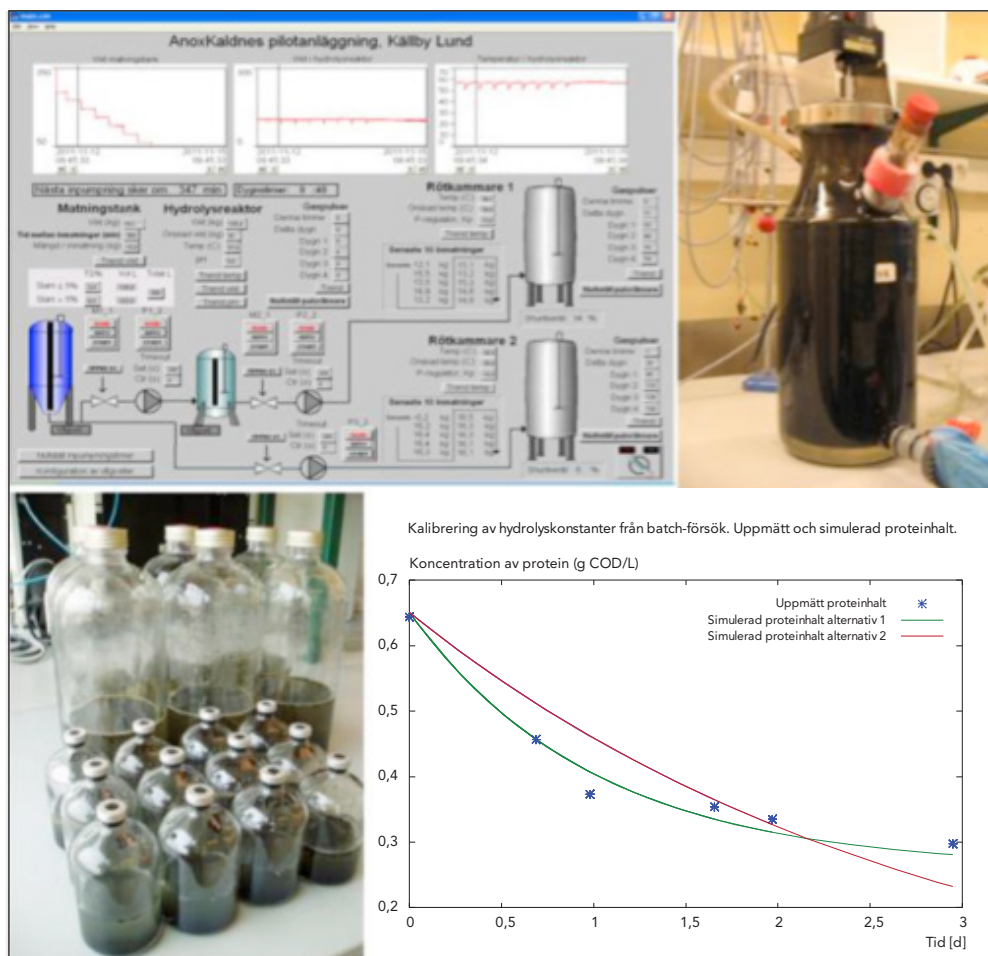


Rötning med inledande termofilt hydrolyssteg för hygienisering och utökad metanutvinning på avloppsreningsverk

*Emelie Persson
Elin Ossiansson
My Carlsson
Martina Uldal
Sofia Johannesson*



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
Ledningsnät
Avloppsvatten
Management

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

Agneta Granberg, ordförande	Göteborgs Stad
Daniel Hellström, sekreterare	Svenskt Vatten
Stefan Johansson	Skellefteå kommun
Charlotte Lindstedt	Göteborg Vatten
Lena Ludvigsson-Olafsen	Smedjebackens kommun
Kenneth M. Persson	Sydvatten AB
Lars-Gunnar Reinius	Stockholm Vatten AB
Mats Rostö	Gästrik Vatten AB
Bo Rutberg	Sveriges Kommuner och Landsting
Lena Söderberg	Svenskt Vatten
Ulf Thysell	NSVA
Fred Ivar Aasand, adjungerad	Norsk Vann

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

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB
Box 47 607
117 94 Stockholm
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 inledande termofilt hydrolyssteg för hygienisering och utökad metanutvinning på avloppsreningsverk
Title of the report:	Anaerobic digestion with thermophilic pre-hydrolysis for hygienisation and enhanced methane production at waste water treatment plants
Rapportnummer:	2012-04
Författare:	Emelie Persson, Elin Ossiansson, BioMil AB. My Carlsson, Martina Uldal, Sofia Johannesson, AnoxKaldnes AB.
Projektnummer:	10-117
Projektets namn:	Rötning med inledande termofilt hydrolyssteg för hygienisering och utökad metanutvinning på avloppsreningsverk
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling, SGC, VA SYD, NSVA, Gryaab och UMEVA
Rapportens omfattning	
Sidantal:	99
Format:	A4
Sökord:	Rötning, förhydrolys, hygienisering, avloppsslam, biogas
Keywords:	Anaerobic digestion, pre-hydrolysis, hygienisation, waste water treatment sludge, biogas
Sammandrag:	Rötning med inledande hydrolyssteg har jämförts med enstegsrötning genom försök i lab- och pilotskala för olika blandslam. Effekt på utrötningsgrad, metanproduktion och patogenreduktion har undersökts.
Abstract:	Anaerobic digestion with pre-hydrolysis have been compared to one-step anaerobic digestion through tests in lab- and pilot scale with various mixed sludges. Effects on solids reduction, methane production and pathogen reduction have been investigated.
Målgrupper:	Drift- och processansvariga vid avloppsreningsverk
Omslagsbild:	Bild från styrprogram pilotanläggningen (AnoxKaldnes), foto från försök på lab (AnoxKaldnes), graf från simulering av försök (BioMil)
Rapport:	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2012
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

Förord

Detta arbete initierades år 2008 då medarbetare på BioMil och AnoxKaldnes beslutade att det vore intressant att genomföra ett gemensamt forsknings- och utvecklingsprojekt kring rötning i kombination med ett inledande biologiskt hydrolyssteg. Den första delen av projektet utformades som en förstudie bestående av en litteraturstudie och insamlad kunskap från fullskalanläggningar, universitet och högskolor samt leverantörer av utrustning. Denna förstudie finansierades av Svenskt Vatten, Avfall Sverige och SGC och finns publicerad i Rapport SGC 215 och Rapport Avfall Sverige U 2010:06.

Då förstudien visade på lovande resultat för avloppsslam och störst intresse för att gå vidare med förstudien fanns hos Svenskt Vattens medlemmar kom fortsättningen av projektet, och föreliggande rapport, att koncentreras på förhydrolys av avloppsslam. Utformningen av projektet har skett i nära samarbete med en referensgrupp bestående av personal från VA SYD, NSVA, Gryaab, UMEVA, SGC och VA-teknik på Lunds Tekniska Högskola. Finansiering har skett via SGC, Svenskt Vatten, VA SYD, NSVA, Gryaab och UMEVA.

Målet var att få klart rapporten i början av 2012, då förslaget till ny slamförordning förväntades träda i kraft. Miljödepartementet beslutade dock per 2012-01-25 att inte anta Naturvårdsverkets förslag till slamförordning, utan gav istället Naturvårdsverket ett nytt uppdrag om hållbar återföring av fosfor som ska redovisas senast 2013-08-12. Det finns därmed möjlighet att i den nya utformningen av förslaget ta hänsyn till resultat från aktuell forskning samt att fortsätta arbetet med metodutveckling och förtydligande av tillvägagångssätt för validering av nya metoder.

Vi vill rikta ett varmt tack till alla som medverkat till detta projekts genomförande! Här nedan hoppas vi inte ha glömt någon: Ola Fredriksson och Susanne Tumlin, Gryaab, Christopher Gruvberger, Liselotte Stålhand-ske, Jan Svensson, Roland Sällberg och Kent Hansson, VA SYD, Marinette Hagman, NSVA, Maria Nordlund och Britta Bristav, UMEVA, Åsa Davids-son, VA-teknik, Lunds Tekniska Högskola, Anneli Petersson och Tobias Persson, SGC, Daniel Hellström, Svenskt Vatten.

Lund, 2012-02-09

Emelie Persson

Elin Ossiansson

My Carlsson

Martina Uldal

Sofia Johannesson

Innehåll

Förord.....	3
Sammanfattning.....	6
Summary.....	8
1 Inledning	10
1.1 Bakgrund	10
1.2 Syfte	10
1.3 Mål	11
1.4 Metoder	11
1.5 Omfattning och avgränsningar.....	12
1.6 Ordlista	12
2 Rötning på avloppsreningsverk.....	14
2.1 Rötning med inledande biologiskt hydrolyssteg	14
2.2 Olika avloppsslams egenskaper	15
2.3 Hygienisering av avloppsslam	16
3 Laboratorieförsök	19
3.1 Bakgrund laboratorieförsök	19
3.2 Försöksuppställning	19
3.3 Resultat	22
3.4 Diskussion	41
4 Pilotförsök på Källby avloppsreningsverk	44
4.1 Bakgrund pilotförsök.....	44
4.2 Försöksuppställning	44
4.3 Resultat	45
4.4 Diskussion	49
5 Modellering av försöken	51
5.1 Syfte med modelleringen	51
5.2 Använd modell och anpassning av denna	51
5.3 Simulering av pilotanläggningen	54
5.4 Simulering med olika slam.....	60
5.5 Simulering av vätgasbildning för att studera skillnad i VS-nedbrytning och metanproduktion.....	63

6	Processtekniska översväganden vid implementering på reningsverk.....	66
6.1	Behov av kompletterande utrustning vid införande av förhydrolys	66
6.2	Värmebehov för termofil förhydrolys.....	68
6.3	Påverkan på efterföljande processteg	69
6.4	Förhydrolys som möjlighet att producera kolkälla	70
6.5	Säkerhetsaspekter avseende uppkomst av vätgas.....	71
7	Sammanfattande diskussion och slutsatser	74
7.1	Effekt på biogas-/metanproduktion och nedbrytning	74
7.2	Samband mellan substrategenskaper, processförhållanden och effekt på den anaeroba processen	74
7.3	Hygieniseringseffekt.....	75
7.4	Processtekniska följder.....	76
7.5	Måluppfyllnad	76
7.6	Återkoppling till förstudien	78
7.7	Förslag till fortsatta studier	78
8	Referenser.....	79
8.1	Publicerat material.....	79
8.2	Övriga referenser	81
	Bilagor	
	Bilaga A – Analysmetoder.....	82
	Bilaga B – Analysdata labförsök	84
	Bilaga C – Övriga grafer pilot.....	88
	Bilaga D – Kalibrering och validering för modellering	91

Sammanfattning

Termofil (55° C) förhydrolys har i flera studier visat sig medföra fördelar i form av exempelvis högre metanutbyte, ökad nedbrytningsgrad och/eller ökad behandlingskapacitet vid rötning (Persson m. fl. 2010). Metoden har också visat sig kunna avdöda patogener, vilket gör den intressant som alternativ till pastörisering. Naturvårdsverket öppnar upp för att andra metoder än de etablerade kan godkännas som hygieniseringsmetod om en validering visar att patogenavdödningen är tillräckligt effektiv. Termofil förhydrolys har flera tänkbara fördelar jämfört med pastörisering, bland annat att fjärrvärme vid lägre framledningstemperatur kan användas för uppvärmningen, att processen potentiellt blir stabilare och att metanproduktionen och nedbrytningsgraden kan öka.

Studiens syfte är att utvärdera effekten av införande av ett termofilt förhydrolyssteg vid rötning av avloppsslam med avseende på:

- biogas-/metanproduktion och nedbrytning
- samband mellan substrategenskaper, processförhållanden och effekt på den anaeroba processen
- hygieniseringseffekt
- processtekniska följder

Kontinuerliga och satsvisa labförsök genomfördes med avloppsslam från fyra svenska reningsverk; VA SYD (Källby ARV i Lund), NSVA (Öresundsverket i Helsingborg), Gryaab (Ryaverket i Göteborg) och UMEVA (Öns avloppsreningsverk i Umeå). I försöken jämfördes termofil förhydrolys med efterföljande mesofil rötning med konventionell mesofil enstegsrötning, samt pastörisering med efterföljande mesofil rötning. Labförsöken har legat till grund dels för utformningen av ett pilotförsök, dels för att ta fram data för modellering, samt för ökad förståelse för tvåfasprocessen och olika substrategenskaper. Huvudsyftet med pilotförsöket var att driftmässigt efterlikna en fullskaleprocess så att mer tillämpbara resultat kunde erhållas. I pilotförsöket, som utfördes på Källby ARV, kunde rätt exponeringstid (6 timmar) hållas i förhydrolyssteg, varför det är dessa resultat som är aktuella för validering av metoden som hygieniseringsmetod. Modellering användes för att få ytterligare information ur mätdata från labförsöken, med syfte att öka förståelsen för tvåfasprocessen. Dessutom undersöktes möjligheten att modellera pilotförsöket. Med hjälp av modellering testades också om mer generella slutsatser kunde dras baserat på substratsammansättning så att resultaten även blir tillämpbara för andra substrat än de analyserade blandslammen. Processtekniska följder av implementering övervägdes genom utvärdering av mätdata i kombination med litteratur och erfarenheter.

För samtliga testade blandslam erhöles en högre TS- och VS-reduktion med termofil förhydrolys innan rötning än med mesofil enstegsrötning. Med avseende på metanutbyte gav studien inget entydigt svar. En ökad biogasproduktion erhöles vid rötning med förhydrolys i pilotskala, men metanproduktionen ökade inte. I labförsöken varierade effekten på metanproduktionen från – 8 % till + 18 % för de tre olika testade blandslammen.

Bäst resultat erhöjls från testlinjen med högst organisk belastning, vars slam innehöll en låg andel fett och en hög andel kolhydrater av VS jämfört med övriga slam.

VS-reduktionen ökade mer än metanproduktionen med inledande förhydrolys, detta visar både simuleringen, pilotförsöket och labförsöken. Möjliga förklaringar till detta är förlust av vätgas och/eller flyktiga organiska föreningar i förhydrolyssteg, delvis aerob nedbrytning, samt fel i gasflödesmätning. Utförda mätningar och analyser kan inte säkerställa orsaken, men den troligaste antas vara förlust av metanpotential genom vätgasavgång i förhydrolyssteg.

Studien visade att termofil förhydrolys har en hygieniserande effekt. I pilotförsöket med termofil förhydrolys vid 6 timmars exponeringstid och 1,5 dygns hydraulisk uppehållstid uppfylldes de hygieniseringskrav som ställs i förslaget till ny slamförordning med avseende på salmonella och e-coli men kunde ej uppfyllas med avseende på enterokocker. Det senare beror på att detektionsnivån för enterokocker ligger högre än uppställt krav i icke-avvattnat slam. Samtliga krav som ställs på hygienisering i ABP-förordningen uppfylldes dock med termofil förhydrolys i pilotskala. När motsvarande försök utfördes i labbskala med 24 h exponeringstid kunde inte samma hygieniseringseffekt påvisas, och resultaten var inkonsekventa och svårtydbara. Inte heller pastörisering kunde i samtliga fall valideras i labbskala. En anledning till de svårtydbara resultaten i labbskala kan ha varit att kontaktytans storlek i förhållande till volymen är större i labbskala än i pilotskala. Tydliga riktlinjer behövs för hur validering av nya hygieniseringsmetoder ska genomföras praktiskt.

Om förhydrolys ska implementeras i fullskala krävs komplettering av utrustning, både med tillkommande volymer och värmeväxlare. Hur många tankar som krävs bör avgöras från fall till fall.

Bildad gas i förhydrolyssteg måste ledas in i efterföljande rötchammare för att fullt kunna tillgodogöras.

Om vätgashalten i förhydrolyssteg riskerar att överstiga 25 volymprocent behöver EX-klassning av anläggningen ses över. Med anledning av risken för momentant höga vätgashalter vid intermittant inmatning av nytt material till ett förhydrolyssteg, som setts vid simulering av processen, bör detta undersökas vidare.

Implementering av termofil förhydrolys innan rötning kan medföra en ökad internbelastning när rejektivattnet återförs till reningsprocessen.

Summary

Thermophilic (55° C) pre-hydrolysis has been shown to improve methane yield, organics reduction and/or treatment capacity when applied to anaerobic digestion (Persson m. fl. 2010). The method has also proven to kill off pathogens, making it an interesting hygienisation alternative to pasteurisation. The Swedish Environmental Protection Agency has opened up for the possibility to validate new methods for hygienisation, if the pathogen reduction can be proven to be efficient enough. Thermophilic pre-hydrolysis has several possible advantages to pasteurization; e. g. district heating of lower temperature can be used, the stability of the process may increase, as well as the efficiency and extent of the digestion process.

The objective of this study is to evaluate the effect of thermophilic pre-hydrolysis on anaerobic digestion (AD) of sewage sludge with respect to:

- biogas/methane production and solids reduction
- correlations between substrate properties, process conditions and effect on the AD process
- pathogen reduction efficiency
- operational consequences

Laboratory trials in continuous and batch mode were conducted on sewage sludge from four Swedish wastewater treatment plants (WWTP); VA SYD (Källby WWTP in Lund), NSVA (Öresundsverket in Helsingborg), Gryaab (Ryaverket in Gothenburg) and UMEVA (Ön WWTP in Umeå). In the trials thermophilic pre-hydrolysis with consecutive mesophilic AD was compared to conventional one-step mesophilic AD, as well as pre-pasteurisation with consecutive AD. The results from the laboratory trials served as a basis for the design of a pilot trial and for input data to computer simulations, as well as for improved understanding of the two-phase process and different substrate characteristics. The main objective of the pilot test was to simulate the operation of a full scale plant and validate the pathogen reduction efficiency of the method. Computer simulations were applied in order to gain additional information from the experimental data. Operational consequences were considered by evaluation of experimental data in combination with literature studies as well as practical experiences.

