	40 %	1,1	41 %	1,0	36 %	0,8	29 %
Total organisk belastning	2,7	100 %	2,7	100 %	2,7	100 %	2,8	100 %	2,8	100 %

* Till och med 2015-11-30.

Fördelningen av nytt substrat till röt-kammarna från det gemensamma matningsröret görs genom tidsstyrda ventiler. Dessa ventiler öppnas och stängs i turordning, en så kallad matningscykel, så att inpumpning av nytt substrat endast sker till en röt-kammare åt gången. Vid normal drift är samtliga ventiler totalt öppna lika lång tid sett över en längre tidsrymd, vilket



Figur 1-3 Röt-kammare 1 med EXRT-centrifug installerad. Svarta pilar: in-, ut- och cirkulationspumpning. Gröna pilar: Flöden, EXRT-processen, grön cylinder motsvarar dekantercentrifugen. Röda pilar: Värmeväxlarkretsen. Gula boxar: Möjliga provtagningspunkter i EXRT-RK: 1) In till röt-kammare, 2) röt-kammarinnehåll från värmeväxlarslingan, 3) rötrest efter avgaskammare, 4) avtatt slam från EXRT-centrifugen in till EXRT-RK och 5) rejekt från EXRT-centrifugen.

innebär att de får samma organiska belastning. Vidare antas att lösningen med ett gemensamt matningsrör göra att samtliga rötkammare får samma fördelning av de olika substratströmmarna. Genom att ändra den relativa ventilöppningstiden per rötkammare i relation till den sammanlagda ventilöppningstiden, så kan den totala belastningen över tid till enskilda rötkammare styras.

Omrörning görs med hjälp av rundpumpning (ca 400 m³h⁻¹) där röt-slam tas från toppen av rötkammaren och pumpas ner i botten, se figur 1-3. Himmerfjärdsverket använder gaspannor eldade med biogas som värme-källa. Uppvärmning till 38 °C i varje enskild rötkammare sker via en egen värmeväxlarlinga med intag av kallare slam i botten och inpumpning av uppvärmt slam i mitten, se figur 1-3.

1.5 Motiv för användning av EXRT-processen

Nedan följer en redogörelse av de förväntade resultaten av användningen av EXRT-processen för de två olika driftsätten.

1.5.1 Förväntade fördelar med driftsätt maxSRT

- Mer gas kan utvinnas per ton inpumpat substrat.
- Mängden bildad rötrest kan minskas.
- Ett minskat antal slamtransporter från biogasanläggningen.
- Bättre utrötning minskar risken för utsläpp av metangas till atmosfären vid efterrötning i öppna rötrestlager och vid utsättning av rötresten.
- Mängden substrat som är tillgänglig för mikroorganismer minskar eftersom den organiska belastningen in till rötkammaren hålls oförändrad medan antalet mikroorganismer ökar per rötkammarvolym. Detta minskar risken för processtörningar på grund av tillfällig överbelastning.
- Möjlighet att ta emot mer svårnedbrytbara substrat som kräver längre uppehållstid.

1.5.2 Förväntade fördelar med driftsätt maxOLR

Möjligheten att öka den organiska belastningen in till en rötkammare kan utnyttjas på ett antal sätt:

- Öka inflödet av substrat till befintliga rötkammarvolymen i syfte att öka ekonomisk- och miljömässig vinst.
- Undvika kostsamma investeringar i nya rötkammarvolymen för anläggningar som ligger nära sin maxkapacitet.
- För anläggningar som har två eller fler rötkammare, att tillfälligt använda endast en rötkammare medan service och uppgradering sker på en annan rötkammare, utan att få totalt driftstopp.

I Himmerfjärdsverkets fall har halterna av ammoniak ökat i takt med att verket succesivt ökat sin mottagning av externt substrat sedan gasuppgraderingsanläggningen och mottagningsstationen för flytande organiskt material invigdes 2009. Den ökade strömmen av externt substrat har även minskat

den hydrauliska uppehållstiden. Hög belastning, låg HRT och höga halter ammoniak i rötkammaren innebär generellt att rötprocessen blir känsligare mot störningar. För Himmerfjärdsverket är därför resultat och erfarenheter från båda driftsätten intressanta:

Vill man i framtiden söka utökat miljötillstånd för att ta emot ytterligare mängder substrat i syfte att producera mer gas är driftsätt maxOLR mest intressant.

Bestämmer man sig för att prioritera driftstabilitet och utnyttja nuvarande substrattillgång maximalt är driftsätt maxSRT mest intressant. Driftsätt maxSRT skulle också kunna möjliggöra lönsam behandling av svårnedbrytbart organiskt material om konkurrensen om de bästa substraten hårdnar i takt med att fler biogasanläggningar startas i regionen. Även möjligheten att tillfälligt leda om belastningen från en rötkammare till de två andra är intressant eftersom inspektion av rötkammarväggarna samt övrigt underhåll behöver göras inom de närmsta åren vilket innebär att tömning av rötkamrarna behöver genomföras. Detta skulle kunna underlättas väsentligt om verket under en begränsad period kunde köras på endast två rötkamrare eftersom verket i dagsläget inte har någon redundans i sin rötkapacitet.

1.6 Projektets mål

Det övergripande målet var att projektet skulle ge ett opartiskt och väl underbyggt besked om EXRT-metodens tekniska och ekonomiska egenskaper, så att landets VA-verk kan ta ställning till om EXRT-metoden går att använda ”som den är”, om den behöver vidareutvecklas eller om den inte är av intresse. Förutom att redovisa drifterfarenheter och identifiera områden med förbättringspotential sattes även följande kvantitativa mål, uttryckt som en skillnad mellan rötkammaren utrustad med en EXRT-centrifug (EXRT-RK) och referensrötkammaren (Ref-RK):

- För driftsätt maxSRT, 10 procent mer gas per ton substrat.
- För driftsätt maxOLR, 40 procent ökad belastning utan att betydande processtörningar uppkommer.

2 Material och metoder

2.1 Installation och idrifttagning av EXRT-processen

Samtlig avvattningsutrustning installerades mellan 2011 och 2012 i ett specialbyggt hus på markplan bredvid RK1-toppen. Som avvattningsutrustning användes en dekantercentrifug. All installation och programmering av övervaknings- och styrsystem gjordes av Syvabs egen personal samt inhyrda konsulter. För kostnader se avsnitt 2.1.1 Kostnader för installation.

Byggnation och installation var helt klart för de första centrifugkörningarna i juni 2012, se tabell 2-1. Optimering av inställningar på pumpar, centrifug och polymerdoseringsutrustning samt ett utrötningsförsök på den använda polymeren genomfördes under sommaren 2012 i samband med ett IVL-lätt examensarbete för yrkeshögskolan i Hallsberg tillsammans med verkets egen personal.

Under den första försökstiden när driftsätt maxSRT testades användes en renoverad dekantercentrifug från NOXON med en hydrauldriven skruv och eldriven trumma (modellnummer DC10).

I samband med att försöken skulle övergå till att testa driftsätt maxOLR togs beslutet att en centrifug med större kapacitet behövdes för att klara det ökade flödet under denna fas. En NOXON dekantercentrifug (modellnummer DC20) med både hydraulisk trumma och skruv som tidigare använts vid verkets ordinarie slutavvattningssteg, ersattes av en nyare modell varvid den äldre DC20 kunde användas för att ersätta DC10 i EXRT-projektet. DC20 driftsattes i juni 2014. Båda centrifuger var kopplade till en specialbyggd polymerdoseringsutrustning anpassad för flytande polymer levererad av BASF.

Försökstiden för driftsätt maxSRT startade i februari 2013 och pågick till februari 2014. Driftsätt maxSRT startades sedan igen, med nya centrifugen, i juni 2014 och pågick fram till försöksstart för driftsätt maxOLR som startade i oktober 2014.

Tabell 2-1 Händelseförlopp från 2011 till 2015.

Händelse	Datum	Försöks-vecka	Vecka på året
Ombyggnation	Mellan 2011 och 2012		
Tidiga försök/uppstart	2012-10-08	–20	41
Driftsätt maxSRT med DC10	2013-02-25 till 2014-02-03	1–50	9 (2013) –6 (2014)
Ombyggnation (byte till DC20)	2014-02-03 till 2014-06-04	51–67	7–23
Driftsätt maxSRT med DC20	2014-06-09 till 2014-10-24	68–86	24–42
Driftsätt maxOLR	2014-10-25 till 2015-06-14	87–120	43 (2014) –24 (2015)
Kontrollförsök – lika belastning I	2015-07-01 till 2015-10-18	123–138	27–42
Kontrollförsök – maxOLR	2015-10-19 till 2015-12-01	139–145	43–49
Kontrollförsök – lika belastning II	2015-12-03 till 2015-12-27	146–148	44–52

2.1.1 Kostnader för installation

Tabell 2-2 visar kostnaderna för installation. Byte av centrifug från DC10 till DC20 är ej inräknat.

Tabell 2-2 Kostnad för installation.

Installationskostnader (SEK)	
Maskinell utrustning	282 779
Byggnation	1 153 889
El, styr, regler	738 380
Konsult	69 451
Summa	2 244 499

2.2 Processutformning

2.2.1 Försörsrötkammare (RK1) med EXRT-process

Figur 2-1 visar uppställning på EXRT-centrifugen, slangpump och torrslampump för driftsätt maxSRT och maxOLR. Figur 2-2 visar en bild på polymerdoseringsutrustningen. EXRT-utrustningen kopplades till RK1 enligt figur 1-3. I figuren finns också möjliga provtagningspunkter utmärkta. En slangpump användes för att pumpa upp rötslam från mitten av rötkammaren till centrifughuset på markplan. En torrslampump användes för att pumpa tillbaka avvattnat slam till en punkt på cirkulationsledningen placerad efter ventilen för nytt substrat från det gemensamma matningsröret. Rejektvatten från EXRT-centrifugen leddes till en pumpgrop med nivåstyrning och sedan till flotationsanläggningen på verket.



Figur 2-1

Till vänster: Dekantercentrifug, DC10. Gröna slangpumpen till vänster i bilden pumpar rötslam till centrifugen där det avvattnas. Den turkosa torrslampumpen pumpar sedan det avvattnade slammet tillbaka till rötkammaren. Till höger: DC20 centrifugen.



Figur 2-2

Polymerdoseringsutrustning med flödesmätare och reglage för dosering av polymer, bland- och spädvatten.

2.2.2 Referensrötkammare (RK2) och RK3

Rötkammare 2 kördes under hela projekttiden som huvudsaklig referens till EXRT-rötkammaren (EXRT-RK). Under försökstiden för driftsätt maxSRT fick samtliga rötkammare samma organiska belastning. Under utvärderingen av driftsätt maxOLR leddes en del av belastningen till rötkammare 3 om till EXRT-RK för att den senare skulle ha tillräckligt med substrat för att utvärdera driftsätt maxOLR.

2.3 Övervakning och utvärdering av processen

I detta avsnitt beskrivs de metoder som används för att utvärdera och övervaka processen. Driftsätt maxSRT och driftsätt maxOLR har utvärderats enligt de metoder som beskrivs nedan. För provtagnings- och analysfrekvens se Bilaga A – Uppföljningsschema.

2.3.1 Gasproduktion

Gasproduktionen följdes upp som biogasproduktion och som metanproduktion mätt totalt, per rötkammare samt som specifik gasproduktion, $\text{Nm}^3 \text{kg}^{-1} \text{VS}^{-1} \text{dygn}^{-1}$. Alla beräkningar som involverar organisk belastning och utbyte per mängd organiskt material in till rötkammarna har för båda driftsätten beräknats med avseende på de mängder nytt substrat som beskickats rötkammaren. Den extra mängd organiskt material som tillförts EXRT-RK från avvattningscentrifugen har alltså inte räknats in.

All gasproduktion mättes kontinuerligt med flödesmätare. Termiska givare (Sierra Instruments: Model 640S) användes fram till 2015-05-05. Därefter installerades ultraljudsgivare (Endress+Hausser: Proline Prosonic Flow B200) i serie med de termiska givarna på samtliga rötkammare.

Metanhalten i gasen från respektive rötkammare analyserades via stickprov i en gaskromatograf (GC) (Perkin Elmer: Clarus 500 med kolonn HayeSep Q80/100 och varmtrådsdetektor) fram till 2015-05-05, därefter registrerades metanhalten online via ultraljudsgivarna.

2.3.2 Rötrestproduktion

Samlade flödet av utgående slam från rötkammarna in till slutavvattning mättes kontinuerligt online och jämfördes med tidigare år. Flödet in till varadera rötkammare samt det sammanlagda flödet ut mättes via flödesmätare. För EXRT-RK registrerades även utflödet via en egen flödesmätare. Torrsubstansanalyser för in- och utgående material gjordes löpande och matchades med flödet för att kunna beräkna rötresten i antal ton torrsustans och relaterades till mängden beskickat material.

På grund av stora osäkerheter i flödesgivare för slam användes Van Kleecks metod efter Koch m.fl. (2015) och Switzenbaum m.fl. (2013) för att beräkna utrötningsgraden för respektive rötkammare, istället för massbalansbaserad uträkning.

Mängden slam som lämnade anläggningen vägdes kontinuerligt och jämfördes med tidigare år omräknat till i ton torrsustans. Även antal transporter med slam som lämnade anläggningen jämfördes med tidigare år.

För att uppskatta hur mycket material som försvunnit ut med rejektet mättes detta flöde och analyserades enligt parametrar redovisade i Bilaga A – Uppföljningsschema.

2.3.3 Energibalanser

Elanvändning för EXRT-utrustningen (centrifugen, slangpump och torrs-lampump) registrerades då utrustningen var i drift. Elanvändning i slut-avvattningen registrerades veckovis. Eventuell skillnad i energigång från transporter uppskattades genom att jämföra mängden producerad rötrest under EXRT-projektiden med åren dessförinnan.

Gasproduktionen från respektive rötkammare räknades om till kilowatt-timmar (kWh). Jämförelse gjordes mellan producerad mängd gas och centrifugens energibehov.

2.3.4 Avvattningsegenskaper slutavvattning

Avvattning över centrifugerna för slutavvattning av utgående slam utvärderades genom att registrera flöde och torrsubstanshalt. Åtgång av polymer registrerades månadsvis för slutavvattning och mängden förbrukad polymer i EXRT-centrifugen följdes upp.

2.3.5 Avvattningsegenskaper EXRT-centrifugen

Avvattning över EXRT-centrifugen utvärderades genom att jämföra torrs-substans och glödförlust i det inkommande materialet till centrifugen med det utgående avvattnade slammet. Även mängden suspenderat material i rejektvattnet följdes upp.

Graden av avskiljning av organiskt material över centrifugsteget kunde styras genom att ändra inställningar hos pumpar, på centrifugen, och på polymerdoseringsenheten. Målvärden var 10 procent torrs-substans för det avvattnade slammet och $< 500 \text{ mg L}^{-1}$ för rejektets suspenderade material. TS-värdet för det avvattnade slammet valdes så pass mycket lägre än riktvärdet för slutavvattning (> 20 procent) för att inte riskera att chocka mikro-organismerna och SS-värdet valdes för att säkerhetsställa att inte betydande mängder organiskt material spolades ut vilket hade inneburit förlust av värdefullt substrat och oönskad belastning på efterföljande reningssteg.

2.4.6 Utvärdering av drift och processtålighet

Följande processparametrar användes för utvärdering:

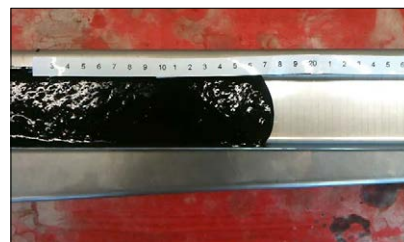
- ammoniumkväve ($\text{NH}_4\text{-N}$)
- totala antalet flyktiga syror (VFA)
- total alkalinitet (pH 4) och bikarbonatalkalinitet (pH 5,75)
- pH
- TS och VS.

Episoder av eventuell skumbildning antecknades. Torrs-substans och glödförlust analyserades på inkommande substratblandning till EXRT-rötkam-maren och Referensrötkammaren. Uppehållstid mätt som HRT och SRT, samt URG beräknades. För analysfrekvenser se Bilaga A – Uppföljnings-

schema. Alla ovanstående analyser följde reningsverkets protokoll enligt Svensk Standard.

För att undvika pumphaveri och kraftigt försämrade omrörning vid för tjockt rötslam sattes en gräns på 6 procents torrsubstans i EXRT-rötkammaren som maxvärde. Dessutom övervakades viskositetsrelaterade egenskaper kontinuerligt hos rötslammet i EXRT-rötkammaren med följande två metoder:

- En bestämd mängd slam sattes till en specialtillverkad lutad ränna (figur 2-3) och tilläts flyta ut under en bestämd tid för att mäta förändringar i viskositet. Ju kortare rinnlängd desto högre viskositet.
- Avläsning av flödet genom cirkulationspumpen. En ökad viskositet i slammet minskar flödet.



Figur 2-3

Viskositetsränna. Sträckan en viss mängd slam hinner rinna på en bestämd tid minskar när viskositeten ökar.

Genom att styra drifttid, flöde in till centrifugen och ändra på centrifugens varvtal, trumvarvtal, samt flödena in till polymerdoseringen hade ökningen av torrsubstans i EXRT-rötkammaren kunnat bromsas om tecken hade setts på att pumpbarheten försämrades.

2.4.7 Aktivitetstester och utrötningsförsök

Mikroorganismernas aktivitet studerades genom satsvisa rötningsförsök. Totalt tre batchförsök genomfördes för att undersöka den biokemiska metanpotentialen, och metanbildningshastighet hos rötslam från EXRT-rötkammaren och referensrötkammaren samt avvattnat slam efter EXRT-centrifugering för att studera hur avvattning påverkar mikroorganismerna. Metoden för batchförsöken beskrivs kortfattat nedan:

Ymp och substrat vägdes upp i vikt VS-förhållande 2:1 i 150 ml serumflaskor med butylkork för att motsvara en uppskattad gasutveckling på <1 000 ml och volymen spädades till 100 ml i flaskorna. Flaskorna fick sedan stå i 30+ dagar i 37°C värmeskåp och skakades i samband med gassampling som skedde med avtagande frekvens. Gasprover togs från batchflaskorna med spruta utrustad med trycklås och gaskomposition analyserades i gaskromatograf med varmtrådsdetektor. Alla gasvolymers rapporteras vid standardtryck och -temperatur normerat mot mängden glödförlust tillsatt i flaskorna och med ympens egenproduktion bortdragen i de flaskor där substrat var tillsatt.

2.4.8 Förändringar av kvaliteten på rötresten över tid

För att undersöka om tungmetaller ansamlas eller om näringsämnen ansamlats eller lakats ur i EXRT-processen skickades slam från EXRT-rötkammaren och referensrötkammaren till externa laboratorium (EUROFINS, ALcontrol, ALS) en gång per kvartal för analys.

För att utreda om det finns mindre potential kvar i slammet från EXRT-rötkammaren att ge metanslipp vid lagring av rötat slam undersöktes BMP genom rötningsförsök på ymp från EXRT-rötkammaren och referensrötkammaren.

2.4.9 Mikrobiologiska försök

I syfte att fånga upp eventuella mikrobiologiska förändringar i den metanogena populationen gjordes en kvantitativ undersökning av metanogener

från Methanobacteriales, Methanomicrobiales, Methanosarcinales, Methanosaetaceae genom Quantitative Polymerase Chain Reaction (q-PCR) utförd av Anna Schnürers mikrobiologigrupp på SLU. Proverna togs vid följande tre tidpunkter:

- Innan start av EXRT-projektet (januari 2013).
- Vid högst TS-halt under driftsätt maxSRT (oktober 2013).
- Slutet av driftsätt maxOLR (juni 2015).

Vermicon AG i Tyskland utförde en Fluorescence In Situ Hybrydization (FISH)-analys på sista provet från driftsätt maxOLR (juni 2015).

Mer detaljerad information kring metoderna för dessa försök finns i Bilaga C – Analysresultat från FISH-analys, Vermicon och Bilaga D – Analysresultat – Kvantifiering av metanogener genom qPCR-analys.

2.4.10 Kontrollförsök

Tre perioder med kontrollförsök beskrivs nedan. Dessa genomfördes efter att ordinarie projekttid var slut och med en begränsad uppföljning med avseende på antal utvärderade parametrar och analysfrekvens. Resultaten från dessa försök redovisas mer kortfattat i resultat- och diskussionsdelen.

Kontrollförsök – lika belastning I

Efter försökens avslut beskickades samtliga rötkammarna lika från och med försöksvecka 123 fram till kontrollförsöken för maxOLR startades försöksvecka 139. Detta för att verifiera att rötkammarnas gasproduktion var lika vid lika belastning.

Kontrollförsök – maxOLR

För att kunna jämföra hur en rötkammare utan EXRT-processen installerad hade reagerat på en belastningsökning motsvarande den som använts under maxOLR, så genomfördes även sådana försök mellan försöksvecka 139 och 145. Utvärderingen av denna period är begränsad till en jämförelse av gasproduktion, gasutbyte per kg VS, och processtabilitet med avseende på gaskomposition och VFA-värden.

Kontrollförsök – lika belastning II

Ett sista kontrollförsök med lika belastning mellan försöksvecka 146 och 148.

3 Erfarenheter

3.1 Drifterfarenheter

3.1.1 Uppdatering av antagen aktiv volym i rötkamrarna

Tidigare antaganden om storleken på aktiv rötvolym, 4 000 m³, baserade sig på det driftsfall som planerades vid byggnationen på tidigt 70-tal, det vill säga nivåstyrning via pumpputtag i rötkammarbotten. Eftersom slamuttag under försökens gång skett via bräddning i rökammartoppen fick den aktiva volymen räknas om enligt konstruktionsritningarna. Den uppdaterade volymen som används i denna rapport blev därmed signifikant större, 4 300 m³. Detta visar på vikten av att kontrollera basdata innan liknande försök sätts igång. Även omrörningsförsök med spårämne (Litium) utfördes under projektets gång för att studera skillnader i dödvolum och kortslutningsströmmar på grund av förändrade viskositetsförhållanden i slammet och flöden mellan EXRT-rötkammaren och referensrötkammare. Resultaten av dessa undersökningar gav dock inte tillräcklig noggrannhet för att ge några kvantifierbara skillnader. Därutöver kan det konstateras att en allmänt accepterad branschstandard saknas för vad en ”bra” omrörning i en rötkammare innebär, och även hur data från liknande försök ska kunna mätas och jämföras mellan olika anläggningar, vilket gör att detta område bör undersökas närmare.

3.1.2 Installation och drift av EXRT-centrifugen

Installation och drift av EXRT-centrifugen har varit förknippat med vissa svårigheter. Då Himmerfjärdsverket använder sig av järnsulfat för att fälla ut fosfat har det skapats beläggningar i rejektvattenrören från EXRT-centrifugen. På grund av vinklar i konstruktionen har rören varit väldigt svåra att rengöra. Detta löstes genom att byta ut samtliga rörböjar mot slang, vilket gjorde det mycket lättare att få loss beläggningar. Att kontinuerligt mäta rejektvattenflödet har också varit svårt. Både skibord och onlinegivare har använts, men utan bra resultat då betydande skumning (normalt för rejektvatten) och igensättning av plaster gjort att insamling av långtidsdata varit omöjlig. I rapporten används därför genomgående flöden som skattats utifrån manuella stickprov, där tiden att fylla upp en behållare med 500 liter rejektvatten klockats, samt medelflöden under perioder som ansetts som representativa och rimliga.

Den övre nivågivaren i torrslamutkastet på EXRT-centrifugen sitter som en insticksgivare från sidan och har varit väldigt utsatt för nedsmutsning, se figur 3-1. Den har över tid täckts med intorkat slam som armerats med plaster vilket lett till att larmet för hög nivå i slamutkastet aktiverats och stängt av EXRT-centrifugen. Detta har gjort att mycket drifttid har gått förlorad. En förbättringsåtgärd vore därför att ha en installation med en annan typ av nivågivare.

Slangpumpen som pumpar slam in till EXRT-centrifugen har inte gett ett konstant flöde, utan detta har varierat med nivån i rötkammaren, vilket



Figur 3-1

Slamutkastet på EXRT-centrifugen. I mitten på bilden syns en nivågivare som är nersmutsad av avvattnat slam.

tyder på att kapacitet eller täthet i pumpen inte varit tillräcklig. Detta har gjort det svårt att optimera centrifugen med avseende på polymerdosering och varvtal. En möjlig förbättring vore att byta ut slangpumpen mot en annan pumptyp eller en pump med större kapacitet.

Den specialbyggda polymerberedningen och -doseringen har vid flera tillfällen drabbats av stopp i polymerslangen vilket har lett till nedsmutsad EXRT-centrifug och betydande nertid för processen. Övriga fel som inträffat innefattar igensatta ventiler i polymerblandningstanken, och automatiskt stoppad polymerberedning på grund av för lågt flöde av blandningsvatten orsakat av en trasig kompressor.

I den tillfälliga försöksupställningen som använts under projektiden var slamintaget till EXRT-centrifugen placerad i mitten av rötkammaren, se figur 1-3. Denna installation ökar risken för att material smiter ut med rötresten via kortslutningsströmmar. Vid en permanent installation bör slamintaget till EXRT-centrifugen istället placeras på utgående rötrestström. I Syvabs fall hade det motsvarat en placering efter avgaskammaren i figur. Denna placering är dock inte möjlig om rötkammarna beskickas parallellt, eftersom den intermittenta inpumpningen detta hade inneburit skulle ge avbrott i slamflödet in till EXRT-centrifugen. En annan lösning för en permanent installation på Syvab skulle vara att leda rötrestflödet från samtliga rötkammare till EXRT-centrifugen. Detta skulle dock göra att försök med en parallell referensrötkammare hade blivit väldigt svåra att utvärdera.

Plaster

Betydande och återkommande problem med pumpar och igensättning av EXRT-centrifugen har kunnat härledas till den mängd plaster som kommer till verket. Framför allt gäller detta substratströmmarna matavfallsslurry och kasserade förpackade livsmedel.

Olyckligtvis har Himmerfjärdsverkets processlösning under försökstiden förvärrat problemet i och med att betydande mängder plaster som lämnat rötkammaren via rejektvattnet från slutavvattningen och EXRT-centrifugen till slut hamnar i flotationsslammet som sedan går tillbaka till rötkammarna. Verket har i flera år försökt att lösa problemet genom att installera silar i olika delar av verket, men dessa försök har inte fallit väl ut eftersom silarna antingen sorterar ut oacceptabla mängder av övrigt organiskt material, sätter igen, eller släpper igenom för stora plastbitar. Uppströmsarbetet mot leverantörssidan har gått trögt då beprövade separationslösningar för att lösa detta problem bedömts som för dyra eller för svåra att integrera i befintliga processkonfigurationer. I samband med en framtida ombyggnation av stora delar av verket kommer en ny kraftansträngning att genomföras för att åtgärda plastproblemet.

Plasterna har framför allt fastnat i rejektrören och i skruven på torrslamsidan på EXRT-centrifugen vilket stör separationsflödena inne i trumman och leder till nedsmutsning av rejektvattnet. Detta har lett till försämrade separationsgrad över EXRT-centrifugen och svårighet att få reproducerbara resultat vid optimering av inställningar av denna. Plaster har även satt sig på nivågivare i slamstupet och pumpgropen vilket lett till flera driftstopp.



Figur 3-2 Bild till höger: Plastrester har ansamlats ovanför rejektvattenbrunnen. Bild till vänster: Plast i DC10 centrifugen.

Förutom försämrad separation har den snabba nedsmutsningen lett till att EXRT-centrifugen inte körts inför vissa helger och långhelger av rädsla för att kritiska driftfel ska inträffa när bemanning inte funnits på verket. Denna rädsla visade sig vara befogad vid ett tillfälle under våren 2013 när ett stopp i rejektvattenpumpen sammanföll med en fallerande nivåvakt vilket ledde till att slam täckte en decimeter av golvet i centrifughuset och även rann ut på gårdsplanen. Även den ökade rengöringsfrekvensen av EXRT-centrifugen som har behövts har bidragit till en betydligt minskad drifttid, speciellt under driftsätt maxSRT när den mindre dekantercentrifugen användes. Vidare har plasterna lett till flera andra driftstopp när andra pumpar i verket satt igen eller rent av havererat. Biogasanläggningar som överväger att ta in externa substrat rekommenderas att alltid skriva in kvantifierbara krav på renhetsgrad för plaster i sina substratkontrakt för att slippa dessa problem. Figur 3-2 visar plast i rejektvattenpumpgropen och i EXRT-centrifugen.

3.1.3 Instrument

Gasflödesgivare

Flödesmätning av rågas är komplicerat eftersom biogasen innehåller frätande komponenter, varierar i komposition, är mättad med vatten, samt att givarna riskerar att utsättas för nedsmutsning under skumningar i rötkammaren. Detta gör att det är svårt att få rättvisande värden. Under projektets tid har problem med de termiska gasgivarna blivit uppenbara främst via hopp i registrerad gasproduktion i samband med rengöring, samt att den registrerade gasproduktionen från de olika rötkamrarna skiljer sig orimligt mycket åt, trots identisk belastning. Olika utredningar har gjorts för att försöka verifiera de gasflöden som uppmäts.

Fram till 2015-03-25 har det inte funnits något instick för att kunna gå in med en referensgivare för att verifiera mätarna. Enda möjliga kontrollen har varit att ta ut gasflödesgivarna och sätta in kontrollgivare istället. De i sin tur har inte kunnat sitta under någon längre tid på grund av nedsmutsning och problem med vattenkondens. Problemet med detta upplägg är att gasproduktionen från rötkamrarna varierar så mycket att eventuella fel i givarna blir svåra att upptäcka. Under de tidpunkter som en extern konsult har kommit för att verifiera gasgivarna så har flödet varierat upp till i stor-

leksordningen 150 kubikmeter per timme på medelflöden kring 350 kubikmeter per timme, vilket följaktligen gjort att möjligheten att hitta eventuella avvikelser har varit väldigt liten.

Termiska gasflödesmätare är känsliga för problem med kondens och nedsmutsning vilket inte kunnat undvikas vid mätning på den smutsiga och blöta rågasen. Dessutom bör även data från termiska givare för bästa möjliga precision korrigeras löpande för gaskomposition eftersom koldioxid och metan har olika värmeledningstal. En sådan kontinuerlig metanhaltsmätning fanns ursprungligen inte på verket förrän installation av ultraljudsgivarna, våren 2015. Tidsupplösningen på analyser av gaskomposition har inte varit tillräcklig för att kunna ta hänsyn till detta på grund av den tidsödande analysmetoden som använts (manuell provtagning och analys i gaskromatograf). Detta felbidrag bedöms dock i detta fall ha haft en mindre betydelse men kan vara avgörande vid andra försök där gaskompositionen varierar betydligt över tid (>10 % för en enskild gastyp).