For all the tested sludge samples the reduction of TS and VS increased as a result of thermophilic pre-hydrolysis prior to mesophilic AD. The results with respect to methane yield were not as straightforward. Increased production of biogas was achieved in pilot scale, but the methane production did not improve. In the laboratory trials the effect on methane production varied from – 8 % to + 18 % for the sludge samples tested. The most positive results were achieved in the test that had the highest organic load and that was fed with a sludge that was low in fat and high in carbohydrates, compared to the other sludge samples.

The VS reduction increased more than the methane production as a result of thermophilic pre-hydrolysis prior to mesophilic AD. This was shown both by laboratory and pilot trials as well as by simulations. Possible

explanations are loss of hydrogen gas and/or volatile organic compounds in the pre-hydrolysis step, partially aerobic degradation and errors in the gas flow measurements. None of the performed measurements or analyses can confirm the cause, but loss of methane potential through hydrogen release in the pre-hydrolysis step seems most likely.

The study has shown that thermophilic pre-hydrolysis has a hygienising effect. In the pilot trial with pre-hydrolysis at 6 hours exposure time and 1.5 days hydraulic retention time the requirements for pathogen reduction that have been suggested for sewage sludge for *Salmonella* and *E-coli* were reached, but could not be reached with respect to *Enterococcus*. This is due to the fact that the detection level of this parameter exceeds the level of requirement in non-dewatered digestate. However, the requirements in the regulations of animal by-products could be fully reached in the pilot-scale trial. In the lab-scale trials with 24 h exposure time the same level of pathogen reduction could not be reached. The results were in these cases inconsequent and difficult to interpret, both from pasteurization and from thermophilic pre-hydrolysis. A possible explanation for this could be that the area of contact per volume is considerably larger in lab scale than in pilot scale. Clear guidelines are needed for the practical implementation of validation of hygienisation methods.

For full-scale implementation of thermophilic pre-hydrolysis, additional tank-volumes and heat-exchangers will be required. The optimal configuration should be considered for each specific case.

The gas produced in the pre-hydrolysis step needs to be introduced into the main digester in order for it to be fully utilized.

If there is a risk that the concentration of hydrogen gas in the pre-hydrolysis step can exceed 25 % by volume, the safety requirements of the plant need to be revised. Simulations have shown that the hydrogen level may momentarily increase after intermittent feeding, so this should be further investigated.

The implementation of pre-hydrolysis can result in increased internal load of organics and nutrients to the WWTP.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Förstudien (Persson m. fl. 2010), som sammanfattar kunskapsläget inom biologisk förhydrolys, visade att inledande biologisk förhydrolys vid flertalet försök har medfört fördelar i form av exempelvis högre metanutbyte, ökad nedbrytningsgrad och/eller ökad behandlingskapacitet vid rötning. Termofil (55°C) förhydrolys ger i regel högre hydrolyshastighet än mesofil (37°C). Förstudien visade också att det är relativt svårt att jämföra resultat från olika studier då det saknas standardiserade metoder för beskrivning av slam och för att olika processutformningar använts. Det hade varit önskvärt att i större utsträckning kunna klarlägga samband mellan substrat, processoptimum och effekt. Det kan antas att olika slamegenskaper ger olika förutsättningar för att termofil förhydrolys ska ge positiv effekt på rötningen eftersom nedbrytningsförloppet blir olika beroende på exempelvis förhållandet mellan kolhydrater, fett och proteiner och i vilken form dessa föreligger. För att öka förståelsen för hur en tvåfasprocess fungerar och för att utröna i vilka fall det kan vara gynnsamt att tillämpa tvåfäsrötning kan laboratorieförsök i kombination med matematisk modellering användas som verktyg.

I Naturvårdsverkets uppdatering av "Aktionsplan för återföring av fosfor ur avlopp" (Naturvårdsverket 2010) föreslås nya regler med avseende på smittskydd vilket innefattar ökade krav på behandling av avloppsslam som ska användas på mark. Lagförslaget innebär en ny utmaning för avloppsreningsverken, som till skillnad från andra biogasanläggningar normalt inte är utrustade med ett hygieniseringssteg. I dagsläget är det troligt att avloppsreningsverk och planerade biogasanläggningar implementerar pastörisering, som är en etablerad teknik, om inte underlag till alternativa metoder finns. Lagförslaget öppnar dock upp för att "Andra behandlingsmetoder som bedöms likvärdiga med dem som definieras i bilaga Y kan godkännas av Naturvårdsverket". Det innebär att termofil förhydrolys vid 55°C med en exponeringstid på 6 timmar och en uppehållstid på några dagar med efterföljande mesofil rötning också skulle kunna godkännas som hygieniseringsmetod om en validering visar att patogenavdödningen är tillräckligt effektiv. Detta skulle kunna vara ett intressant alternativ för anläggningar som inte önskar implementera termofil rötning eller traditionell pastörisering. Termofil förhydrolys har flera tänkbara fördelar jämfört med pastörisering, bland annat att fjärrvärme vid lägre framledningstemperatur kan användas för uppvärmningen, att processen potentiellt blir stabilare och att metanproduktionen och nedbrytningsgraden kan öka.

1.2 Syfte

Studiens syfte är att utvärdera effekten av införande av ett termofilt förhydrolyssteg vid rötning av avloppsslam med avseende på:

- biogas-/metanproduktion och nedbrytning

- samband mellan substrategenskaper, processförhållanden och effekt på den anaeroba processen
- hygieniseringseffekt
- processtekniska följder

1.3 Mål

Målet med studien är att ge ett underlag för att kunna avgöra

- under vilka förutsättningar termofil förhydrolys är gynnsamt för ökad processeffektivitet med avseende på biogas-/metanbyte och nedbrytningsgrad
- om termofil förhydrolys kan valideras som godkänd hygieniseringsmetod för Klass A-slam (se ordlista)
- hur termofil förhydrolys påverkar patogener och anaerob nedbrytning i jämförelse med den etablerade metoden pastörisering (se ordlista)
- vilka aspekter som måste beaktas vid implementering av termofil förhydrolys

1.4 Metoder

Referensgrupp

En referensgrupp bestående av aktörer från VA- och biogasbranschen har fungerat vägledande både under projektplanering och under projektets gång då olika beslut har tagits om utformning av de ingående försöken.

Laboratieförsök

Genom försök i labbskala med blandslam från de i studien deltagande avloppsreningsverken har termofil förhydrolys med efterföljande mesofil rötning jämförts med konventionell mesofil enstegsrötning och pastörisering med efterföljande mesofil rötning.

Labförsöken har legat till grund dels för utformning av ett pilotförsök, dels för att ta fram data för modellering och för ökad förståelse för tvåfasprocessen och olika substrategenskaper.

Pilotförsök

Huvudsyftet med pilotförsöket var att driftmässigt efterlikna en fullskaleprocess så att mer tillämpbara resultat kunde erhållas. I pilotförsöket kunde rätt exponeringstid hållas i förhydrolysteget, så det är dessa resultat som är aktuella för validering av metoden som hygieniseringsmetod.

Modellering

Modellering användes för att få ytterligare information ur mätdata från labförsöken, med syfte att öka förståelsen för tvåfasprocessen. Dessutom undersöktes möjligheten att modellera pilotförsöket. Med hjälp av modellering testades också om mer generella slutsatser kunde dras baserat på substratsammansättning så att resultaten även blir tillämpbara för andra substrat än de analyserade blandslammen.

Processtekniska överväganden

Processtekniska följder av implementering övervägdes genom utvärdering av mätdata i kombination med litteratur och erfarenheter.

1.5 Omfattning och avgränsningar

Utformningen av lab- och pilotförsök avgör vilken information som kan erhållas från dessa. Eftersom praktiska försök är väldigt tidskrävande kan inte alla tänkbara kombinationer av processvariabler såsom uppehållstid, belastning, temperatur etc. testas, utan kompromisser måste göras baserat på vilken information som är viktigast och vilken som är mindre relevant. I denna studie har processutformningen bestämts i samråd med referensgruppen som här får representera VA-branschens behov. Detta har medfört att fokus till viss del har flyttats från teknisk implementering av tvåfasrötning mot utvärdering av hygieniseringseffekten.

Enbart blandslam från de reningsverk som delfinansierat studien har testats, men studiens utformning mot fördjupad förståelse ska möjliggöra en utvidgning av resultaten till att även kunna tillämpas på andra slam.

Studien har inte inkluderat en utvärdering av skumningsproblematik.

1.6 Ordlista

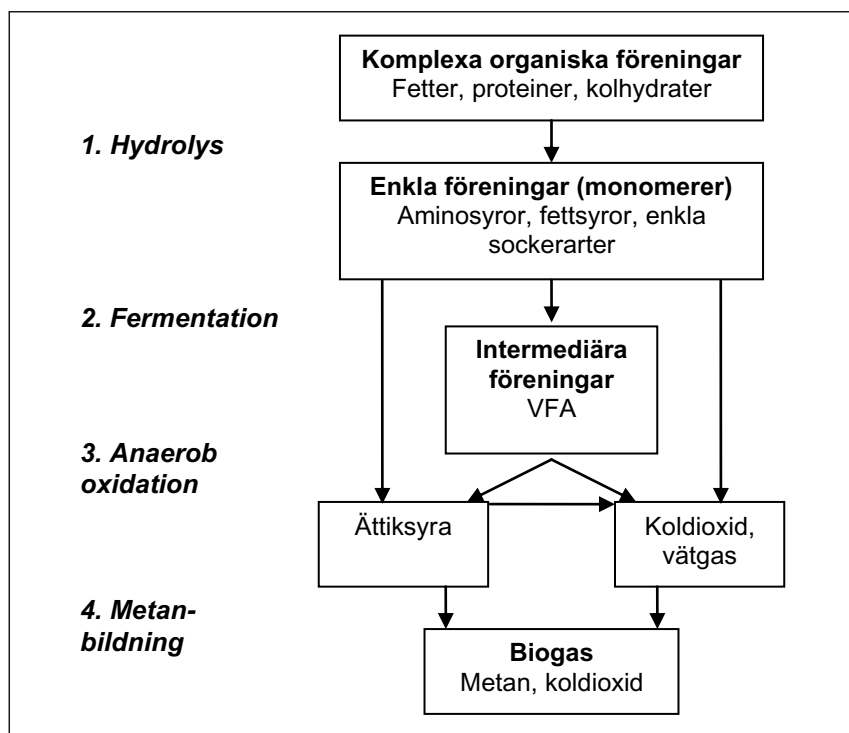
ABP	Animaliska biprodukter, för vilka insamling, transport, lagring, bearbetning och användning eller bortskaffande regleras genom EU-lagstiftning (ABP-förordningarna) samt i Sverige av kompletterande föreskrifter.
Alkalinitet	Ett mått på buffertkapaciteten i ett system, mängden alkaliska (basiska) ämnen, mäts ofta i halten av HCO_3^- .
Autoklavering	Behandling i autoklav, en form av tryckkokare, som används för sterilisering av laboriematerial. I de fall som beskrivs i denna rapport avser autoklavering att substratet behandlas vid 121° C i 40 minuter.
Bioslam	Slam som tas ut från biologiska reningssteg på avloppsreningsverk för att slamhalterna i dessa inte successivt ska öka. Kan även benämnas sekundärslam eller överskottsslam.
BMP	Biochemical Methane Potential – Metanpotential i ett substrat vid fullständig utrötning under optimala förhållanden. Bestäms med ett satsvist så kallat metanpotentialförsök.
CFU	Colony-Forming Unit, mått på antalet livsdugliga bakterier eller svampar.
COD	Chemical Oxygen Demand, ett mått på mängden organiska föreningar.

HRT	Hydraulic Retention Time, hydraulisk uppehållstid.
Klass A-slam	Slam behandlat i en sluten kontrollerad process som godkänts för hygienisering. Klass A slam medger flest användningsmöjligheter.
Maximal nedbrytningsgrad	Högsta möjliga nedbrytningsgrad av organiskt material som kan uppnås.
Mesofil rötning	Rötning vid ca 37° C.
NH ₄ -N	Ammoniumkväve, bildas vid nedbrytning av proteiner.
Pastörisering	Värmebehandling för att ta död på skadliga bakterier och mikroorganismer. I biogassammanhang menas vanligen en behandling vid 70° C en timme.
PE	Personekvivalenter, standardiserat mått på mängden avloppsvatten och föroreningar som bildas per person och dag. I Sverige definieras PE i BOD ₇ -belastning som 70 gram/person & dygn (Statens naturvårdsverks författningssamling).
Primärslam	Slam avskilt från försedimenteringsbassänger på avloppsreningsverk före biologisk rening.
Termofil rötning	Rötning vid ca 55° C.
TKN	Total Kjeldahl Nitrogen, summan av organiskt kväve, ammonium och ammoniak.
TS	Torrsubstanshalt, det som återstår när vattnet torkats bort från ett material. Provet torkas i 105° C. Anges vanligen som procent av våtvikt.
TSS	Total Suspended Solids, ett prov filtreras och filtret torkas sedan i 105° C. TSS är det som återstår på filtret efter torkning. Anges som procent av våtvikt.
Tvåfasrötning	En röttningsprocess där hydrolys/syrabildning och metanbildning är fysiskt separerade.
Tvåstegsrötning	Rötning med två på varandra följande behållare.
Utröttningsgrad	Procentuell reduktion av organiskt material som uppnås i en process.
VFA	Volatile Fatty Acids, flyktiga fettsyror.
VFA-COD	Flyktiga fettsyror omräknat till vad de motsvarar i COD.
VS	Volatile Solids, ett mått på andelen organiskt material. TS provet förbränns vid 550° C, VS mäts sedan som torrsubstans minus aska. Anges som procent av TS eller procent av våtvikt.
VSS	Volatile Suspended Solids, TSS-provet förbränns vid 550° C. VSS mäts sedan som TSS minus aska. Anges i procent av våtvikt eller som procent av TSS.

2 Rötning på avloppsreningsverk

2.1 Rötning med inledande biologiskt hydrolyssteg

Anaerob nedbrytning av organiskt material, rötning, sker i olika steg, som schematiskt visas i Figur 1. Hydrolysen är det första steget i nedbrytningskedjan då proteiner, fetter och kolhydrater bryts ner till aminosyror, långa fettsyror och enkla sockerarter. I nästa steg, fermentation (även kallat syrabildning), omvandlas aminosyror och enkla sockerarter till olika organiska syror såsom ättiksyra, propionsyra och smörsyra (flyktiga fettsyror – VFA), alkoholer samt vätgas och koldioxid. I nästa steg, anaerob oxidation (även kallad ättiksyrabildning) omvandlas sedan långa fettsyror samt VFA och alkoholer till ättiksyra, vätgas och koldioxid. Av dessa ämnen bildar sedan metanogener metan och koldioxid (Figur 1).



Figur 1 Schematisk bild över nedbrytningsförloppet under rötning.

Genom att fysiskt separera hydrolys/fermentation från metanbildningssteget finns möjlighet att optimera de olika stegen bättre. Den förstudie som föranledde denna rapport (Persson m. fl. 2010) visade på att följande mikrobiologiska fördelar kan uppnås genom fassettering:

- Kontaktytan mellan hydrolyserande biomassa och substrat förbättras och enzymkoncentrationen ökar.
- I det metanbildande steget minskar konkurrensen från de fermenterande mikroorganismerna för de känsliga mikroorganismer som utför anaerob oxidation, vilket kan öka processens effektivitet.

- pH i det metanbildande steget blir lättare att kontrollera och hålla vid ett optimalt värde.
- Processen blir mer stabil då flödet utjämnas i hydrolyssteg och pH i metanbildande steget blir mindre variabelt.

Persson m. fl. (2010) visar på möjligheten att erhålla en ökad metanutvinning och en högre nedbrytningsgrad på kortare tid i efterföljande metanbildningssteg när den anaeroba nedbrytningen delas upp på detta sätt. De surare förhållandena som erhålls i ett inledande separat hydrolyssteg kan dessutom bidra till ytterligare effekter (Persson m. fl. 2010):

- Effektivare patogenreduktion
- Effektivare utlösning av mineraler och spårämnen viktiga för rötningsprocessen
- Eliminering av skumbildande ämnen
- Större möjlighet att bryta ner toxiska och inhiberande ämnen

Utöver de potentiella positiva effekterna medför fasseparering också möjliga mikrobiologiska nackdelar. Anaerob oxidation är beroende av att vätgashalten hålls låg genom samexistens med vätgaskonsumerande metanogener (ett så kallat syntrofiskt förhållande). Vid fasseparering missgynnas syntrofin och nedbrytning av långa fettsyror, VFA och alkoholer till ättiksyra, vätgas och koldioxid kan därför anses osannolik eller begränsad i ett renodlat förhydrolyssteg. Vätgasbildning genom fermentation kan dock förväntas ske även i frånvaro av metanproduktion, varför fasseparering ger upphov till en viss produktion av vätgas som inte omvandlas till metan och därmed en potentiell förlust av energi om inte denna tas tillvara. Övriga nackdelar som uppmärksammades i förstudien innefattar (Persson m. fl. 2010):

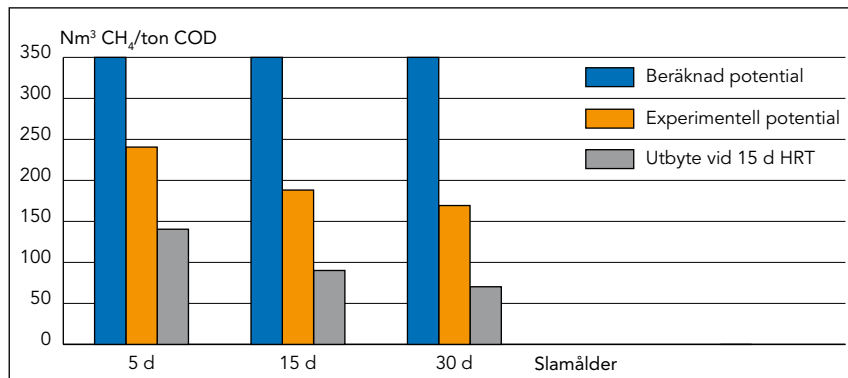
- Vätgas kan vara en säkerhetsrisk om anläggningen inte designats för detta
- Erfarenhet saknas av processen och hur nedbrytningen av olika substrat påverkas.
- Processen blir svårare att konstruera och driva.