Bristfälliga kalibrerings- och valideringsmöjligheter för gasgivarna har inneburit att gasproduktionen, framför allt för driftsätt maxSRT, inte har kunnat utvärderas på ett tillfredsställande sätt, trots månadsvis rengöring av givarna. Försök att skatta detta fel har inte varit möjligt, men som ett exempel kan nämnas att den uppmätta relativa gasproduktionen mellan EXRT-rötkammaren och referensrötkammaren, före och efter rengöring varierat mellan -15 och 27 procent, se figur 4-3 i resultatdelen. Dessa exempel ska dock betraktas som extremvärden eftersom en naturlig variation i gasproduktionen mellan rötkammare bidrar till skillnaden. För mer information beträffande försök att verifiera gasgivarna, se Bilaga B – Utvärdering ultraljudsgivare och termiska givare.

För att få en bättre kontroll av gasflödet installerades nya ultraljudsgivare våren 2015. Dessa installerades i serie med de termiska givarna för att kunna mäta samtidigt på samma flöde. Samtidigt installerades ett instick som möjliggör att koppla på ytterligare en givare vid behov för att validera givarna, som en extern kontroll. En bild på installation finns i figur 3-3.

Under sista delen av maxOLR kunde gasflödet mätas med både termiska och ultraljudsgivare. En jämförelse mellan givartyperna under perioden 2015-05-06 till 2015-06-30 (d.v.s. från och med den senaste justeringen av de termiska givarna) återfinns tillsammans med resultaten av en verifieringsmätning som gjordes av en extern konsult i Bilaga B – Utvärdering ultraljudsgivare och termiska givare. Skillnaderna mellan givartyperna finns summerade i tabell 3-1.

Tabell 3-1 Skillnad mellan termiska och ultraljudsgivare för EXRT-RK, REF-RK och RK3 2015-06-15.

	EXRT-RK	REF-RK	RK3
Ultraljudsgivare	431 Nm ³ /h	323 Nm ³ /h	194 Nm ³ /h
Termiska givare	362 Nm ³ /h	324 Nm ³ /h	213 Nm ³ /h
Skillnad	19%	0%	-9%



Figur 3-3

Gasledningen kommer ut från toppen av rötkammaren och går sedan ner igen för att skapa tillräckliga raksträckor mellan givarna. Ledningen har två olika gasflödesgivare installerade i serie. Först sitter en termisk gasflödesgivare (instick) och sedan en ultraljudsgivare. Högst upp på bilden syns ett instick som möjliggör kontroll mot tredje givare.

Flödesgivare

Graden av noggrannhet som behövs för att klara normal drift på ett reningsverk jämfört med forskningsverksamhet är olika. I daglig drift är man ofta mer intresserad av trender hos många flödesgivare snarare än absoluta värden som duger för att göra korrekta massbalanser. Detta leder naturligtvis till olika mål med underhållsarbetet. Till detta kommer att många av givarna är svåra eller rent av omöjliga att validera eller kalibrera mot säkra referenser. Att ha en redundans på givare och inkopplingsmöjligheter för att göra sådana kontroller möjliga är i många fall inte praktiskt görbart på grund av utrymmesskäl och inte heller ekonomiskt försvarbart för ett normalt verk. Trots att verkspersonalen gjort sitt yttersta har det varit väldigt svårt att hålla samtliga massa- och volymsflödesmätare för slam och vatten kalibrerade under försöksperioden eftersom verkspersonalen alltid måste prioritera ordinarie verksamhet för att kunna hålla utsläppskrav och inte offra säkerhet.

I huvudsak två strategier har använts för att verifiera och kalibrera givare under försökstiden:

- Kontroll av misstänkt felaktiga givare gentemot andra givare upp- eller nerströms har i flera fall kunnat göras tack vare verkets många olika omkopplingsmöjligheter.
- En annan vanlig typ av kontroll är ”torrkalibrering” där signalbehandlingsenheten i givaren matas med en känd spänning eller ström som enligt manual eller erfarenhet ska ge ett visst mätvärde. Detta mätvärde kan sedan jämföras med registrerat värde i styrsystemet.

Vid en eventuell avvikelse finns ett antal strategier där renspolning med höga flöden vatten oftast räcker för flödesgivare för slam och vatten. Andra typer av vanliga justeringar som rutinemässigt görs på verket inkluderar omskalning av elektriska mA-signaler (efter kontroll av värden i givarmodulen gentemot vad som registrerats i styrsystemet och en känd referens) och isärtagning av instrument eller moduler på plats för att byta särskilt utsatta komponenter. Vid svårare fall och garantiärenden plockas hela givaren ut och lagas eller skickas på service.

Temperaturgivare

Det finns tre temperaturgivare på varje rötkammare, en i rötkammaren, en före värmeväxlaren och en efter värmeväxlaren. Givaren före värmeväxlaren är den som styr värmeväxlaren. Samtliga givares skiljeförstärkare sitter fysiskt i en kulvert under rötkammarens botten där påverkas av en slitsam miljö med varm luft samt svavelväte i luften. Skiljeförstärkarna sitter emellan den analoga signalen från temperaturgivarna och PLC. Slitage på skiljeförstärkarna kan därmed medföra att loggade värden skiljer sig från de värdena som givaren registrerar. I samband kontrollförsöken upptäcktes att en sådan drift hade skett. Temperaturen i EXRT-rötkammaren har därför 2–3 grader under temperaturen i referensrötkammaren. När detta upptäcktes togs beslutet att fortsätta driva EXRT-rötkammaren vid den lägre temperaturen under samtliga kontrollförsök för att inte introducera en extra osäkerhet vid utvärderingen.

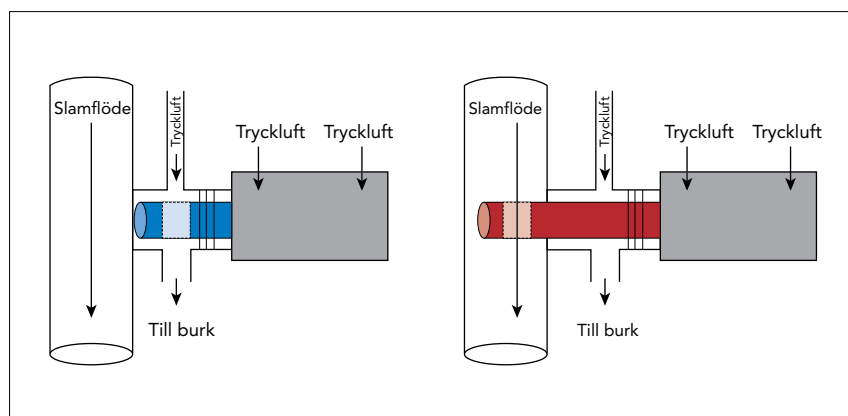
3.1.4 Analyser

Plaster har försvårat provtagningen och med stor säkerhet bidragit till en ökad varians i flera parametrar, speciellt de som mäter organiskt innehåll, det vill säga TS och VS, kemisk syreförbrukning (COD) och totalt organiskt kol (TOC). Storleken på plastresterna har varierat från decimeterlånga remsor och nedåt vilket gjort att de klassiska metoderna som funnits att tillgå (silning och siktning) för att skilja ut plasterna har bedömts som för omständliga och tidskrävande för att användas. Detta har medfört att plasternas bidrag till resultaten har varit väldigt svåra att kvantifiera.

Att hitta en parameter för organiskt rötbart material som täcker hela TS-spannet från avvattnat slam (TS uppemot 14 %) till rejektivatten (TS ofta <0,2 %) är ett återkommande problem i forskarvärlden och att konvertera resultat från en parameter till en annan ger sällan tillfredsställande resultat. Exempelvis fungerar TS/VS-mätningar bra för slam då den största parten av det organiska materialet utgörs av partikulärt material, medan mängderna av lösliga ämnen som ångar bort redan i TS-ugnen (ex. alkoholer och VFA) ofta är försumbara. Slam är dock notoriskt svårt att analysera repeterbart med COD-mätningar på grund av att provmängderna för denna analys sällan ger repeterbara stickprov utan orimligt omständliga homogeniseringsstrategier och kontrollprover. För rejektivatten är situationen den omvända, där kan lösliga ämnen som flyktiga fettsyror och alkoholer på ett bra sätt fångas upp via COD-analys, medan de partikulära bidragen ofta ger ett oproportionerligt genomslag på analysvaret. Att öka provmängden för att på så sätt få mer representativa prover fungerar inte för COD-analysen. Till detta kommer problemet hur man ska hantera plastbidraget, som visserligen är organiskt men som kan antas brytas ner olika i COD-analysen beroende på plastsort. Dessutom är de flesta plastsorter mer eller mindre inerta för själva rötprocessen och plastinnehåll introducerar därför en felkälla i sig när man vill använda organiskt material som ett mått, exempelvis vid normering av BMP-tester och uppvägning av "lika" mängder ymp.

Provpunkter

Figur 1-3 visar de olika provpunkterna. Vid provpunkt 1 tas prov på materialet som kommer in till EXRT-rötkammaren med en slamprovtagare, se figur 3-4.

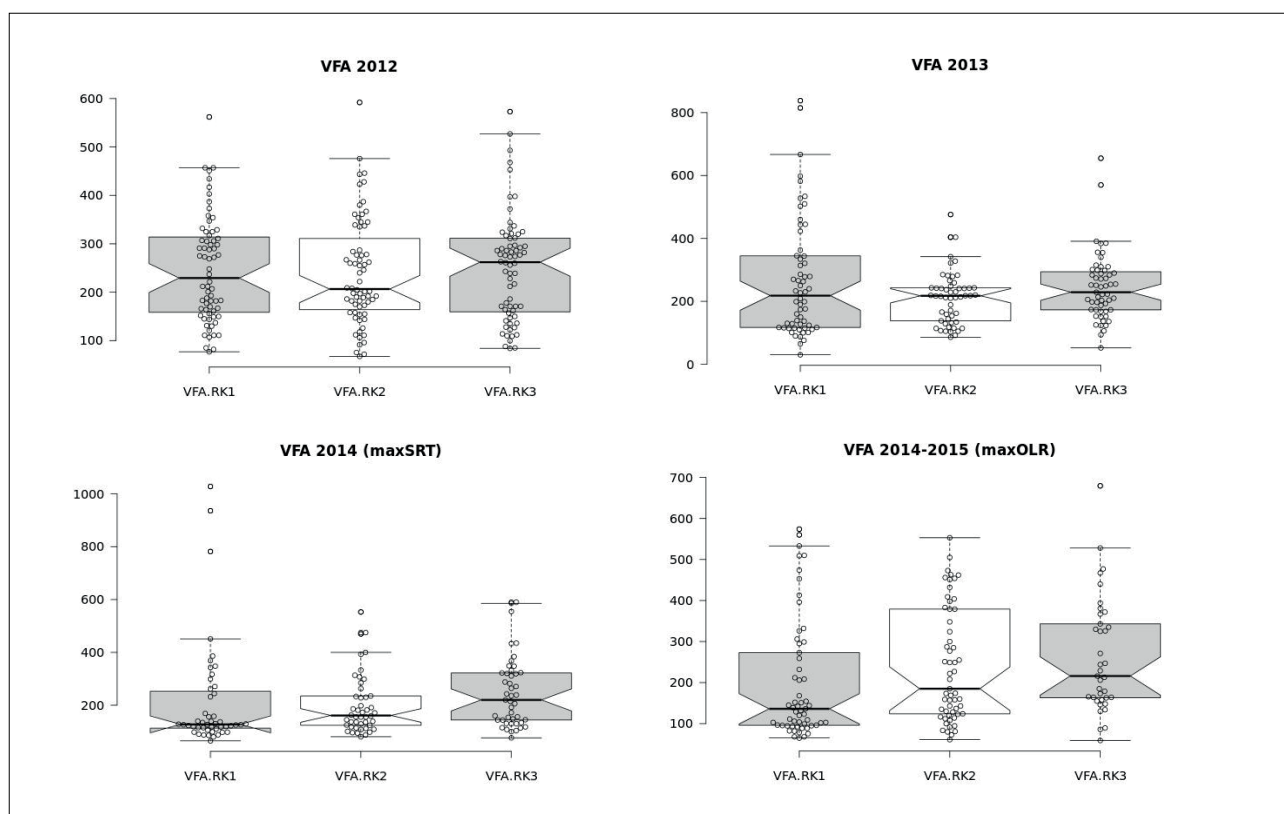


Figur 3-4 Automatiserad provtagare.

Slamprovtagaren trycker med hjälp av tryckluft en ihålig kolv in i matningsröret där sedan substratet flyter in i kolvens hålighet. Kolven förs sedan ut och provmaterialet trycks med luft ner i ett kylt kärl i väntan på upphämtning för analys. Då misstanke funnits om att EXRT-rötkammaren och referensrötkammaren inte har fått samma substratfördelning, så installerades en liknande provtagare på materialet in till referensrötkammaren under november 2014. Denna provtagare visade först på en orimlig skillnad i beskickning, trots antagande om lika belastning tack vare det gemensamma matningsröret in till rötkammarna. En möjlig felkälla till detta är att provhämtningshålen på kolvarna är små i förhållande till det partikulära material som i värsta fall skulle kunna passera provtagarna, vilket då skulle kunna påverka resultaten. En annan möjlig felkälla är om provtagning skett på icke-representativa flöden i delvis sedimenterade delar av rörledningarna under tiden när inmatning inte skett. Detta har bedömts som sannolikt med tanke på de långa tiderna mellan inpumpning (tre timmar under maxOLR) och på grund av att provtagarna har installerats på olika rörpositioner, provtagaren på material in till EXRT-rötkammaren satt på ett horisontellt rör och provtagaren in till referensrötkammaren satt på ett vertikalt rör. Försök gjordes med att ändra timing för provtagningsperiod till att bara göras under slutet av tiden för varje inpumpning, för att säkerställa att eventuell sedimentering skulle vara bortspolad. Tolkningen av dessa resultat måste dock verifieras med ytterligare mätningar på likadant monterade provtagare för att kunna användas med säkerhet, vilket inte kunnat göras inom ramen för detta projekt. Antagandet om lika fördelning av substrat till de olika rötkammarna kan därmed inte förkastas inom ramen för denna rapport, men den goda överensstämmelsen i gasproduktion under kontrollförsöken efter projektets slut indikerar att denna skillnad varit försumbar under projektiden.

Provpunkt 2 är för rötkammarmaterialet och tas på ingående ström till värmeväxlarlingen. Problem med kortslutningsströmmar från cirkulationslingen har observerats vid denna provtagningspunkt. Med detta menas att en icke-representativ andel av inkommande material från cirkulationslingen går förbi denna provtagningspunkt. Detta har märkts genom skillnader i analysvärden beroende på om prov för labbanalyser hämtats under tiden som rötkammaren beskickats eller inte. Exempelvis kan höga VFA-halter i externa substratströmmar slå igenom i analyserna vilket visar att kortslutningsströmmar sannolikt bidragit till en förhöjd varians i flera av de uppmätta processparametrarna, BMP-testerna, och de mikrobiologiska analyserna. Genom att den manuella provtagningen görs vid bestämda tidpunkter i relation till matningscykeln kan detta problem rent teoretiskt kringgås. Det har dock varit praktiskt omöjligt för provtagande personal att alltid anpassa tidpunkt för provtagning och analys för att kompensera fullt ut för detta. Att påverkan av kortslutningsströmmar varit betydande för analysresultaten från stickproven kan tydligt ses i figur 3-5.

Under 2012 och största delen av 2013 matades substrat in till EXRT-RK, Ref-RK, och RK3 var 10:e minut, vilket inte gav någon möjlighet att undvika påverkan av kortslutningsströmmar vid provtagning. Provtagningsstidpunkten har alltså historiskt skett mer eller mindre slumpmässigt i förhållande till när i matningscykeln man befunnit sig. Detta återspeglas



Figur 3-5 Jämförelse av uppmätta VFA-halter [mg/L] vid olika år och val tidpunkter för provtagning i relation till inmatning (RK1 = EXRT-RK, RK2 = Ref-RK). Boxar 1:a–3:e kvartil; morrhår: 1,5× interkvartilavstånd; streck: median; hack: 95 % konfidensintervall för median.

i den stora spridningen i uppmätta VFA-halter för dessa år. Under 2014 och framåt har däremot både spridning och median i uppmätta VFA-halter minskat drastiskt, detta trots att den organiska belastningen in till samtliga rötkammare ökat sedan 2012, vilket rimligen borde ha lett till ökade VFA-halter. Detta på grund av att det förändrade inpumpningsschemat (minst 1 timmes inpumpning per rötkammare) möjliggjort provtagning efter att omrörningen fått mer tid på sig att sprida nyinkommet substrat över större delar av reaktorvolymerna, och även underlättat för personalen att provta på bestämda tidpunkter i matningscykeln. Även för 2014 och 2015 års provtagningar kan dock fortfarande en tydlig trend ses i både ökad spridning och median (EXRT-RK < Ref-RK < RK3). Detta sammanfaller med att provtagningstidpunkten för EXRT-RK legat längre ifrån tidpunkten för senaste matning än Ref-RK. För RK3 har provtagning skett under beskickning. Detta förklarar att RK3 haft skenbart högre VFA-halter än EXRT-rötkammare och referensrötkammare under perioden för maxOLR vilket är orimligt med tanke på att denna rökammarens belastning i relation till de två andra varit mycket mindre under detta driftsätt.

Provpunkt 3 hade varit den självklara provpunkten för rötat material, då endast rötat material går den vägen. Problemet är att rötresten först hamnar i en avgaskammare där viss sedimentering sker innan vidarepumpning startar. Det hade därmed inte varit möjligt att provta representativt eftersom (åtminstone) TS-, och VS-halter hade varierat under pumpens gångtid. Dessutom var provpunkten dåligt placerad rent arbetsmiljömässigt.

Det finns två provpunkter vid EXRT-centrifugen: provpunkt 4, rejekt från EXRT-centrifugen, och provpunkt 5, avvattnat slam från EXRT-centrifugen in till EXRT-rökammaren. Prov på det avvattnade slammet från centrifugens slamutkast togs fram till 2015-03-23. Detta var inte en optimal provpunkt då slammet i mitten på utkastet skiljer sig åt med avseende på vatteninnehåll jämfört med det slam som är ute vid sidorna. Genom att föra in en skopa och ta prov kan man få missvisande halter torrsubstans beroende på var i utkastet man tar provet. En ny provpunkt installerades därför på rörledningen efter torrslampumpen där omrörningsförhållandena är goda, vilket anses ge ett mer representativt värde.

4 Resultat

Resultaten presenteras under rubriker motsvarande de i metodikdelen för både driftsätt maxSRT och driftsätt maxOLR.

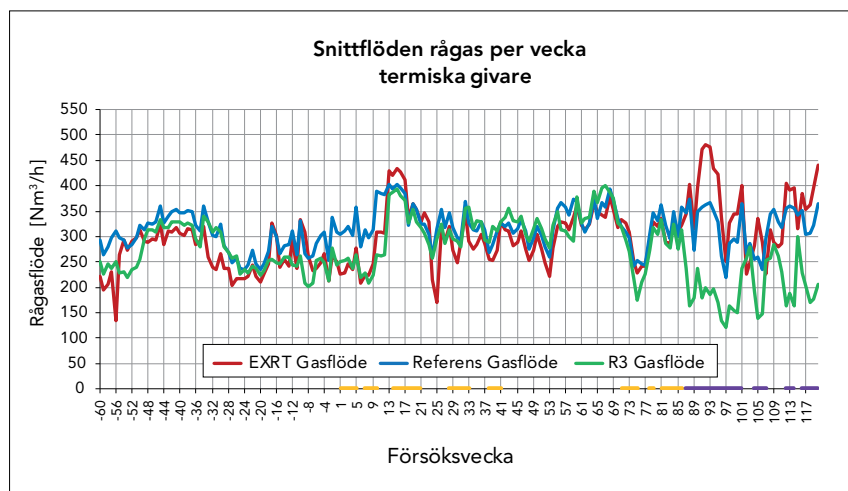
4.1 Gasproduktion maxSRT och maxOLR

Gasproduktionen följdes upp som biogasproduktion och som metanproduktion per röttningsvolym samt som specifik gasproduktion, $\text{Nm}^3 \text{CH}_4 \text{ kgVS}^{-1}$. På grund av opålitliga gasflödesdata från termiska givare (för kommentarer kring detta, se avsnitt 3.1.3) redovisas bara de mer detaljerade beräkningarna av gasproduktionen för driftsätt maxOLR, se avsnitt 4.3.3.

Metanhalten skattades från stickprov och efter 2015-03-25 från ultraljudsgivarna. Metanhalter från totalt 19 stickprovsmätningar mellan 2012 och 2015 varierade obetydligt mellan de olika röttningskammarna och över tid och hade ett medel på 60,1 procent. Metanhalter beräknade som medel från totalt sex veckors onlinevärden från ultraljudsgivarna varierade även de obetydligt över tid och röttningskammare emellan och hade ett medel på 63,3 procent. För övriga metanhaltsberoende beräkningar i denna rapport används ett sammanvägt medel på 61,7 procent.

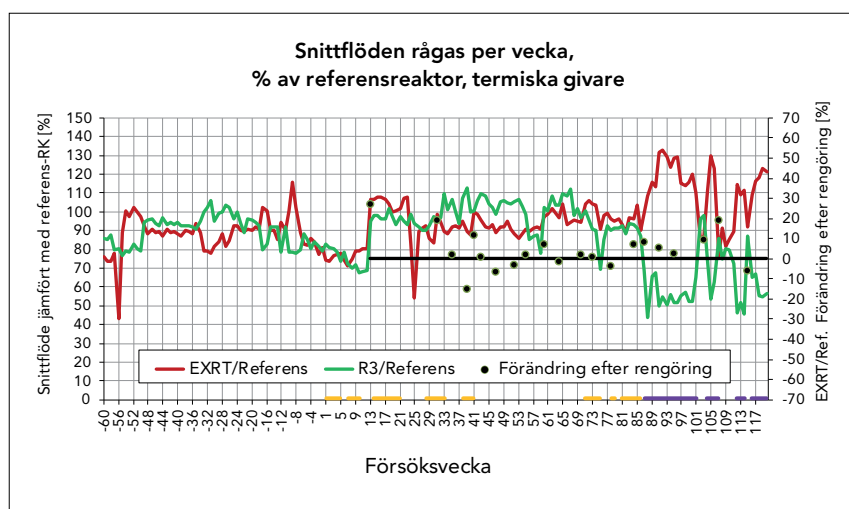
4.1.1 Termiska och ultraljudsgivare för mätning av gasproduktion

Veckovis registrerad rågasproduktion visas som Nm^3/h för de tre röttningskammarna i figur 4-1.



Figur 4-1 Snittflöden per vecka Nm^3/h för registrerad rågas (termiska givare). Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.

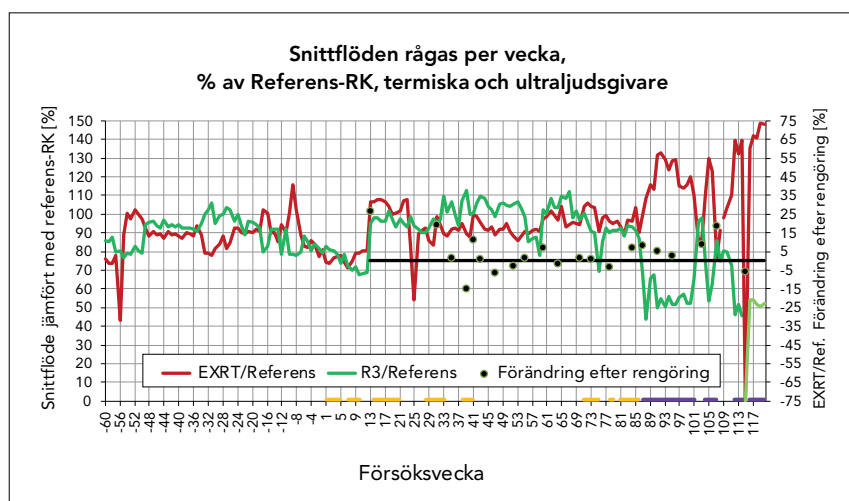
Figur 4-2 visar gasproduktionen för EXRT-RK och RK3 uttryckt som procent av Ref-RK och en infälld tidslinje som redovisar förändring i antal procentenheter av registrerad gasproduktion EXRT-RK/Ref-RK före och efter rengöringar av de termiska givarna beräknad som medel[4 dagar efter



Figur 4-2 Snittflöden av rågas per vecka, procent av Ref-RK, termiska givare. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila. För förändrad registrering i gasproduktion före och efter rengöring (termiska givare) visas via svarta punkter, Obs höger skala.

rengöring] – medel[4 dagar före rengöring]. Första rengöringen av termiska gasflödesgivarna gjordes försöksvecka 13 vilket gav en dramatisk skillnad i registrerat gasflöde.

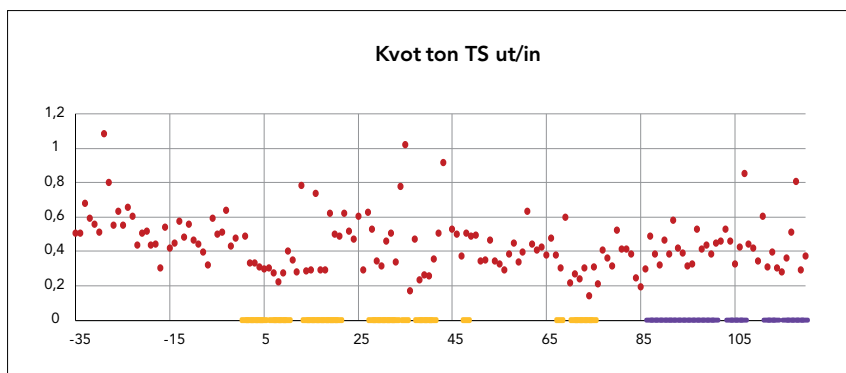
Figur 4-3 visar i stort sett samma information som föregående figur 4-2 men med registrerad gas för ultraljudsgivarna inlagda från vecka 109 och framåt.



Figur 4-3 Snittflöden av rågas per vecka, procent av Ref-RK, termiska och ultraljudsgivare. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.

4.2 Rötrestproduktion

Under driftsätt maxSRT var ett av de primära målen att minimera rötrestproduktionen. För att få en överblick över förändring av rötrestproduktion så jämfördes mängden torrsbstans i det beskickade materialet med mängden torrsbstans i rötresten från rötchammaren. Beräkningarna är baserade på flöde och TS-analyser på de enskilda strömmarna in till rötchammaren



Figur 4-4

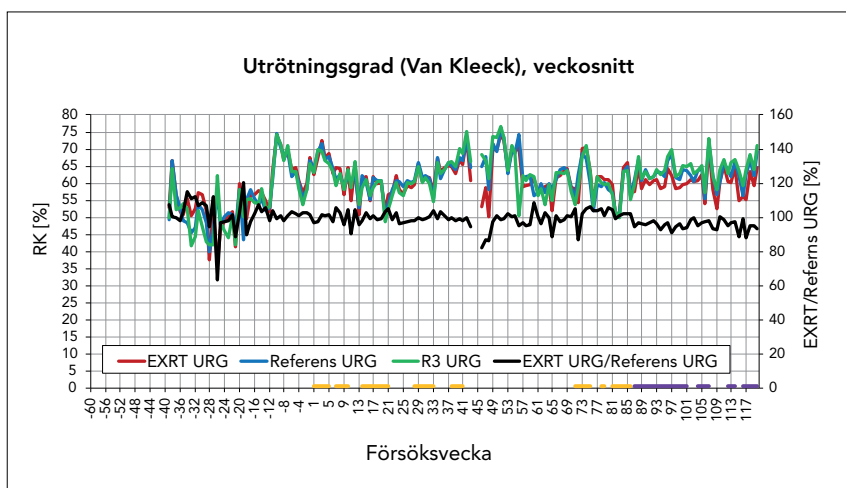
Kvoten mellan ton TS i rötrest och ton TS in till rötkammaren. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.

(primärslam, flotationsslam och externa substrat) samt på flöde och TS-analyser på samlade rötrestflödet till avvattningscentrifugerna.

I figur 4-4 presenteras kvoten [ton TS som kommit in till EXRT-rötkammaren/ton TS rötrest] för samtliga rötkammare. För de första två sammanhängande perioderna i driftsättet maxSRT (gulmarkerat i tidsaxeln) kan en lägre kvot observeras än före försöksstart. Den sista perioden i maxSRT har också en något lägre kvot, men inte lika tydlig som för de första två perioderna. För period tre och fyra i maxSRT kan ingen tydlig trend ses. För driftsätt maxOLR (lilamarkerat i tidsaxeln) kan ingen tydlig trend observeras.

4.2.1 Utrötningsgrad, torrsubstans- och glödresthalter

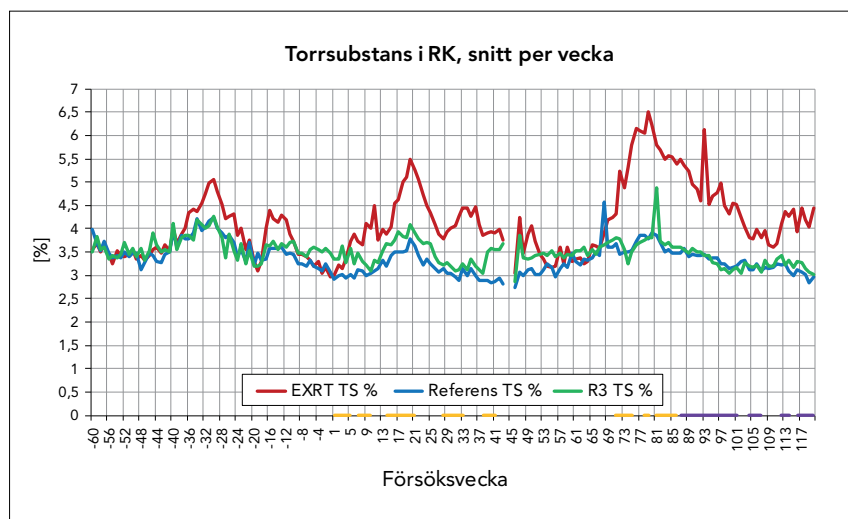
Utrötningsgrad beräknad med Van Kleecks metod visas i figur 4-5. Utifrån variationen i data är det svårt att dra några säkra slutsatser kring förändringar i utrötningsgraden. Möjligtvis kan ett trendbrott ses i skiftet mellan driftsätt maxSRT och maxOLR vid vecka 87, där relativa utrötningsgraden uttryckt som [EXRT-RK URG/Ref-RK URG] i procent får en svagt fallande trend. Den flödesoberoende Van Kleeck-beräkningen – som normalt brukar klassas som konservativ i skattning av utrötningsgrader i jämförelse med massbalansbaserade uträkningar – indikerar onormalt höga utrötningsgrader för denna typ av rötkammare och för de uppehållstider som har studerats. Detta beror sannolikt på den stora andelen lättnedbrytbart externt substrat i Syvabs inkommande strömmar.



Figur 4-5

Utrötningsgraden från mitten av 2012 till 2015 baserat på veckosnitt. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.

Figur 4-6 visar TS-halterna i de tre rötkammarna från 2012 till 2015. Fram till försöksvecka -40 har alla rötkammare jämna TS-halter. Under slutet av 2012 så genomfördes inledande tester med EXRT-centrifugen vilket förklarar de två topparna för EXRT-RK innan försöksvecka 1. Då driftsätt maxSRT påbörjades vecka 1 ökade TS för EXRT-RK från att ligga runt 3 procent till 5,5 procent som högst. TS-halten pendlade därefter på grund av olika driftstopp och försöken pausades vecka 50 för att byta ut DC10-centrifugen mot en större modell. Efter att DC20-centrifugen kommit igång efter installationsproblem ökade TS-halten snabbt. EXRT-centrifugen stängdes av några enskilda dagar efter att TS hade nått ett toppvärde på 6,5 procent under försöksvecka 79 för att inte riskera haveri i pumpsystem, men framför allt för att skydda värmeväxlare som visat tecken på försämrad funktion, förmodligen på grund av för tjockt slam. Dessa tendenser försvann så fort TS sjönk något. Under driftsätt maxOLR var TS-halten i EXRT-RK högre än i Ref-RK och RK3 och låg runt 4 procent.

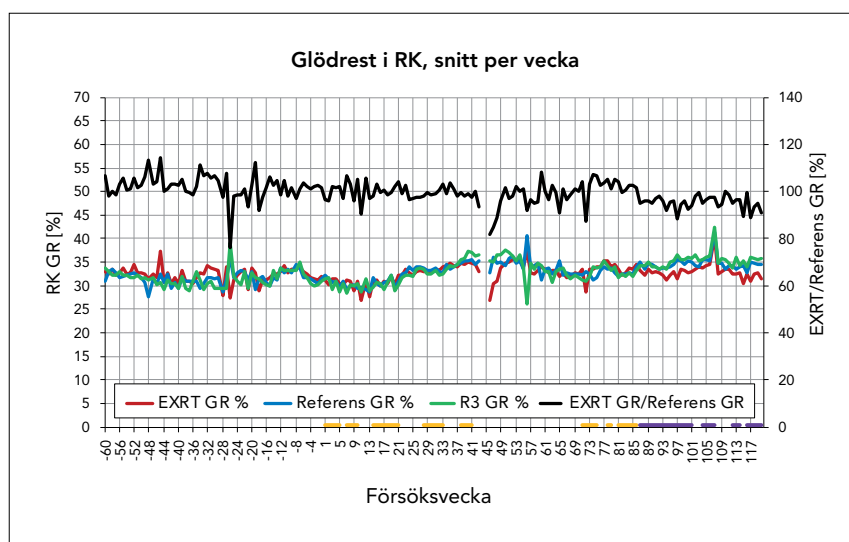


Figur 4-6

TS i RK i snitt per vecka från 2012 till 2015 baserat på stickprover. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.

Figur 4-7 visar glödresten i samtliga rötkammare. Under första perioden av driftsätt maxSRT (vecka 1–48) kan en minskning av glödrestmätningarnas median observeras för EXRT-RK och RK3 i jämförelse med Ref-RK, (32,10, 32,75, 32,20 för EXRT-RK, Ref-RK, RK3). Detta motsvarar en procentuell minskning på 1,98 procent för EXRT-RK och 1,68 procent för RK3 om Ref-RKs glödrest räknas som 100 procent. Under andra perioden av driftsätt maxSRT (vecka 68–86) finns en tendens till ökad glödrest i EXRT-RK jämfört med Ref-RK och RK3 baserat på medianer av analysvärdena (33,60, 32,50, 32,57 för EXRT-RK, Ref-RK, RK3). Detta motsvarar en procentuell ökning med 3,38 procent för EXRT-RK och 0,22 procent för RK3 med Ref-RKs glödrest som 100 procent. I slutet av driftsätt maxOLR sjunker glödresten i EXRT-RK jämfört med Ref-RK på grund av sämre utrötning och/eller ökade kortslutningsströmmar från inkommande substrat, medan RK3:s glödrest verkar öka något.

En jämförelse av medianerna (32,54, 34,27, 35,54 för EXRT-RK, Ref-RK, RK3) visar att den procentuella skillnaden är -5 procent och +4 procent för EXRT- respektive RK3- jämfört med Ref-RK.

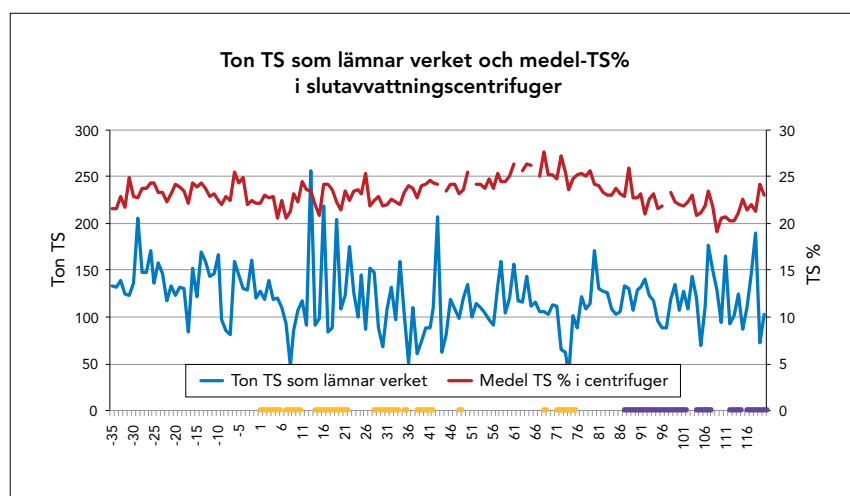


Figur 4-7

GR i RK i snitt per vecka från 2012 till 2015 baserat på stickprover. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.

4.2.2 Eventuell vinst i minskade transporter

Tittar man på mängden slam som lämnade verket under 2012 och jämför med 2013–2015 då EXRT-projektet kördes så kan ingen tydlig minskning i ton torrs substans observeras. Antalet transporter som lämnat verket kan därför inte säkert sägas ha minskat, se figur 4-8.



Figur 4-8

Ton torrs substans som lämnar verket och medel torrs substans för avvattnat slam från 2012 till 2015. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.

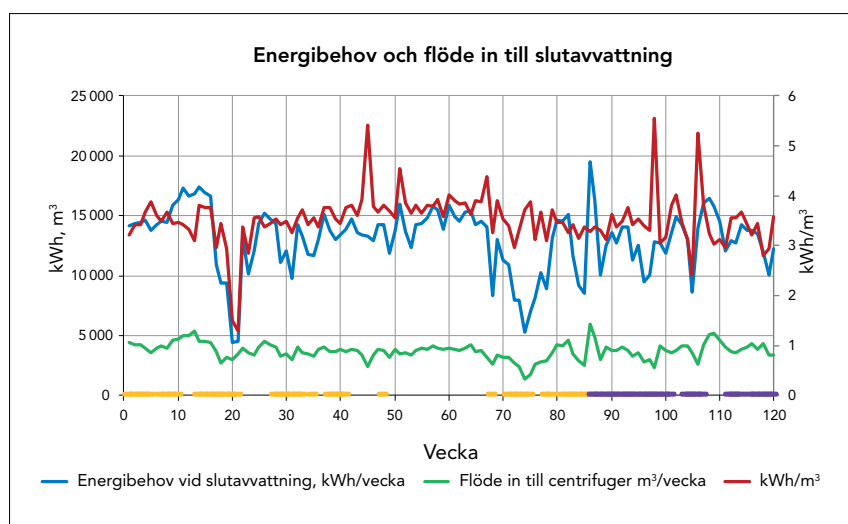
4.3 Energibalans

4.3.1 Slutavvattningen

Ingen synbar ökning i energibehov för slutavvattning kunde observeras för driftsätten maxSRT och maxOLR. Se figur 4-9.

4.3.2 Energibehov EXRT-centrifugen

Hydrauliska centrifuger är inte lika energieffektiva som eldrivna centrifuger. Energibehovet ökar med 20–30 procent om både skruv och trumma är hydrauliska jämfört med om båda är eldrivna. Tillverkaren anger en tum-



Figur 4-9 Energibehov och flöde in till slutavvattningen från 2013–2015. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.

regel på 1 kWh/m³ inmatat slam för de använda modellerna (Claes Gustafson, Noxon [2015-06-29]).

Tabell 4-1 visar energibehovet för DC10 och DC20. För DC10-centrifugen är energibehovet 7,2 kW, medel inpumpningen låg på i snitt 7 m³/h vilket passar väldigt bra med tumregeln om 1 kWh/m³. För den större centrifugen, DC20 så hamnar energibehovet något högre, 23,6 kW. Under tiden som DC20 har använts har registrerat flöde in till EXRT-centrifugen varierat mellan 1,3 m³/h och 12,7 m³/h. DC20 är designad för flöden på 20–25 m³ vilket gör att den ligger under hälften av designkapaciteten vilket sannolikt är anledningen till att DC20 drar så mycket mer elektricitet. För beräkningar kommer därför tumregeln på 1 kWh/m³ att användas.

Då DC20-centrifugen är större har torrslampumpen också fått jobba mer under tiden som DC20 användes jämfört med när DC10 användes, vilket förklarar det ökade energibehovet för denna pump.

Tabell 4-1 Energibehov för pumpar och EXRT-centrifugen. Siffror är baserade på medianvärden.

Typ av Centrifug	Slampump, kW	Torrslampump, kW	Skruv, kW	Trumma, kW	Centrifugen, kW	Totalt, kW
DC 10	1,9	0,8	3,9	3,4	7,2	9,9
DC 20, maxSRT	1,4	1,1	-	-	23,9	26,4
DC 20, maxOLR	1,3	1,0	-	-	23,9	26,2

4.3.3 Jämförelse använd energi och vinst i energi från gasproduktion – energibalans maxOLR

Utvärderingen av driftsätt maxOLR har gjorts baserat på data från de sista veckorna av försökstiden (försöksvecka 117–120) då EXRT-centrifugen kunnat köras kontinuerligt en längre tid i syfte att kunna göra så korrekta jämförelser med kontrollförsöken för maxOLR som möjligt. Figur 4-34 ger en översikt av vilka datapunkter som inkluderats i beräkningarna.

Gasdata för RK3 har justerats upp baserat på att denna rötkammare under kontrollförsöken med lika belastning konstant producerat cirka 5 % mindre gas, se Kontrollförsök – lika belastning I. En tendens till någon enstaka procents sämre produktion för EXRT-RK under samma period har dock inte justerats för. För omräkning av gasvolym till energivärde har 9,97 kWh/Nm³ CH₄ använts.

Hela perioden för maxOLR varade i 34 veckor vilket dividerat med median-SRT för rötternarna under denna tid motsvarar följande antal uppehållstider: EXRT-RK=10,5, Ref-RK=9,8 och RK3=5,2. Detta betyder att samtliga rötkammare bör kunna anses ha varit fullt anpassade under utvärderingsperioden. Till skillnad från driftsätt maxSRT – som antas behöva en lång period av sammanhållen centrifugdrift för att uppnå de förväntade fördelarna med den förlängda uppehållstiden – bedöms maxOLR kunna utvärderas med avseende på energibalans under betydligt kortare tid, baserat på det snabba svaret i gasproduktion vid förändrad belastning som kan ses i figur 4-34.

Under utvärderingsperioden har medelskattningarna i tabell 4-2 använts för beräkningarna.

Tabell 4-2 Skattade parametrar för energibalans maxOLR för EXRT-RK, Ref-RK och RK3.

Parameter	EXRT-RK	Ref-RK	RK3	Enhet	Källa
Inflöde substrat	11,89	8,08	4,28	m ³ /h	Online flödesgivare
VS-halt substrat	5,16	5,16	5,16	% av våtvikt	Provtagare, flöde in till EXRT-RK
Snittskillnad OLR	147,13	-	52,87	% av Ref-RK OLR	
Flöde till avvattningscentrifug	9	-	-	m ³ /h	Uppskattat snittvärde
Metanhalt	61,7	61,7	61,7	% CH ₄	Medel av stickprov och ultraljudsgivare

Resultaten av energibalansen för maxOLR redovisas i tabell 4-3.

Tabell 4-3 Jämförelse mellan energibehov, och energi från producerade mängder metan under maxOLR.

	EXRT-RK	Ref-RK	RK3	EXRT-RK/ Ref-RK	RK3/ Ref-RK
Nm ³ biogas/h	465,91	321,20	176,85	145,1 %	55,1 %
Nm ³ CH ₄ /h	287,47	198,18	109,12	145,1 %	55,1 %
Nm ³ biogas/kg VS	0,760	0,772	0,804	98,4 %	104,3 %
Nm ³ CH ₄ /kg VS	0,469	0,476	0,496	98,4 %	104,3 %
Nm ³ biogas/m ³ RK	2,600	1,793	0,987	145,1 %	55,1 %
Nm ³ CH ₄ /m ³ RK	1,604	1,106	0,609	145,1 %	55,1 %
kW gas	16,00	11,03	6,07	145,1 %	55,1 %

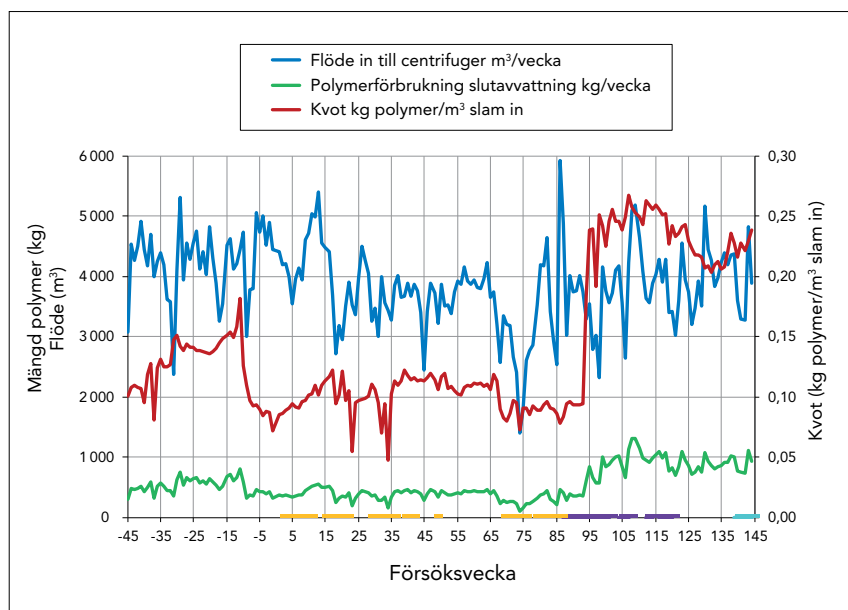
Energibalans för EXRT-RK jämfört med Ref-RK under driftsätt maxOLR				
Ökning biogas Nm ³ /(m ³ RK dag)	Ökning metan Nm ³ /(m ³ RK dag)	Ökning gas kWh/(m ³ RK dag)	Elbehov centrifug kWh/(m ³ RK dag)	Netto kWh/(m ³ RK dag)
0,808	0,498	4,97	0,0502	4,918

Alternativkostnad substratanvändning, snittförlust i metanpotential under utvärderingsperioden, beräknad genom att jämföra metanutbytet för den totala mängden substrat som gått till EXRT-RK med vad det teoretiska metanutbytet blivit om motsvarande mängd istället rötats med samma utrötningsgrad som i REF-RK: -0.23 kWh/(m³ RK dag).

4.4 Avvattningsegenskaper slutavvattning

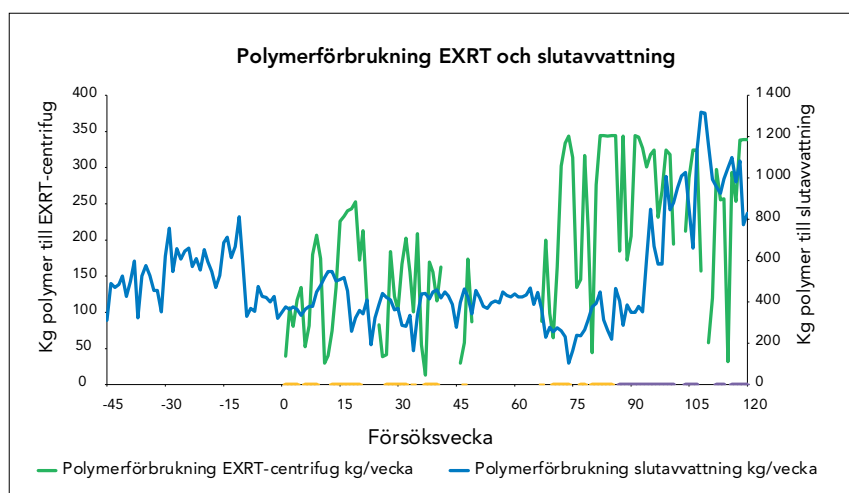
Avvattningsegenskaperna för slutavvattningen utvärderas genom att följa upp TS, SS samt polymeråtgång. Figur 4-10 visar att polymeråtgången följer slamflödet väl och sjunker efter mitten av 2013 (försöksvecka 17) när byte av polymer sker från Zetag 9016 till Zetag 9018 (BASF, Sverige), som också är en positivt laddad linjär polymer, men med 80 procent laddning istället för 60 procent. Under driftsätt maxSRT är polymerförbrukningen jämn, men efter att driftsätt maxOLR påbörjas så ökar polymerförbrukningen från cirka 2 000 kilo per vecka till cirka 5 000 kilo per vecka. Förklaringen till detta är sannolikt att 50 procent av rötresten kom från EXRT-rötkammaren (som redan fått polymer via processen) under driftsätt maxOLR i kombination med sämre avvattningsegenskaper överlag på verkets slam under december 2014, vilket troligtvis förändrat laddningen i den totala slamblandningen och gjort att ordinarie polymer i slutavvattningen tappat sin effektivitet. I hur stor grad detta beror på tillsats av polymer i EXRT-centrifugen är oklart, eftersom en tydlig ökning av polymer i slutavvattning också kan observeras i samband med försöken med ökad belastning utan EXRT-centrifugen kördes (kontrollförsök maxOLR).

Polymerdoseringen vid slutavvattningen på Himmerfjärdsverket är automatiskt reglerad efter förinställda börvärden (anges i g polymer per kg inkommande TS-flöde). Ändring av börvärdet görs efter behov av erfaren personal vilket gör att denna doseringsökning kan anses ha varit nödvändig med hög säkerhet.

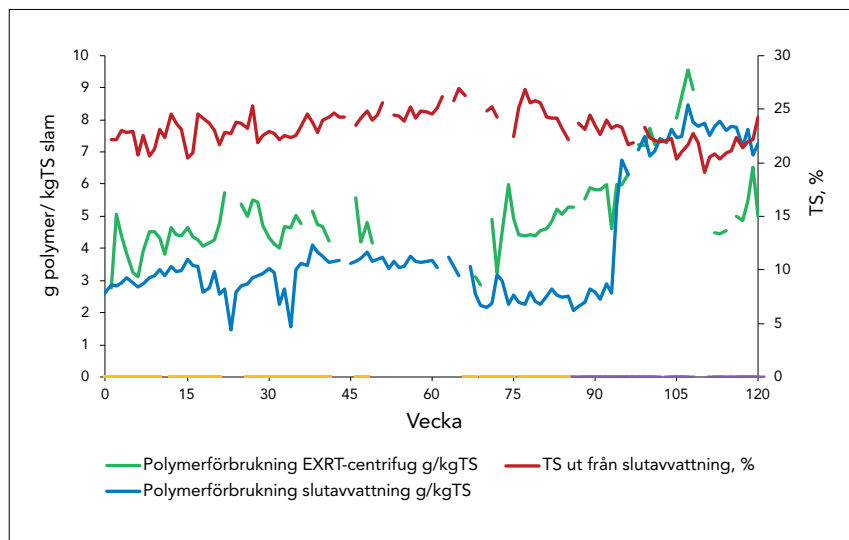


Figur 4-10 Polymerförbrukning slutavvattning från 2012–2015. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila. Kontrollförsöket med maxOLR är markerat med turkos.

Figur 4-11 visar polymerförbrukning för slutavvattningen och EXRT-centrifugen. Polymerförbrukningen för detta processteg ökade kraftigt när DC20 kom i drift. Att detta till viss del berott på ökade slamflöden genom den större EXRT-centrifugen vilket genom ökade polymerhalter i rötres-



Figur 4-11 Polymerförbrukning för slutavvattningen samt för EXRT-centrifugen. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.

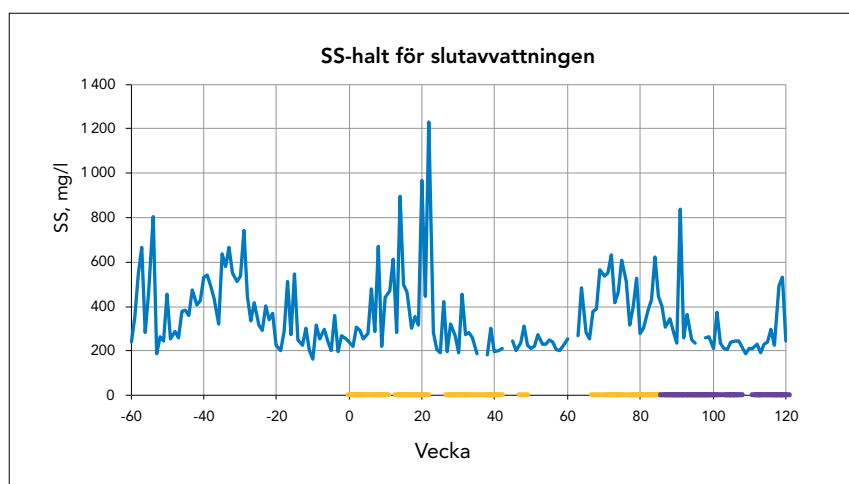


Figur 4-12 G polymer/kg TS för EXRT-centrifugen och för slutavvattningen. Figuren visar även TS för slutavvattningen. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.

ten påverkat slutavvattningspolymerens effektivitet är troligt. Det kan dock inte uteslutas att de försämrade avvattningsegenskaperna som lett till att driftpersonelen varit tvungna att öka polymerdoseringen även påverkats av faktorer som inte hade med EXRT att göra.

Figur 4-11 visar polymerförbrukning för slutavvattningen och EXRT-centrifugen. Polymerförbrukningen ökade kraftigt när DC20 kom i drift, detta på grund av ökade flöden genom den större centrifugen.

Kvoten mellan mängden polymer och kilo torrsubstans för slutavvattningen var låg i början av försökstiden, se figur 4-12. Koncentrationen låg på 0,15 procent under hela försökstiden, men att döma från kvoten så kan koncentrationen ha underskattats. Figur 4-12 visar inga tydliga förändringar i TS-halten i slutavvattnat slam som kan förknippas med driftsätt maxSRT eller driftsätt maxOLR.

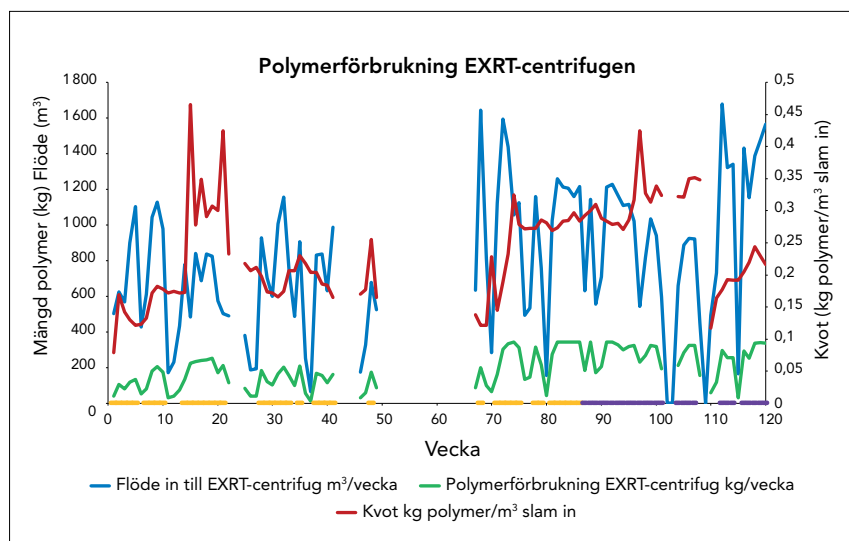


Figur 4-13 SS-halter för rejekt från slutavvattningen från 2012–2015. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.

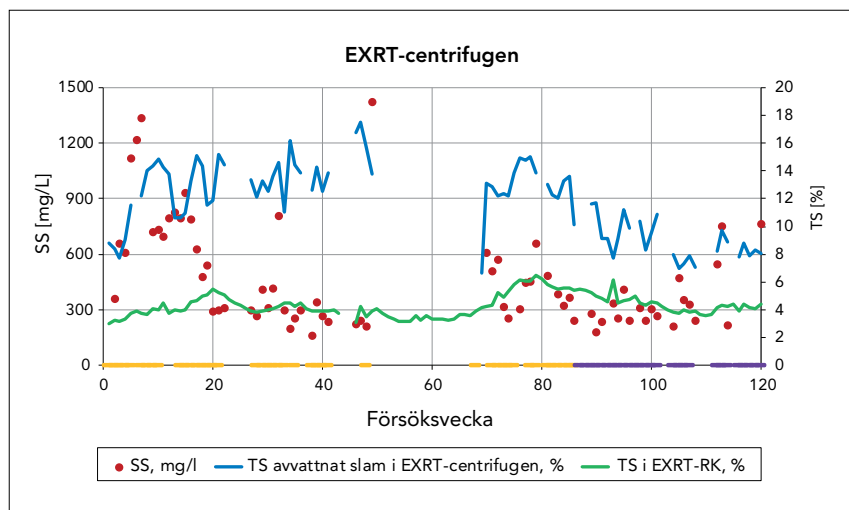
Figur 4-13 visar SS-halten i rejektet från slutavvattningen. SS-halten har varit väldigt varierande vilket gör det svårt att se någon tydlig trend. Ett flertal av topparna beror på dålig avskiljning i centrifugen på grund av plast.

4.5 Avvattningsegenskaper EXRT-centrifug

Mängd förbrukad polymer i EXRT-centrifugen och slamflöden in till denna redovisas i figur 4-14. Försöksvecka 68 driftsattes DC20-centrifugen för första gången, vilket ökade totala mängder slam och polymer till EXRT-centrifugen. Från figur 4-15 kan man se att varken målet om <500 mg/l i rejektvattnet eller 10 procent TS i avvattnat slam kunnat hållas under hela projektiden. De främsta orsakerna till detta har varit problem med polymerutrustningen, samt möjligheten att kontinuerligt anpassa styrparametrarna efter tillförlitliga och stabila flödesvärden.



Figur 4-14 Polymerförbrukning EXRT-centrifugen. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.



Figur 4-15

SS och TS för EXRT-centrifugen, samt TS för EXRT-RK. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.

Rejektflödet uppmättes både med skibord och flödesmätare, men utan bra resultat. Därför gjordes två referenstest den 2015-05-19 där rejektivattenflödet mättes i en Cipax-tank. Se tabell 4-4. Dessa försök bekräftade felet i onlinegivaren, som för den aktuella perioden visade runt 8 m³/h, det vill säga en överskattning om cirka 30 procent.

Tabell 4-4 Försök med att mäta rejektivattenflödet i tank, utfört 2015-05-19.

	Volym (m ³)	Tid (s)	Flöde (L/s)	Flöde (m ³ /h)
Försök 1	500	286	1,7	6,3
Försök 2	500	300	1,7	6
Medel	500	293	1,7	6,1

Tabell 4-5 visar samlade resultaten av massbalanser över centrifugen med avseende på förluster av metan från kända, kartlagda källor. Dessa siffror (och summan) är att betrakta som övre gränser, och antas vara i samma storleksordning som de förluster som sker normalt i slutavvattningen.

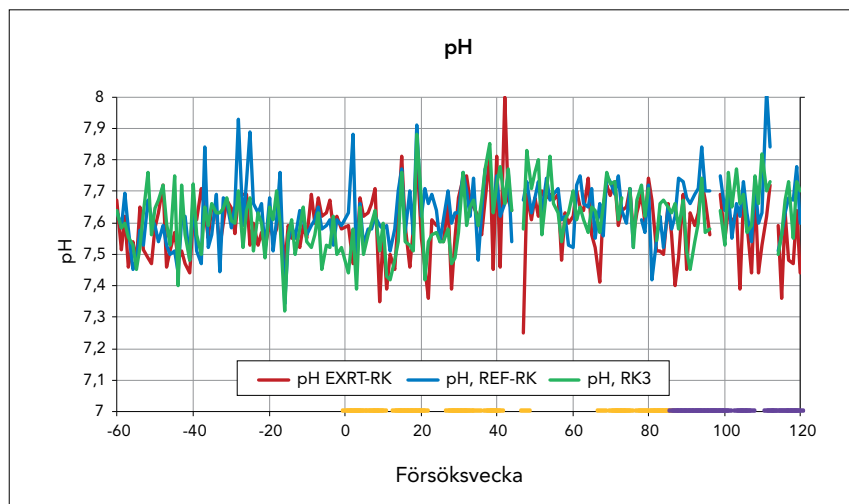
Tabell 4-5 Storleksuppskattning av kända möjliga källor till metanförlust från EXRT-centrifugen.