För mer ingående beskrivning av de mikrobiologiska processerna och de möjliga effekterna av förhydrolys hänvisas till förstudien av Persson m. fl. (2010).

2.2 Olika avloppsslams egenskaper

Slam från ett reningsverk är en blandning av material som avskiljs direkt från det inkommande avloppsvattnet och från de ingående processerna. Slamfraktionerna varierar i egenskaper och sammansättning beroende på avloppsvattnet som behandlas och hur reningsverkets processer är utformade. Primärslammet är exempelvis mer lättnedbrytbart och ger generellt ett högre metanutbyte än bioslam (Parkin och Owen 1986). Nedbrytbarheten och metanutbytet från bioslam minskar generellt med ökande slamålder i den biologiska reningsprocessen. I Figur 2 redovisas metanpotentialer och metanutbyten från bioslam som tagits fram genom labförsök med olika slamålder (Gossett och Belser 1982). I detta fall kunde en tydlig försämring av både metanpotential och utbyte från en kontinuerlig process med 15 dygns

uppehållstid påvisas med ökande slamålder. Med minskande nedbrytbarhet ökar oftast effekten av en förbehandling, vilket gör införandet av en sådan mer intressant (Gossett och Belser 1982; Bolzonella et al. 2005).



Figur 2 Beräknade och experimentella potentialer samt utbyte från kontinuerlig process vid 15 d hydraulisk uppehållstid (HRT) från kommunalt bioslam med olika slamålder. Data från Gossett och Belser (1982).

Tabell 1 redovisar process- och belastningsdata från de reningsverk som deltagit i denna studie. Öresundsverket har relativt lång slamålder, Källby något kortare. Umeva har ingen kväverening, vilket medför kort slamålder. Ryaverkets process är uppdelad i delsteg, varav slamåldern i aktivslam-delen är kort. Industribelastningen är relativt sett högre vid Öresundsverket och Umeva (ca 14 % av PE) än från Ryaverket (ca 5 % av PE) och Källby reningsverk (ca 2,6 % av PE).

Tabell 1 Uppgifter angående process och belastning vid de reningsverk som ingår i studien.

Reningsverk	PE Totalt	PE Industri	N-rening	P-rening	Slamålder biosteg	Bioslam/ primärslam/ kemsam (TS-basis)	Förtjockning
Öresunds- verket	137 500	18 574	Fördenitrifikation	Bio-P	10 d	55/45/-	Gravitation, dosering av järnklorid resp. polymer Zetag 8185 till bioslam-förtjockare
Ryaverket	699 569	33 000	Nitrifikation i bio-bäddar och denitrifikation i aktiv slam och i efterdenitrifikation (MBBR)	Simultanfällning med Fe(II)SO ₄ och skivfilter	2 d (AS)	54/45/1	Bandgravitationsförtjockare med katjonpolymer
Källby	96 000	2 500	Efterdenitrifikation	Efterfällning med Feralco PIX	6-8 d	30/70/-	Gravitation följt av trumsilsförtjockare med polymer 492 HMW (Kemira)
Umeva	127 108	18 657	Ingen	För- och simultan-fällning med Fe(II)SO ₄	2-4 d	Ingen uppgift	Gravitationsförtjockare med katjonpolymer

2.3 Hygienisering av avloppsslam

I Sverige är det i dagsläget tillåtet att sprida ohygieniserat men stabiliserat avloppsslam på jordbruksmark, undantaget betesmark och vissa grödor, under förutsättning att det nedbrukas inom ett dygn. Eftersom det är väl-

känt att avloppsslam kan innehålla sjukdomsframkallande mikroorganismer har det dock i förslaget till förordning om återföring av fosfor till kretsloppet (Naturvårdsverket, 2010), ställts krav på hygienisering av avloppsslam innan användning på eller i mark. I förslaget listas ett antal specificerade hygieniseringsmetoder vilka föreslås ska ge avloppsslam av klass A, men även att andra metoder ska kunna godkännas om Naturvårdsverket bedömer dem som likvärdiga. För detta krävs att den via validering kan påvisas som lika effektiv som en redan godkänd hygieniseringsmetod. En sådan validering skulle kunna ske dels indirekt via kontinuerlig registrering av driftparametrar (pH, temperatur, tidsintervaller etc.), dels direkt via att man med hjälp av analys av en specifik mikroorganism visar att denna reduceras till förväntad nivå, men ingen färdig valideringsmetod finns ännu klar att tillämpa. De krav som enligt förslaget till förordning skall uppfyllas av varje godkänd hygieniseringsmetod är:

- Salmonella frånvarande i 25 g våtvikt
- E. Coli < 1 000 CFU/g TS
- Enterokocker < 1 000 CFU/g TS

Det är intressant att jämföra de krav som ställs i förslaget till ny slamförordning med de krav som ställs i EU:s förordning om animaliska biprodukter (EU) nr 142/2011 (ABP-förordningen), vilken gäller för samrötningsanläggningar som tar emot ABP-material för rötning. Enligt denna förordning skall följande hygieniseringskrav uppfyllas för att rötrest skall få certifieras som biogödsel:

- Salmonella frånvarande i 25 g våtvikt
- E. Coli $n = 5, c = 1, m = 1\,000, M = 5\,000$ i 1 g
- Enterokocker $n = 5, c = 1, m = 1\,000, M = 5\,000$ i 1 g

Där n = antalet prover som skall testas

m = gränsvärde för antal bakterier; resultatet anses tillfredsställande om antalet bakterier i samtliga prover inte överstiger m

M = maximivärde för antalet bakterier; resultatet anses icke tillfredsställande om antalet bakterier i ett eller flera stickprover är M eller fler

c = antalet prover i vilka antalet bakterier får ligga mellan m och M utan att underkännas, förutsatt att antalet bakterier i övriga prover är högst m

Vid rötning av avfall som omfattas av ABP-förordningen gäller alltså att antalet E. Coli respektive enterokocker får vara maximalt 1 000 CFU/g våtvikt i rötresten, medan kraven vid rötning av slam säger att antalet E. Coli respektive enterokocker får vara maximalt 1 000 CFU/g TS i rötresten. En jämförelse av kraven finns presenterad i Tabell 2.

Tabell 2 Jämförelse av hygieniseringskraven enligt ABP respektive enligt förslaget till ny slamförordning. Anger maximalt antal E. Coli respektive enterokocker i enheten CFU/g.

	Krav enligt ABP		Krav enligt förslaget till ny slamförordning	
	CFU/g TS	CFU/g våtvikt	CFU/g TS	CFU/g våtvikt
Rötrest (3,5 % TS)	< 28 571	< 1 000	< 1 000	< 35

Om man antar en TS-halt på 3,5 % i rötresten, vilket kan sägas vara en normal TS-halt för rötslam från avloppsreningsverk, motsvarar kraven alltså att det rötade materialet får innehålla E. Coli respektive enterokocker < 1 000 CFU/g våtvikt, motsvarande 28 571 CFU/g TS enligt ABP-förordningen, men endast E. Coli respektive enterokocker < 1 000 CFU/g TS, motsvarande < 35 CFU/g våtvikt enligt förslaget till ny slamförordning, för att få spridas på jordbruksmark.

Det hygieniseringskrav som ställs på enterokocker i förslaget till ny slamförordning kommer att bli svårt att uppvisa, eftersom detektionsnivån för enterokocker enligt godkänd analysmetod (NMKL) är 100 CFU/g våtvikt. Med en TS-halt på 3,5 % innebär detta att den lägsta nivån enterokocker som kan uppmätas i icke avvattnat slam är ~2 850 CFU/g TS, vilket alltså ligger över godkänd nivå för att få slammet godkänt för spridning på och i mark, enligt förslaget till ny slamförordning.

Ovannämnda frågeställningar visar att hygieniseringskraven som ställs i förslaget till ny slamförordning kan ifrågasättas, och eventuellt behöver formuleras om för att kunna fungera i praktiken. Ett alternativ skulle kunna vara att analys av patogener utförs på avvattnat slam, men detta försvårar validering av hygieniseringsmetoder i lab- och pilotskala. Vidare skulle nya analysmetoder för patogener kunna arbetas fram, med lägre detektionsnivå för enterokocker, för att kraven i förordningen skall kunna tillgodoses. Det skulle även vara önskvärt att kunna relatera antalet patogener till en parameter som inte bryts ner i rötningsprocessen, t ex fosfor, för att undvika problematiken med att en förbättrad utrotningsgrad innebär att det blir svårare att uppnå hygieniseringskraven. Vidare krävs det specifika riktlinjer kring provuttag samt provhantering, eftersom risken för återkontaminering av uttaget prov annars är stor.

3 Laboratorieförsök

3.1 Bakgrund laboratorieförsök

Kontinuerliga och satsvisa labförsök genomfördes med avloppsslam från fyra svenska reningsverk; VA SYD (Källby ARV i Lund), NSVA (Öresundsverket i Helsingborg), Gryaab (Ryaverket i Göteborg) och UMEVA (Öns avloppsreningsverk i Umeå). Samtliga labförsök genomfördes på AnoxKaldnes laboratorium i Lund. Försöken utfördes under två olika försöksperioder; under feb – juni 2011 (Försök 1) samt aug – nov 2011 (Försök 2).

Syftet med labförsöken var att utvärdera skillnader mellan olika processkonfigurationer, samt mellan olika blandslam, och därmed få förklaringar till skillnader i effekt av förbehandling. Syftet med labförsöken var därför att ta fram relativa data snarare än absoluta data, eftersom processförhållande som råder i fullskala inte kan uppnås exakt i labbskala. Labförsöken gav möjligheten att testa flera olika parametrar parallellt, samt bidrog till en ökad förståelse för hur olika substrategenskaper påverkar effekten av förbehandling. Med hjälp av resultaten från labförsöken kunde en lämplig utformning av pilotförsöket fås fram, samt data produceras för modellering av processen.

1,5, 2,5 och 3,5 dagar valdes till uppehållstider i förhydrolyssteg i första labförsöket på grund av önskemål om att minimera storleken på den extra tanken som behövs för detta steg. Därmed erhöles ingen information i detta laborationsförsök om vad en längre uppehållstid i förhydrolyssteg skulle kunna ge. Pastörisering av blandslam vid 70° C i 1 h valdes som referensmetod för förbehandling.

En uppehållstid på 15 dygn valdes till metansteget eftersom önskemålet var att validera en process med så kort uppehållstid som möjligt i det mesofila steget, och 15 dygn ansågs vara den kortaste uppehållstiden som var rimlig.

3.2 Försöksuppställning

3.2.1 Kontinuerliga försök

Förhydrolyssteg (benämns som FH) simulerades i 2-liters glasreaktorer med 800 ml aktiv volym, vilka stod placerade i ett vattenfyllt skakbad. Blandslam tillsattes förhydrolynsreaktorerna manuellt en gång per dag på vardagar, och hydrolyserat slam togs då samtidigt ut. Förhydrolynsreaktorerna är gastäta och har semi-kontinuerlig gasflödesmätning. Temperaturen i vattenbadet var 55° C.

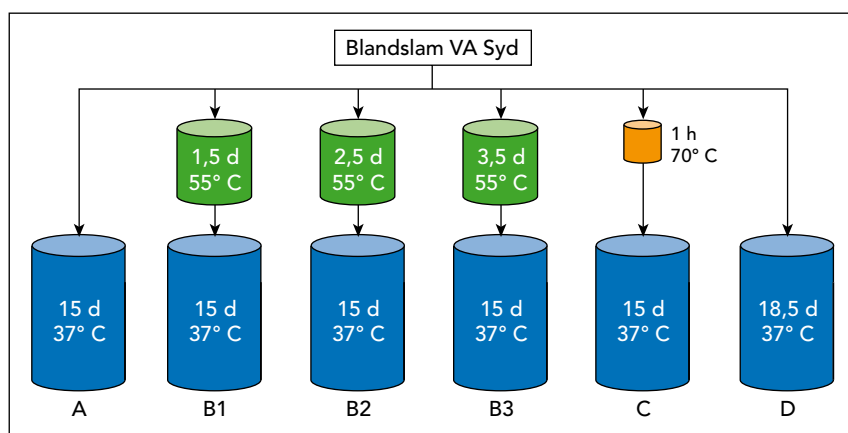
Rötsteget (benämns som RK) utfördes i 4-liters mantlade glasreaktorer. Obehandlat respektive förbehandlat blandslam tillsattes rötreaktorerna manuellt en gång per dag på vardagar, och rötrest togs då samtidigt ut. Reaktorerna är gastäta och har mekanisk omrörning, temperaturreglering samt semi-kontinuerlig gasflödesmätning. Temperaturen reglerades till 37° C.

Pastörisering av blandslam utfördes i värmeskåp i 500 ml glasflaskor en gång per vecka. Temperaturen på slammet i pastöriseringsflaskorna övervakades med termometer för att säkerställa att en temperatur på minst 70° C uppnåddes i 1 h. På grund av att temperaturen skulle övervakas var glasflaskorna ej slutna under uppvärmningen. Total tid flaskorna stod i värmeskåpet var ca 3 h. Det pastöriserade blandslammet (benämns som P) förvarades sedan i kylrum.

Blandslam från de olika reningsverken skickades till AnoxKaldnes, alternativt hämtades av personal från AnoxKaldnes, en gång per vecka under hela försöksperiodens gång, och förvarades sedan i kylrum. I samtliga testreaktorer tillsattes obehandlat respektive förbehandlat blandslam en gång per dag på vardagar. Under båda försöksperioderna genomfördes även en intensivare period på 3 veckor, då blandslam tillsattes samt rötrest togs ut sju dagar per vecka.

I det första labbförsöket (*Försök 1*) testades följande konfigurationer med blandslam från VA SYD som substrat (se Figur 3):

- Mesofil rötning (RK_{Ref})
- Termofil förhydrolys med olika uppehållstider och mesofil rötning med samma uppehållstid som rötningstegen i A (RK_{FH})
- Pastörisering och mesofil rötning med samma uppehållstid som rötningstegen i A och B (RK_p)
- Mesofil rötning med samma uppehållstid som den längsta totala uppehållstiden i B ($RK_{LångHRT}$)



Figur 3 Illustration av labbuppställning i Försök 1 med blandslam från VA SYD. Upphållstid i respektive steg anges i dygn. För pastörisering gäller att 70°C skall uppnås i substratet under 1 h.

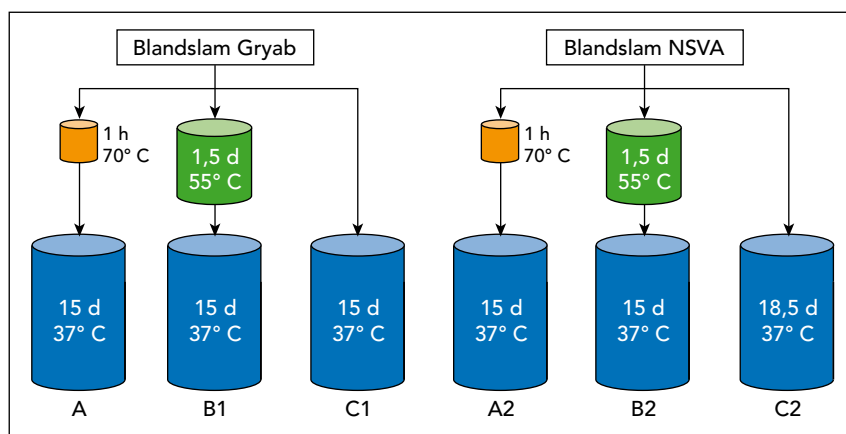
Upphållstiden i det mesofila rötsteget var 15 d för samtliga konfigurationer, förutom i D, där den var 18,5 d. Upphållstiderna som testades i det termofila förhydrolyssteg var 1,5 d; 2,5 d samt 3,5 d. Som referenslinje användes i *Försök 1* två identiska rötkammare. Genom att köra dessa två parallellt kunde ett osäkerhetsintervall för labbmetoden fås fram. En effekt av förbehandling definieras i denna studie som ett resultat som ligger utanför osäkerhetsintervallet för referensduplikaten.

Resultaten från *Försök 1* användes för dimensionering av pilotförsök på Källby avloppsreningsverk samt för konfigurering av labbförsök med slam

från NSVA, Gryaab och UMEVA (*Försök 2*). I det andra labförsöket (*Försök 2*) testas följande konfigurationer i labbskala med blandslam från NSVA respektive Gryaab som substrat:

- A. Pastörisering och mesofil rötning
- B. Termofil förhydrolys med uppehållstid baserad på resultat från första labförsöket, och mesofil rötning med samma uppehållstid som rötningssstegen i A
- C. Mesofil rötning med samma uppehållstid som rötningssstegen i A och B

Upphållstiden i det mesofila rötsteget var 15 d för samtliga konfigurationer. Upphållstiden i det termofila förhydrolyssteg var 1,5 d. Labbupställningen för det andra labförsöket illustreras i Figur 4.



Figur 4 Illustration av labbupställning i Försök 2 med blandslam från NSVA samt Gryaab. Upphållstid i respektive steg anges i dygn. För pastörisering gäller att 70 °C skall uppnås i substratet under 1 h.

Utöver de reaktorer som illustreras i Figur 4, sattes även en förhydrolysen reaktor upp med blandslam från UMEVA, i syfte att producera förhydrolyserat blandslam till satsvisa försök, samt för att undersöka vilken effekt som kunde uppnås med termofil förhydrolys av detta blandslam. Förhydrolysen reaktorn kördes enligt samma processkonfiguration som med övriga blandslam i Försök 2 (1,5 d uppehållstid samt 55° C).