Flöden	Typisk metanproduktion från EXRT-RK (Nm ³ /d)	5 011
	Rejektflöde m ³ per timme (högsta uppmätta värde)	7
VFA	VFA halt (mg (ekv. acetat)/L) i rejekt (medelvärde)	100
	BMP (metangaspotential) VFA (Nm ³ /kg)	0,6
	VFA ut i rejekt per dygn (mg)	16,8
	Gaspotential VFA per dygn som åker ut rejektivatten (Nm ³ /d)	10,08
	Procent av dagsproduktion	0,20 %
COD	COD halt (mg/L) i rejekt (median av kontrollanalyser från externt laboratorium)	1 100
	BMP (metangaspotential) COD (Nm ³ /kg) (teoretiskt, stökiometriskt värde)	0,35
	COD ut i rejekt per dygn (kg)	184,8
	Gaspotential COD per dygn som åker ut rejektivatten (Nm ³ /d)	64,68
	Procent av dagsproduktion	1,29 %
Löst metan, baserat på batchförsök (BMP 100 ml rejekt)	Inkommande metanhalt i slam till centrifug (NL/m ³)	160
	Ut från centrifug, BMP rejektivatten (NL/m ³)	85
	Inflöde till centrifug (m ³ /h)	8
	Metan ut i rejekt per dygn (Nm ³ /d)	14,28
	Procent av dagsproduktion	0,28 %
Summa, procent av dagsproduktion samtliga källor (VFA dubbelräknad i COD)		1,78 %

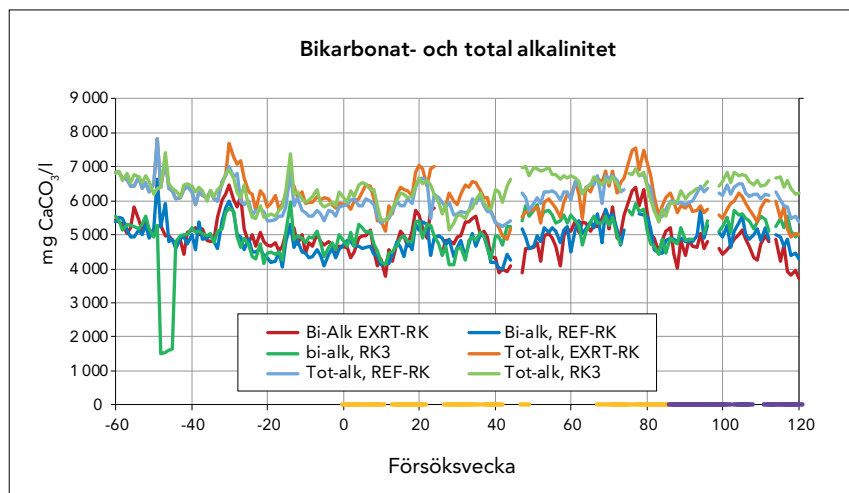
4.6 Drift och processtålighet

4.6.1 Processtålighet vid maxSRT och maxOLR

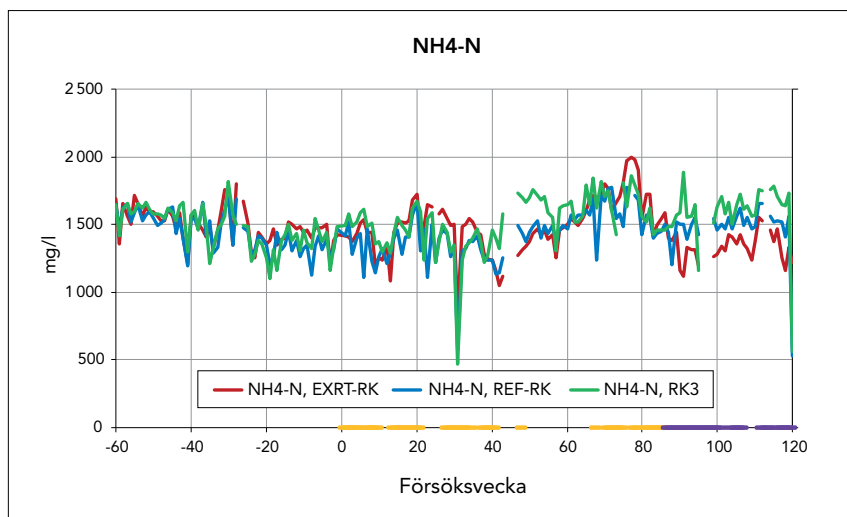
Figur 4-16–figur 4-19 visar processparametrar för EXRT-RK, Ref-RK och RK3. Samtliga värden ligger inom normala registrerade spann för Himmerfjärdsverket och har en hög varians, vilket gör det svårt att urskilja skillnader mellan rötkamrarna. Eventuella förändringar som kan kopplas till driftsätt maxSRT eller maxOLR verkar överlag vara små, men en tendens till ökade VFA-halter kan ses vilket återspeglas i minskade alkalinitetsvärden och något minskat pH. Halten $\text{NH}_4\text{-N}$ ser ut att skilja sig något mellan de olika rötkamrarna några veckor in i maxOLR och fram till försökstidens slut med trenden $\text{RK3} > \text{Ref-RK} > \text{EXRT-RK}$. Ingen processtörande skumning har kunnat uppträcka under försökstiden men att mindre episoder inträffat kan inte utestlutas då det är svårt att upptäcka skumning vid Himmerfjärdsverket.



Figur 4-16 pH i EXRT-RK, Ref-RK och RK3 från 2012–2015. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.

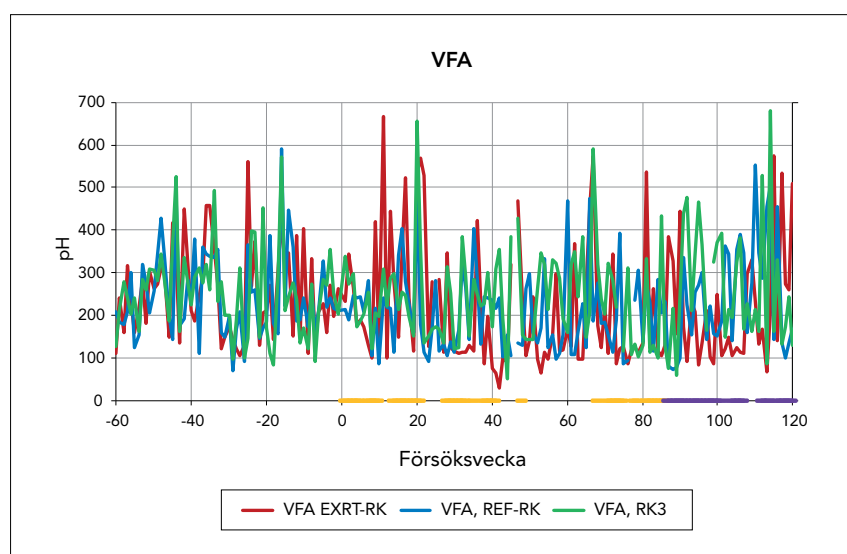


Figur 4-17 Bikarbonat- och totala alkaliniteten i EXRT-RK, Ref-RK och RK3 från 2012–2015. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.



Figur 4-18

$\text{NH}_4\text{-N}$ i EXRT-RK, Ref-RK och RK3 från 2012-2015. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.



Figur 4-19

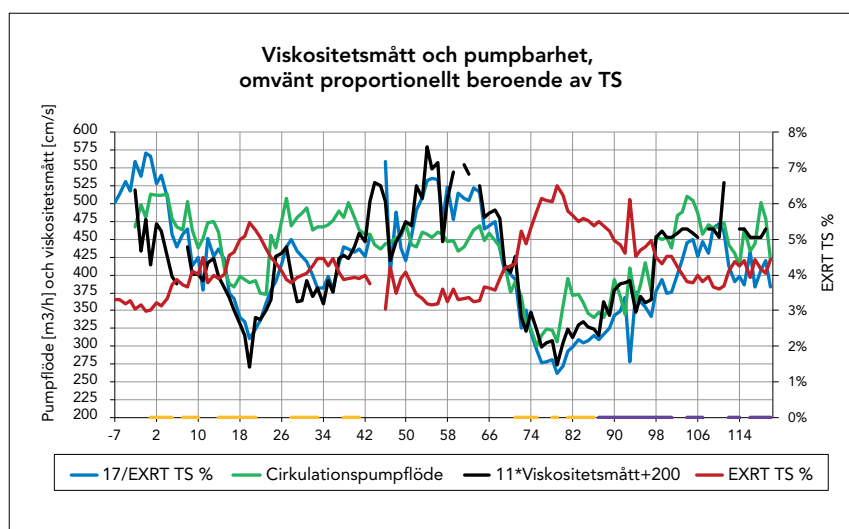
VFA i EXRT-RK, Ref-RK och RK3 från 2012-2015. Från och med försöksvecka 90 hämtades prover under tiden som RK3 beskickades för att undvika kortslutningsströmmar i EXRT-RK och Ref-RK proverna. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.

4.6.2 Pumpbarhet

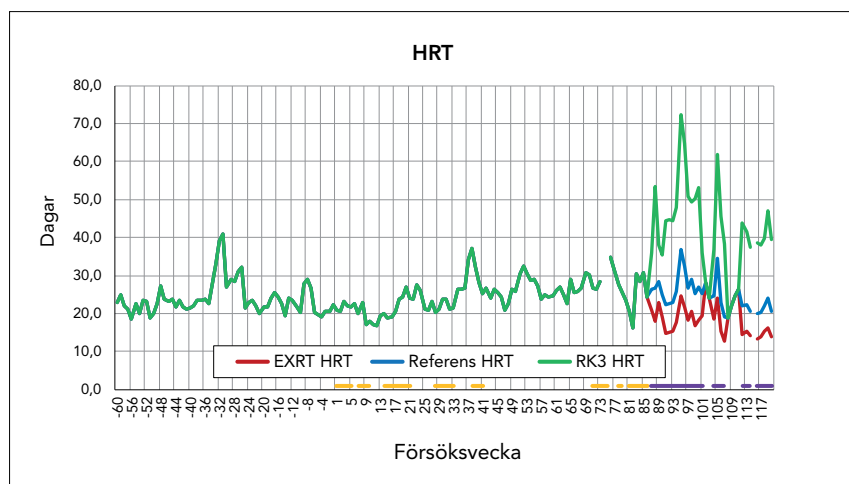
Figur 4-20 visar förändringen i pumpbarhet av rötslammet via de två utvärderingsmetoder som använts. En tydlig trend med försämrat flöde genom cirkulationspumpen (som står för omrörningen i rötammaren) och ökande halter av torrsustans, TS, i EXRT-RK kan ses. Denna trend i försämrad pumpbarhet samvarierar med måttet på viskositet. Ett omvänt proportionerligt samband med TS har skissats i grafen. Samma samband mellan viskositet och TS observerades för Ref-RK men utan stora variationer på grund av en mer konstant TS-halt. Detta visas dock inte här.

4.6.3 Uppehållstid

Figur 4-21 och figur 4-22 visar resultatet av beräknade uppehållstider under försökens gång. I beräkningarna som ligger bakom dessa figurer har omskalad inflödesdata från referensrötkammaren använts för att beskriva uppehållstiderna vilket gör att graferna ligger överlagrade under stora delar av redovisad försökstid.



Figur 4-20 Viskositetsmått och pumpbarhet, omvänt proportionellt beroende av TS. Driftsätt maxSRT är gulmarkerat och driftsätt maxOLR är markerat med lila.

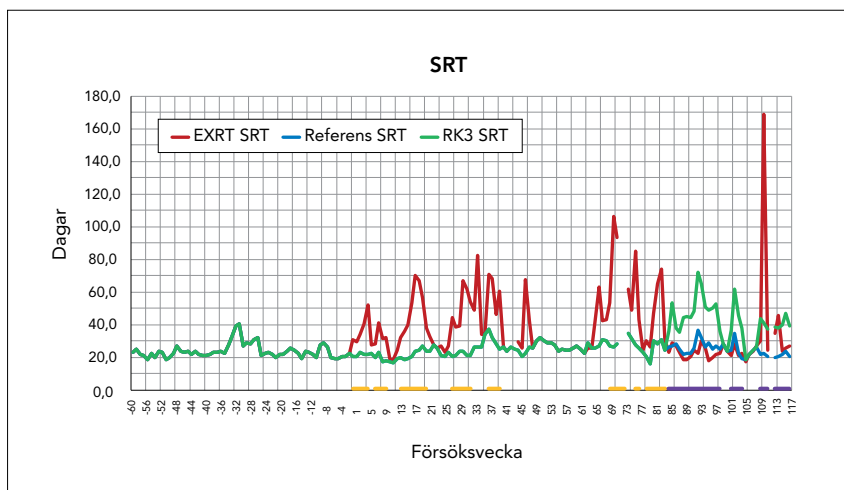


Figur 4-21 Hydraulisk uppehållstid för de tre RK under försökstiden.

HRT för samtliga rötkammare ligger under tiden fram till starten av driftsätt maxOLR lika, mellan 20 och 30 dagar i snitt.

Under de veckor när maxOLR körs ökar RK3:s HRT med det dubbla jämfört med Ref-RK eftersom det relativa inflödet över tid halveras när den tidsstyrda inpumpningen går från 1:1:1 timmar till 3:2:1 timmar (EXRT-RK:Ref-RK:RK3). För EXRT-RK är det tvärtom, en flödesökning med 50 procent hade gett 50 procent kortare HRT de veckor centrifugen varit igång. Median-HRT under samtliga försöksveckor som innefattar maxOLR (87-120) ger följande HRT för de tre rötkamrarna 17, 24, 46 (EXRT-RK, Ref-RK, och RK3). Uttryckt i HRT-förändring gentemot Ref-RK ger det -30 procent för EXRT-RK och +87 procent för RK3.

Figur 4-22 visar fasta ämnens uppehållstider. Perioden med driftsätt maxSRT gav en tydligt ökad SRT i EXRT-RK jämfört med Ref-RK. Uttryckt som median över antalet veckor med centrifug DC10 (försöksvecka 1-48) var SRT för EXRT-RK 35 jämfört med 23 dagar för de övriga rötkamrarna, det vill säga en ökning med 52 procent.



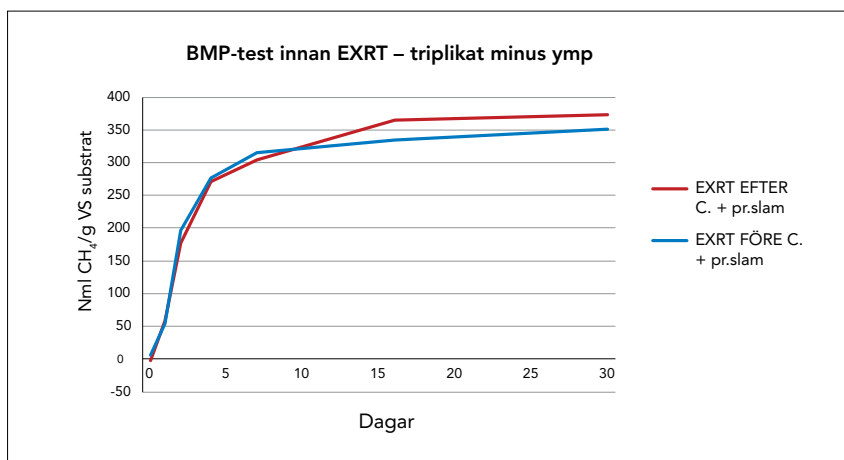
Figur 4-22 Fasta ämnens uppehållstid för de tre rötkamrarna under försökstiden.

Under maxSRT med den större centrifugen DC20 (försöksvecka 68–86) var median-SRT 49 dagar för EXRT-RK respektive 28 dagar för de övriga två rötkamrarna, en ökning med 78 procent. Detta motsvarande följande antal uppehållstider: EXRT-RK = 2,7 SRT, Ref-RK och RK3 = 4,8 SRT.

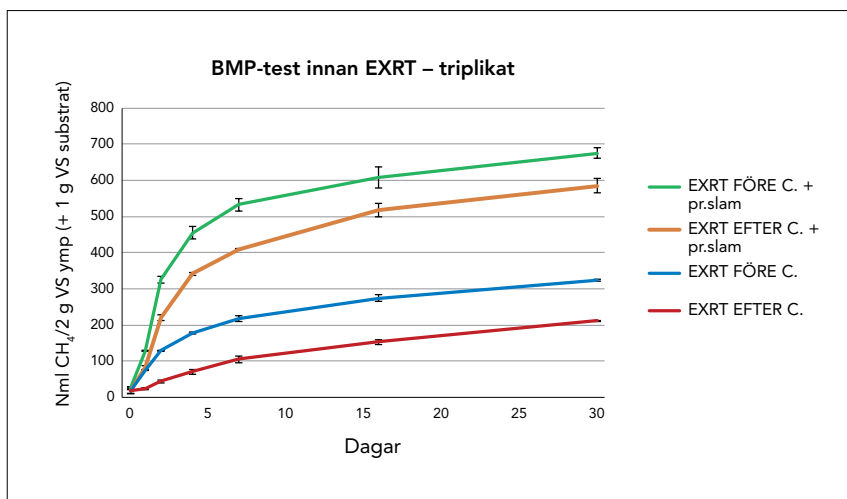
För maxOLR var median-SRT 23, 24, och 47 dagar för EXRT-RK, Ref-RK, och RK3. En förändring gentemot Ref-RK på -7 procent för EXRT-RK och +87 procent för RK3. Detta motsvarade följande antal uppehållstider: EXRT-RK = 10,5 SRT, Ref-RK = 9,8, och RK3 = 5,2.

4.7 Aktivitetstester

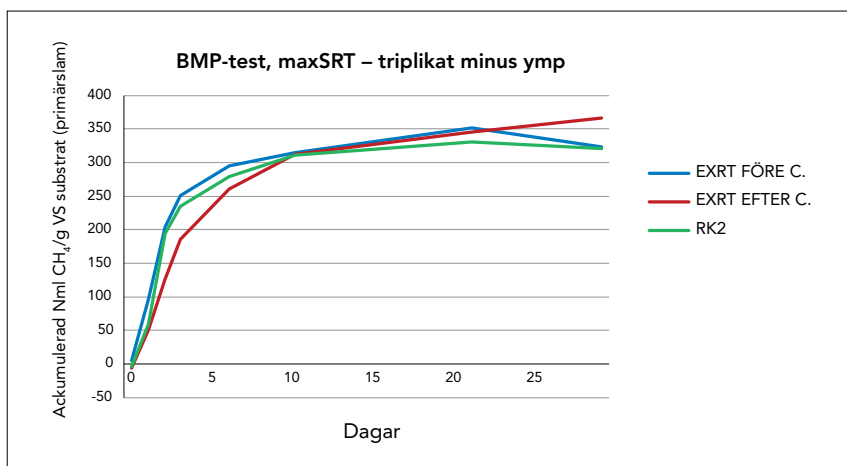
Resultat från tre olika BMP-tester presenteras nedan och ger information om aktivitet och BMP i rötkamrarna vid tre olika tidpunkter: innan EXRT-försökets start, försöksvecka 12 under maxSRT och försöksvecka 117 under maxOLR. Figur 4-23 och figur 4-24 visar resultat från tester precis innan uppstart av EXRT-försöken.



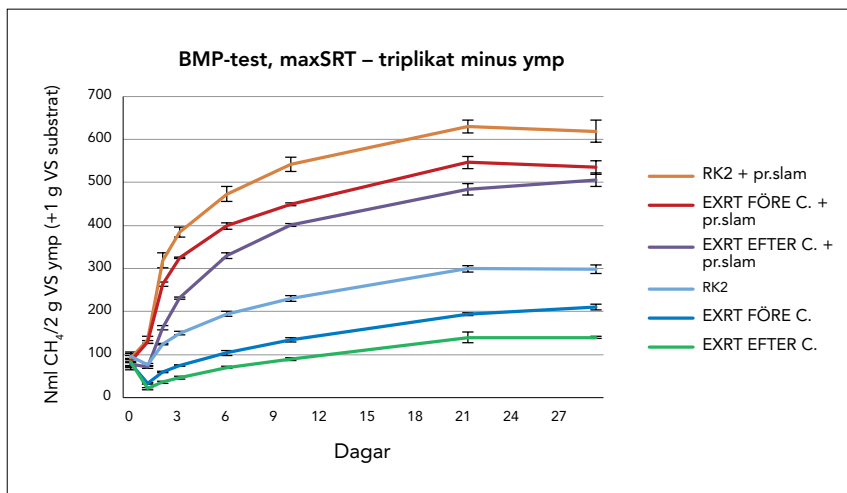
Figur 4-23 BMP med ymp tagen från start av Driftsätt maxSRT 2013-02-25, försöksvecka 1.



Figur 4-24 BMP, triplikat. Ymp tagen från start av driftsätt maxSRT 2013-02-25, försöksvecka 1. Felstaplar visar +/- SD.

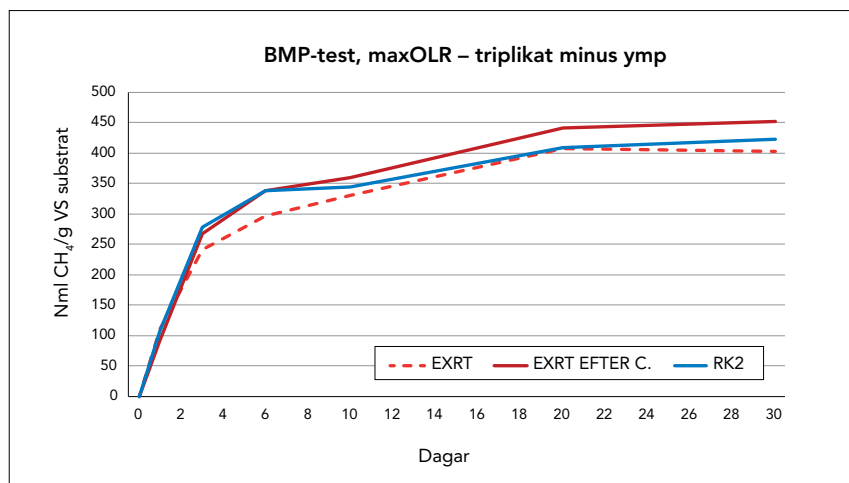


Figur 4-25 BMP med ymp tagen tre månader in i driftsätt maxSRT, 2013-05-14, försöksvecka 12.

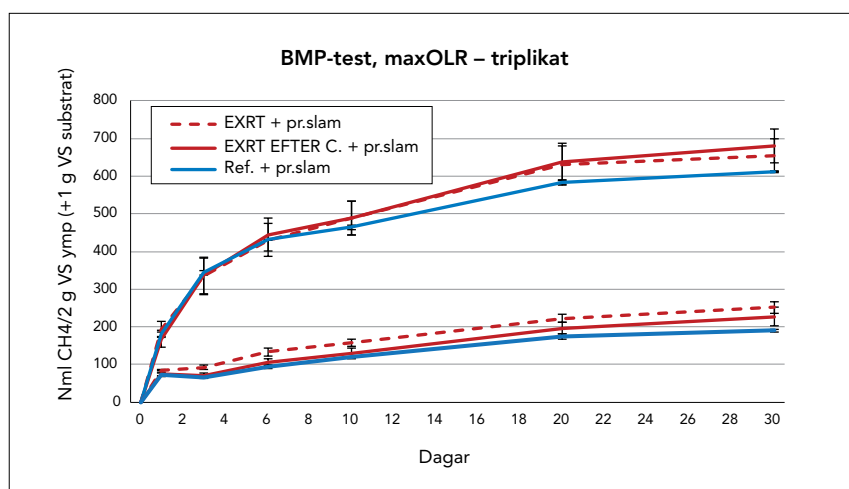


Figur 4-26 BMP, triplikat. Ymp tagen tre månader in i driftsätt maxSRT, 2013-05-14, försöksvecka 12. Felstaplar visar +/- SD.

Figur 4-25 och figur 4-26 visar resultat från försöksvecka 12 under maxSRT.



Figur 4-27 BMP med ymp tagen i slutet av driftsätt maxOLR, 2015-05-19, försöksvecka 117.



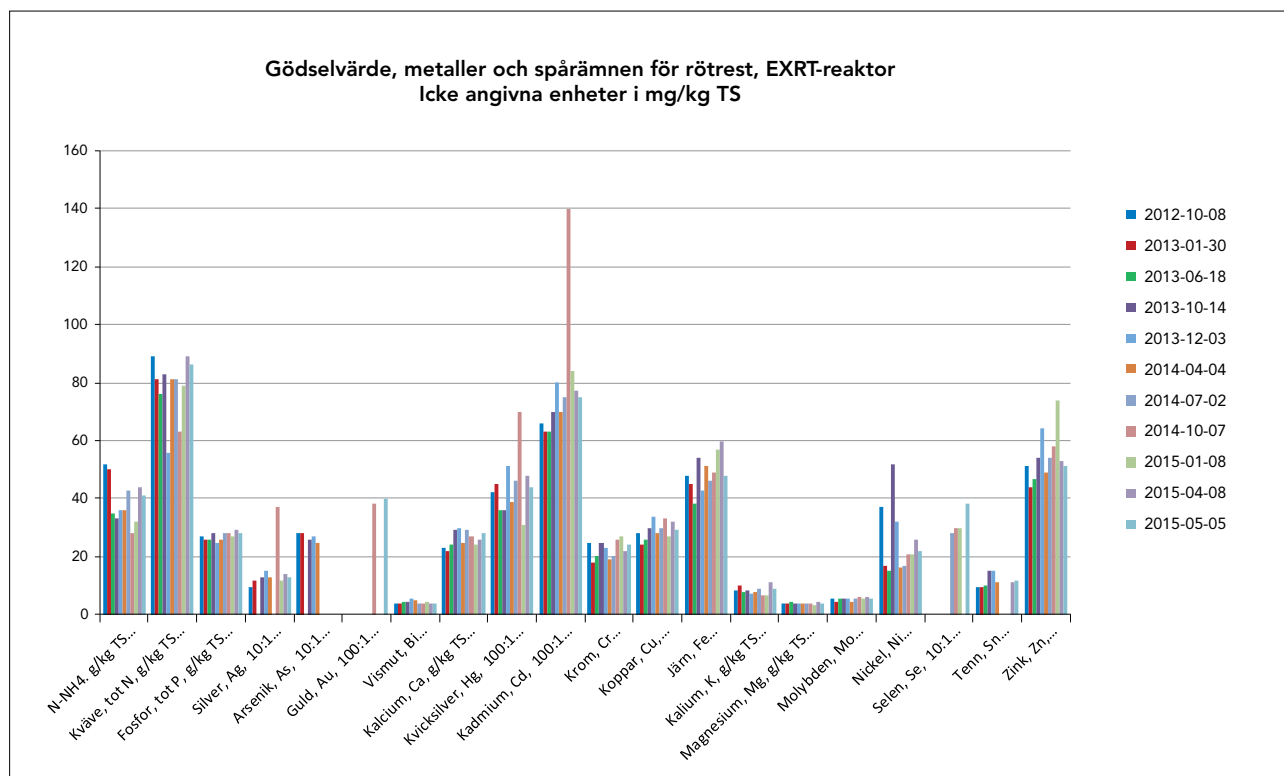
Figur 28 BMP, triplikat. Ymp tagen tre månader in i slutet av driftsätt maxOLR, 2015-05-19, försöksvecka 117. Felstaplar visar +/- SD.

Figur 4-27 och figur 4-28 visar resultat från försöksvecka 117 under max-OLR. Gemensamt för BMP-testerna gjorda precis innan EXRT-försöksstart, vid maxSRT och vid maxOLR är att metanbildningshastigheten är likvärdig oavsett vilken ymp som använts (material från EXRT-RK före/efter centrifug, eller Ref-RK). Detta bekräftar att EXRT-processen inte hämmar mikro-organismernas aktivitet nämnvärt. Även BMP för substratet (primärsлам) är snarlik i jämförelse försöken emellan och stämmer väl överens med historiskt data som Himmerfjärdsverket har där BMP brukar ligga runt 400 Nml/gVS.

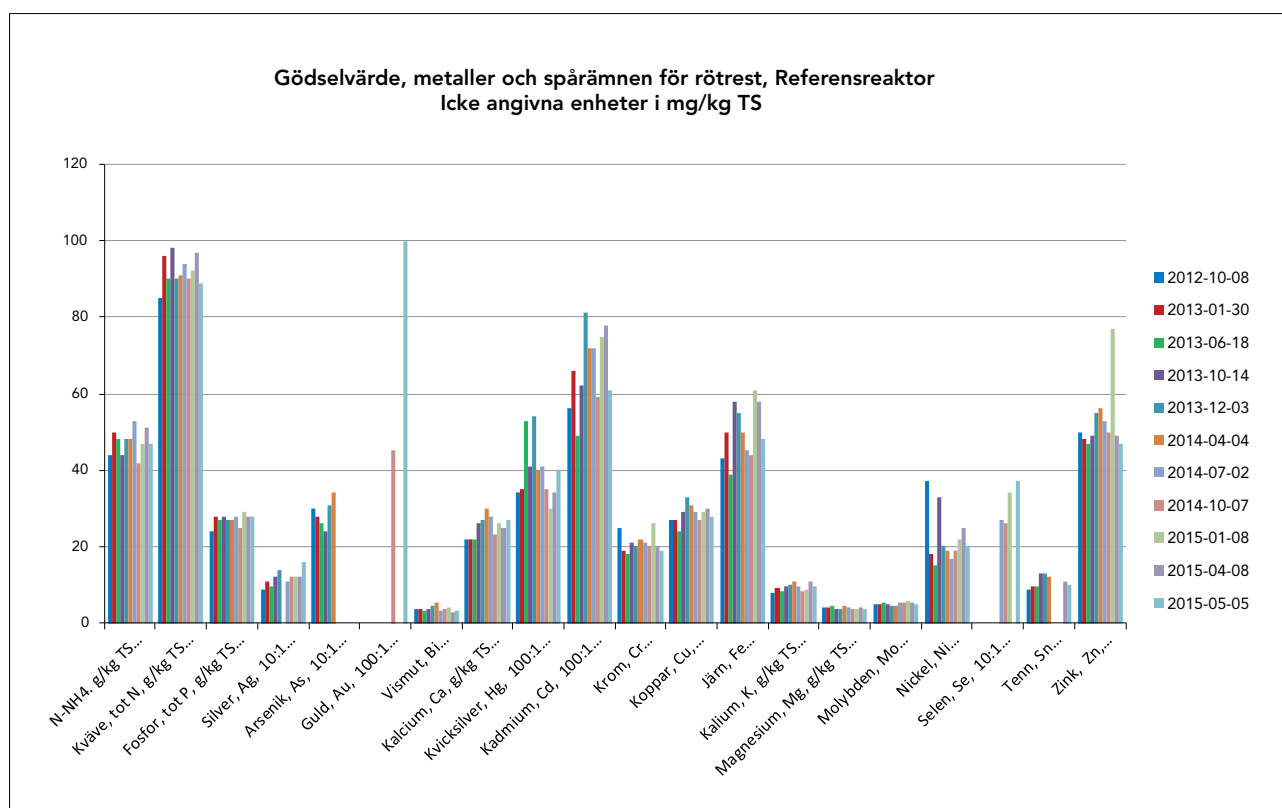
Observerar man däremot ympens egenproduktion per gram tillsatt VS framträder en annan bild. Redan det första BMP-testet (figur 4-24) visar en kraftigt minskad potential hos ymp tagen efter centrifugering jämfört med ymp tagen direkt från EXRT-RK. Detta beror sannolikt på sammansättningen av VS i det uttagna materialet som misstänks variera betydligt beroende på när i matningscykeln prover hämtas (se 3.1.4). Vid tidpunkten för det sista BMP-testet har hänsyn tagits till detta fenomen och provtagningstidpunkten justerats. Figur 4-28 visar också att skillnaden i BMP mellan centrifugerat slam och röt-kammarinnehåll då är försumbar.

4.8 Förändringar av kvaliteten på rötresten

Figur 4-29 och figur 4-30 visar eventuella förändringar över tid i kvalitet på rötresten uttryckt i halter av metaller och innehåll av kväve, fosfor, och kalium. Med tanke på analysernas osäkerhet (externt laboratorium rapporterar i snitt +/-30 procent) är det svårt att hitta någon signifikant skillnad. Möjligen kan en skillnad ses i ökad halt av kvicksilver i EXRT-RK jämfört med Ref-RK. En indikation på minskad mängd N-NH₄ som också slår igenom i total-N kan också anas i jämförelsen mellan EXRT-RK och Ref-RK vilket till viss del överensstämmer med resultaten i figur 4-18.



Figur 4-29 EXRT-RK: Gödsvärde, metaller och spårämnen för rötrest.



Figur 4-30 Ref-RK: Gödselvärde, metaller och spårämnen för rötrest.