Under båda försöksomgångarna utfördes analyser på gasproduktion, metanhalt, TS/VS, kväve, VFA, totalfett och alkalinitet. Koncentrationen av kväve analyserad som Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) i kvävefraktionerna TKN_{tot} , $TKN_{löst}$ samt som ammoniumkväve (NH_4-N). Bakteriologiska tester gjordes avseende på salmonella, enterokocker och E. Coli. Samtliga analyser utfördes enligt angivna metoder i Bilaga A.

3.2.2 Satsvisa försök

Satsvisa försök utfördes vid tre olika tillfällen under projektperioden (se Tabell 3). Försök A och C utfördes som satsvisa metanpotentialförsök, vilket ger information om ett substrats anaeroba nedbrytbarhet och maximala metanbildningspotential. Effekten av tre förbehandlingstekniker testades i Försök A respektive Försök C: förhydrolys, autoklavering och pastörisering. Försök B utfördes som en satsvis förhydrolys, vars primära syfte var att pro-

ducera indata till modellering av hydrolyskonstant. Samtliga satsvisa försöken utfördes enligt metod beskriven i Bilaga A.

Tabell 3 Försöksupplägg för de tre satsvisa försöken som utfördes under projektperioden.

	Ymp	Testsubstrat
Försök A	Rötslam från rötreaktor	Blandslam VA SYD • obehandlat • autoklaverat
Försök B	Förhydrolyserat slam från hydrolysreaktor	Blandslam VA SYD • obehandlat
Försök C	Rötslam från respektive rötreaktor	Blandslam NSVA • obehandlat • förhydrolyserat • autoklaverat Blandslam Gryaab • obehandlat • förhydrolyserat • autoklaverat Blandslam UMEVA • obehandlat • förhydrolyserat • autoklaverat • pastöriserat

3.3 Resultat

3.3.1 Val av utvärderingsperiod

Labförsöken pågick i 101 dagar (*Försök 1*) respektive 68 dagar (*Försök 2*). All utvärdering är baserad på värden från period 36–101 respektive period 30–68, eftersom stabila förhållanden i testreaktorerna då hade uppnåtts.

3.3.2 Försök 1 – optimering av uppehållstid i förhydrolysreaktor

Under *Försök 1* testades tre olika uppehållstider i förhydrolysteget. Utvärdering av data från dessa tre testlinjer låg sedan till grund för val av processdesign för pilotförsöket samt processdesignen för det efterföljande labförsöket (*Försök 2*). Den organiska belastningen för respektive testreaktor visas i Tabell 4.

Tabell 4 Organisk belastning i respektive testreaktor under Försök 1.

	kg VS/m ³ /d
FH _{1,5d}	23,1
FH _{2,5d}	13,9
FH _{3,5d}	9,9
RK _{Ref}	2,7
RK _{FH 1,5d}	2,7 ¹
RK _{FH 2,5d}	2,7 ¹
RK _{FH 3,5d}	2,7 ¹
RK _p	2,7 ¹
RK _{LångHRT}	2,2

¹ Hänsyn har inte tagits till VS-reduktionen över förbehandlingssteget.

I blandslammet som tillsattes testlinjerna var TS ~ 5 % och VS ~ 3,9 %.

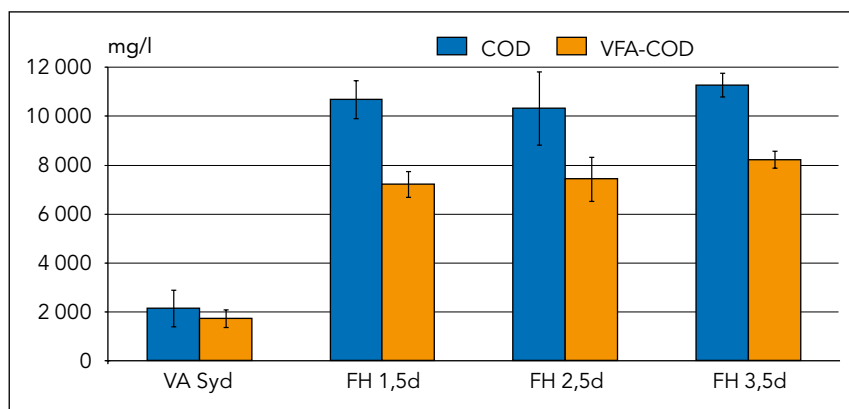
Uppnådda TS- och VS-reduktioner under Försök 1 visas i Tabell 5. Samtliga värden representerar reduktionen över hela testlinjen, och inte enbart över metansteget.

Tabell 5 Uppnådda TS- och VS-reduktioner över respektive testlinje under Försök 1.

	TS-reduktion (%)	VS-reduktion (%)
RK _{Ref}	33	44
RK _{FH 1,5d}	35	47
RK _{FH 2,5d}	36	49
RK _{FH 3,5d}	35	48
RK _p	33	45
RK _{LångHRT}	34	45

Förhydrolys innan rötning gav en högre TS- och VS-reduktion, jämfört med referenslinjen. Även jämfört med pastörisering och en längre uppehållstid i rötchambran, var TS- och VS-reduktionen högre med förhydrolys innan rötning.

I Figur 5 visas koncentrationerna av löst COD samt av VFA-COD i inkommande blandslam från VA SYD, samt i förhydrolyssteg hos de tre testlinjerna.



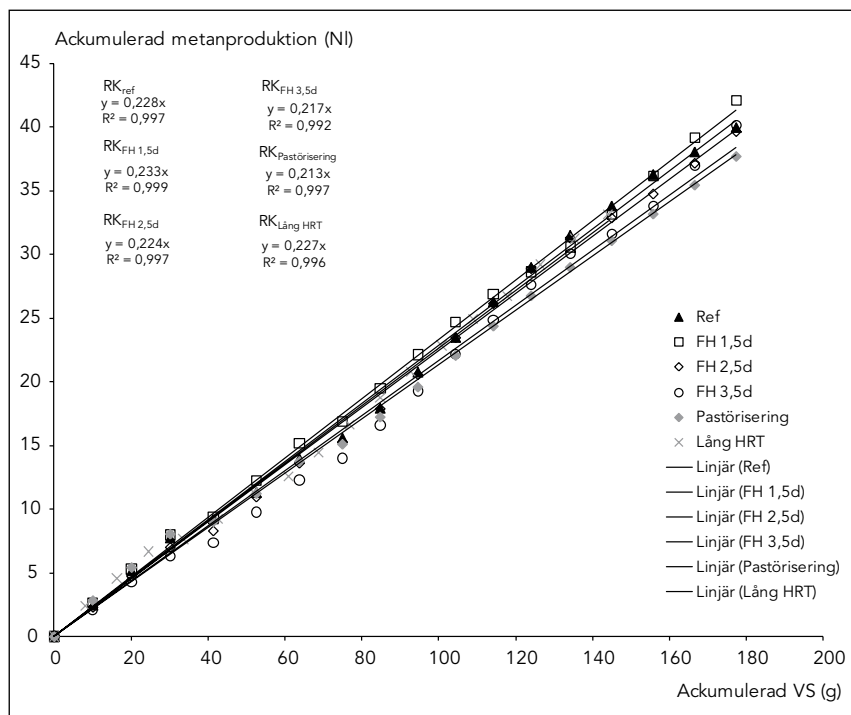
Figur 5 Resultat från Försök 1: Koncentration löst COD (mg COD/l) samt VFA-COD (mg VFA-COD/l) inklusive standardavvikelse, i de tre förhydrolyis-reaktorerna samt i inkommande blandslam. Följande uppehållstider testades i försöket: 1,5 d; 2,5 d; 3,5 d.

Ökningen av löst COD och VFA-COD visar på att hydrolys och syrabildning sker i förhydrolyssteg. Resultaten visar även på att den största delen av hydrolysen och syrabildningen sker inom 1,5 d, och att ingen nämnvärd ytterligare effekt fås genom längre uppehållstid i förhydrolyssteg. På grund av inkommande blandslams, samt hydrolysatens, inhomogena karaktär kunde analys av COD_{tot} ej genomföras. Effekt av hydrolys på COD och VFA i blandslammen diskuteras vidare i kapitel 3.3.3.2.

Utvärdering av data från Försök 1 visade även på att osäkerhetsintervallet för metanutbytet från labreaktorerna ligger på ca 5 %, vilket innebär att en ökning eller minskning i metanutbyte mellan referens- respektive testreak-

torer som uppgår till 0 till ± 5 % av referensvärdet, i detta försök inte kan ses som en effekt av vidtagen åtgärd.

Det totala metanutbytet för blandslam från VA SYD visas i Figur 6. Metanutbytet för testlinjerna är beräknat som lutningen på linjäranpassningen av data där ackumulerad metanproduktion plottas mot ackumulerad inmatad VS.



Figur 6 Ackumulerad metanproduktion plottad mot ackumulerad inmatad VS för testlinjen med blandslam från VA SYD, inklusive metanproduktion från både förhydrolyssteg och rötsteg. Totalt metanutbyte ($\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$) visas som lutningen på respektive kurva.

För referenslinjen uppnåddes ett metanutbyte på $0,23 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$. Förhydrolys innan rötkammaren gav inte någon effekt på det totala metanutbytet, oavsett uppehållstid i förhydrolyssteg. Inte heller pastörisering gav ett högre metanutbyte, istället var metanutbytet för denna linje ca 9 % lägre än i referenslinjen, vilket troligen beror på en icke optimerad pastörisering där organiskt material avgått under själva upphettningmomentet.

För testlinjerna med förhydrolys (FH_{1,5d}, FH_{2,5d}, FH_{3,5d}) utgjorde metanproduktionen från hydrolysen 5,6 %, 7,5 % respektive 8,5 % av den totala metanproduktionen, samt gasproduktionen 12,2 %, 15,6 % respektive 16,0 % av den totala gasproduktionen. Metanhalterna var under utvärderingsperioden relativt stabila i både rötkammarna och hydrolysreaktorerna. Halten vätgas i den bildade gasen analyserades inte under testperioden, och kunde därför inte kvantifieras. Uppnådda metanutbyten samt metanhalt i den bildade biogasen visas i Tabell 6.

Behandling med termofil förhydrolys innan rötning gav en högre metanhalt i den bildade biogasen från rötsteget, men eftersom den bildade biogasen från förhydrolyssteg till större del består av CO_2 , blev metanhalten i den totala gasvolymen, med bildad biogas från förhydrolyssteget inräknat,

Tabell 6 Uppnådda metanutbyten vid rötning av slam från VA SYD.

	Metanutbyte i förhydrolyssteget	Metanutbyte totalt	Metanhalt % CH ₄ i förhydrolyssteget	Metanhalt % CH ₄ i metansteget	Metanhalt % CH ₄ totalt i bildad biogas
	Nm ³ CH ₄ /kg VS _{in}	Nm ³ CH ₄ /kg VS _{in}			
RK _{Ref}		0,23		65	65
RK _{FH 1,5 d}	0,011	0,23	29	67	63
RK _{FH 2,5 d}	0,017	0,22	30	68	62
RK _{FH 3,5 d}	0,019	0,22	33	68	62
RK _p		0,21		65	65
RK _{Lång HRT}		0,23		63	63

något lägre än metanhalt i den bildade biogasen från referenslinjen. Även här kan konkluderas att ingen nämnvärd ytterligare effekt fås genom längre uppehållstid i förhydrolyssteget för detta blandslam. Däremot verkar det som att man genom en längre uppehållstid i förhydrolyssteget skapar en annan fördelning av var metangasen produceras. Med längre uppehållstid i förhydrolyssteget sker en omfördelning till att en större andel av den totala mängden producerad metangas kommer från förhydrolyssteget, med det omvända förhållandet för kortare uppehållstid i förhydrolyssteget. Resultaten visar även att ett högre metanutbyte inte heller kan uppnås genom en längre uppehållstid i rötkammaren.

Resultat från bakteriologiska analyser för utvärdering av hygieniseringseffekt presenteras i kapitel 3.3.6. En längre uppehållstid i förhydrolyssteget resulterade inte i en förbättrad hygieniseringseffekt på blandslammet. Mot bakgrund av dessa resultat, tillsammans med processdataresultaten, drogs därför slutsatsen att uppehållstiden 1,5 d i förhydrolyssteget var fullt tillräcklig för behandling av avloppsslam, och därför kunde väljas för testlinjerna med blandslam från NSVA, Gryaab och UMEVA samt för pilotförsöket med blandslam från VA SYD.

3.3.3 Försök 2 – ytterligare studier med avloppsslam från tre olika avloppsreningsverk

Under Försök 2 gjordes ytterligare studier med slam från tre olika avloppsreningsverk: NSVA, Gryaab samt UMEVA, nu med processdesign för de kontinuerliga försöken baserad på resultaten från Försök 1.

Den organiska belastningen för respektive testreaktor i *Försök 2* visas i Tabell 7.

Tabell 7 Organisk belastning i respektive testreaktor under Försök 2.

	kg VS/m ³ /d		
	NSVA	Gryaab	UMEVA
FH _{1,5 d}	23,1	26,3	13,2
RK _{Ref}	2,3	2,9	
RK _{FH}	2,3 ¹	2,9 ¹	
RK _p	2,3 ¹	2,9 ¹	

¹ Hänsyn har inte tagits till VS-reduktionen över förbehandlingssteget.

Eftersom blandslammen från de olika reningsverken hade olika TS- och VS-halt, men uppehållstiderna i respektive processteg skulle vara konstanta, blev följden att den organiska belastningen i testlinjen med blandslam från

Gryaab blev något högre, jämfört med testlinjen med blandslam från NSVA. Blandslam från UMEVA användes enbart i en förhydrolyslinje och denna med hade avsevärt lägre belastning än förhydrolyslinjerna med blandslam från NSVA och Gryaab. Blandslammen som tillsattes testlinjerna hade en TS-halt på ca 5,15 % (NSVA), 6,7 % (Gryaab) samt 3,14 % (UMEVA), samt en VS-halt på ca 3,9 % (NSVA), 4,6 % (Gryaab) och 2,3 % (UMEVA).

Uppnådda TS-respektive VS-reduktioner under *Försök 2* presenteras i Tabell 8. Samtliga värden representerar reduktionen över hela testlinjen, och inte enbart över metansteget.

Tabell 8 TS- samt VS-reduktion över respektive testlinje under *Försök 2*.

	TS-reduktion (%)		VS-reduktion (%)	
	NSVA	Gryaab	NSVA	Gryaab
RK _{Ref}	37	33	48	50
RK _{FH}	38	34	50	51
RK _p	36	31	47	48

Med blandslam från NSVA respektive Gryaab uppnåddes en något högre TS- och VS-reduktion över testlinjen med förhydrolys innan rötning, jämfört med referenslinjen. Även jämfört med pastörisering innan rötning var TS- och VS-reduktionen högre i testlinjerna där förhydrolys tillämpades innan rötning, för båda blandslammen.

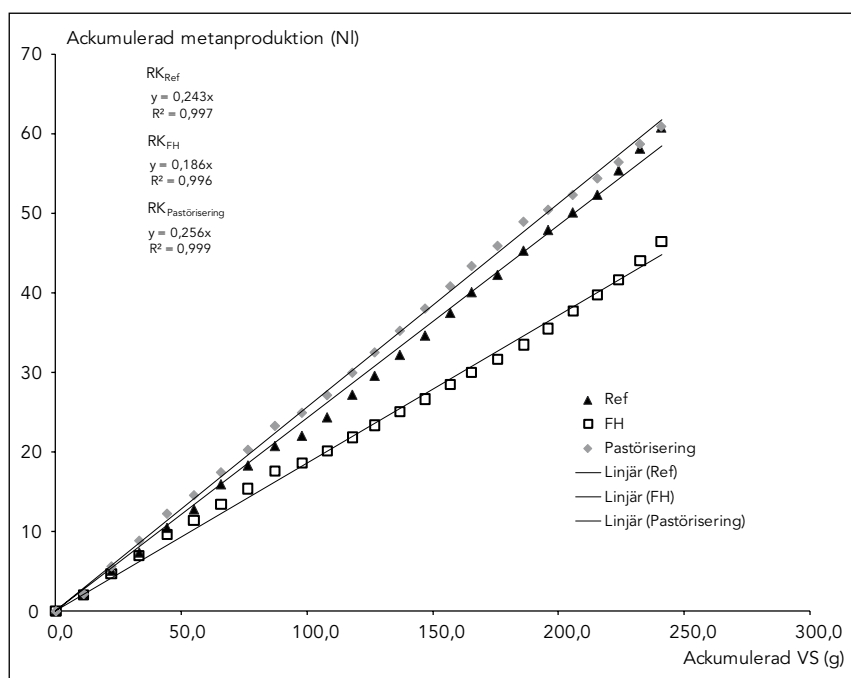
3.3.3.1 Metanutbyte och nedbrytningsgrad

Metanutbytet för testlinjerna är beräknat som lutningen på linjäranpassningen av data där ackumulerad metanproduktion plottas mot ackumulerad inmatad VS. I Figur 7 visas resultaten från dessa beräkningar för testlinjen med blandslam från NSVA.

I referenslinjen uppnåddes ett metanutbyte på 0,24 Nm³ CH₄/kg VS. Med förhydrolys innan rötning blev metanutbytet för blandslammet 0,19 Nm³ CH₄/kg VS, vilket motsvarar en minskning av det totala utbytet med ca 20 %. Minskningen kan delvis förklaras med att processtörningar uppstod vilket medförde sjunkande pH och ökade koncentrationer VFA i röt-kammaren. Inmatningen av blandslam fick därför stoppas under ett par dagar, för att sedan startas upp igen långsamt. Dessa processtörningar påverkade metanutbytet negativt. Om man bortser från data för denna period blir metanutbytet för blandslammet 0,22 Nm³ CH₄/kg VS, vilket motsvarar ett ca 8 % lägre metanutbyte jämfört med referenslinjen. TS- respektive VS-reduktionen var dock något högre över testlinjen med förhydrolys, jämfört med referenslinjen. Detta skulle kunna ha sin delförklaring i de processtörningar som uppstod i testlinjen, med högre koncentrationer av flyktiga syror som följd. Dessa syror avgår från provet vid 105° C, och leder därmed till en underskattning av TS-halt i provet.

Med pastörisering innan rötning blev metanutbytet i 0,26 Nm³ CH₄/kg VS, vilket ligger inom osäkerhetsintervallet för labmetoden.

Metanproduktionen från hydrolysen utgjorde 3 % av den totala metanproduktionen från testlinjen. Gasproduktionen från hydrolysen utgjorde ca 8 % av den totala gasproduktionen från testlinjen. Metanhalterna var under utvärderingsperioden relativt stabila i både rötkamrarna och hydrolysreak-



Figur 7 Ackumulerad metanproduktion plottad mot ackumulerad inmatad VS för testlinjen med blandslam från NSVA, inklusive metanproduktion från både förhydrolyssteg och rötsteg. Totalt metanutbyte ($\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$) visas som lutningen på respektive kurva.

torerna. Halten vätgas i den bildade gasen analyserades inte under testperioden, och kunde därför inte kvantifieras. Uppnådda metanutbyten samt metanhalt i den bildade biogasen visas i Tabell 9.

Tabell 9 Uppnådda metanutbyten vid rötning av slam från NSVA.

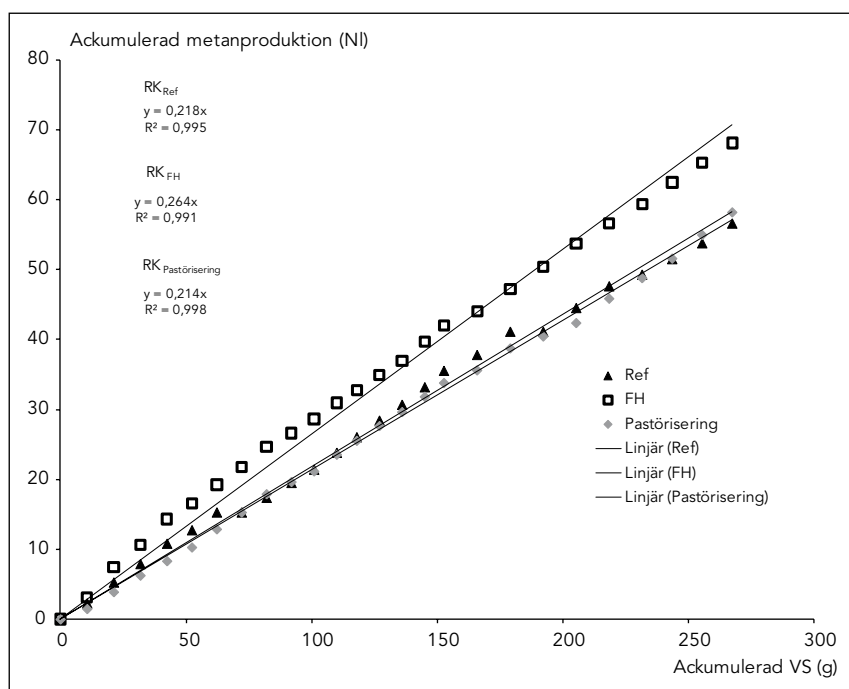
	Metanutbyte i förhydrolyssteg	Metanutbyte totalt	Metanhalt % CH_4 i förhydrolyssteg	Metanhalt % CH_4 i metansteget	Metanhalt % CH_4 totalt i bildad biogas
	$\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$	$\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$			
RK_{Ref}		0,24		64	64
$\text{RK}_{\text{FH}} 1,5 \text{ d med processtörning}$	0,005	0,19	23	66	63
$\text{RK}_{\text{FH}} 1,5 \text{ d utan processtörning}$	0,005	0,22	23	67	64
RK_p		0,26		65	65

Med termofil förhydrolysis uppnåddes en högre metanhalt i den bildade biogasen från rötsteget, men räknar man även in metanproduktionen från förhydrolyssteget blir metanhalten totalt sett i den bildade biogasen samma från denna testlinje som från referenslinjen.

I Figur 8 visas resultaten från beräkningarna av metanutbyte för testlinjen med blandslam från Gryaab.

I referenslinjen uppnåddes ett metanutbyte på $0,22 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$. Med förhydrolysis innan rötning uppnåddes ett metanutbyte på $0,26 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$, vilket är en ökning med ca 18 %. Med pastörisering innan rötning blev metanutbytet i samma storleksordning som i referenslinjen ($0,21 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$).

Metanproduktionen från hydrolysen utgjorde 4,8 % av den totala metanproduktionen från testlinje med förhydrolysis. Gasproduktionen från



Figur 8 Accumulerad metanproduktion plottad mot ackumulerad inmatad VS för testlinjen med blandslam från Gryaab, inklusive metanproduktion från både förhydrolyssteg och rötsteg. Totalt metanutbyte ($\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$) visas som lutningen på respektive kurva.

hydrolysen utgjorde ca 11 % av den totala gasproduktionen från testlinjen. Metanhaltarna var under utvärderingsperioden relativt stabila i både rötkammarna och hydrolysreaktorerna. Halten vätgas i den bildade gasen analyserades inte under testperioden, och kunde därför inte kvantifieras. Uppnådda metanutbyten samt metanhalt i den bildade biogasen visas i Tabell 10.

Tabell 10 Uppnådda metanutbyten vid rötning av slam från Gryaab.

	Metanutbyte i förhydrolyssteg	Metanutbyte totalt	Metanhalt % CH_4 i förhydrolyssteg	Metanhalt % CH_4 i metansteget	Metanhalt % CH_4 totalt i bildad biogas
	$\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$	$\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$			
RK _{Ref}		0,21	64		64
RK _{FH 1,5 d}	0,011	0,26	29	68	63
RK _p		0,22	64		64

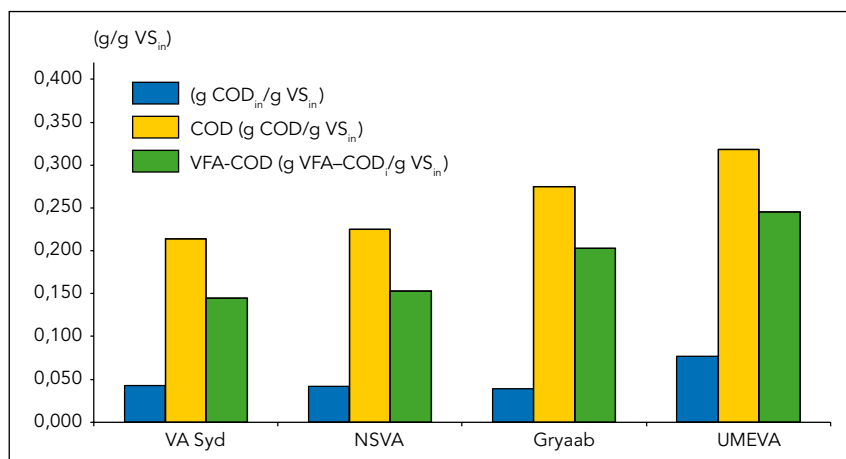
Även här är det tydligt att man med termofil förhydrolys uppnår en högre metanhalt i den bildade biogasen från rötsteget, men att när bildad metan i förhydrolysen räknas med blir resultatet att metanhalten totalt sett blir samma som från referenslinjen.

För testlinjen med blandslam från UMEVA testades endast den termofila förhydrolysen i kontinuerlig drift. I detta steg uppnåddes ett metanutbyte $0,022 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$. Metanhalten i den bildade biogasen var 24 %. Med blandslam från UMEVA uppnåddes således det högsta metanutbytet ifrån förhydrolyssteg, men eftersom efterföljande metansteget ej testades i kontinuerlig drift kan slutsatser ej dras kring hur detta hade kunnat påverka det

totala metanutbytet över hela testlinjen. Blandslammet från UMEVA hade den lägsta TS- och VS-halten av de fyra blandslam som testades, vilket innebär att denna förhydrolysreaktor hade den lägsta organiska belastningen. Samtidigt visade resultaten från karakterisering av blandslammet (se kapitel 3.3.4) att det även innehöll högst andel fett samt lägst andel kolhydrat.

3.3.3.2 COD och VFA

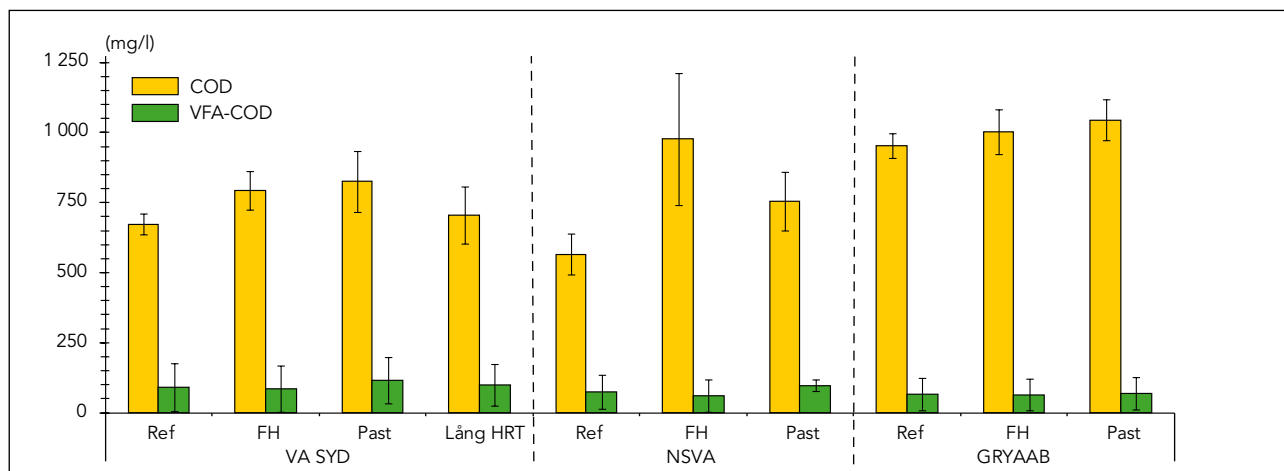
Analys av viktiga processparametrar såsom pH, VFA, COD och kväve gjordes kontinuerligt under labförsökens gång. I Figur 9 visas löst COD i inkommande blandslam, samt löst COD samt VFA-COD i hydrolyssteget. Halterna har normaliserat mot inkommande VS-halt.



Figur 9 Löst COD i inkommande blandslam (stapel längst till vänster) samt löst COD och VFA-COD i hydrolyssteget, normaliserat mot VS-halt i inkommande blandslam.

Under hydrolysen bryts proteiner, fetter och kolhydrater ner till aminosyror, fettsyror och enkla sockerarter. Organiskt bundet material övergår då till vätskefas, och koncentrationen löst COD ökar. Detta syns i Figur 9, vilken visar hur mycket COD per VS som hydrolyseras i de fyra olika testlinjerna under förhydrolyssteget. Resultaten tyder på att andelen löst COD av VS ökar kraftigt under förhydrolysen i samtliga fyra testlinjer. I inkommande blandslam är den normaliserade halten löst COD ca 0,04–0,08 g COD/g VS_{in} i de fyra blandslammen, för att sedan öka till 0,21 g COD/g VS_{in}, 0,23 g COD/g VS_{in}, 0,28 g COD/g VS_{in} samt 0,32 g COD/g VS_{in} i hydrolyssteget för testlinjerna med blandslam från VA SYD, NSVA, Gryaab respektive UMEVA. Med blandslam från UMEVA var således halten normaliserad COD högst efter förhydrolysisprocessen, jämfört med övriga blandslam. Detta kan dels kopplas till att halten redan i råslammet var högre, dels till detta blandslams sammansättning av fett/protein/kolhydrater (se 3.3.4). Den senare visade på ett högt innehåll av fett i blandslammet från UMEVA, och således ett högt energiinnehåll i det organiska materialet (VS), motsvarande en hög halt COD per VS. Resultaten i Figur 9 tyder även på att inte bara hydrolys sker i förhydrolyssteget, utan även syrabildning, vilket leder till en ökning av koncentrationen VFA-COD.

Koncentrationen löst COD samt VFA-COD i rötkammaren kan ge information om processens stabilitet och det lösta organiska materialets nedbrytbarhet. En hög/ökande VFA-koncentration indikerar instabilitet i metanproduktionen och den del av löst COD som inte omvandlats till VFA har av olika anledningar inte kunnat nyttjas av de syra- respektive ättiksyra-bildande mikroorganismerna i processen. I Figur 10 visas koncentrationen löst COD samt VFA-COD i metansteget för respektive testlinje.



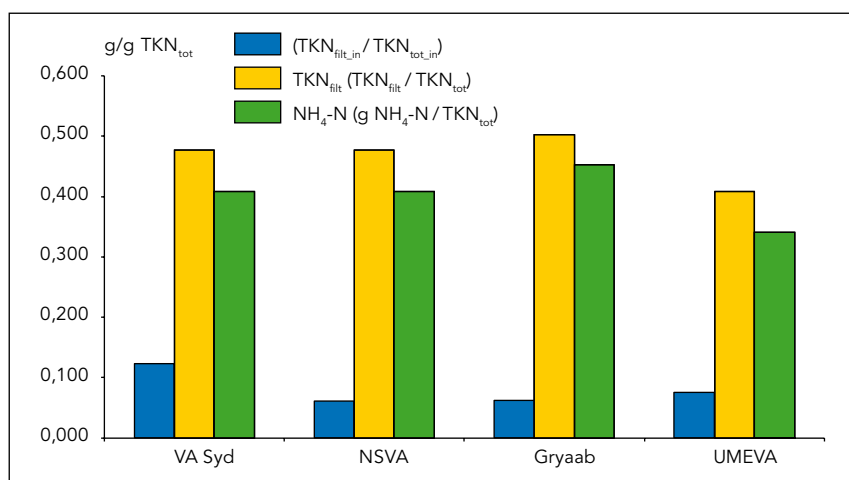
Figur 10 Koncentration löst COD samt VFA-COD i metansteget i respektive testlinje, inklusive standardavvikelse.

Resultaten i Figur 10 tyder på att förbehandling med pastörisering och förhydrolys har olika effekt på olika blandslam. I samtliga testlinjer var koncentrationen VFA-COD låg i metansteget, oavsett förbehandlingsmetod, medan koncentrationen löst COD varierade. För blandslammet från VA SYD samt från NSVA innebär förbehandlingen en något förhöjd koncentration löst COD i rötresten, medan det för blandslammet från Gryaab inte blir någon lika tydlig effekt på koncentrationen löst COD i rötresten. Den större standardavvikelsen för löst COD i rötresten från testlinjen med förhydrolys av blandslam från NSVA speglar de processtörningar som uppstod under senare delen av försöksperioden.

3.3.3.3 Kväve

Vid hydrolys av protein löses organiskt bundet kväve ut, och koncentrationen lösta kvävefraktioner (uttryckt som $\text{NH}_4\text{-N}$ och $\text{TKN}_{\text{löst}}$) ökar i vätskefasen. En effektivare hydrolys/nedbrytning av proteiner leder därför till en högre koncentration av lösta kvävefraktioner i vätskefasen. I Figur 11 visas andelen $\text{TKN}_{\text{löst}}$ i inkommande blandslam, samt $\text{TKN}_{\text{löst}}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$ i hydrolyssteg, uttryckt som andel av den totala mängden kväve (uttryckt som TKN_{tot}), för respektive testlinje.

Resultaten i Figur 11 visar på att protein hydrolyseras i förhydrolyssteg, vilket leder till en ökning av lösta kvävefraktioner. För blandslam från VA SYD, NSVA och Gryaab är det ca 0,5 g $\text{TKN}_{\text{löst}}$ /g TKN_{tot} som övergår i löst form under förhydrolysen, och av detta har en större andel ($\sim 0,4$ g $\text{NH}_4\text{-N}/\text{TKN}_{\text{tot}}$) även mineraliserats. Med blandslam från Gryaab är det en något större andel av den lösta kvävefraktionen som mineraliseras ($\sim 0,45$ g

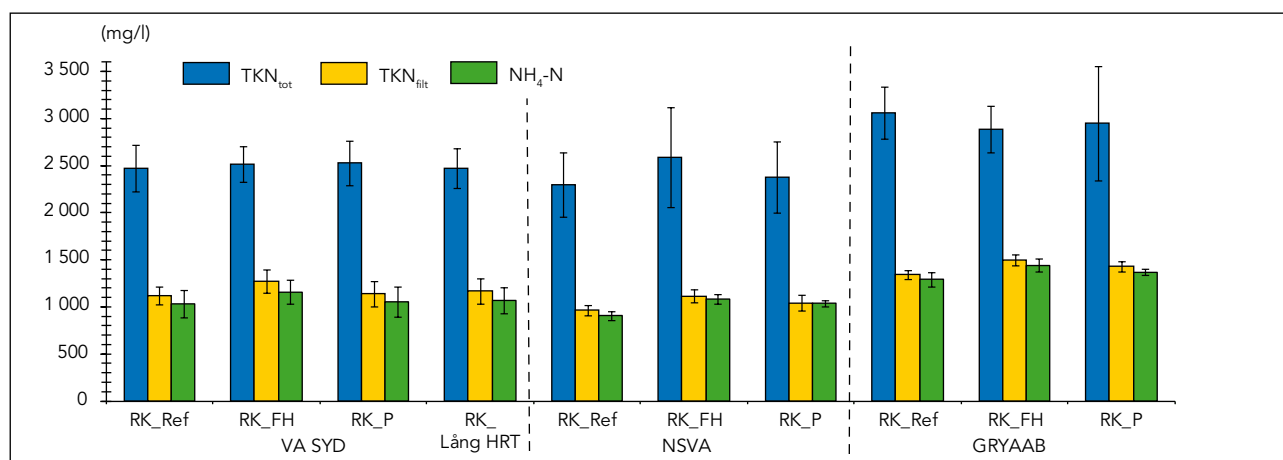


Figur 11 TKN_{filt} i inkommande blandslam (stapel längst till vänster) samt TKN_{filt} och NH_4-N i hydrolyssteg, uttryckt som andel av TKN_{tot} i inkommande blandslam.