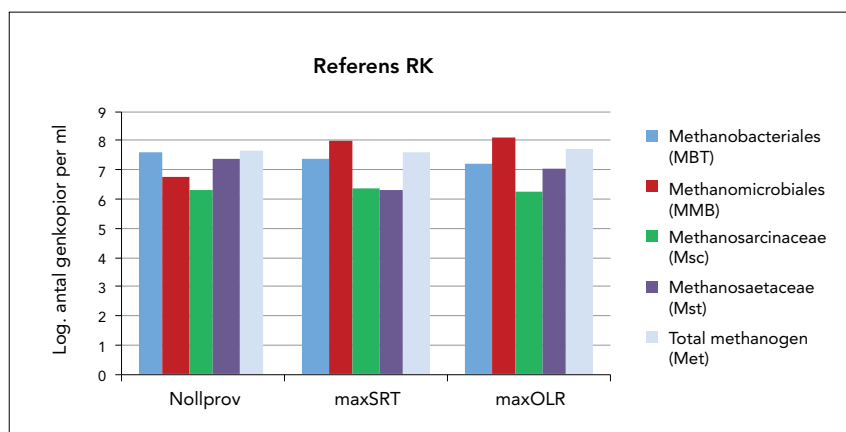
4.9 Mikrobiella förändringar i rötslammet

Figur 4-31, figur 4-32 och figur 4-33 visar resultaten från kvantifiering av metanogener från EXRT-RK och Ref-RK via q-PCR utförd av Anna Schnürrers mikrobiologigrupp vid Sveriges lantbruksuniversitet, SLU. Detaljer kring metoden finns beskrivna i Bilaga D – Analysresultat – Kvantifiering av metanogener genom qPCR-analys.

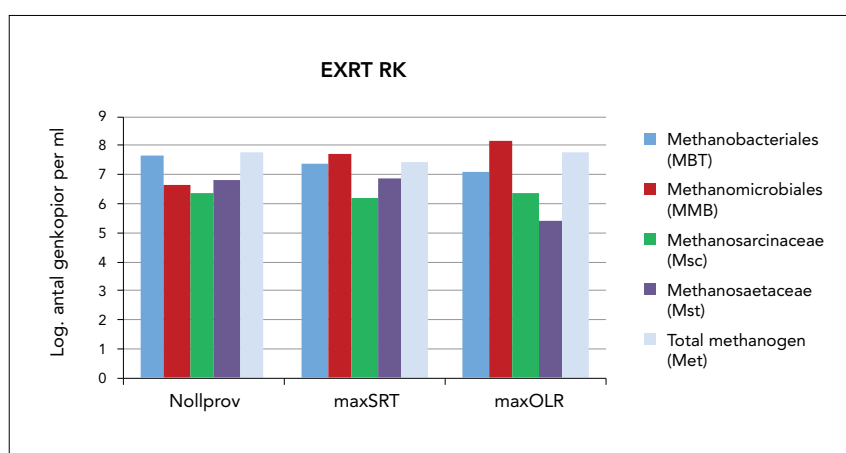
Totalt tre nedfryssta prover valdes ut från försökstiden för att representera tillståndet i rötkastrarna innan försöksstart (nollprov) i försöksvecka -4, nära högsta registrerade TS under driftsätt maxSRT i försöksvecka 79, samt i slutet av driftsätt maxOLR i försöksvecka 118.

Ingen uppenbar skillnad mellan rötkastrarna kan ses i antal detekterbara genkopior, förutom för Methanosaetaceae som verkar öka kraftigt i EXRT-RK i jämförelse med Ref-RK under maxSRT, för att sedan minska under maxOLR. Primers för samtliga metanogener visar dock ingen signifikant skillnad. Över tid kan en tydlig ökning av Methanomicrobiales ses i båda rötkastrarna.

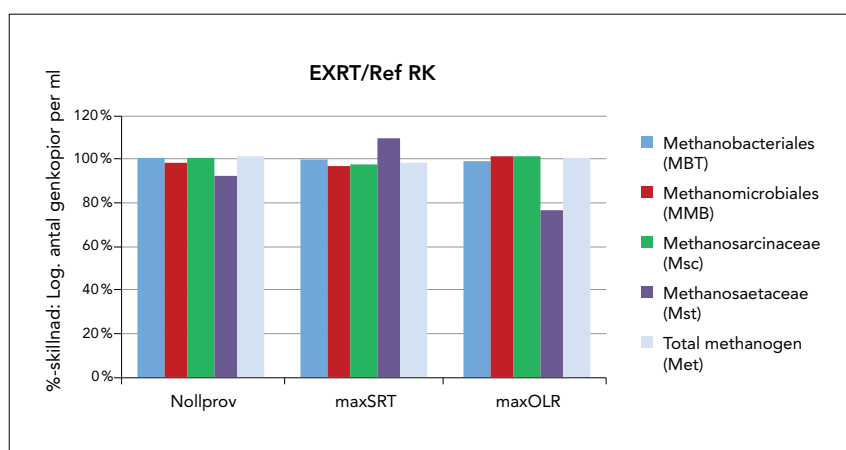
Resultaten från undersökning med FISH gjord av Vermicon AG på material från samma stickprov från maxOLR som q-PCR utfördes på, presenteras i Bilaga C – Analysresultat från FISH-analys, Vermicon. Resultaten bekräftar det som har kunnat ses med q-PCR under maxOLR, det vill säga att ingen signifikant skillnad finns i antal levande metanogener under detta driftsätt baserat på de stickprov som tagits. Däremot indikerar resultaten att EXRT-RK kan ha en ökning i både totalt antal och i diversitet av icke-metanogena mikroorganismer.



Figur 4-31 Logaritmerat antal genkopior av olika metanogener och förändring över tid, innan försökstart (försöksvecka -4), maxSRT (försöksvecka 79), och slutet av maxOLR (försöksvecka 118).



Figur 4-32 Logaritmerat antal genkopior av olika metanogener och förändring över tid, innan försökstart (försöksvecka -4), maxSRT (försöksvecka 79), och slutet av maxOLR (försöksvecka 118).

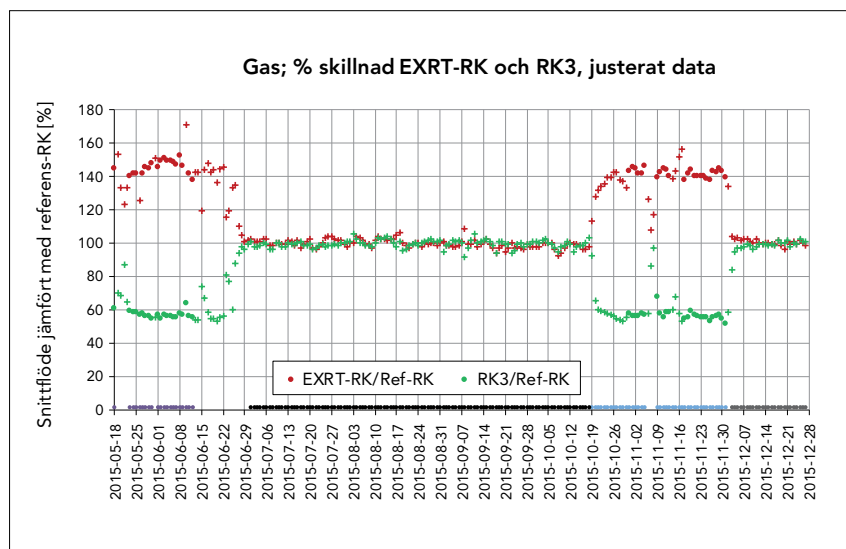


Figur 4-33 Förändring av logaritmerat antal genkopior (EXRT-RK relativt Ref-RK) över tid, innan försökstart (försöksvecka -4), maxSRT (försöksvecka 79), och slutet av maxOLR (försöksvecka 118). OBS logaritmiskt förhållande i bakomliggande data.

4.10 Kontrollförsök

4.10.1 Kontrollförsök – lika belastning I

Figur 4-34 visar en mycket god överensstämmelse de tre rötkammarna emellan med avseende på registrerad gasproduktion under kontrollperioden efter att RK3:s gasproduktion justerats upp med 5 %. Denna justering har använts vid alla beräkningar av gasutbyte för RK3 i rapporten.



Figur 4-34

Justerad procentuell skillnad i gasproduktion EXRT-RK och RK3 jämfört med Ref-RK. Punkter markerar det data som använts för beräkningar av gasproduktion under maxOLR. I tidsaxeln är försöksperioderna markerade med olika färger: maxOLR – lila, kontrollförsök lika belastning I – svart, kontrollförsök maxOLR – turkos, kontrollförsök lika belastning II – grå.

4.10.2 Kontrollförsök maxOLR

Samtliga processparametrar som använts som indikatorer för stabil process under denna period (gaskomposition, VFA-halter, pH, alkalinitet) låg inom stabila värden. Inga processtörningar i form av skumning eller synliga förändringar i slutavvattningsegenskaper kunde observeras. OLR in till Referensrötkammaren skiljde sig inte signifikant mot årsmedelvärdet under kontrollförsöken. Snittgasproduktionen utvärderades under vecka 31/10 till 1/12, med dagar 6–8/11 och 15–17/11 undantagna, eftersom driftarbete genomfördes då, se figur 4-34. HRT för EXRT-rötkammare, Referensrötkammare och RK3 var under denna kontrollperiod 17, 25, och 51 dagar.

Vid en ökad snittbelastning på 50 % under denna kontrollperiod producerade EXRT-rötkammaren 42 mer gas än Referensrötkammaren. Detta motsvarade en minskning i gasutbyte per kg VS på 4 % på jämfört med vad som uppnåddes under maxOLR, och en minskning med 5 % jämfört med vanlig drift. På samma vis ledde en minskad snittbelastning på 50 % RK3 till en snittgasproduktion som var 44 % mindre än referensrötkammaren och en ökning av gasutbyte per kg VS med 13 %, jämfört referensreaktorn.

4.10.3 Kontrollförsök – lika belastning II

Data från dessa kontrollförsök bekräftar resultaten från kontrollförsök med lika belastning I, se figur 4-34.

5 Diskussion

Trots bristen på pålitliga gasflödesdata kan vissa antaganden göras för perioden maxSRT genom att studera gasproduktionen i RK3 under maxOLR och beräknade utröttningsgrader. Denna rötammare hade en median-HRT på 46 dagar (d.v.s. 87 % längre än Ref-RK) men ökade bara sin gasproduktion per kilo VS med 4 procent jämfört med Ref-RK under denna period (se tabell 4-3). Detta är långt ifrån de potentialer för ökad utrötning som man kan förvänta sig genom att bara titta på BMP för rötresten. Under kontrollförsöken för maxOLR ökade däremot gasutbytet med 13 procent jämfört med referensrötammaren. Kostnader för polymerförbrukning, ökad processkomplexitet och driftarbete måste därför vägas mot förväntade ökningarna i gasutbyte för driftsätt maxSRT. En trolig anledning till ökningarna i gasutbyte inte varit större under maxSRT är att även en idealt omrörd och kontinuerligt matad rötammare alltid kommer att ha en spridning i sin retentionstidsdistribution för substratet som en avvattningsutrustning inte kan påverka, om den inte sitter placerad så att den behandlar allt utgående material från rötammaren. Med den processlösning som använts i dessa försök har man inte kunnat undvika att en viss andel färskt substrat alltid riskerat att följa med rötresten ut ur rötammaren via kortslutningsströmmar utan att ha uppnått design-SRT. En rekommendation för en permanent installation är att placera EXRT-centrifugen så att den istället behandlar strömmen av utgående material. Med speciella matningsstrategier och avvattningsutrustning som har kapacitet att hantera flöden som mostavarar det totala inflödet av nytt substrat skulle då påverkan av ökade kortslutningsströmmar vid högre flöden kunna minimeras. En ytterligare aspekt som bör vägas in i utvärderingen maxSRT är den substratsammansättning som använts under försöken. Samtliga substrat (utom möjligtvis dravet) har redan en hög utröttningsgrad vid verkets normala HRT, vilket gör att eventuella skillnader i ökad nedbrytning tack vare en ökad SRT inte blir lika tydliga som om en större andel av den totala substratströmmen bestått av långsammare substrat. Detta skulle i så fall betyda att röttningsanläggningar med en långsammare substratkomposition skulle kunna förvänta sig ett bättre resultat av maxSRT än vad som kunnat visas med Syvabs förutsättningar, givet förstås att den separationsteknik som då används vid avvattningen klarar av att hålla kvar de ämnen som ska brytas ner i rötammaren. Om exempelvis membranavvattning används skulle även nedbrytningsgraden av andra oönskade ämnen, såsom läkemedelsrester och andra organiska föroreningar, samt vissa plaster kunna ökas samtidigt som polymerdosering skulle kunna undvikas i avvattningssteget. Data på prestanda, och installations- och driftskostnad från långtidsförsök i fullskala för membranavvattning saknas dock vid skrivandet av denna rapport.

När det kommer till den mer noggrant studerade gasproduktionen under slutfasen av driftsätt maxOLR är det intressant att den observerade procentuella skillnaden i gasutbyte per kilo VS i jämfört med Ref-RK i tabell 4-3 (-1,5 % och +4 % för EXRT-RK och RK3) trendmässigt stämmer

överens med de procentuella förändringarna i utrötningsgrad från samma period (-5 % och +2 % för EXRT-RK och RK3) vilket stödjer slutsatserna baserade på gasproduktion. I samband med detta kan det konstateras att det finns ett behov att utveckla en metod för att beräkna en parameter motsvarande utrötningsgrad som ger större noggrannhet och bättre överensstämmelse med observerad gasproduktion än de befintliga som baseras på VS, COD, eller TOC. Även om energibalansen pekar på förluster i metanutbyte per kilo VS under maxOLR kan det för många verk vara värt att ta in extra mängder substrat, under förutsättning att de kan hantera de ökade riskerna för metanslip som kommer av en ej fullständigt utrötad rötrest. Detta kan göras exempelvis genom att använda sig av efterrötkammare med garanterade uppehållstider (pluggflöde eller satsvis), torkning av slammet, förbränning, eller hydrotermisk förkolning.

Antagandet att en ökning av det totala antalet metanogener kan ske tack vare EXRT-processen kunde inte styrkas utifrån q-PCR-resultaten under något av driftsätten, trots en bevisligen avsevärt högre mängd torrsubstans under driftsätt maxSRT. En tänkbar förklaring till detta är att antalet metanogener redan har förutsättningar att växa maximalt under verkets normala uppehållstider. Slutsatserna av de kvantitativa jämförelserna bör dock betraktas som svaga eftersom provtagningspunkterna med stor säkerhet varit påverkade av kortslutningsströmmar.

Resultaten från FISH-analyserna i slutet av maxOLR bekräftar q-PCR-analyserna för detta driftsätt och ger en indikation om ett ökat antal, och en ökad diversitet, av icke-metanogener i EXRT-RK.

Arter inom Methanosaetaceae anses konkurrera om substrat med arter inom Methanosarcina, där de förstnämnda normalt har en fördel gentemot de sistnämnda vid längre uppehållstider och låga koncentrationer av acetat. Detta skulle kunna tala för att observationen att Methanosaetaceae tycks öka under maxSRT (lång SRT) och sedan minska under maxOLR (högre VFA-halter) i EXRT-rötkammaren jämfört med referensrötkammaren (figur 4-31–figur 4-33). En acetoklastisk metanogen population som domineras av Methanosarcina snarare än Methanosaetaceae i en rötkammare anses vara mer stabil mot plötsliga processförändringar (DeVrieze et al. 2014). Skillnaderna i SRT och VFA i detta experiment är dock förmodligen inte tillräckligt extrema för att kunna förklara ett sådant kraftigt populationsskift som figur 4-33 ger sken av. Exempelvis har sannolikt naturliga variationer bidragit till dessa skillnader. Sådana variationer över tid har observerats i kontrollerade labbförsök i reaktorer som körs på syntetiska substrat under lång tid (Westerholm et al. 2015). Därtill kommer att primers för Methanosaetaceae är erkänt ospecifika (Schnürer pers. komm.). Ökningen av Methanomicrobiales (som brukar räknas som hydrogenotrofer) över tid i båda rötkastrarna anses däremot vara säkrare rent analystekniskt, och indikerar att båda rötkastrarna under försökstiden genomgått vissa förändringar i sin kollektiva metabolism av substraten eftersom Methanomicrobiales är utpräglade CO₂-reducerare via format och framför allt vätgas. Detta kan vara av intresse för framtida processlösningar om Syvab vill satsa på att försöka öka metanhalten ut från sina rötkastrare genom exempelvis vätgastillsats eller *in-situ* elektricitetöverföring via mikrobiella elektrokemiska celler i ett Power to Gas-upplägg. Framtida röttningsförsök som är beroende av mer långtgående mikrobiolo-

giska slutsatser rekommenderas att planera in betydligt fler provpunkter än vad som rymts inom detta projekts budget för ökad tillförlitlighet.

Överlag har utvärderingen av projektet lidit av stora osäkerheter i flödesmätningar av gas, slam och rejektivatten. Tillsammans med betydande driftproblem när det gäller speciellt den första avvattningscentrifugen, har detta lett till svårigheter i utvärdering av framför allt driftsätt maxSRT som förväntades få sin fulla effekt först efter lång tids sammanhängande drift för att dra nytta av den ökade uppehållstiden. Denna kontinuitet har inte kunnat åstadkommas, trots omfattande insatser av verkets personal. Merparten av driftproblemen kan dock härledas till problem med plaster i verket, samt användandet av äldre centrifugmodeller med låg kapacitet i kombination med en sårbar försöksupställning för polymerdoseringen. Parallellt med försöken på Syvab genomfördes även försök på Duvbackens ARV (Gävle) med att åstadkomma en förlängd uppehållstid genom att periodvis utnyttja den befintliga slutavvattningscentrifugen som avvattningsutrustning. Slutsatsen av dessa försök var dock att en mer omfattande ombyggnation och redundans i slutavvattningen hade behövts för att kunna få en tillräckligt driftsäker installation för att våga köra processen utan konstant övervakning. Vid en fast installation där lärdom tagits av erfarenheterna i denna rapport när det gäller val och anpassning av utrustning bedöms EXRT ha stor potential att fungera som en lättimplementerad kapacitetsökande processlösning, speciellt för driftsättet maxOLR.

Processtäligheten för EXRT-RK utvärderat som processparametrar är under båda driftsätten att betrakta som likvärdig med de övriga rötkamrarna och inga tecken på överbelastning har kunnat observeras. Kortslutningsströmmar vid provtagningspunkterna för stickprovsanalyser i rötkamrarna har med stor säkerhet bidragit till ett betydligt ökat brus i samtliga analyserade parametrar och minskar tyvärr möjligheten att kvantifiera eventuella skillnader mer exakt. Att minska brus är en forskningstekniskt väldigt viktig pusselbit och avgörande för att kunna studera effekten av nya processer med små förväntade skillnader (vilka tillsammans kan göra stor skillnad) och därmed definitivt något som bör undersökas närmare.

Även cirkulationspumpen för omrörning har genomgående fungerat bra genom försökstiden, även om flödet minskat med ökande halter torrsubbans. I försöksvecka 79 sågs vissa tendenser till försämrade uppvärmning över värmeväxlarna vid TS-halt 6,5 procent vilket gör att 6 procent bör sättas som en säkerhetsgräns i eventuella framtida försök om inte uppvärmningssystemet byggs om för att klara högre slamhalter. Det omvänt proportionerliga sambandet mellan pumpbarhet och TS, samt samvariansen mellan pumpbarhet och uttrinngstestet (se figur 4-20), ger som helhet en bra bild av när slammet börjar bli för tjockt för processen.

Avvattningsegenskaperna i slutavvattningen försämrades kraftigt i samband med starten av maxOLR vilket märktes genom att polymerdoseringen ökade för verket. Förmodligen kan detta härledas till ökade flöden av polymer från EXRT-RK vilket förändrat laddningar i slammet så att ordinarie polymer i slutavvattningen tappat effekt. Det är en mycket viktig punkt att minska båda polymerförbrukarna eftersom polymerkostnaden bara för EXRT-centrifugens drift under maxOLR utgör en signifikant kostnadspost i resultaträkningen.

6 Slutsatser

Målet om att kunna driva EXRT-rötkammaren med 40 procent ökad belastning utan processtörningar under maxOLR uppnåddes. Det resulterade i cirka 45 procent mer gas per rötkammarvolym vid en ökad belastning om cirka 47 procent mer VS per rötkammarvolym jämfört med referensrötkammare. Detta ledde dock till att metanutbytet per kilo VS sjönk med cirka 1,4 procent i jämförelse med referensrötkammaren. En energibalans beräknad för utvärderingsperioden för detta driftsätt gav ett netto på 4,9 kWh/(m³ RK dag), med centrifugens energibehov inräknat. Skulle samma substratflöde som under utvärderingsperioden gått till EXRT-rötkammaren istället ha rötats i rötkammarvolymen med samma utrötningsgrad som referensrötkammaren skulle detta ge ett netto på 5,2 kWh/(m³ RK dag). Baserat på detta har rötning i EXRT-rötkammaren gett en kombinerad effekt av minskat substratutnyttjande och energiåtgång för centrifug på under -0,28 kWh/(m³ RK dag). Under en kontrollperiod för maxOLR där EXRT-rötkammaren belastades med 50 procent mer VS utan avvattningscentrifug inkopplad registrerades cirka 42 procent mer gas än referensrötkammaren och gasutbytet per kilo VS sjönk med cirka 5,3 procent.

Målet om 10 procent mer gas under maxSRT kunde inte verifieras via gasmätningar. Baserat på jämförelser med övriga rötkammarers utrötningsgrader och glödrester är det inte heller troligt att denna nivå uppnåts. Projektet har som helhet varit drabbat av återkommande driftstörningar, speciellt under första delen av maxSRT. Det största problemet har varit plaster från externa substratströmmar som smutsat centrifugen och fastnat i pumpar. Efter byte av centrifug till en större modell med större kapacitet och mindre känslighet för plastproblemet kunde processen köras med betydligt färre driftstopp. Eftersom maxSRT inte visat tillräckligt lovande resultat planeras inga fortsatta försök med detta driftsätt om inte en justering av den använda försöksupställningen kan göras där kortslutningsströmmar minimeras, och där tillräckligt lång sammanhållen drifttid kan uppnås.

EXRT-rötkammaren visade under försökstiden inga betydande tecken på försämrad processtålighet jämfört med referensrötkammaren. Pumpbarheten av slammet försämrades med ökande halter torrsustans och ett gränsvärde på 6,5 procent identifierades under maxSRT när värmeväxlingen visade tendenser på minskad effektivitet. Ett stabilt samband kunde ses mellan en enkel labbanalys och graden av pumpbarhet.

Det gick inte att se någon påverkan på slutavvattningen mätt i energiåtgång i eller ökad polymerdosering under driftsätt maxSRT. Däremot verkar driftsätt maxOLR ha mer än dubblat polymeråtgången i slutavvattningen, vilket gör att fortsatta resurser för att utveckla processen bör läggas på att hitta rätt polymer(-kombinationer) för att komma tillrätta med detta.

Antagandet om ökat antal metanogener tack vare anrikning av torrsustans kunde inte bekräftas i de mikrobiologiska analyserna som utfördes. Denna slutsats bör dock betraktas som svag i och med att den bygger på

kvantitativa jämförelser av stickprov från provtagningspunkter som påverkats av kortslutningsströmmar från inkommande nytt substrat.

Med tanke på de osäkerheter i olika parametrar såsom gasproduktion, OLR, med flera som observerats i dessa försök, och behovet av långa sammanhängande driftsperioder vid rötningsförsök, så rekommenderas generellt ett omfattande förarbete vid liknande fullskaleförsök. Detta gäller speciellt om förväntade effekter ligger i storleksordningen <10 procent. Fokus bör ligga på givarverifiering, identifiering av representativa provtagningspunkter, och kartläggning av rötkamarspecifika omrörningsförhållanden.

Referenser

De Vrieze, J., Hennebel, T., Boon, N. & Verstraete, W. 2012 Methanoscarcina: the rediscovered methanogen for heavy duty biomethanation. Bioresource technology, 112, 1–9.

Koch, K. (2015). Calculating the degree of degradation of the volatile solids in continuously operated bioreactors. Biomass and Bioenergy, 74, 79–83. doi:10.1016/j.biombioe.2015.01.009-

Switzenbaum, M.S., Farrell, J.B. & Pincince, A.B. (2003). Relationship Between the Van Kleeck and Mass-Balance Calculation of Volatile Solids Loss. Water Environment Research, 75(4), 377–380. doi:10.2175/106143003X141187-

Westerholm, M., Müller, B., Isaksson, S. & Schnürer, A. 2015 Trace element and temperature effects on microbial communities and links to biogas digester performance at high ammonia levels. Biotechnology for Biofuels, 8(1), 154.

Prof. Anna Schnürer, SLU – kontakt via e-post och telefon.

Clas Gustafson, NOXON – kontakt via telefon (2015-06-29).

Bilagor

Bilaga A – Uppföljningsschema

Uppföljnings- område	Provpunkt	Analyser	Typ av prov	Typ av analys	Frekvens	Eventuella ändringar
Belastning	Inkommande RK1	Flödesmätning	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	
		TS	Dygssamlingsprov	Labanalys	5 ggr/v	
		VS	Dygssamlingsprov	Labanalys	5 ggr/v	
	Inkommande RK2	Flödesmätning	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	
		TS	Dygssamlingsprov	Labanalys	5 ggr/v	Provpunkten tillkom 14-11-07 då misstanke var att materialet in till EXRT-RK och REF-RK skilde sig.
		VS	Dygssamlingsprov	Labanalys	5 ggr/v	
	Inkommande RK3	Flödesmätning	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	
	Förtjockat primärslam	TS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	
		VS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	
	Avvattnat flotationsslam (bioslam)	TS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	
		VS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	
	Flytande externt organiskt material	TS	Stickprov	Labanalys	5 ggr/v	Dygssamlingsprov
		VS	Stickprov	Labanalys	5 ggr/v	
	Fast externt organiskt material	TS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	Då variationen inte har varit stor har endast ett få antal stickprov gjorts.
		VS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	
Pumpbarhet	Rötkammarinnehåll RK1	Flödesmätning	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	
		Viskositet	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	1 ggr/v fr.o.m 2015-01-15 eftersom förändringar i viskositet och pumpbarhet inte är lika intressant att hålla koll på i Driftsätt 2 när vi längre strävar mot maximal TS i reaktorn som i Driftsätt 1.
		Strömförbrukning cirkulationspumpen	Stickprov	Avläsning givare	2 ggr/v	
	Rötkammarinnehåll RK2	Viskositet	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	Tillkom 12-11-19. Samma ändringar 2012-01-15.
EXRT-centrifugkontroll	Recirkulerat slam	TS	Stickprov	Labanalys	3 ggr/v	
		VS	Stickprov	Labanalys	3 ggr/v	
	Rejekt EXRT-centrifug	SS	Stickprov	Labanalys	5 ggr/v	
		TS	Stickprov	Labanalys	3 ggr/v	Tillkom 2013-02-20 för att få bättre noggrannhet i TS/GR-mass- och flödesbalanser över centrifugen.
		VS	Stickprov	Labanalys	3 ggr/v	
		VFA	Stickprov	Labanalys	3 ggr/v	Tillkom 2014-11-17 för att hålla koll under driftsätt2.
Massbalans och energibalans EXRT	Inkommande RK1	TOC	Månadssamlingsprov	Labanalys	1 ggr/månad	
		COD	Månadssamlingsprov	Labanalys	1 ggr/månad	
		Tot-P	Månadssamlingsprov	Labanalys	1 ggr/månad	
		Tot-N	Månadssamlingsprov	Labanalys	1 ggr/månad	
	Utgående rötslam = rötkammarinnehåll RK1	TOC	Stickprov	Labanalys	1 ggr/månad	
		COD	Stickprov	Labanalys	1 ggr/månad	
		Tot-P	Stickprov	Labanalys	1 ggr/månad	
		Tot-N	Stickprov	Labanalys	1 ggr/månad	
	Rejekt EXRT-centrifug	TOC	Stickprov	Labanalys	1 ggr/månad	
		COD	Stickprov	Labanalys	1 ggr/månad	
		Tot-P	Stickprov	Labanalys	1 ggr/månad	
		Tot-N	Stickprov	Labanalys	1 ggr/månad	
	UT EXRT-centrifug	TOC	Stickprov	Labanalys	1 ggr/månad	
		COD	Stickprov	Labanalys	1 ggr/månad	
		Tot-P	Stickprov	Labanalys	1 ggr/månad	
		Tot-N	Stickprov	Labanalys	1 ggr/månad	

Uppföljnings- område	Provpunkt	Analyser	Typ av prov	Typ av analys	Frekvens	Eventuella ändringar
Gasproduk- tion och gaskvalitet	Gas RK1	Gasflöde	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	Nya ultraljudsgivare installerades 2015-03-24. De mäter asflöde, temperatur och metanhalt
		Metanhalt	Stickprov	Labanalys	2 ggr/månad	Gjort 7 gånger under 2014-2015. Efter installation av ultraljudsgivare har online metanhalt använts
	Gas RK2	Gasflöde	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	Samma som för RK1
		Metanhalt	Stickprov	Labanalys	2 ggr/månad	Samma som för RK1
	Gas RK3	Gasflöde	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	Samma som för RK1
		Metanhalt	Stickprov	Labanalys	2 ggr/månad	Samma som för RK1
Mängd av- vattnat slam	Avvattnat slam	Mängd slam	Kontinuerligt	Vågdata	Kontinuerligt	
		TS	Stickprov	Labanalys	3 ggr/v	
Polymer- förbrukning	Polymer till avv. centrifuger	Flöde	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	
		TS	stickprov	Labanalys	Vid behov	
Process- parametrar	Rötkammarinnehåll RK1	VFA	Stickprov	Labanalys	1 ggr/v	Analyserat 3 ggr/v under uppstart av driftsätt 2. Då ingen ökning observerades ändrades det till 2 ggr/v.
		NH ₄ -N	Stickprov	Labanalys	1 ggr/v	
		Bikarbonat- alkalinitet	Stickprov	Labanalys	1 ggr/v	
		Total alkalinitet	Stickprov	Labanalys	1 ggr/v	
		pH	Stickprov	Labanalys	1 ggr/v	
		TS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	
		VS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	
		Temperatur	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	
	Rötkammarinnehåll RK2	VFA	Stickprov	Labanalys	1 ggr/v	Samma ändringar som för RK1
		NH ₄ -N	Stickprov	Labanalys	1 ggr/v	
		Bikarbonat- alkalinitet	Stickprov	Labanalys	1 ggr/v	
		Total alkalinitet	Stickprov	Labanalys	1 ggr/v	
		pH	Stickprov	Labanalys	1 ggr/v	
		TS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	
		VS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	
		Temperatur	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	
	Rötkammarinnehåll RK3	VFA	Stickprov	Labanalys	1 ggr/v	
		NH ₄ -N	Stickprov	Labanalys	1 ggr/v	
		Bikarbonat- alkalinitet	Stickprov	Labanalys	1 ggr/v	
		Total alkalinitet	Stickprov	Labanalys	1 ggr/v	
		pH	Stickprov	Labanalys	1 ggr/v	
		TS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	
		VS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	
		Temperatur	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	
Metan- potential utgående rötslam	Utgående rötslam = rötkammarinnehåll RK1	Utrötnings- försök oavgasad ymp	Stickprov	Labanalys	4 ggr/år	3 utrötningsförsökt gjorda enligt genomförande plan.
	Utgående rötslam = rötkammarinnehåll RK2	Utrötnings- försök oavgasad ymp	Stickprov	Labanalys	4 ggr/år	3 utrötningsförsökt gjorda enligt genomförande plan.
	Utgående rötslam = rötkammarinnehåll RK3	Utrötnings- försök oavgasad ymp	Stickprov	Labanalys	4 ggr/år	3 utrötningsförsökt gjorda enligt genomförande plan.