NH_4-N / TKN_{tot}). Med blandslam från UMEVA är det dock en mindre andel av den totala mängden kväve som övergår i löst form, vilket tyder på detta blandslam innehåller en mindre andel hydrolyserbara proteiner. Resultaten från Figur 9 tydde dock på att det i testlinjen med blandslam från UMEVA var en större andel COD av VS som löstes ut under förhydrolysisprocessen, jämfört med övriga blandslam, vilket således bör utgöras till större andel av nedbrytningsprodukter från fett och kolhydrater än från proteiner.

Då en ökad nedbrytning medför en ökad mineralisering av näringsämne, kommer detta även att innebära en högre koncentration kväve i rejektivatt-net från avvattningen. Koncentrationen av lösta kvävefraktioner i röt-kam-maren speglar därför inte bara processtabiliteten i själva metansteget, men även vad internbelastningen kommer att bli då rejektivatt-net återförs till reningsprocessen. I Figur 12 visas koncentrationen av TKN_{tot} , $TKN_{löst}$ samt NH_4-N i metansteget för respektive testlinje.

I Figur 12 syns en viss ökning av $TKN_{löst}$ och NH_4-N i framförallt test-linjerna med termofil förhydrolys, men även i viss mån i testlinjerna med



Figur 12 Koncentration av N-fraktioner i röt-kam-rarna i respektive testlinje, angivet som totalkväve (mg TKN_{tot}/l), löst totalkväve (mg $TKN_{löst}/l$) samt ammoniumkväve (mg NH_4-N/l), inklusive standardavvikelse.

pastörisering, jämfört med referenslinjerna, vilket tyder på en något ökad nedbrytning av proteiner. För samtliga testlinjer ligger dock ökningarna inom standardavvikelsen och mätosäkerheten för respektive analys, och kan därför inte tolkas som en säkerställd effekt.

Vidare är det tydligt att standardavvikelsen för TKN_{tot} är högre än för övriga N-fraktioner, vilket grundar sig i större analysvarigheter vid analys av totala prover jämfört med vid analys av filtrat. Över respektive testlinje ska den totala koncentrationen av kväve (TKN_{tot}) vara konstant, eftersom kväve i väldigt liten utsträckning avgår under rötning, endast ombildas till löst form.

3.3.3.4 pH

pH har under båda försöksperioderna legat kring 7,3 i metansteget för samtliga testlinjer, med ett något högre pH-värde i testlinjen som behandlade blandslam från Gryaab. I förhydrolyssteg låg pH kring 5,9, med ett något högre värde i förhydrolyisreaktorn som behandlade blandslam från Gryaab (se Tabell 11).

Tabell 11 pH i förhydrolyssteg respektive metansteget i de fyra olika testlinjerna under försöksperiodens gång.

Processteg	VA SYD	NSVA	Gryaab	UMEVA
FH _{1,5 d}	5,8	5,9	6,2	6,1
FH _{2,5 d}	5,9			
FH _{3,5 d}	5,9			
RK _{Ref}	7,3	7,1	7,4	
RK _{FH 1,5 d}	7,4	7,2	7,5	
RK _{FH 2,5 d}	7,4			
RK _{FH 3,5 d}	7,4			
RK _{Pastörisering}	7,3	7,2	7,4	
RK _{LångHRT}	7,3			

3.3.4 Karakterisering

Vid ett antal tillfällen under respektive försöksperiods gång utfördes karakterisering med avseende på fett, protein och kolhydrater på prov från inkommande blandslam, samt från förbehandlingssteg (pastörisering samt förhydrolys) och alla rötammare (för analysmetoder och beräkningar se Bilaga A). Resultaten av utförd karakterisering ger en grov uppskattning på respektive substrats sammansättning av fett, protein och kolhydrater. I karakteriseringen görs ingen skillnad på olika typer av proteiner, vilket är en förenkling av verkliga förhållanden. Mängden kolhydrater analyseras ej direkt, utan beräknas som allt VS som inte är fett eller protein.

Karakterisering gjordes vid fyra tillfällen med blandslam från VA SYD, vid två tillfällen med förhydrolyserat blandslam från VA SYD, vid ett tillfälle med pastöriserat samt rötat blandslam från VA SYD, vid två tillfällen med obehandlat respektive förbehandlat blandslam från UMEVA, samt vid två tillfällen med obehandlat, förbehandlat samt rötat blandslam från NSVA och GRYAAB. Resultaten presenteras i Tabell 12 samt Tabell 14.

Tabell 12 Resultat från karakterisering av blandslam. Presenterade värden är medelvärden, med standardavvikelse inom parentes.

	Fett (g/l)	Andel av VS (%)	Protein (g/l)	Andel av VS (%)	Kol- hydrat (g/l)	Andel av VS (%)	Inert (g/l)	Andel av TS (%)	TS (g/l)
VA SYD									
Inkommande blandslam	5,7 (0,5)	15	14,4 (3,4)	37	18,3 (1,8)	48	11,4 (1,5)	23	49,8 (5,3)
NSVA									
Inkommande blandslam	5,9 (0,5)	16	13,2 (1,2)	35	18,2 (0,0)	49	12,8 (0,2)	26	50,0 (0,4)
Gryaab									
Inkommande blandslam	5,2 (0,1)	11	15,0 (1,3)	32	27,1 (5,9)	57	20,2 (1,2)	30	67,5 (5,7)
UMEVA									
Inkommande blandslam	6,8 (0,8)	27	9,4 (1,1)	37	9,3 (0,7)	37	9,7 (0,1)	28	35,2 (0,9)

De olika avloppsreningsverken skiljer sig åt dels i storlek och processdesign, dels i karaktär på inkommande avloppsvatten. Resultaten från de utförda karakteriseringarna bekräftar olikheterna mellan de olika avloppsreningsverken och visar på att sammansättningen av fett, protein och kolhydrater varierar mycket för olika blandslam. Enligt de analyser och beräkningar som utförts verkar blandslammen från VA SYD samt NSVA likna varandra i sammansättning, medan blandslammet från Gryaab har ett högre innehåll av kolhydrater samt ett lägre innehåll av fett, och blandslammet från UMEVA har ett högre fettinnehåll samt lägre kolhydratinnehåll. För andel inert material liknar samtliga fyra blandslam varandra, med en något högre andel inert material i blandslammet från Gryaab. Det inerta materialet i blandslammet kommer att gå opåverkat igenom rötningsprocessen. I tabellen visas även TS-halten för respektive blandslam. Standardavvikelsen för TS-halten visar på hur denna varierar över tiden, vilket innebär att blandslammen från VA SYD och Gryaab har varierat mer i TS-halt under försöksperioderna än övriga blandslam.

Utifrån innehållet av fett, protein och kolhydrater i de fyra blandslammen kunde en teoretisk metanpotential för respektive slam beräknas (för beräkningsmetod se Bilaga A). Data presenteras i Tabell 13, tillsammans med data över uppnådda metanpotentialer i utförda metanpotentialförsök (se kapitel 3.3.5).

Tabell 13 Beräknad metanpotential utifrån utförd karakterisering av blandslam, respektive data över uppnådda metanpotentialer i utförda metanpotentialförsök.

	Beräknad metanpotential (Nm ³ CH ₄ /kg VS)	Uppnådd metanpotential i BMP (Nm ³ CH ₄ /kg VS)
VA SYD		
Inkommande blandslam	0,52	0,38
NSVA		
Inkommande blandslam	0,54	0,33
Gryaab		
Inkommande blandslam	0,51	0,32
UMEVA		
Inkommande blandslam	0,61	0,47

Beräknas det teoretiska metanutbytet utifrån sammansättningen på respektive blandslam blir det maximala teoretiska utbytet 0,52 Nm³ CH₄/kg VS,

0,54 Nm³ CH₄/kg VS, 0,51 Nm³ CH₄/kg VS samt 0,61 Nm³ CH₄/kg VS för obehandlat slam från VA SYD, NSVA, Gryaab respektive UMEVA. Den högre beräknade metanpotentialen för blandslammet från UMEVA har sin förklaring i det högre innehållet av fett i detta blandslam, vilket pga att det är mycket energirikt ger upphov till en högre metanproduktion, jämfört med kolhydrater och protein. Även vid utförd metanpotentialförsök uppnåddes en högre metanpotential för detta blandslam, jämfört med för övriga blandslam.

Vid utförda metanpotentialförsök uppnåddes en lägre metanpotential för samtliga blandslam, jämfört med den beräknade metanpotentialen. En viss del av det organiska materialet används till tillväxt, och ger därmed inte upphov till metanproduktion. En ytterligare orsak till skillnaden i resultat är att blandslammen kan innehålla svårnedbrytbara proteinfraktioner, celldelar och fibrer, vilka inte bryts ner anaerobt eller inte är tillgängliga för nedbrytning. Då den använda karakteriseringsmetoden inte särskiljer dessa svårnedbrytbara fraktioner och inte heller skiljer på olika typer av fett, proteiner och kolhydrater, kan slutsatsen dras att den grova karakteriseringen inte är tillräcklig för att förutsäga substratens metanpotential.

I Tabell 14 visas resultaten från karakteriseringen av förbehandlat respektive rötat blandslam från de fyra reningsverken. Från resultaten kan nedbrytningen av fett, protein och kolhydrat följas genom respektive testlinjes delsteg.

Tabell 14 Resultat från karakterisering av obehandlat, förhydrolyserat (FH), pastöriserat (P) samt rötat (RK) blandslam från respektive testlinje. Presenterade värden är medelvärden, med standardavvikelse inom parentes.

	Fett (g/l)	Protein (g/l)	Kolhydrat (g/l)	Inert (g/l)	TS (g/l)
VA SYD					
Obehandlat blandslam	5,7 (0,5)	14,4 (3,4)	18,3 (1,8)	11,4 (1,5)	49,8
FH	6,4 (1,9)	10,2 (1,3)	12,7 (2,5)	15,9 (0,7)	45,2
P	5,3	18,1	15,7	12,8	49,8
RK _{ref}	1,8	9,4	10,0	10,9	32,2
RK _{FH}	2,2	8,8	8,9	11,3	31,6
RK _p	1,9	7,5	11,3	11,2	32,0
NSVA					
Obehandlat blandslam	5,9 (0,5)	13,1 (1,2)	18,3 (0,1)	12,8 (0,2)	50,0
FH	7,1 (0,6)	9,4 (0,3)	17,7 (0,1)	12,2 (1,3)	46,4
P	6,4 (0,1)	9,5 (0,8)	23,4 (2,4)	13,4 (0,5)	52,6
RK _{ref}	1,3 (0,0)	8,9 (0,1)	9,9 (0,5)	11,7 (0,1)	31,8
RK _{FH}	1,8 (0,4)	8,4 (1,0)	9,0 (0,4)	12,0 (0,1)	31,2
RK _p	2,0 (0,4)	8,6 (1,0)	9,8 (0,7)	12,3 (0,0)	32,7
Gryaab					
Obehandlat blandslam	5,2 (0,1)	15,0 (1,3)	27,1 (5,9)	20,0 (1,2)	67,5
FH	6,1 (1,1)	10,5 (0,6)	22,7 (0,9)	18,8 (1,6)	58,1
P	6,8 (0,1)	17,0 (0,3)	23,1 (3,3)	20,1 (0,8)	67,0
RK _{ref}	1,8 (0,2)	9,9 (0,0)	11,6 (0,8)	18,0 (0,5)	41,2
RK _{FH}	1,7 (0,0)	9,2 (1,6)	11,2 (1,6)	17,7 (0,2)	39,8
RK _p	2,1 (0,1)	10,0 (0,6)	11,3 (1,3)	18,0 (0,4)	41,4
UMEVA					
Obehandlat blandslam	6,8 (0,8)	9,4 (1,1)	9,3 (0,7)	9,7 (0,1)	35,2
FH	6,9 (0,6)	6,5 (0,4)	8,8 (0,8)	9,2 (0,8)	31,3

Resultaten från Tabell 14 visar på att det till största del är protein som bryts ner i den termofila förhydrolysen. Även kolhydrater bryts ner till viss del,

medan fett inte bryts ner under förhydrolyssteg. Detta mönster återfinns hos samtliga fyra testlinjer.

I det rötade slammet för samtliga tre testlinjer (VA SYD, NSVA, Gryaab) kan en tendens till ökad nedbrytning av proteiner ses i testlinjerna med förhydrolys innan rötning, jämfört med referenslinjerna. Ingen signifikant skillnad kan dock påvisas, vilket bekräftas av resultaten från Figur 12, där en viss ökning av $\text{TKN}_{\text{löst}}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$ i testlinjerna med termofil förhydrolys kunde ses, men denna ökning låg inom standardavvikelsen för respektive analys, och kan därför inte antas som en säkerställd effekt. För fett och kolhydrater kunde ingen signifikant skillnad påvisas i testlinjerna med förhydrolys respektive pastörisering innan rötning, jämfört med referenslinjerna.

3.3.5 Metanpotentialförsök och cykelstudier

3.3.5.1 Metanpotentialförsök

Metanpotentialförsök utfördes med samtliga fyra blandslam (VA SYD, NSVA, Gryaab samt UMEVA) för att undersöka vilken maximal metanbildningspotential som kunde uppnås med respektive slam (för metod se Bilaga A). För att få ett mått på "förbehandlingspotentialen" för respektive blandslam sattes även en serie med autoklaverat blandslam upp för samtliga fyra testlinjer, för att simulera en relativt kraftfull förbehandlingsmetod. I försöken med blandslam från NSVA, Gryaab och UMEVA sattes även testlinjer med förhydrolyserat blandslam upp, och i försöket med blandslam från UMEVA sattes även en testlinje med pastöriserat blandslam upp. Samtliga utbyten är relaterade till VS-halt i obehandlat blandslam. För resultatet från förhydrolyserat blandslam har uppnått metanutbyte i förhydrolyssteg från det kontinuerliga labförsöket (se kapitel 3.3.2 samt kapitel 3.3.3.10) lagts till uppnått metanutbyte i testflaskan.

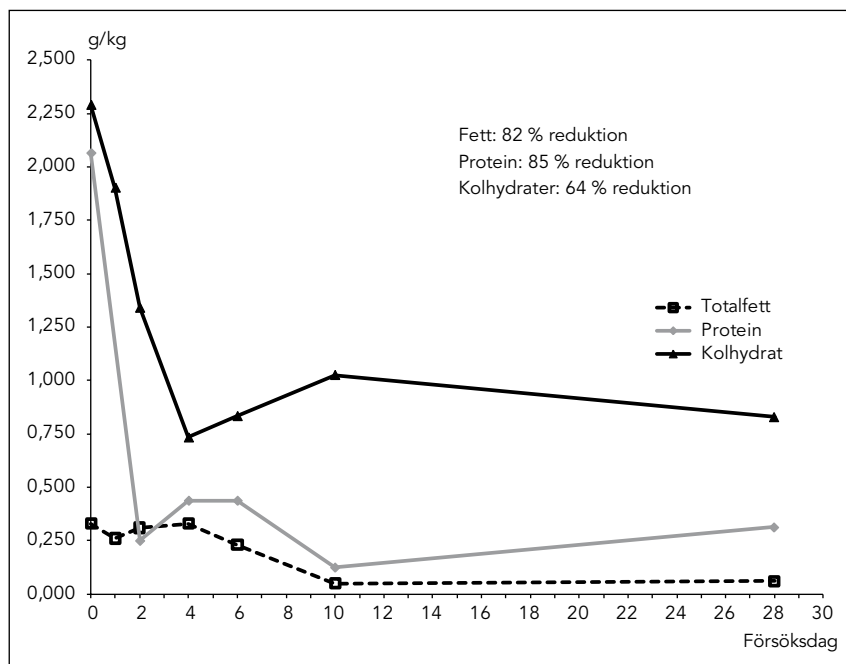
Resultaten från metanpotentialförsöken visas i Tabell 15, samt i Bilaga B.

Tabell 15 Uppnådd metanpotential för respektive blandslam vid utfört metanpotentialförsök.

	Uppnådd metanpotential ($\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kgVS}$)			
	VA SYD	NSVA	Gryaab	UMEVA
Obehandlat blandslam	0,38	0,33	0,32	0,47
Autoklaverat blandslam	0,40	0,32	0,30	0,40
Förhydrolyserat blandslam		0,31	0,32	0,41
Pastöriserat blandslam				0,40

Resultaten från utförda metanpotentialförsök visar på att för samtliga fyra blandslam ger förbehandling med autoklivering, pastörisering eller förhydrolys ingen avsevärd effekt på metanutbytet, vilket tyder på att blandslamen är relativt lättnedbrytbara, samt att den del organiskt material som finns kvar efter rötning inte kan göras tillgänglig genom applicering av de testade förbehandlingsmetoderna. Nedbrytningen gick inte heller fortare i flaskorna med förbehandlat material (se Bilaga B). För att, om möjligt, komma åt dessa fraktioner krävs således en kraftigare förbehandlingsteknik än de som testats i denna studie. För blandslammet från UMEVA är den uppnådda metanpotentialen högre än för övriga blandslam, vilket har sin grund i den högre andelen fett i detta blandslam.

Under metanpotentialförsöket med blandslam från VA SYD gjordes även analyser av TS, VS, pH, kväve, VFA samt totalfett, under försökets gång, för att nedbrytningsförloppet i testflaskorna skulle kunna följas. Resultaten visas i Figur 13, och visar på att den största andelen protein (ca 80 %) bryts ner inom 2 dagar via hydrolys. Nedbrytningen av fett startar efter ca 4 dagar, och efter ca 10 dagar har 82 % brutits ner. Av kolhydraterna bryts ca 60 % ner inom ca 8 dagar.



Figur 13 Nedbrytning av fett, protein och kolhydrater vid rötning av blandslam från VA SYD.

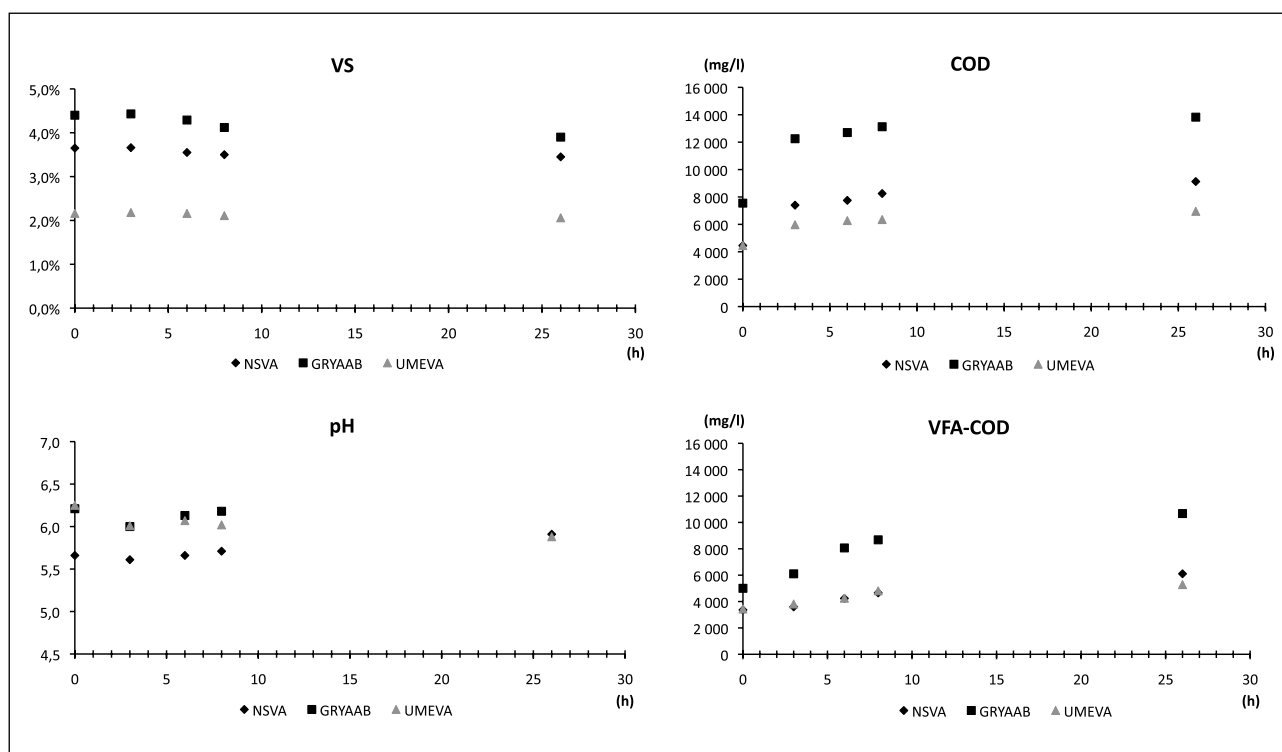
Löst COD samt VFA ökade under de första 2 dagarna, men förbrukades sedan av metanbildarna, vilka börjar producera metan inom några dagar från försöksstart. Vid försökets slut var metanhalten i den producerade biogasen 64 % (obehandlat blandslam) respektive 65 % (autoklaverat blandslam).

3.3.5.2 Cykelstudie med blandslam från NSVA, Gryaab och UMEVA

En cykelstudie utfördes för att kartlägga nedbrytningsförloppet i förhydrolyssteget med blandslam från NSVA, Gryaab och UMEVA. Studien genomfördes under 24 h för att undersöka vad som händer i hydrolyssteget under en matningscykel. Prov togs ut ifrån förhydrolysreaktorerna vid fem tillfällen under en 24-timmars period. Resultaten finns presenterade i Figur 14 och Figur 15.

I Figur 14 kan utläsas att hydrolysen startar omedelbart och fortsätter under hela det första dygnet, men att största delen av nedbrytningsprocessen sker under de första 10 timmarna. Inom 24 h fördubblas koncentrationerna av VFA-COD och löst COD för samtliga tre testreaktorer. Av denna ökning sker den största delen av COD-ökningen inom bara ett par timmar.

pH är stabilt kring 5,6–5,7 under den termofila förhydrolysen av blandslam från NSVA. För testreaktorn med blandslam från Gryaab varierar pH



Figur 14 Resultat från cykelstudie av nedbrytningsförloppet vid termofil förhydrolys av blandslam från NSVA, Gryaab och UMEVA. Nedbrytning av VS (överst till vänster), koncentration av löst COD (överst till höger), pH (nederst till vänster) samt koncentration av VFA-COD (nederst till höger) i förhydrolysteget under ett dygn.

från 6,2 vid cykelstudiens start, till 6,0 efter 3 h för att sedan öka igen och lägga sig kring 6,2. Med blandslam från UMEVA minskar pH från 6,3 till 6,0 under 24 h perioden med termofil förhydrolys.

Både TS och VS reduceras under cykelstudien för samtliga tre testreaktorer. VS reduceras från 3,7 %; 4,4 % och 2,2 %, till 3,5 %; 4,1 % och 2,1 % för NSVA; Gryaab respektive UMEVA.

Vid hydrolys av protein löses organiskt bundet kväve ut, och koncentrationen $\text{NH}_4\text{-N}$ och $\text{TKN}_{\text{löst}}$ ökar i vätskefasen. Skillnaden i $\text{TKN}_{\text{löst}}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$ i vätskefasen representerar andelen aminosyror som ej hunnit ombildas till $\text{NH}_4\text{-N}$, och således ej gått vidare till syrabildning. För att få med både protein som fermenterats och protein som enbart hydrolyserats, beräknades därför partikulär proteinfraktion som

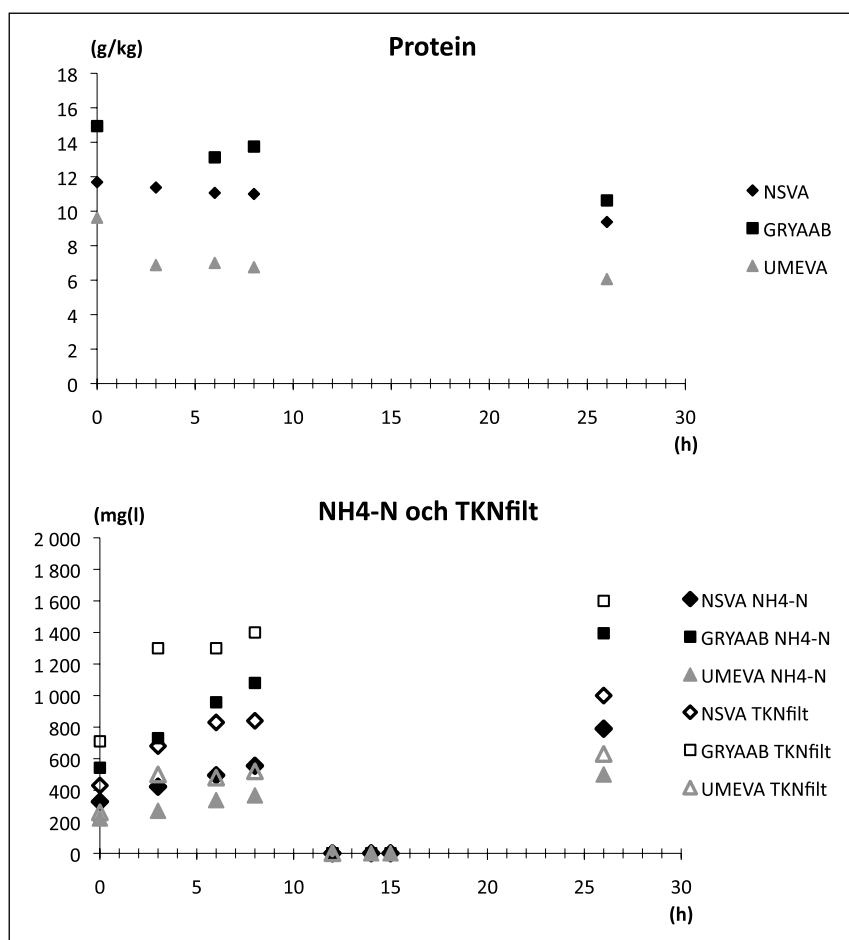
$$\text{Partikulärt protein} = (\text{TKN}_{\text{tot}} - \text{TKN}_{\text{löst}}) \cdot 6,25$$

För ytterligare beskrivning av beräkning av protein hänvisas till Bilaga A.

I Figur 15 visas nedbrytningen av protein, respektive ökningen av lösta kvävefraktioner under cykelstudien.

Nedbrytning av protein och kolhydrater kunde påvisas inom 24 h. Nedbrytning av fett kunde däremot ej påvisas. I samtliga tre testlinjer ökade koncentrationen av lösta kvävefraktioner under dygnet, vilket bekräftar nedbrytningen av protein. Ökningen av andel löst kväve i % beräknades som

$$\text{Ökning (\%)} = \frac{(\text{löst } N_{\text{före}} - \text{löst } N_{\text{efter}})}{\text{TKN}_{\text{tot}}}$$



Figur 15 Resultat från cykelstudie av nebrytningsförloppet vid termofil förhydrolys av blandslam från NSVA, Gryaab och UMEVA. Koncentration av partikulärt protein (figur överst) samt koncentration av lösta kvävefraktioner (figur underst) i förhydrolyssteg under ett dygn.

Under de 24 h var ökningen av andelen TKN_{filt} 23 %, 27 % samt 23 %, samt ökningen av andelen NH_4-N 19 %, 26 % samt 17 %, för testlinjerna med blandslam från NSVA, Gryaab respektive UMEVA. I linjen med blandslam från Gryaab var det således en större andel av hydrolyserat protein som gick vidare till syrabildning och därmed ombildades till NH_4-N .

3.3.6 Bakteriologiska tester

Vid ett antal tillfällen under Försök 1 och Försök 2 togs prov ut för bakteriologisk analys. Prov togs ut från inkommande blandslam, från förhydrolyserat blandslam, från pastöriserat blandslam samt från rötkamrarna och skickades till Statens Veterinärmedicinska Anstalt (SVA) för analys. Analysmetod för de bakteriologiska testerna finns angiven i Bilaga A. Resultat från bakteriologiska tester av rötat blandslam presenteras i Tabell 16 t.o.m. Tabell 18.

Från testperioden då slam från Gryaab samt NSVA testades finns dessvärre endast analysresultat från ett provtagningstillfälle, eftersom det första paketet med prover till SVA fastnade i posten, och proverna därmed ej kunde användas för analys.

Tabell 16 Analysresultat av bakteriologiska tester för inkommande blandslam.

	Salmonella	Enterokocker (CFU/g)	E. Coli (CFU/g)
VA Syd	PÅVISADE	156 400 (148 522)	374 000 (242 446)
NSVA	PÅVISADE	110 000	410 000
Gryaab	PÅVISADE	180 000	400 000

Standardavvikelsen för analysresultaten från 5 olika tillfällen för blandslam från VA SYD är angivet inom parentes. För övriga blandslam härstammar analysresultaten från ett provtagningstillfälle.

I samtliga tre blandslam kunde både höga halter patogener påvisas, samt förekomst av salmonella. Blandslam från VA SYD skickades för analys hos SVA vid fem olika tillfällen, och resultaten från dessa analysresultat visar på en mycket stor variation i innehåll av de aktuella mikroorganismerna i blandslammet.

Tabell 17 Analysresultat av bakteriologiska tester för förhydrolyserat (FH) samt pastöriserat (P) blandslam.

	Salmonella	Enterokocker (CFU/g)	E. Coli (CFU/g)
Gränsvärde vid 4,7 % TS	EJ PÅVISADE	47	47
VA SYD			
FH 1,5 d	EJ PÅVISADE	< 100	51 (57)
FH 2, 5 d	EJ PÅVISADE	< 100	55 (64)
FH 3,5 d	EJ PÅVISADE	< 100	180 (240)
P	EJ PÅVISADE	< 100	< 10
Gryaab			
FH	PÅVISADE	400	1 100
P	EJ PÅVISADE	< 100	< 10
NSVA			
FH	PÅVISADE	< 100	10 000
P	EJ PÅVISADE	< 100	< 10

Standardavvikelsen för analysresultaten från 2 olika tillfällen för förbehandlat blandslam från VA SYD är angivet inom parentes. För övriga förbehandlade blandslam härstammar analysresultaten från ett provtagningstillfälle.

I Tabell 17 visas resultat från bakteriologiska tester utförda på förbehandlat blandslam från VA SYD, Gryaab samt NSVA. Gränsvärde enligt de krav som ställs i förslaget till ny slamförordning är angivna överst i tabellen (för mer information om hygieniseringskraven, se kapitel 2.3), omräknade till CFU/g_{vätvikt}. En TS-halt på 4,7 % i slammen har använts för denna omräkning, eftersom detta motsvarar ett medelvärde för de förbehandlade slammen från de olika testlinjerna. Med en TS-halt på 4,7 % motsvarar de uppställda hygieniseringskraven att antalet enterokocker respektive E. Coli måste vara mindre än 47 CFU/g_{vätvikt} för att uppnå de föreslagna hygieniseringskraven.

Resultaten visar att både termofil förhydrolys och pastörisering resulterade i avlägsnande av salmonella i blandslammet från VA SYD. Med blandslam från Gryaab samt NSVA kunde salmonella påvisas efter termofil förhydrolys men ej efter pastörisering.

Förbehandling med pastörisering gav i samtliga fall en reduktion av enterokocker samt E. Coli till under detektionsnivåerna. Förbehandling med termofil förhydrolys gav i samtliga fall, förutom med blandslam från Gryaab, en reduktion av enterokocker till under detektionsnivån. Trots reduktion av enterokocker till under detektionsnivån uppnås dock inte det uppställda hygieniseringskravet på enterokocker, vilket säger att antalet enterokocker skall vara mindre än 1000 CFU/g_{TS}, vilket med 4,7 % TS motsvarar 47 CFU/g_{vätvikt}.

För blandslammet från VA SYD var antalet E. Coli efter termofil förhydrolys högre än lägsta detektionsnivån vid provtagningstillfälle 1, men vid provtillfälle 2 var antalet E. Coli under detektionsnivån för samtliga tre uppehållstider (1,5; 2,5; 3,5 d). Detta innebär att det föreslagna kravet på mindre än 1 000 CFU/gTS, motsvarande 47 CFU/g_{våtvikt}, uppnåddes för blandslammet från VA SYD vid det andra provtagningstillfället. För blandslammen från Gryaab samt NSVA visade sig den termofila förhydrolysen ej resultera i reduktion av E. Coli till under föreslaget gränsvärde.

Med pastörisering uppnåddes en reduktion av E. Coli till under detektionsnivån för samtliga blandslam. Detta innebär att det föreslagna kravet på mindre än 1 000 CFU/gTS uppnåddes med pastörisering. Resultat från bakteriologiska tester av rötat blandslam presenteras i Tabell 18.

Tabell 18 Analysresultat av bakteriologiska tester för rötat blandslam. Samtliga analysresultat härstammar från ett provtagningstillfälle.

	Salmonella	Enterokocker (CFU/g)	E. Coli (CFU/g)
Gränsvärde vid 3,5 % TS	EJ PÅVISADE	35	35
VA SYD			
RK _{ref}	EJ PÅVISADE	2800	1150
RK _{FH 1,5 d}	EJ PÅVISADE	100	10
RK _{FH 2,5 d}	EJ PÅVISADE	< 100	100
RK _{FH 3,5 d}	EJ PÅVISADE	< 100	140
RK _{Past}	EJ PÅVISADE	*	*
RK _{Lång HRT}	EJ PÅVISADE	2500	2900
Gryaab			
RK _{ref}	PÅVISADE	6 500	1 300
RK _{FH 1,5 d}	EJ PÅVISADE	400	100
RK _{Past}	EJ PÅVISADE	< 100	< 10
NSVA			
RK _{ref}	PÅVISADE	4 300	1 500
RK _{FH 1,5 d}	EJ PÅVISADE	< 100	5 100
RK _{Past}	PÅVISADE	< 100	100 000

* Analysresultat anses ej tillförlitliga.

I Tabell 18 visas resultat från bakteriologiska tester utförda på rötat blandslam från VA SYD, Gryaab samt NSVA. Gränsvärde enligt de krav som ställs i förslaget till ny slamförordning är angivna överst i tabellen (för mer information om hygieniseringskraven, se kapitel 2.3), omräknade till CFU/g_{våtvikt}. En TS-halt på 3,5 % i slammen har använts för denna omräkning, eftersom detta motsvarar ett medelvärde för de rötade slammen från de olika testlinjerna. Med en TS-halt på 3,5 % motsvarar de uppställda hygieniseringskraven att antalet enterokocker respektive E. Coli måste vara mindre än 35 CFU/g_{våtvikt} för att uppnå de föreslagna hygieniseringskraven.

För samtliga rötkammare togs prov ut vid ett tillfälle och skickades till SVA för bakteriologiska tester. De rötkammare som rötat obehandlat blandslam (RK_{ref}) innehöll alla högre halter av enterokocker än de rötkammare som rötat förbehandlat blandslam. I två fall (Gryaab samt NSVA) kunde salmonella påvisas i rötkamrarna som rötade obehandlat blandslam. En längre uppehållstid i rötkammaren påverkade inte förekomsten av enterokocker eller E. Coli i det rötade blandslammet från VA SYD.