Uppföljnings- område	Provpunkt	Analyser	Typ av prov	Typ av analys	Frekvens	Eventuella ändringar	
Specifik gas- produktion, beräknas på veckobasis	Gas RK1	Gasflöde	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt		
	Gas RK2	Gasflöde	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt		
	Gas RK3	Gasflöde	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt		
	Inkommande RK1	Flöde in	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt		
		VS	Dygssamlingsprov	Labanalys	5 ggr/v		
	Inkommande RK2	Flöde in	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt		
		VS	Dygssamlingsprov	Labanalys	5 ggr/v	Provpunkten tillkom 14-11-07	
	Inkommande RK3	Flöde in	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt		
Hypotetisk gasproduk- tion, beräknas på veckobasis	Externa material, fasta och flytande	Utrötnings- försök, kontroll av metangas- potential	Stickprov	Labanalys	Vid behov/ ändringar		
		VS	Stickprov	Labanalys	Vid behov/ ändringar	Dygssamlingsprov	
		Mängd substrat och typ av substrat	Kontinuerligt	Loggning våg	Dagligen		
	Förtjockat primärslam	Utrötnings- försök, kontroll av metangas- potential	Stickprov	Labanalys	6 ggr/år		
		Inflöde	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt		
		VS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v		
	Avvattnat flotationsslam (bioslam)	Utrötnings- försök, kontroll av metangas- potential	Stickprov	Labanalys	Vid behov, misstanke om för- ändring etc.		
		VS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v		
		Inflöde	Kontinuerligt	onlinegivare	Kontinuerligt		
	Metan- potential utgående rötslam	Utgående rötslam = rötkammarinnehåll RK1	Utrötnings- försök oavgasad ymp	Stickprov	Labanalys	4 ggr/år	3 utrötningsförsökt gjorda enligt genomförande plan.
		Utgående rötslam = rötkammarinnehåll RK2	Utrötnings- försök oavgasad ymp	Stickprov	Labanalys	4 ggr/år	3 utrötningsförsökt gjorda enligt genomförande plan.
		Utgående rötslam = rötkammarinnehåll RK3	Utrötnings- försök oavgasad ymp	Stickprov	Labanalys	4 ggr/år	3 utrötningsförsökt gjorda enligt genomförande plan.
Uppföljnings- område	Provpunkt	Analyser	Typ av prov	Typ av analys	Frekvens	Eventuella ändringar	
Uppehållstid	Inkommande RK1	Flöde	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt		
	Rejektvatten EXRT- centrifug	Flöde	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt		
		SS	Stickprov	Labanalys	5 ggr/v		
	Inkommande RK2	Flöde	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt		
	Inkommande RK3	Flöde	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt		
Mikrobiell förändring	Rötkammarinnehåll RK1	qPCR	Stickprov	Labanalys	4 ggr		
	Rötkammarinnehåll RK2	qPCR	Stickprov	Labanalys	4 ggr		
	Rötkammarinnehåll RK1	FISH	Stickprov	Labanalys	1 gång		
	Rötkammarinnehåll RK2	FISH	Stickprov	Labanalys	1 gång		
Ansamling av metaller näringsäm- nen etc.	Rötkammarinnehåll RK1	Metallanalys, näringsämnen, PCB, PAH	Stickprov	Labanalys	4 ggr/år		
	Rötkammarinnehåll RK2	Metallanalys, näringsämnen, PCB, PAH	Stickprov	Labanalys	4 ggr/år		

Uppföljnings- område	Provpunkt	Analyser	Typ av prov	Typ av analys	Frekvens	Eventuella ändringar
Aktivitet på rötslam	Rötkammarinnehåll RK1	Satsvisa rötningsförsök	Stickprov	Labanalys	3 ggr	
	Rötkammarinnehåll RK2	Satsvisa rötningsförsök	Stickprov	Labanalys	3 ggr	
Energiför- brukning	Gas RK1	Flödesmätning	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	
	Gas RK2	Flödesmätning	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	
	EXRT-utrustning	Energiförbruk- ning	Dygnsförbrukning	Avläsning	5 ggr/vecka	
	RK1	Rötrestproduk- tion	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	
	RK2	Rötrestproduk- tion	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	
	Slutavvattnings- centrifuger	Förbrukning/ m ³ slam, total förbrukning	Kontinuerligt	Onlinegivare	1 ggr/vecka	
Utrötnings- grad	Inkommande RK1	Flödesmätning	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	
		TS	Dygnsamlingsprov	Labanalys	5 ggr/v	
		VS	Dygnsamlingsprov	Labanalys	5 ggr/v	
	Inkommande RK2	Flödesmätning	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	
	Inkommande RK3	Flödesmätning	Kontinuerligt	Onlinegivare	Kontinuerligt	
	Förtjockat primärslam	TS	Stickprov	Labalalys	2 ggr/v	
		VS	Stickprov	Labanalys	2ggr/v	
	Avvattnat flotationsslam (bioslam)	TS	Stickprov	Labalalys	2 ggr/v	
		VS	Stickprov	Labanalys	2ggr/v	
	Flytande externt organiskt material	TS	Stickprov	Labalalys	5 ggr/v	Dygnsamlingsprov
		VS	Stickprov	Labanalys	5 ggr/v	Dygnsamlingsprov
	Fast externt organiskt material	TS	Stickprov	Labalalys	2 ggr/v	Då variationen inte har varit stor har endast ett få antal stickprov gjorts.
		VS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	
	Rötkammarinnehåll RK1	TS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	
		VS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	
	Rötkammarinnehåll RK2	TS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	
		VS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	
	Rötkammarinnehåll RK3	TS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	
		VS	Stickprov	Labanalys	2 ggr/v	

Bilaga B

Utvärdering ultraljudsgivare och termiska givare

Bakgrund

Flödesmätning av rågas är komplicerat eftersom biogasen innehåller frätande komponenter, varierar i komposition och är mättad med vatten. Därtill riskerar även mätarna att utsättas för nedsmutsning under skumningar i RK. På Syvab har termiska gasflödesmätare använts för att mäta rågasen. Denna givartyp är känslig för kondensproblematik och nedsmutsning. Figur B-1 visar exempel på hur detta kan se ut. Notera att det är mest beläggning i flödesriktningen. Figur B-2 visar hur de termiska givarna kan se ut före och efter rengöring. Påverkan av denna nedsmutsning på registrerade gasflöden blir tydlig om man jämför värden före och efter rengöring, se figur 4-2.

Dessutom bör även data från termiska givare för bästa möjliga precision korrigeras löpande för gaskomposition eftersom CO_2 och CH_4 har olika värmeledningstal. Ingen sådan kontinuerlig metanhaltsmätning har funnits. Istället har gaskompositionen analyserats genom manuell provtagning och analys i GC.

Vid tidigare verifiering av givarna (fram till 2015-03-25) har det inte funnits något instick för att kunna gå in med en referensgivare för att verifiera mätarna. Enda möjliga kontrollen har varit att ta ut gasflödesgivarna och sätta in kontrollgivare istället. Problemet med detta upplägg är att gasproduktion från RK i sig varierar så mycket att eventuella fel i givarna blir svårt att upptäcka. Under de tidpunkter som extern konsult har kommit för att verifiera gasgivarna som en del av verkets uppfyllande av HBK-kriterier så har flödet typiskt kunnat variera upp till i storleksordningen $150 \text{ m}^3/\text{h}$ på medelflöden kring $350 \text{ m}^3/\text{h}$, vilket följaktligen gjort att upplösningen för att hitta eventuella avvikelser har varit väldigt låg.

Under EXRT-projektets gång blev det tydligt att registrerad gasproduktion från de olika RK skiljde sig orimligt mycket åt trots identisk belastning. Under våren 2015 togs därför beslutet att installera nya ultraljudsgivare, för att få en bättre kontroll av gasflödet. Dessa installerades i serie med termiska givarna för att kunna mäta samtidigt på samma flöde. Ett exempel på hur en sådan jämförelse kan se ut visas i figur B-3. Dynamiken i signalerna



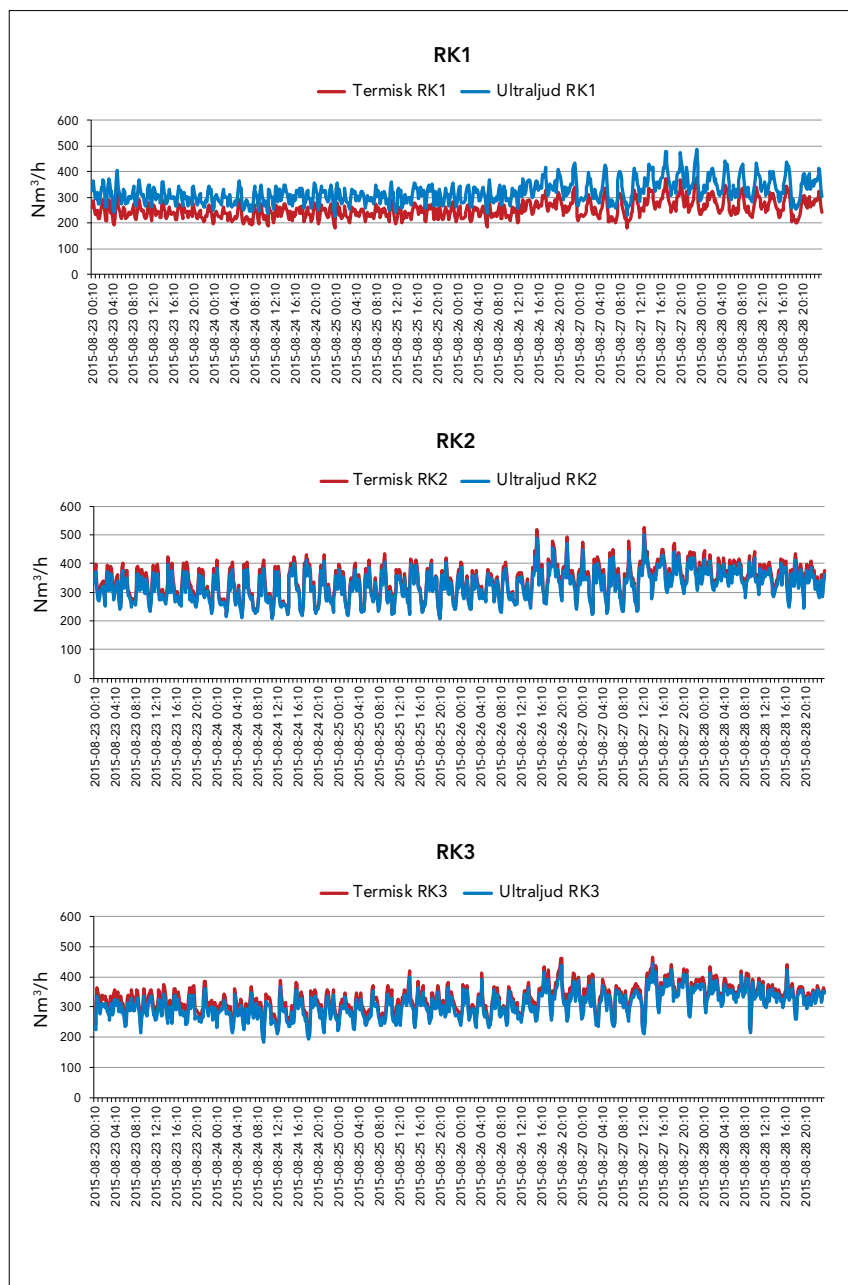
Figur B-1

Överst: Smutsig termisk givare, vy flödesriktning.

Ovan: Smutsig termisk givare, vy mot flödesriktning.



Figur B-2 Vänster: Termisk givare före rengöring. Höger: Termisk givare efter rengöring.



Figur B-3 Registrerat gasflöde termiska och ultraljud en vecka i maj 2015. Ultraljud är +18, -1, och -8% för RK1, RK2, och RK3 jämfört med termiska givare under denna period

stämmer väldigt bra överens om man jämför ultraljudsgivarna med de termiska, men en förskjutning kan se i registrerade absoluta flöden. Ett instick som möjliggör att gå in med ytterligare en givare vid behov för att validera givarna som en extern kontroll installerades också. För en bild på hur hela installationen kom att se ut, se figur 3-3.

För att verifiera gasgivarna har extern konsult vid skrivandet av denna rapport hyrts in vid tre tillfällen under 2015 för att kontrollera flödesmätarna: 2015-05-05, 2015-06-15, och 2015-09-08. Vid det första tillfället kunde inga kontrollmätningar genomföras på grund av för mycket kondens i röret, förmodligen på grund av rören vid detta tillfälle ännu inte hunnit bli isolerade efter ombyggnation och installation av de nya ultraljudsgivarna.

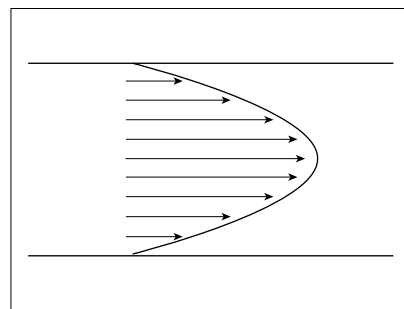
Vid de senare två tillfällena hade extern konsult utvecklat en metod för att blåsa bort kondensvatten med hjälp av kvävgas. Det är resultaten från dessa mätningar som redovisas i denna rapport.

Metod för verifiering

Verifieringsmätningarna gjordes med hjälp av Prandtlrör via insticket innan de termiska givarna, se figur 3-3. Mätprincipen bygger på tryckskillnad och kompletterar därmed de övriga två givartyperna som bygger sina flödesberäkningar genom omräkning av avkylningsförmåga (termiska givare) och gasflödes hastighet (ultraljud). För att i möjligaste mån undvika påverkan av kondensvatten (som utrustningen är känslig för) blåstes först insticket ”torrt” med hjälp av kvävgas innan mätningarna påbörjades.

För att kunna få fram ett absolut värde på flödet via Prandtlrörmätningarna behövs egentligen en så kallad traversering för att kunna göra en tillförlitlig omräkning från differenstryck till flöde. Detta gör man för att kompensera för att flödesprofilen ser olika ut i utkanterna (lägre hastighet) jämfört med i mitten av röret (högre hastighet), se figur B-4. Rent praktiskt görs detta genom att mäta på ett antal punkter i gasledningen för att på så sätt utvärdera flödesprofilen i ett tvärsnitt.

På grund av betydande kondens vid rörets kanter kunde inte en fullständig traversering göras utan att givaren blev blöt/smutsig, utan samtliga mätningar gjordes mitt i gasledningen. Detta innebär att några absoluta tal för flödet inte kan tas fram och användas för jämförelse. Istället har relativ skillnad mellan resultat från Prandtlrörmätningar och registrerade värden från ultraljudsgivare respektive termiska givare använts för att utvärdera de två givartyperna.



Figur B-4

Flödesprofil i rör. Snabbare gasflöde i mitten.

Resultat och diskussion

Kända felkällor

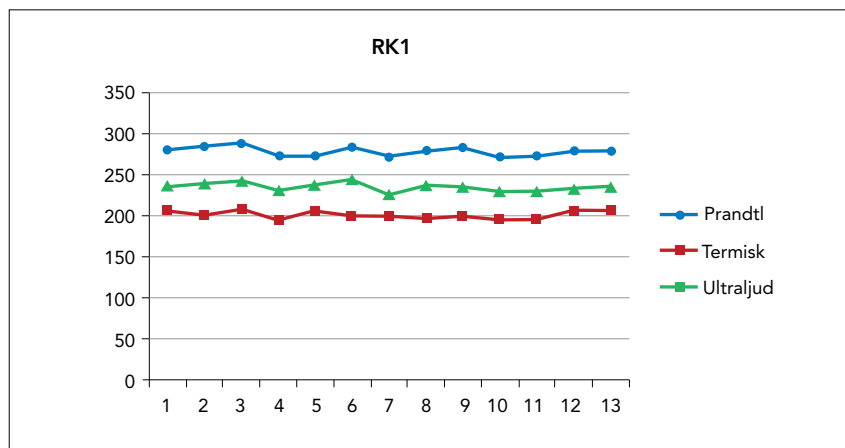
Mätningarna med Prandtlröret kunde bara göras under ett par minuter åt gången för att inte riskera kondensvattenproblem, detta begränsar slutsatserna som kan dras av dessa mätningar. En ytterligare felkälla kommer av att data från Prandtlrörmätningarna inte kunde loggas. Onlinevärden på Syvab sparas vidare endast som minutvärden. Eftersom de manuella mätningarna endast kunde göras under cirka två minuter fick därför registrering av samtliga värden under verifieringen göras ”för hand” genom att ta skärmdumpar från styrsystemsbilden på Citect och matcha dessa med noterade värden från tryckgivaren var tionde sekund.

I de första försöken (2015-05-05) utfördes mätningarna för RK1 och RK2 under en period i matningscykeln när gasproduktionen bedömdes vara som mest stabil, det vill säga under en period när det hade gått lång tid (timmar) efter senaste inpumpning av nytt substrat. Det senare var dock inte möjligt att åstadkomma för mätningarna på RK3 inom tidsramen för försöken, så mätningarna för denna RK bör betraktas som extra osäkra.

I det andra försöket (2015-09-08) utfördes mätningarna på RK2 under en period när gasflödet bedömdes som mer varierande på grund av kort tid sedan senaste inpumpning och därmed högre gasproduktion, vilket gör att mätningarna för denna RK bör betraktas som extra osäkra.

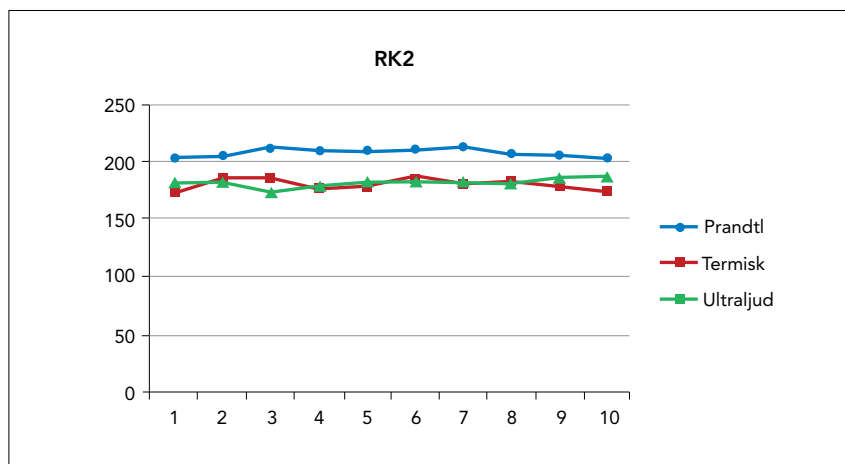
Försök 2015-06-15

Totalt fyra stycken skarpa mätningar utfördes (inledande testmätningar redovisas inte): en för RK1, en för RK2, och två stycken för RK3. I figur B-5, figur B-6, figur B-7 och figur B-8 visas de uppmätta gasflödena från de olika givartyperna parallellt för RK1, RK2, och RK3. På grund av endast ett fåtal punkter (10–13 stycken) per mätning är det svårt att säga något entydigt angående hur dynamiken i signalerna från de olika givarna följer varandra. Exempelvis följer ultraljudsgivaren Prandtl-givaren bättre i figur B-5, medan det i figur B-6 ser ut som om att den termiska givaren följer dynamiken i Prandtl-givaren bättre.



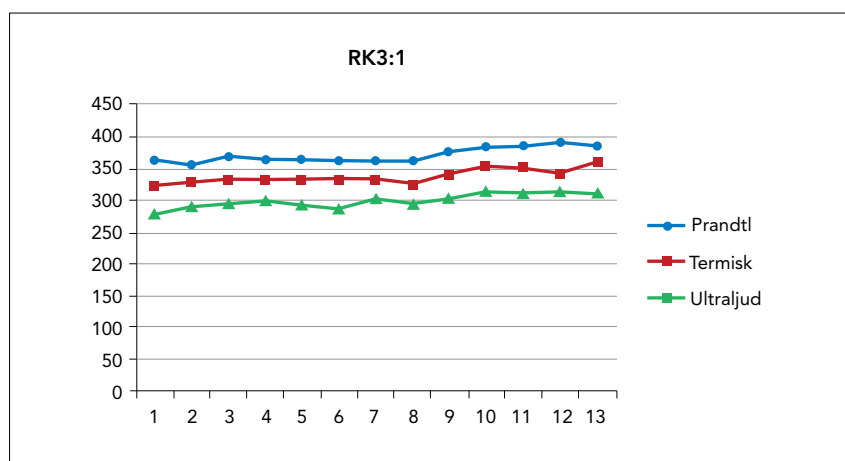
Figur B-5

Mätning 2015-06-15 med Prandtlrör för RK1 och jämförelse med termiska och ultraljudsgivare.



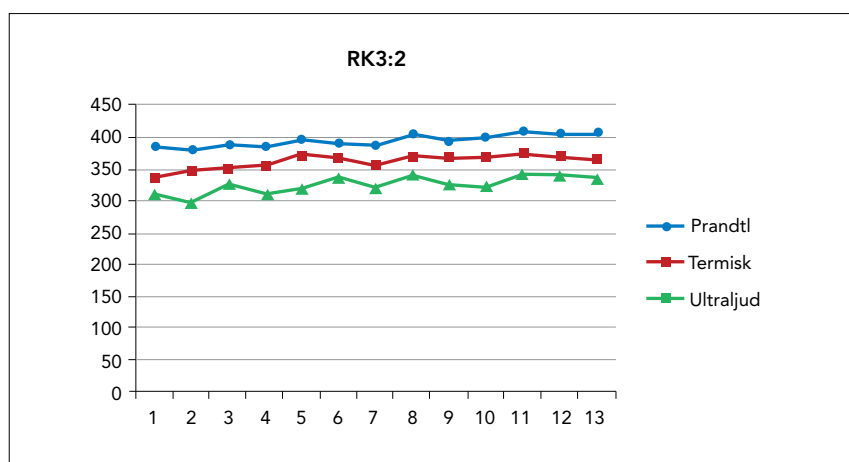
Figur B-6

Mätning 2015-06-15 med Prandtlrör för RK2 och jämförelse med termiska och ultraljudsgivare.



Figur B-7

Första mätning 2015-06-15 med Prandtlrör för RK3 och jämförelse med termiska och ultraljudsgivare.



Figur B-8 Andra mätning 2015-06-15 med Prandtlrör för RK3 och jämförelse med termiska och ultraljudsgivare.

Ultraljudsgivarna som givartyp hade bäst överensstämmande differens (-15, -13, -19 %) gentemot Prandtlrörmätningarna i jämförelse med de termiska givarna (-28, -13, -9 %) om man jämför mätningarna från samtliga rötkammare med varandra, se tabell B-1.

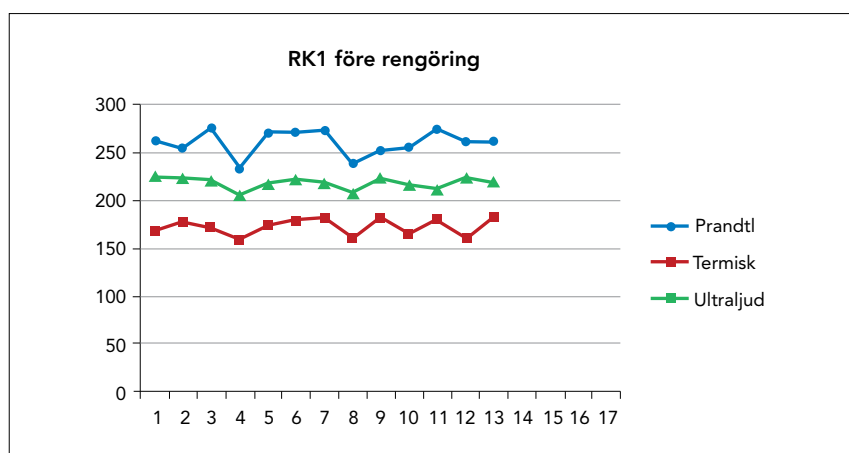
Resultaten från jämförelsen mellan ultraljuds- och termiska mätare under tidperioden för verifieringsmätningen (+17, +1, -11 %) stämde väl överens med skillnaden över en längre tids mätning över en slumpmässigt vald vecka i maj 2015 (+18, -1, och -8 %), se figur B-3. Detta betyder att överensstämmelsen dessa två givartyper under den korta verifieringsmätningen stämmer väl överens med mätningar över längre tid.

Tabell B-1 Resultat från verifiering med Prandtlrör 2015-06-15.

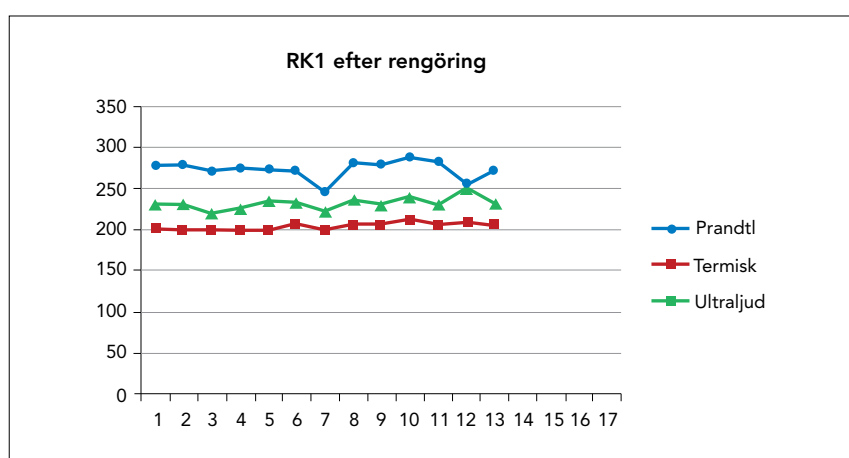
	Termisk-Prandtlrör	Ultraljud-Prandtlrör	Ultraljud-termisk
RK1	-28 %	-15 %	17 %
RK2	-13 %	-13 %	1 %
RK3	-9 %	-19 %	-11 %

Försök 2015-09-08

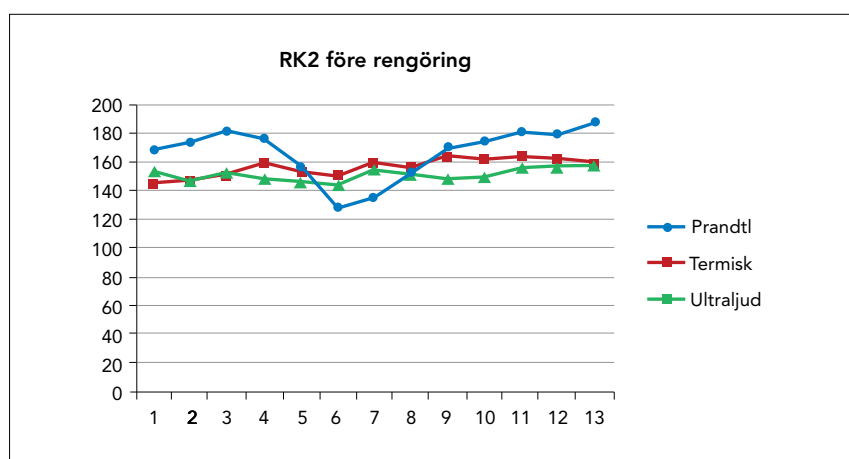
Dessa försök gjordes efter att givarna suttit utan rengöring i 85 dagar i syfte att utvärdera hur de termiska givarna påverkades av rengöring efter en längre tids drift. Två mätningar genomfördes per rötkammare: en innan rengöring och en efter rengöring av de termiska givarna. Ingen rengöring av ultraljudsgivarna kunde göras mellan mätningarna då utrustning för detta inte fanns tillgänglig vid tillfället, och den extra tid som demontering och återinstallation skulle ta. Resultaten före och efter rengöring redovisas för RK1 i figur B-9 och figur B-10, för RK2 i figur B-11 och figur B-12 samt för RK3 i figur B-13 och figur B-14. På samma sätt som i försöken 2015-06-15 är det svårt att dra några slutsatser när det gäller vilken givartyp som bäst stämmer överens med avseende på överensstämmelse i signalernas dynamik. Speciellt kan dock noteras att i första mätningen för RK2 (figur B-11), så skiljer sig resultaten från Prandtlmätningen kraftigt från övriga två givare.



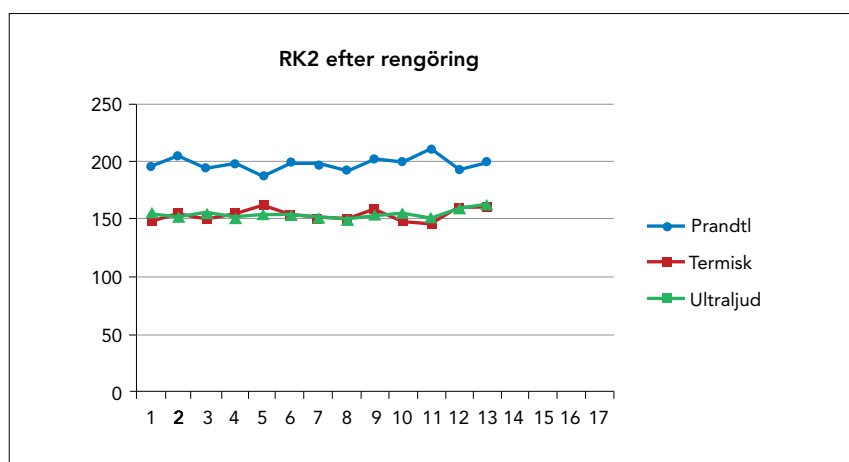
Figur B-9 Mätning 2015-09-08 med Prandtlrör för RK1 och jämförelse med termiska och ultraljudsgivare. Innan rengöring av termiska givare.



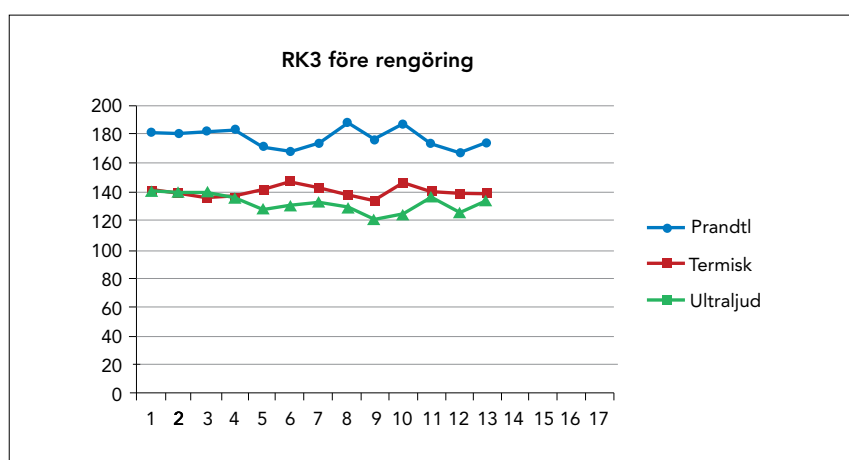
Figur B-10 Mätning 2015-09-08 med Prandtlrör för RK1 och jämförelse med termiska och ultraljudsgivare. Efter rengöring av termiska givare.



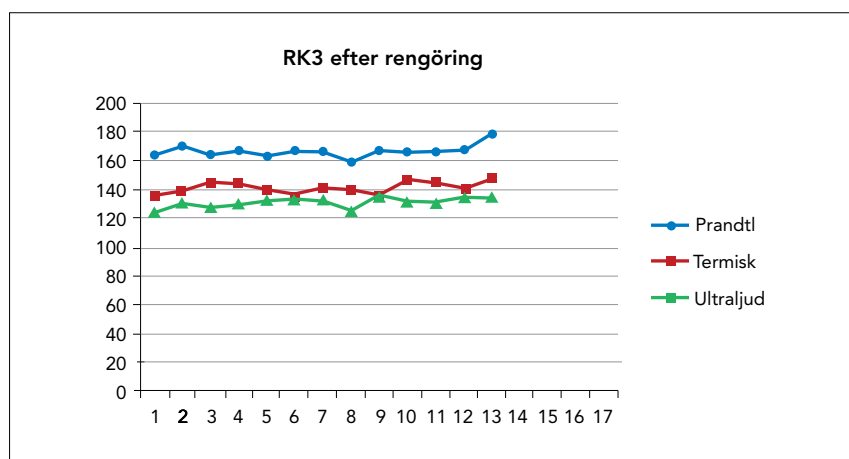
Figur B-11 Mätning 2015-09-08 med Prandtlrör för RK2 och jämförelse med termiska och ultraljudsgivare. Innan rengöring av termiska givare.



Figur B-12 Mätning 2015-09-08 med Prandtlrör för RK2 och jämförelse med termiska och ultraljudsgivare. Efter rengöring av termiska givare.



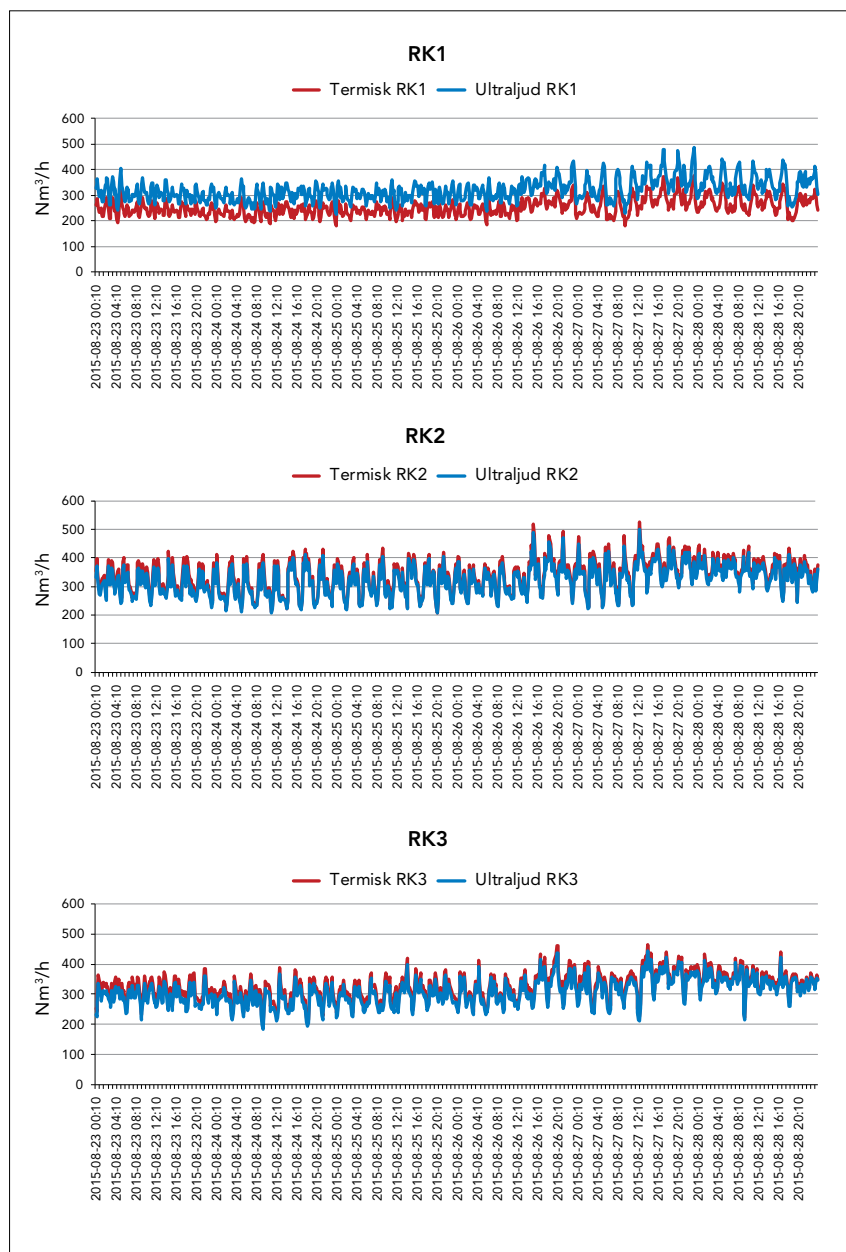
Figur B-13 Mätning 2015-09-08 med Prandtlrör för RK3 och jämförelse med termiska och ultraljudsgivare. Innan rengöring av termiska givare.



Figur B-14 Mätning 2015-09-08 med Prandtlrör för RK3 och jämförelse med termiska och ultraljudsgivare. Efter rengöring av termiska givare.

Det är svårt att säga vilken givartyp hade bäst överensstämmande differens gentemot Prandtlrörmätningarna för försöket 2015-09-08. Mätningen innan rengöring av de termiska givarna, visade ingen riktig överensstämmelse för någon av givartyperna se tabell B-2, för försöket efter rengöring hade ultraljudsgivarna (-15, -22, -21 %) lite bättre överensstämmelse gentemot Prandtlröret än de termiska givarna (-25, -22, -15 %), se tabell B-3.

Resultaten från jämförelsen mellan ultraljuds- och termiska mätare under tidperioden för verifieringsmätningen innan rengöring (+27, -3, -5 %) stämde väl överens med skillnaden över en längre tids mätning över en slumpmässigt vald vecka i aug 2015 (+27, -4, och -5 %), se figur B-15. Detta betyder att överensstämmelsen dessa två givartyper under den korta verifieringsmätningen stämmer väl överens med mätningar över längre tid.



Figur B-15 Registrerat gasflöde termiska och ultraljud en vecka i aug 2015. Ultraljud är +27, -4, och -5% för RK1, RK2, och RK3 jämfört med termiska givare under denna period

Tabell B-2 Resultat från verifiering med Prandtlrör 2015-09-08, innan rengöring av termiska givare.

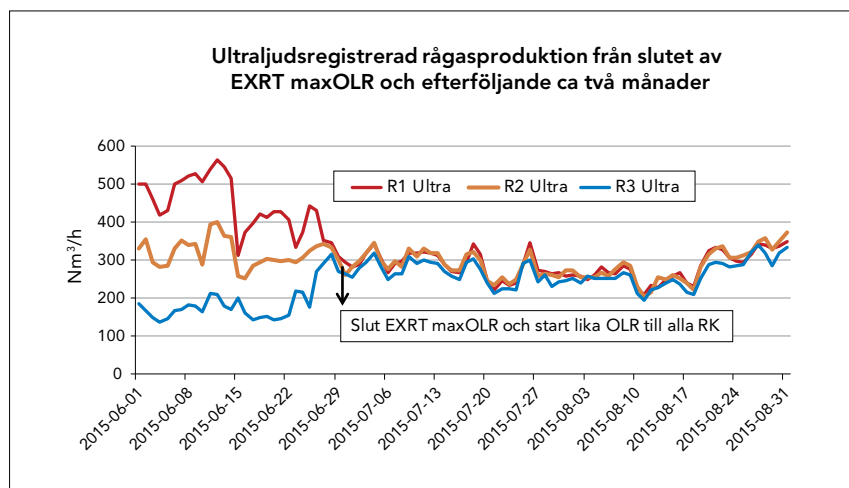
	Termisk-Prandtlrör	Ultraljud-Prandtlrör	Ultraljud-termisk
RK1	-34 %	-16 %	27 %
RK2	-5 %	-8 %	-3 %
RK3	-21 %	-25 %	-5 %

Tabell B-3 Resultat från verifiering med Prandtlrör 2015-09-08, efter rengöring av termiska givare.

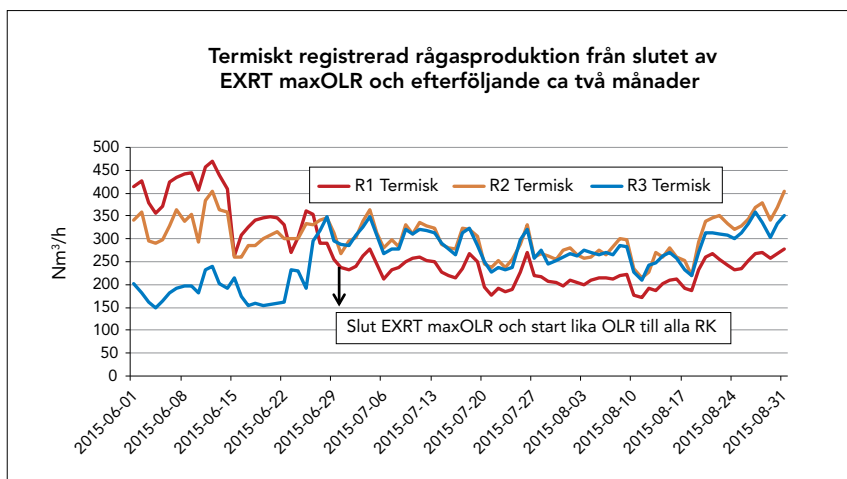
	Termisk-Prandtlrör	Ultraljud-Prandtlrör	Ultraljud-termisk
RK1	-25 %	-15 %	13 %
RK2	-22 %	-22 %	1 %
RK3	-15 %	-21 %	-7 %

Långtidsuppföljning av skillnader mellan termiska och ultraljudsgivare

Figur B-16 och figur B-17 visar registrerad gasproduktion mätt med ultraljudsgivarna respektive termiska givare under tre månader. Efter EXRT-projektets avslutning börjar rötammarna beskickas med lika mängd substrat. Detta betyder att den registrerade gasproduktionen bör vara lika från och med starten för lika belastning. Gasproduktionen från ultraljudsgivarna mätt för samtliga rötammare följer varandra väldigt väl med -1%, och -7% för RK1 och RK3 jämfört med RK2. Skillnaderna för de termiska givarna är mycket större för RK1 -23% medan skillnaden för RK3 är -4%, jämfört med RK2. Baserat på detta resultat bör åtminstone den termiska givaren för RK1 justeras.



Figur B-16 Ultraljudsregisterad rågasproduktion från slutet av EXRT maxOLR och efterföljande cirka två månader



Figur B-17 Termiskt registrerad rågasproduktion från slutet av EXRT maxOLR och efterföljande cirka två månader

Slutsatser och rekommendationer

Kontroll med extern Prandtlgivare, som de hittills utförts, bedöms inte kunna ge ett tillräckligt bra underlag för att kalibrera övriga rågasgivare med bra precision. Detta eftersom:

- Mätning kan endast göras över korta tidsperioder (osäkerhet på grund av liten stickprovsstorlek).
- Traversering har inte kunnat genomföras (absoluta flöden kan inte beräknas).
- Loggning av data har inte varit möjlig (svårighet att jämföra med onlinen värden i efterhand, som endast loggas som minutvärden).

Från de kontroller som utförts under 2015 kan inte entydigt avgöras vilken givartyp som ger bäst överensstämmelse mot sann gasproduktion. Däremot bedöms långtidsdata från perioden med lika belastning visa att ultraljudsgivarna stämmer bäst överens och är den givartyp som bör användas i syfte att utvärdera process, och för rapportering till miljörapporter samt HBK.

Ett förslag är att i framtiden använda sig av intern kontroll genom att jämföra data från ultraljudsgivare och termiska för att upptäcka drift i givarna på grund av nedsmutsning.

Ett frågetecken som kvarstår är hur snabbt ultraljudsgivarna smutsas ner, och hur stor påverkan detta har på den registrerade gasproduktionen. Detta bör undersökas vidare.

Cultivation-independent microbial analysis of anaerobic sludge samples

CUSTOMER:	Syvvab	CONTACT:	Susanna Berg
CUSTOMER-NO:	K070959	REFERENCE:	--
SAMPLE ID:	1: RK1 27-05-2015 2: RK2 27-05-2015	PROJECT:	P1506102
DATE OF SAMPLE ARRIVAL:	03.06.2015	NUMBER OF SAMPLES:	2

A. PROJECT

Two anaerobic sludge samples stabilized (fixed) by the customer were analysed regarding their microbial populations. In Table 1 sample designation and sampling dates are given. The analysis was carried out using the VIT® gene probe technology by using a set of specific gene probes, which cover the main bacterial phyla present in anaerobic sludge samples. By using this set-up usually more than 95% of all Bacteria and Archaea in such a sample can be grouped according to their phylogenetic affiliation. Table 3 of the Annex gives more information about the detected microbial groups.

Table 1: Sample information

internal sample number	customer's sample designation
1	RK1 27-05-2015
2	RK2 27-05-2015

B. VIT® GENE PROBE TECHNOLOGY

VIT® gene probe technology is based on the usage of fluorescently labelled gene probes penetrating morphologically sound bacteria and binding to the rRNA within the cells. Identification and quantification is performed via fluorescence microscopy after stimulation of the fluorescent dye bound to the gene probes. This molecular-biological method enables the cultivation-independent analysis of microorganisms specifically and individually directly within the sample (*in situ*). The major advantage of this method is that the analysis is based on the stable genetic material of the cells and is independent on phenotypic features. Microbial characteristics of a large variety of samples can thus be analyzed and compared. The overall viable cell count is determined by using universal *Bacteria*- and *Archaea*-specific gene probes. The detection limit of this method ranges at 1.000 cells / ml.

In addition, conclusions about activity of detected cells can be drawn: fluorescent signals emitted by gene probes mirror the physiological state of the cells. The higher the activity of the cells, the more gene probes can bind within them. Accordingly, the detected cells appear brighter under the fluorescence microscope.

C. MICROBIOLOGY OF ANAEROBIC DIGESTION

Anaerobic digestion is a multi-step process carried out by symbiotically interacting microorganisms. During the first step (hydrolysis) bacteria digest high-molecular compounds (e.g. complex polymers). To date, mainly members of the *Firmicutes* (e.g. clostridia and *Bacillus* species) are known to be involved in hydrolysis. However, recent studies have revealed that some *Chloroflexi* and also members of *Cytophaga-Flexibacter* subgroup do also participate in this step. During the second step (acidogenesis), the oligomers are further digested into short-chained volatile fatty acids (e.g. butyric acid and propionate). In addition, hydrogen sulfide and ammonia are formed during this step. Again, *Firmicutes* bacteria are involved here, but also *Actinobacteria*. During the third step, so called 'acetogenic bacteria' (predominantly members of the *Deltaproteobacteria*) convert these acids into acetate, hydrogen and carbon dioxide. Finally, during the last step of anaerobic digestion, these compounds are converted to methane by methanogenic bacteria (*Euryarchaeota*). Methanogenic bacteria are subdivided based on their substrate specificities into hydrogenotrophic (reduction of e.g. carbon dioxide and formate) and acetoclastic (conversion of acetate to methane) methanogens. Methanogenic bacteria are growing slowly and are sensitive against light, oxygen, ammonia and rapid temperature changes. In addition, they are highly specialized with

respect to substrates. As a consequence, not only methanogenesis itself, but also the other steps involved in anaerobic digestion are considered to be essential for providing optimal conditions for the methanogenic bacteria.

D. ANALYSES

The following steps were carried out:

- sample preparation, including ultra-turrax treatment
- determination of the total cell count (viable and dead) using DAPI (4',6-diamidino-2-phenylindole) DNA staining and total viable cell count by using general gene probes specific for domains *Bacteria* and *Archaea*.
- Analysis of the sample using a set of specific fluorescently-labelled gene probes which specifically identify the main groups within the two domains.
- Evaluation of the results by using fluorescence microscopy; quantification of the main bacteria groups in relation to the overall viable flora (*Bacteria* and *Archaea*).
- photo documentation of representative results

E. RESULTS

Total cell counts

All determined cell counts as well as the percental shares of viable cells are provided in Table 2 of the Annex. In addition and for orientation, Table 2 contains minimum target values for the different populations. However, these values are valid for anaerobic pellet sludge reactors, because for this type of reactors the most data are available.

In general, sample 1 contained higher total and higher viable cells counts than sample 2. For sample 1, viable cell counts were measured with 3,9E+09 cells / ml sludge and 3,0E+09 cells / ml sludge for sample 2. With these data, both reactors were below the target value for pellet sludge reactors, which is at a minimum of 5,0E+09 / ml. However, it can be assumed, that pellet sludge reactors contain more cells than anaerobic sludges without pellet formation.

Also, the calculated percental shares of the viable cells on the total cell count per reactor were comparably good: Sample 1 was calculated with 77% and sample 2 with 69%.

Bacterial population analysis

The percental compositions of the analysed samples are illustrated in diagram 1, the absolute cell counts of the different populations are given in diagram 2. Qualitatively, both reactor samples contained similar populations, however, quantitatively, some differences were measured.

Methanogenic bacteria were detected with a share of 24% in reactor 1 and of 33% in reactor 2. In both reactors a quite diverse population of methanogenic bacteria could be detected. Besides long rod-shaped cells, also coccoid methanogenic bacteria were present. Moreover, atypical dense clusters of many cells were observed, which showed very bright fluorescence signals.

Deltaproteobacteria, which are not only important for acetogenesis but can also play a role during desulfurification were measured with shares of 17% (reactor 1) and 14% (reactor 2). In both reactors they were observed as typical rather diverse population of different cell morphologies.

Actinobacteria, which are part of the acidogenic population were detected with comparably high shares on the viable flora of 15% and 16%, respectively. They were present as quite homogenous population of thin rod-shaped bacteria, which were partly also organised in clusters. For the *Firmicutes*, which are also a group mainly involved in acidogenesis shares of 3% and 4% were measured.

The *Chloroflexi*, a group of filamentous bacteria responsible for hydrolysis and in pellet sludge reactors also for pellet stability, were

measured with shares of 10% in reactor 1 and 15% in reactor 2. In both samples they were observed as two different filamentous bacteria. The second group of hydrolytic bacteria, the *Cytophaga-Flexibacter*-Subphylum, was observed as typical thin rod-shaped bacteria and was measured with a low share of 2% in sample 1 and with <1 % in sample 2.

Besides these bacteria groups with quite defined functions in anaerobic sludges, further populations were detected in both samples, which are not that typical and with unclear functions or are usually only present in low amounts.

Populations with major shares in both reactors were the *Alpha*- and *Betaproteobacteria*. *Alphaproteobacteria* were measured with shares of 8% in sample 1 and 3% in sample 2. In both samples a mixture of filamentous bacteria and single cells were observed. *Betaproteobacteria* were present with relatively unusual high shares of 12% (sample 1) and 8% (sample 2). These cells were present as single cells but also in form of big clusters of many cells.

Moreover, other bacteria groups analysed like *Gammaproteobacteria* and *Planctomycetes*, were detected with typical low shares or with very low shares (*Crenarchaeota*, sample 2).

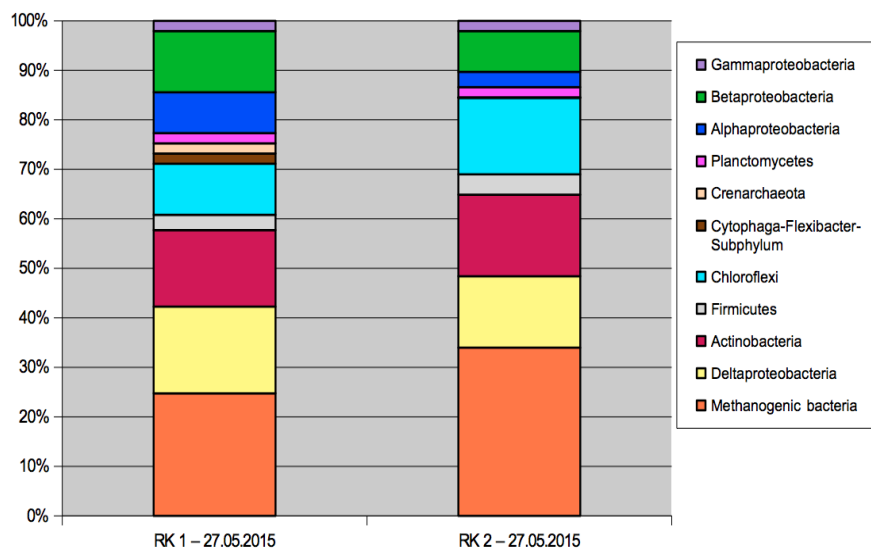


Diagram 1: Percental shares of each population on the total viable flora (*Bacteria* and *Archaea*)

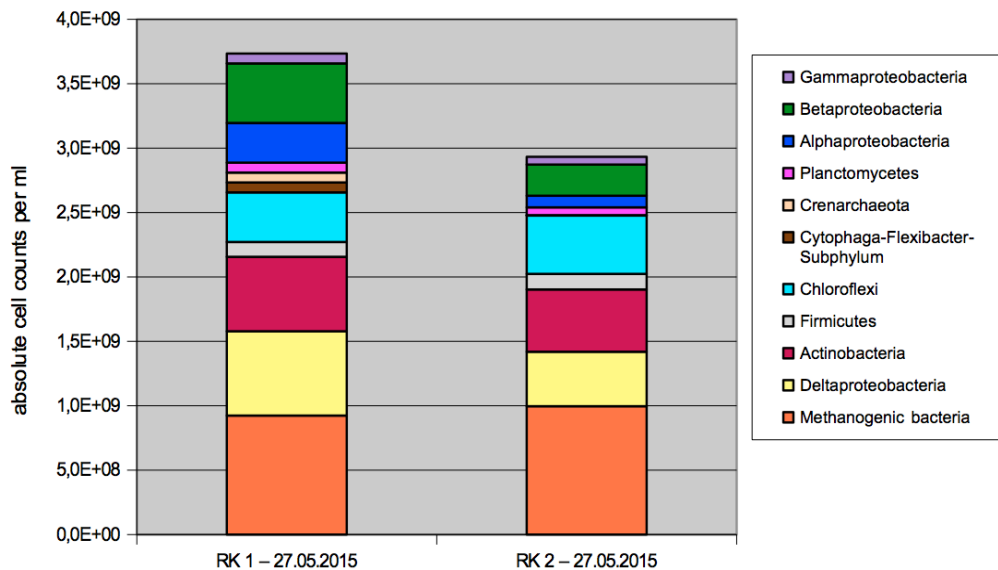


Diagram 2: Comparison of absolute cell counts of each population per ml sludge

F. CONCLUSIONS

In both reactors the typical functional microbial groups of the anaerobic digestion were detected, however, the percental shares of these groups differed to a certain extent in the samples.

In case of methanogenic bacteria a quite diverse composition of at least three different methanogenic populations could be analysed. Moreover, comparably high amounts of acidogenic bacteria were measured mainly within the *Actinobacteria*. Possibly, a changed acid spectrum might be a consequence.

The other functional groups showed no major deviations from typical anaerobic profiles. However, it must be noted that target values given should only be treated as indicative, because they were deviated from anaerobic pellet sludge profiles.

Also, the presence of otherwise more atypical populations e.g. from the *Betaproteobacteria* may be normal in the reactor types at hand.

G. ANNEX

- Table 2, containing all gene probe results
- Table 3, containing more information about the bacteria groups analysed
- Documentation of results

vermicon AG, Munich, 26.06.2015

C. Beimfohr

Dr. Claudia Beimfohr

Table 2: Summary of all gene probe results

Analyzed phylogenetic groups	Degrading step	Target values ²	RK 1 – 27.05.2015		RK 2 – 27.05.2015	
			% shares ³	absolute cell numbers/ ml	% shares ³	absolute cell numbers/ ml
Methanogenic bacteria	Methanogenesis	45-60%	24,0	9,2E+08	33,0	1,0E+09
<i>Deltaproteobacteria</i>	Acetogenesis/ Desulfurication	8-12%	17,0	6,5E+08	14,0	4,2E+08
<i>Actinobacteria</i>	Acidogenesis	< 5%	15,0	5,8E+08	16,0	4,8E+08
<i>Firmicutes</i>	Acidogenesis/ Hydrolysis	< 5%	3,0	1,2E+08	4,0	1,2E+08
<i>Chloroflexi</i>	Hydrolysis	> 20%	10,0	3,9E+08	15,0	4,5E+08
<i>Cytophaga-Flexibacter</i> -Subphylum	Hydrolysis	5-8%	2,0	7,7E+07	0,1	3,0E+06
<i>Crenarchaeota</i>	unclear ¹	0%	2,0	7,7E+07	0,01	3,0E+05
Planctomycetes	unclear ¹	< 2%	2,0	7,7E+07	2,0	6,0E+07
<i>Alphaproteobacteria</i>	unclear ¹	< 5% (0% filaments)	8,0	3,1E+08	3,0	9,1E+07
<i>Betaproteobacteria</i>	unclear ¹	< 2%	12,0	4,6E+08	8,0	2,4E+08
<i>Gammaproteobacteria</i>	unclear ¹	< 2%	2,0	7,7E+07	2,0	6,0E+07
Total cell count/ ml (viable and dead)		> 1,0E+10		5,0E+09		4,4E+09
Viable cell count/ ml		> 5,0E+09		3,9E+09		3,0E+09
% share of viable cells on total cell count				77%		69%

*¹ Problem indicators or function not yet known*² the given target values are related to pellet sludge of the paper, food and pharmaceutical industry*³ % shares on complete viable flora (Archaea and Bacteria)

n. d.: not detected

Table 3: Information about the populations analysed with the different specific gene probes

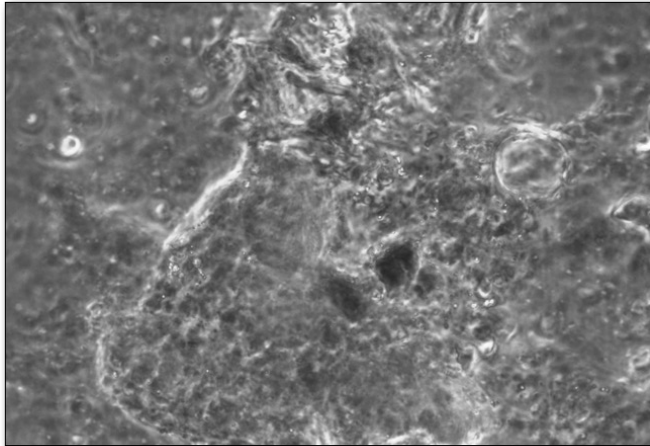
Groups analysed	Information regarding members and physiology
Domain ARCHAEA	All <i>Archaea</i> ; can live under strong methane-, sulfur, salty conditions, also many thermophilic members.
<i>Euryarchaeota</i>	Subdivision of the <i>Archaea</i> ; predominantly methanogenic archaea
<i>Crenarchaeota</i>	Subdivision of the <i>Archaea</i> ; members are often hyperthermophiles and usually obligate anaerobes. Require CO ₂ , H ₂ and S ₂ for growth. Are usually absent from anaerob reactors.
Domain BACTERIA	All <i>Bacteria</i>
<i>Deltaproteobacteria</i>	Gram-negative group comprises a branch of predominantly aerobic genera, the fruiting-body-forming <i>Myxobacteria</i> , and a branch of strictly anaerobic genera, which contains most of the known sulfate- (<i>Desulfovibrio</i> , <i>Desulfobacter</i> , <i>Desulfococcus</i> , <i>Desulfonema</i> , etc.) and sulfur-reducing bacteria (e.g. <i>Desulfuromonas</i>) alongside several other anaerobic bacteria with different physiologies (e.g. ferrous iron-reducing <i>Geobacter</i> and syntrophic <i>Pelobacter</i> and <i>Syntrophus</i>). In anaerobic digestion processes, sulfate-reducing members play an important role during the acetogenic step.
<i>Actinobacteria</i>	Group of gram-positive bacteria; aerobic and anaerobic members, contains many members with strong hydrophobic features, but also many which play a role in fermentative processes; many with strong economic impact, such as antibiotic producing strains (e. g. <i>Streptomyces</i> , <i>Bifidobacterium</i> , <i>Propionibacterium</i>). Play an important role in anaerobic digestion processes due to their acidification capabilities.
<i>Firmicutes</i>	Group of gram-positive bacteria; aerobic and anaerobic members, many produce endospores, which are resistant to desiccation and can survive extreme conditions. They are found in various environments. <i>Firmicutes</i> play an important industrial role as producing bacteria but also as spoilage bacteria (e. g. <i>Bacillus</i> , <i>Lactobacillus</i> , <i>Streptococcus</i>). In anaerobic digestion processes, members of the <i>Firmicutes</i> are not only responsible for the hydrolysis step but also for acidification.
<i>Chloroflexi</i>	Group of gram-variable bacteria, formerly known as Green-non sulfur bacteria, quite diverse, with only few cultivable members (long-term underestimated due to this fact), including aerobic thermophiles, anoxygenic phototrophs, and anaerobic halorespirers, which use halogenated organics as energy sources, also many filamentous bacteria with increasing importance for waste water treatment plants; e.g. <i>Dehalococcoides</i> , <i>Caldilinea</i> , <i>Thermomicrobium</i> , <i>Herpetosiphon</i> . Due to enzymatic capabilities very likely involved in hydrolysis steps during anaerobic digestion.
<i>Cytophaga-Flavobacterium-Subphylum</i>	Group of gram-negative bacteria, mostly aerobic, comprises many filamentous and non-filamentous bacteria, some are involved in hydrolytic activities e.g. in anaerobic digesters) e. g. <i>Cytophaga</i> , <i>Flavobacterium</i> , <i>Flexibacter</i> .

Table 3 (continued): Information about the populations detected with the different specific gene probes

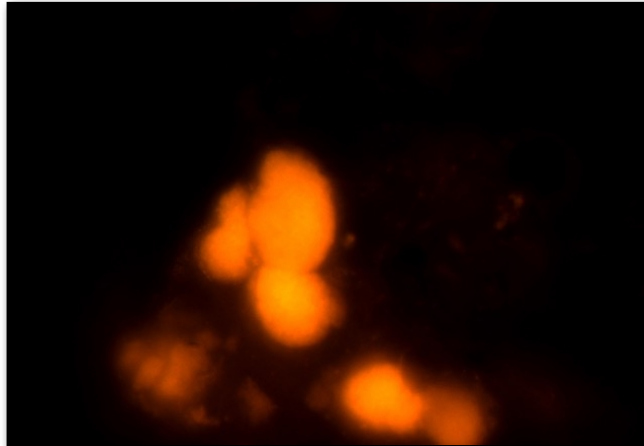
Groups analysed	Information regarding members and physiology
<i>Planctomycetes</i>	Phylum of gram-negative aquatic bacteria, found in samples of brackish, marine and freshwater. Members are usually coccoid, some are involved in the anaerobic ammonia oxidation process (ANAMMOX), adapted to low oxygen concentrations, e.g. <i>Planctomyces</i> , <i>Pirellula</i> , <i>Isosphaera</i> , <i>Scalindua</i> . Other members are capable of 'atypical' acidification in anaerobic digestion processes.
<i>Alphaproteobacteria</i>	Group of gram-negative bacteria, quite diverse; contains many heterotrophic bacteria and several phototrophic genera, several genera metabolising C1-compounds (e.g. <i>Methylobacterium</i>), symbionts of plants (e.g. <i>Rhizobium</i>); filamentous members can cause severe bulking problems predominantly in industrial wastewater treatment plants. Usually only of low abundance in anaerobic wastewater treatment plants.
<i>Betaproteobacteria</i>	Group of gram-negative bacteria; consists of several groups of aerobic or facultative anaerobic bacteria that are often highly versatile in their degradation capacities, contains also chemolithotrophic genera (e.g., the ammonia-oxidising genus <i>Nitrosomonas</i>) and some phototrophs (members of the genera <i>Rhodocyclus</i> and <i>Rubrivivax</i>). <i>Betaproteobacteria</i> play a role in nitrogen fixation in various types of plants, many of them are found in environmental samples, such as wastewater or soil. Usually only of low abundance in anaerobic wastewater treatment plants.
<i>Gammaproteobacteria</i>	Gram-negative group with highly versatile metabolic capabilities; comprises several medically and scientifically important groups of bacteria, such as the Enterobacteriaceae, Vibrionaceae and Pseudomonadaceae. A number of important pathogens belongs to this class, e.g. <i>Salmonella</i> , <i>Vibrio cholerae</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> and <i>E. coli</i> . Some <i>Gammaproteobacteria</i> are methane oxidizers, and many of them are in symbiosis with geothermic ocean vent animals. Usually only of low abundance in anaerobic wastewater treatment plants.

Anaerobic population profiling - Syvab, sample RK 1 - 27.05.2015

A

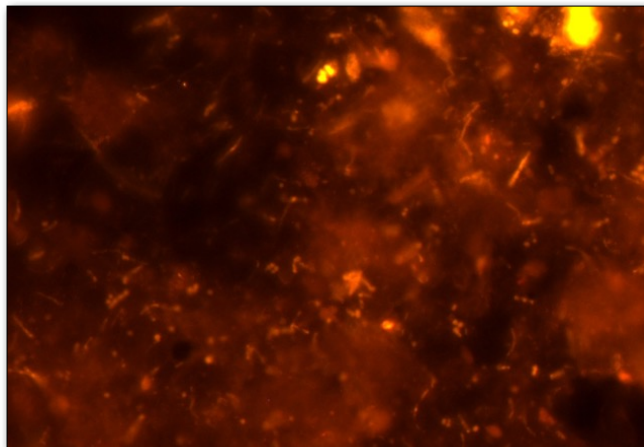
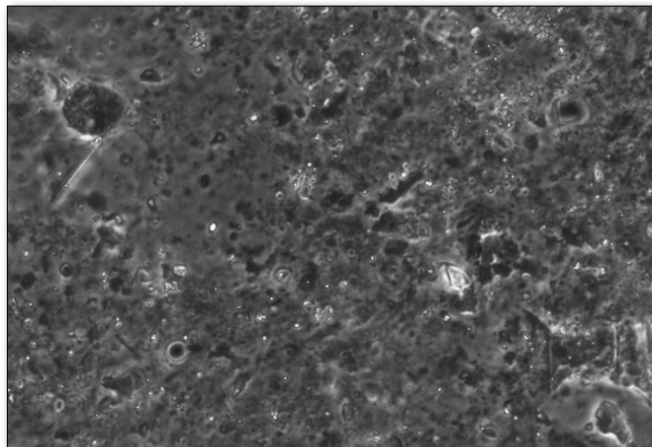


B



Picture A:
Phase contrast

Picture B:
Identical microscopic view
under fluorescence -
specific detection of the
methanogenic bacteria



Picture C:
Phase contrast

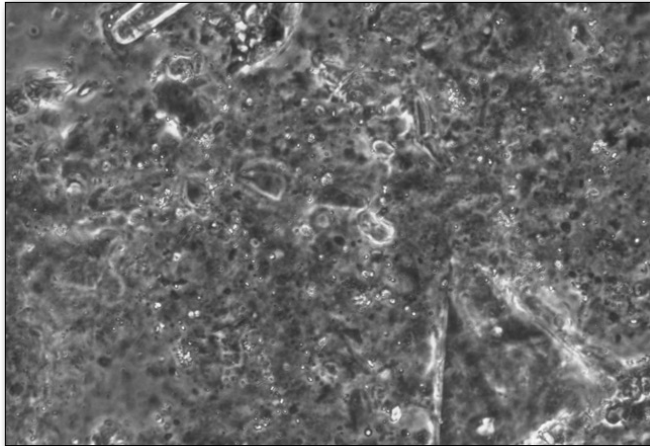
Picture D:
Identical microscopic view
under fluorescence -
specific detection of the
methanogenic bacteria

Total magnification
microscopic images: 1000x

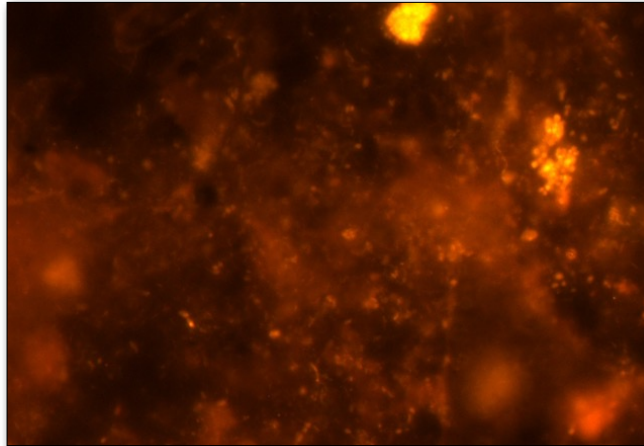
www.vermicon.com

Anaerobic population profiling - Syvab, sample RK 1 - 27.05.2015

A



B

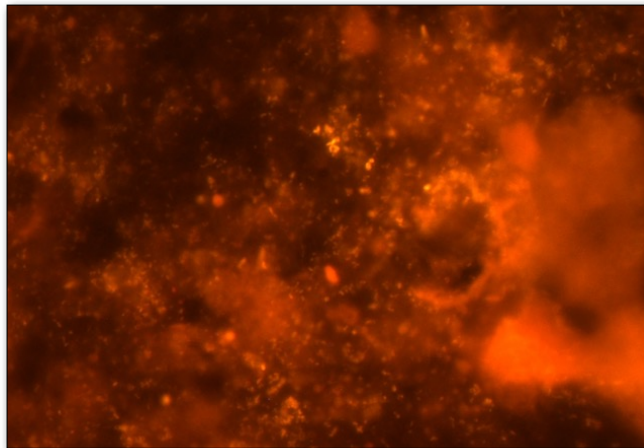
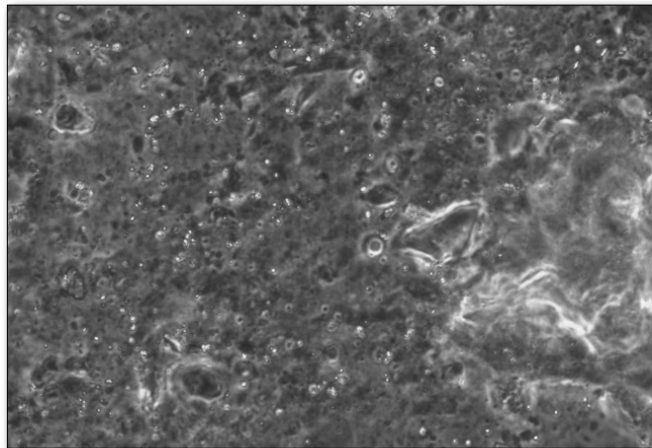


Picture A:

Phase contrast

Picture B:

Identical microscopic view
under fluorescence -
specific detection of the
Deltaproteobacteria



Picture C:

Phase contrast

Picture D:

Identical microscopic view
under fluorescence -
specific detection of the
Actinobacteria

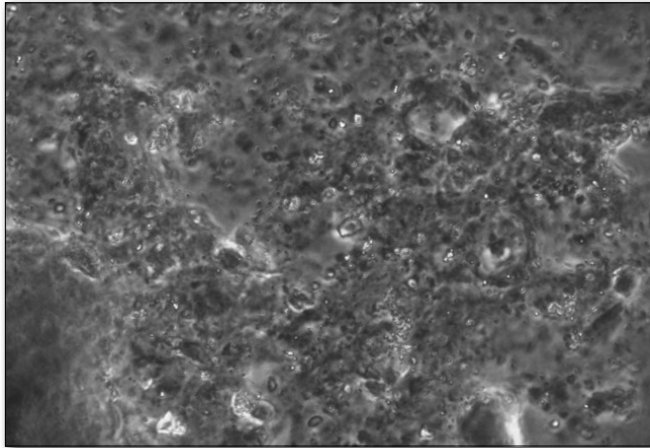
Total magnification
microscopic images: 1000x

C

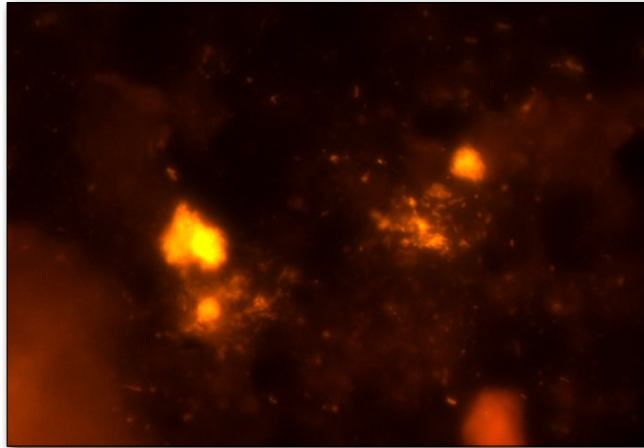
D

Anaerobic population profiling - Syvab, sample RK 1 - 27.05.2015

A



B

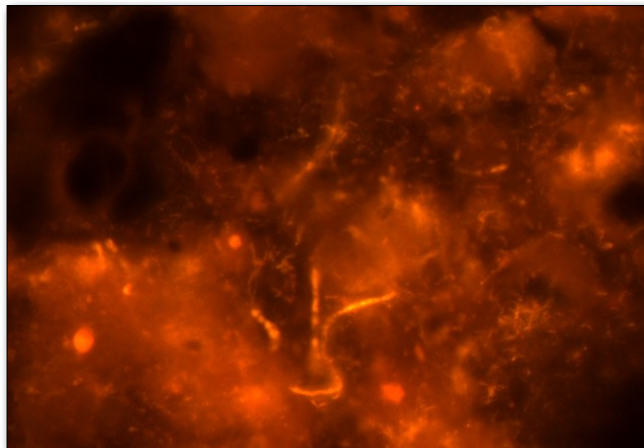
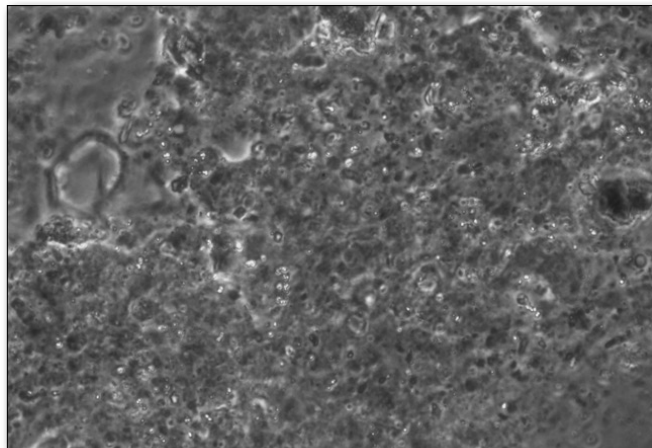


Picture A:

Phase contrast

Picture B:

Identical microscopic view
under fluorescence -
specific detection of the
Betaproteobacteria



Picture C:

Phase contrast

Picture D:

Identical microscopic view
under fluorescence -
specific detection of the
Chloroflexi

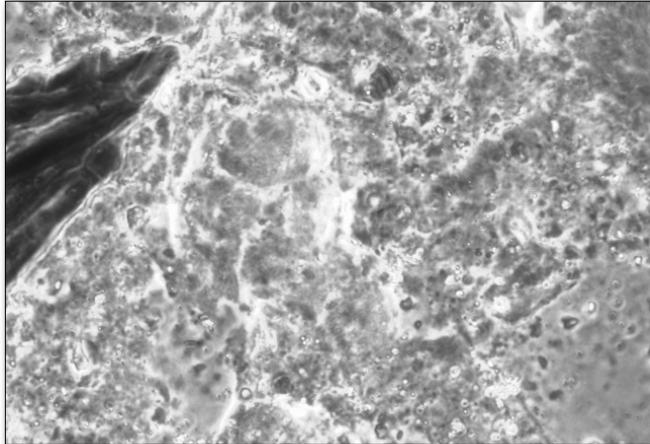
Total magnification
microscopic images: 1000x

C

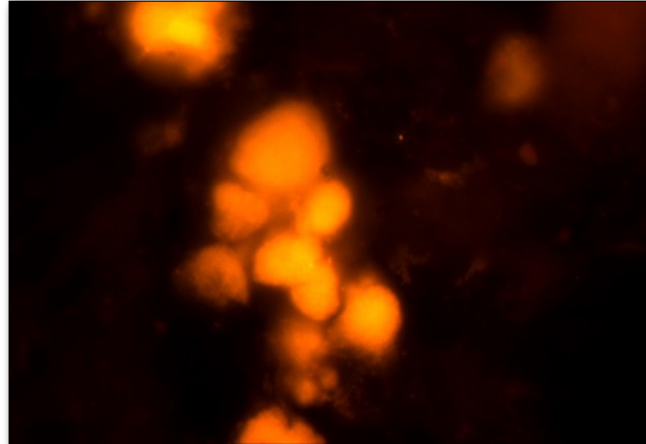
D

Anaerobic population profiling - Syvab, sample RK 2 - 27.05.2015

A

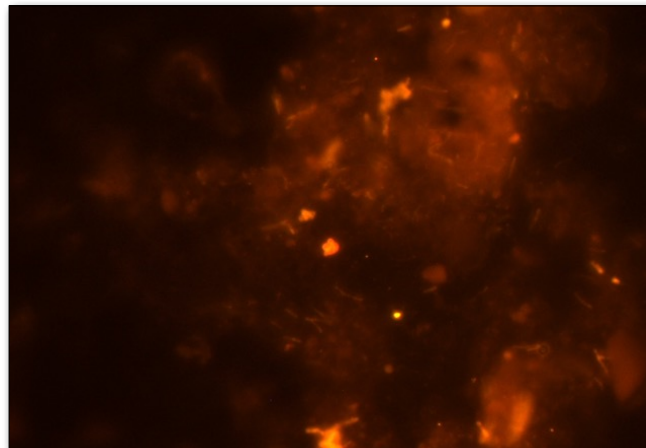
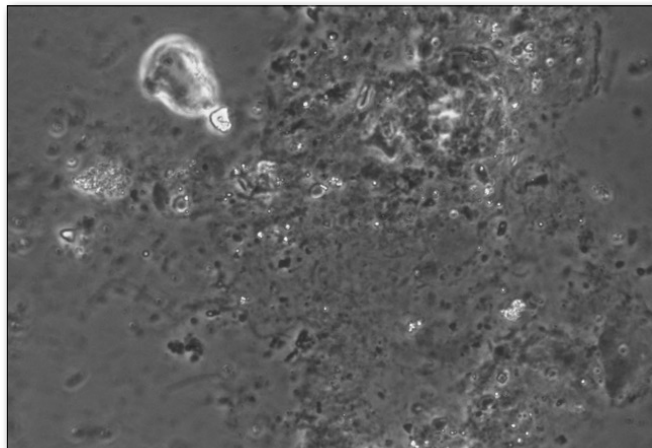


B



Picture A:
Phase contrast

Picture B:
Identical microscopic view
under fluorescence -
specific detection of the
methanogenic bacteria



Picture C:
Phase contrast

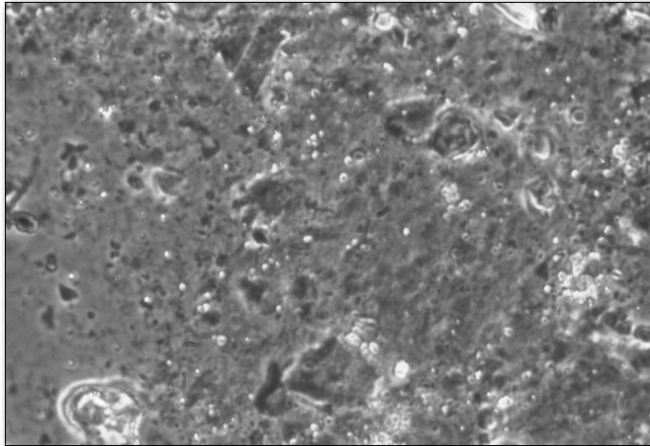
Picture D:
Identical microscopic view
under fluorescence -
specific detection of the
methanogenic bacteria

Total magnification
microscopic images: 1000x

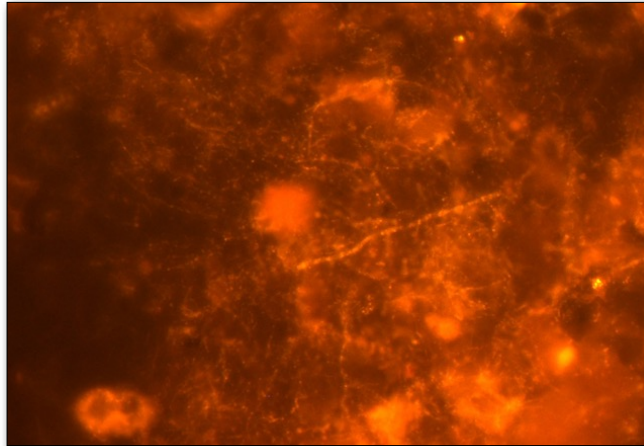
www.vermicon.com

Anaerobic population profiling - Syvab, sample RK 2 - 27.05.2015

A



B

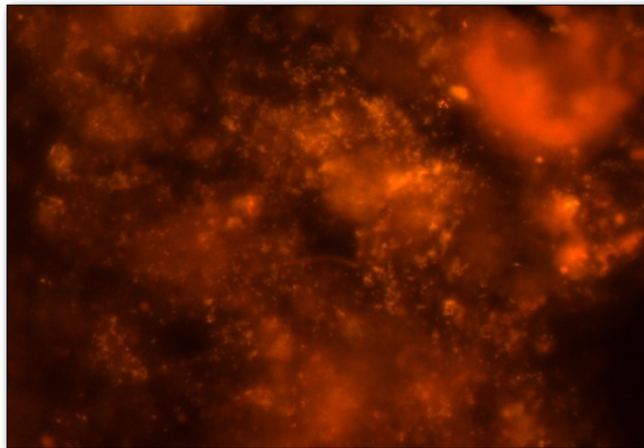
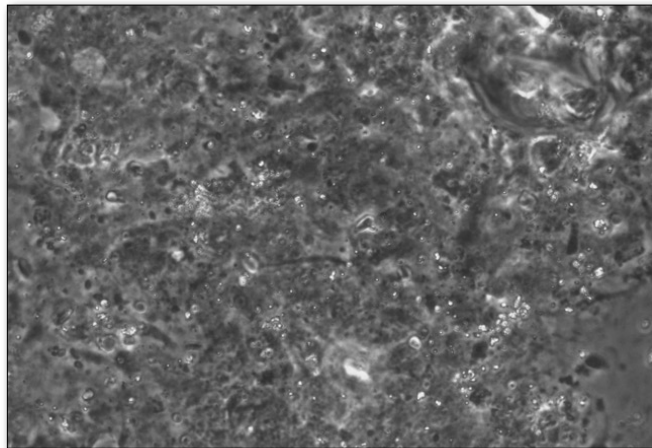


Picture A:

Phase contrast

Picture B:

Identical microscopic view
under fluorescence -
specific detection of the
Chloroflexi



Picture C:

Phase contrast

Picture D:

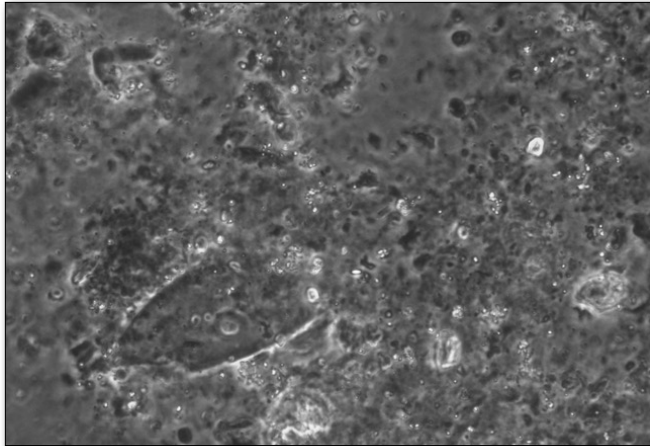
Identical microscopic view
under fluorescence -
specific detection of the
Actinobacteria

Total magnification
microscopic images: 1000x

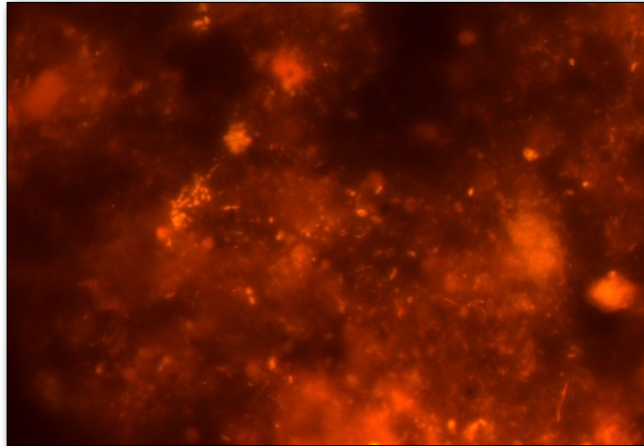
www.vermicon.com

Anaerobic population profiling - Syvab, sample RK 2 - 27.05.2015

A



B

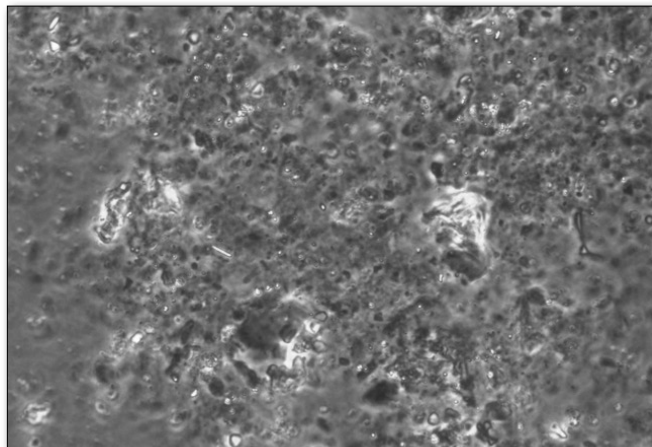


Picture A:

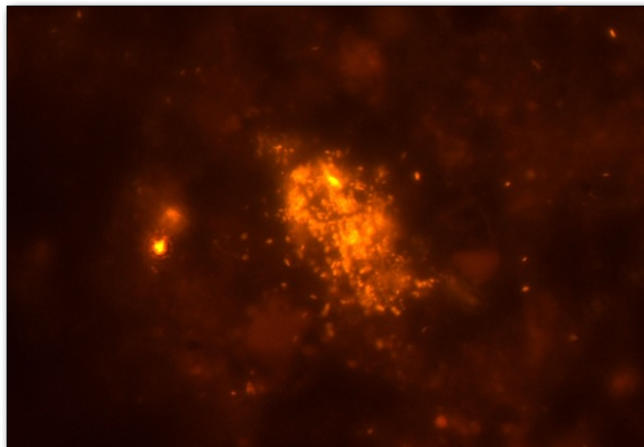
Phase contrast

Picture B:

Identical microscopic view
under fluorescence -
specific detection of the
Deltaproteobacteria



C



D

Picture C:

Phase contrast

Picture D:

Identical microscopic view
under fluorescence -
specific detection of the
Betaproteobacteria

Total magnification
microscopic images: 1000x

www.vermicon.com

Bilaga D – Analysresultat – Kvantifiering av metanogener genom qPCR-analys

DNA extraherades i triplikat från var och en av de 6 proverna. Samtliga prover spädades 50 och 100 gånger för att kunna upptäcka eventuell inhibering av PCR-reaktionen. Alla prover analyserades samtidigt för en viss metanogen (primer-par). Resultaten visade inga tecken på inhibering och de olika spädningarna gav samma resultat för alla metanogena grupper utom *Methanosaetaceae* samt för totala metanogener. I tabell D-1 nedan visas 50x-spädningen för dessa analyser. Analysen av *Methanosaetaceae* gjordes med ospädda prover för optimala resultat. Spädda prover påvisade ospecifika produkter utifrån smältpunkt och gelanalys. Standardavvikelsen som redovisas i tabellen representerar variationen mellan de tre replikaten inom vald spädning. Effektiviteten varierade något mellan analyserna och låg mellan 83,1–89,6 % och korrelationsvärdet (r^2) varierade mellan 0,997 och 0,999. DNA-extraktion och qPCR-analys av de olika metanogena grupperna utfördes enligt: Westerholm M, Hansson M, Schnürer A. 2012. Improved biogas production from whole stillage by co-digestion with cattle manure. *Bioresour. Technol.* 114:314–319. För analys av totala metanogener användes primer-paret Met86f/Met915r (Narihito T, and Sekiguchi, Y (2011) Oligonucleotide primers, probes and molecular methods for the environmental monitoring of methanogenic archaea. *Microbial Biotechnology* (2011) 4(5), 585–602) och här gjordes en standardkurva genom att föra samman PCR-produkten från samtliga prov, som därefter renades och spädades till känt kopietal (Westerholm M, .Dolfing J, Sherry A, Gray ND, Head, I, Schnürer A (2011). Quantification of syntrophic acetate-oxidizing communities in biogas processes. *Env. Microbiol. Report.* 3(4), 500–505).

Prof. Anna Schnürer

Institutionen för Mikrobiologi, Biocentrum, SLU

Box 7025

750 07 Uppsala

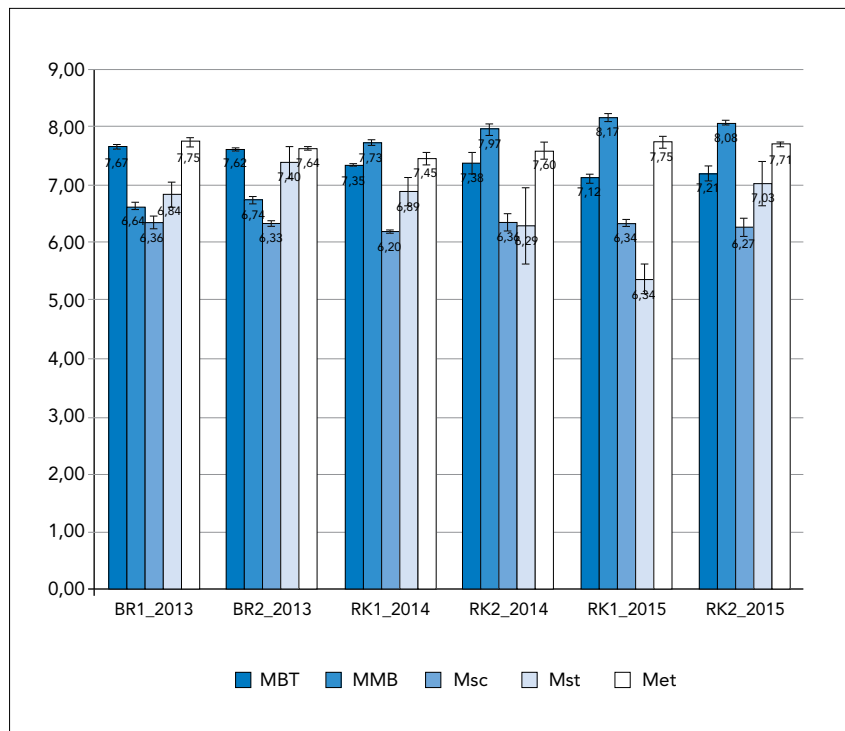
Tel. 018-673288

Anna.Schnurer@slu.se

Kvantifiering av metanogener genom qPCR-analys

Tabell D-1 Kvantifiering av metanogener genom qPCR-analys.

Datum	2013-01-30				2014-08-27				2015-05-27			
Rötkammare	RK1		RK2		RK1		RK2		RK1		RK2	
	Log. gene copy no./ml	stdev	Log. gene copy no./ml	stdev	Log. gene copy no./ml	stdev	Log. gene copy no./ml	stdev	Log. gene copy no./ml	stdev	Log. gene copy no./ml	stdev
Methanobacteriales (MBT)	7.67	0.04	7.62	0.03	7.35	0.03	7.38	0.18	7.12	0.08	7.21	0.13
Methanomicrobiales (MMB)	6.64	0.06	6.74	0.06	7.73	0.06	7.97	0.10	8.17	0.07	8.08	0.04
Methanosarcinaceae (Msc)	6.36	0.11	6.33	0.05	6.20	0.03	6.36	0.15	6.34	0.06	6.27	0.15
Methanosaetaceae (Mst)	6.84	0.22	7.40	0.28	6.89	0.24	6.29	0.65	5.38	0.25	7.03	0.39
Total methanogen (Met)	7.75	0.07	7.64	0.03	7.45	0.11	7.60	0.15	7.75	0.10	7.71	0.05



Figur D-1 Kvantifiering av metanogener genom qPCR-analys.



Box 14057, 167 14 Bromma

Tel 08 506 002 00

Fax 08 506 002 10

E-post svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se