Med pastörisering uppnåddes en reduktion av enterokocker i röt-kammarna till under detektionsnivån i samtliga fall. Trots detta kunde inte det uppställda hygieniseringskravet på enterokocker uppnås, eftersom detta säger att antalet enterokocker skall vara mindre 35 CFU/g_{våtvikt}.

E. Coli reducerades till under detektionsnivån i fallet med pastöriserat blandslam från Gryaab, vilket innebär att det föreslagna kravet på mindre än 1 000 CFU/gTS uppnåddes i detta fall.

I röt-kammaren som rötat pastöriserat blandslam från NSVA är dock antalet E. Coli orimligt hög.

Med termofil förhydrolys innan rötning uppnåddes en reduktion av enterokocker till detektionsnivån (100) eller under detektionsnivån i fyra fall av fem. Precis som diskuterats tidigare innebär detta dock inte att det uppställda hygieniseringskravet på enterokocker kunde uppnås, eftersom detta säger att antalet enterokocker skall vara mindre 35 CFU/g_{våtvikt}.

E. Coli reducerades till 10 CFU/g_{våtvikt} i ett fall (RKFH1,5d), men låg för övriga testlinjer med förhydrolys på 100 CFU/g_{våtvikt} eller högre i rötslammet. Detta innebär att hygieniseringskravet på E. Coli ej kunde uppnås i dessa fall. I ett fall (RKFH med blandslam från NSVA) var antalet E. Coli högre i rötslammet från testlinjen med förhydrolys jämfört med referenslinjen.

3.4 Diskussion

Målet med laboratorieförsöken var att klarlägga vilka förutsättningar olika slamegenskaper och processutformningar ger för att termofil förhydrolys, alternativt pastörisering, ska ge positiv effekt på rötning. Resultaten från utförda labbförsök visar på att en uppdelning av rötningsprocessen i två faser inte alltid medför ett ökat metanutbyte från avloppsslammet. Med termofil förhydrolys innan rötning uppnåddes i ett fall ett högre metanutbyte för blandslammet (Gryaab), i ett fall ett lägre metanutbyte (NSVA) och i ett fall ett metanutbyte motsvarande det metanutbyte som uppnåddes i referenslinjen (VA SYD). Förbehandling med pastörisering medförde ej att ett högre metanutbyte uppnåddes för något av de testade blandslammen. Uppkomsten av vätgas i den bildade biogasen har ej analyserats under laboratorieförsöken, varför utredning av vätgasbildning i förhydrolyssteg ej har kunnat kvantifieras. Detta har istället utretts i det utförda pilotförsöket.

Att ett högre metanutbyte uppnåddes med förhydrolys av blandslam från Gryaab skulle kunna kopplas till dels blandslammets sammansättning av fett/protein/kolhydrat, dels till den organiska belastningen över testlinjen. Karakterisering av blandslammet från Gryaab visade på ett högre innehåll av kolhydrater, samt ett något lägre innehåll av fett, jämfört med övriga blandslam. Vidare visar resultaten från karakterisering av testlinjens olika delsteg på en effektiv nedbrytning av protein, vilken troligen beror på att proteinerna i detta blandslam till största del är lättnedbrytbara. Blandslammet från Gryaab hade även högst TS- respektive VS-halt, vilket medförde att den organiska belastningen över testlinjen var högre än för övriga testlinjer.

För samtliga blandslam uppnåddes en högre TS- och VS-reduktion över de testlinjer som tillämpade termofil förhydrolys innan rötning, jämfört med referenslinjerna. Denna ökning i reduktion kunde ej styrkas av en högre metanproduktion. Vid uppdelning av röttningsprocessen i två faser är det möjligt att en del av metanpotentialen går förlorad då vätgas och koldioxid avgår. För att tillgodogöra sig denna måste hydrolysgasen föras in i röttningssteget, vilket ej var praktiskt möjligt i labbskala. Vidare kan en del flyktigt organiskt material ha avgått i hydrolyssteget med den bildade gasen, vilket ytterligare medför att metanpotential gått förlorad. Slutligen är mätosäkerheten vid låga gasflöden stor, vilket innebär att bidraget från förhydrolyssteget eventuellt underskattades.

Termofil förhydrolys innan rötning medförde en något förhöjd koncentration av löst COD i rötresten för testlinjerna med blandslam från NSVA och VA SYD, men ej för testlinjen med blandslam från Gryaab. I samtliga tre testlinjer syntes en tendens till att termofil förhydrolys innan rötning ger en viss ökning av lösta kvävefraktioner i rötresten, till följd av en mer långtgående nedbrytning av protein. Både näringsämnen och COD medför en ökad internbelastning när rejektivattnet återförs till reningsprocessen.

Laboratorieförsöken med avloppsslam från VA SYD, NSVA, Gryaab och UMEVA visar på att blandslammen från dessa fyra reningsverk är relativt lättnedbrytbara, men visade även på att det finns svårtillgängligt organiskt material kvar i blandslammen efter rötning vilket skulle kunna bli tillgängligt för metanproduktion. För att göra detta material tillgängligt för metanproduktion krävs dock troligen att en kraftfullare förbehandlingsteknik tillämpas innan rötning.

Utvärdering av optimal uppehållstid i förhydrolysteget med blandslam från VA SYD visade på att uppehållstiden 1,5 d var tillräckligt för att uppnå en hydrolys av organiskt material vid 55° C. Nedbrytning av protein och kolhydrater startade omedelbart i förhydrolysteget och ledde till en ökning av löst COD, VFA-COD samt lösta kvävefraktioner i det förhydrolyserade materialet. För att kartlägga nedbrytningsförloppet i förhydrolysteget utfördes även en cykelstudie över detta steg med blandslam från NSVA, Gryaab och UMEVA. Resultaten från cykelstudien styrker slutsatsen att en uppehållstid på 1,5 d i förhydrolysteget är fullt tillräcklig för att uppnå en hydrolys av organiskt material i blandslam, och visar även på att en kortare uppehållstid är 1,5 d skulle kunna vara möjlig. Detta var dock inte praktiskt möjligt att testa i semikontinuerlig drift i labbskala.

Analys av resultaten från de bakteriologiska testerna visar på svårtydbara resultat. Termofil förhydrolys innan rötning innebär i samtliga fall att salmonella ej kunde påvisas i rötresten, samt att antalet enterokocker var lika med eller lägre än detektionsgränsen i fyra fall av fem. För E. Coli kunde inte en lika signifikant reduktion påvisas i rötresten, som resultat av termofil förhydrolys. Dock är det tydligt att en längre uppehållstid i förhydrolysteget ej resulterar i en bättre hygieniseringseffekt.

Med pastörisering innan rötning reducerades E. Coli till under detektionsnivån i ett fall av två, samtidigt som antalet enterokocker var under detektionsnivån i samtliga fall. Salmonella påvisades i rötresten från linjen med pastöriserat blandslam från NSVA, men ej från testlinjerna med pastöriserat blandslam från VA SYD respektive Gryaab.

Relaterar man resultaten från de bakteriologiska testerna med de hygieniseringskrav som återfinns i förslaget till ny slamförordning innebär de, med en antagen TS-halt på 3,5 % i rötresten, att antalet enterokocker respektive E. Coli får vara maximalt 1 000 CFU/gTS, vilket motsvarar 35 CFU/g_{våtvikt}. Detta krav uppfylldes med avseende på E. Coli med termofil förhydrolys innan rötning i ett fall av fem. Med pastörisering innan rötning uppfylldes hygieniseringskravet med avseende på E. Coli i ett fall av två. För enterokocker kunde det inte bevisas att förslaget hygieniseringskrav uppfylldes med varken termofil förhydrolys eller pastörisering, pga. att detektionsgränser för enterokocker är 100 CFU/g_{våtvikt}. Vidare innebär hygieniseringskraven att salmonella skall vara frånvarande i 25 g våtvikt, vilket uppfylldes i samtliga rötrester vilka förbehandlats med termofil förhydrolys innan rötning, men endast i två fall av tre för de testlinjer där pastörisering innan rötning tillämpats.

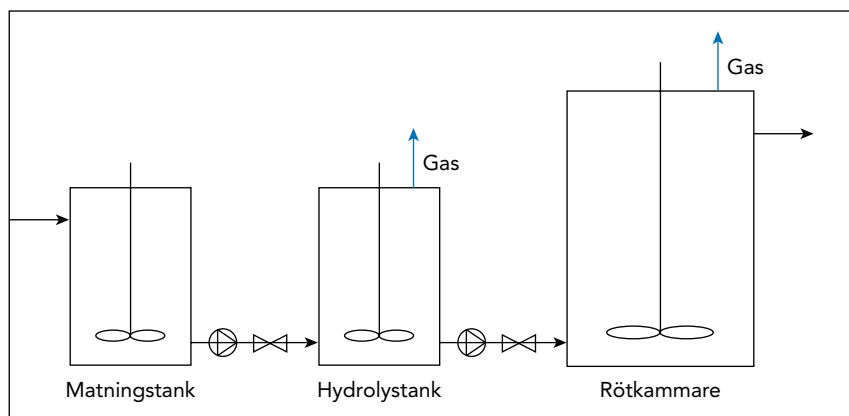
4 Pilotförsök på Källby avloppsreningsverk

4.1 Bakgrund pilotförsök

I labförsöken matas reaktorerna manuellt en gång per dag eftersom det är mycket svårt att automatisera labskaledriften. Detta innebär att exponeringstiden blir 24 timmar i förhydrolysen. För att kunna utvärdera effekten av 6 timmars exponeringstid utfördes ett pilotförsök med möjlighet att pumpa in var 6:e timme till hydrolystanken. I pilotförsöket kommer mer av de variationer som finns i slammet med eftersom matningstanken fylls på 3 gånger per vecka jämfört med i labförsöket där slam hämtades en gång per vecka.

4.2 Försöksuppställning

Pilotförsöket, som utfördes i befintliga lokaler på Källby avloppsreningsverk, bestod av två linjer. En referenslinje utan förhydrolysis och en testlinje med förhydrolysis (testlinjens rötkammare benämns RK_{test}). I Figur 16 visas en översiktlig bild av testlinjen. Referenslinjen bestod av matningstank och rötkammare (RK_{ref}). Matningstanken var gemensam för de båda linjerna och rymde 350 liter. Hydrolystanken samt de båda rötkammarna hade en effektiv volym på 100 respektive vardera 950 liter.



Figur 16 Skiss över testlinjen med förhydrolysis.

På Källby avloppsreningsverk återförs bioslammet till försedimenteringen, härifrån går sedan blandningen av bioslam och primärslam vidare till gravitationsförtjockaren som förtjockar slammet till cirka 2 % TS. Slammet går sedan vidare till en mekanisk avvattare som förtjockar slammet ytterligare (till mellan 5–8 % TS). Källbys fullskala drivs med en högre TS-halt än många andra rötkammare och för att få en process som kan jämföras med flera andra anläggningar valdes att späda slammet till cirka 5 %. En hög TS-halt skulle även kunna orsaka driftsproblem i pilotanläggningen. Efter

den mekaniska avvattaren finns ingen TS-mätare varför driftspersonalen vid varje tillfälle bedömt TS-halten okulärt utifrån erfarenhet eller genom att sätta ett prov på snabb TS-analys. Spädningen gjordes sedan genom att blanda slammet ut från gravitationsförtjockaren med slammet ut från den mekaniska avvattaren (utifrån bedömda och uppmätta TS-halter) i matningstanken. Matningstanken fylldes på manuellt tre gånger i veckan; måndag, onsdag och fredag.

För att uppnå en exponeringstid på 6 timmar i hydrolystanken skedde inmatning fyra gånger per dygn. För att garantera exponeringstiden började matningssekvensen med att pumpa ut en bestämd mängd från hydrolystanken till efterföljande rötkammare (RK_{test}), därefter pumpades nytt substrat in i hydrolystanken. Uppehållstiden i hydrolystanken var i genomsnitt 1,5 dygn medan den i rötkammarna var knappt 15 dygn. Den totala uppehållstiden var 16,5 dygn i testlinjen mot 15 dygn i referenslinjen. De båda rötkammarna höll en temperatur på ca 37° C medan temperaturen i hydrolystanken var ca 55° C.

Prover togs ut från de fyra tankarna en gång per vecka för analys av COD, $\text{NH}_4\text{-N}$, VFA, TKN samt TS & VS (För metoder hänvisas till Bilaga A). Från matningstanken har prov även tagits ut de två andra dagarna då tanken fylldes på med nytt slam men dessa har endast analyserats med avseende på TS och VS. Gasprov för analys av metan- och koldioxidsammansättning har tagits ut en gång per vecka från hydrolystanken samt de båda rötkammarna. Gasprovet togs ut i en glascylinder som transporterades till AnoxKaldnes laboratorium där det analyserades i en gaskromatograf (GC-TCD).

4.3 Resultat

4.3.1 Val av utvärderingsperiod

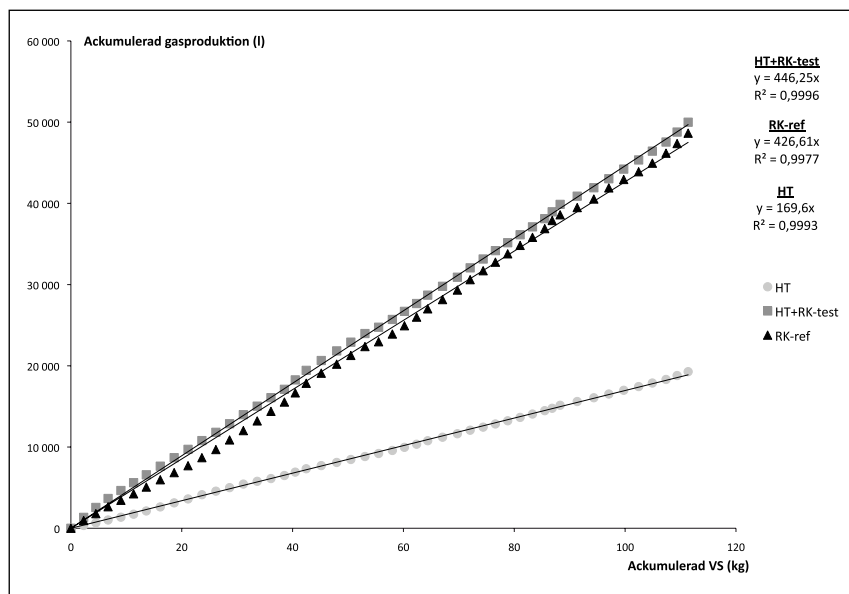
Pilotförsöket pågick under 123 dagar (12/7–11/11), men på grund av problem som uppstod är utvärderingsperioden kortare. Dag 45 upptäcktes att temperaturgivarna i reaktorerna inte fungerade som de skulle och att temperaturen istället för 37° C var cirka 34° C i de båda rötkammarna. Detta upptäcktes då pH minskade och COD samt VFA ökade. På grund av detta skedde ingen inmatning dag 45–50 för att undvika överbelastning. När temperaturen återigen var uppe på 37° C startades inmatningen. Ingen inmatning skedde heller dag 61–65, på grund av strömbavbrott. På grund av dessa problem har alla värden som presenteras nedan beräknats på data från dag 70 och framåt om inget annat anges.

4.3.2 Gasutbyte & nedbrytningsgrad

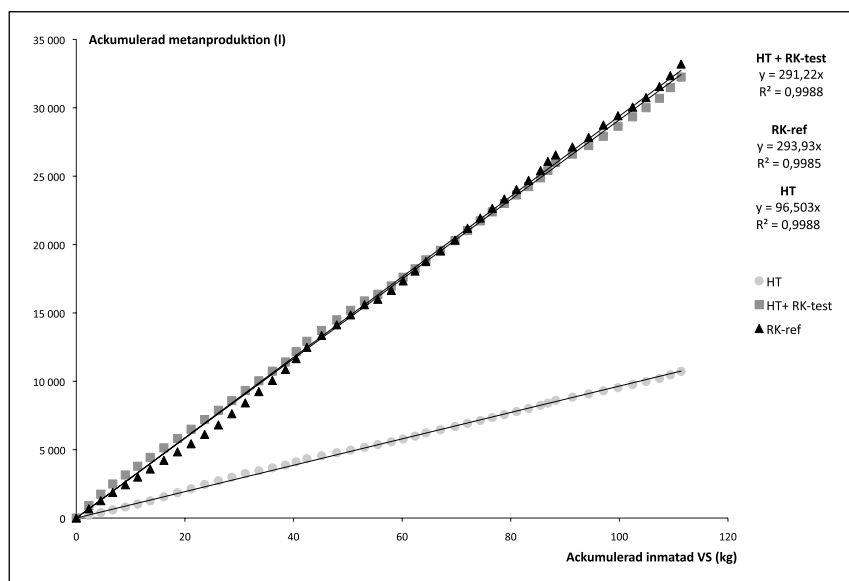
Det totala gasutbytet för testlinjen och referenslinjen har beräknats som lutningen på grafen där ackumulerad gasproduktion plottas mot ackumulerad inmatad VS (samma sätt har använts för metanutbytet). Gasutbytet som då erhöles var 0,445 Nm^3 gas/kg VS från testlinjen och 0,425 Nm^3 gas/kg VS från referenslinjen vilket motsvarar en ökning på 4,7 % i testlinjen, se Figur 17. Metanutbytet för de båda linjerna visar dock att utbytet var 0,290 Nm^3 CH_4 /kg VS i båda linjerna, se Figur 18.

Metanproduktionen från hydrolysen utgjorde 33 % av den totala metanproduktionen från testlinjen. Metanhalten var under utvärderingsperioden relativt stabil i rötkammarna medan den varierade mer i hydrolystanken, se Figur 19.

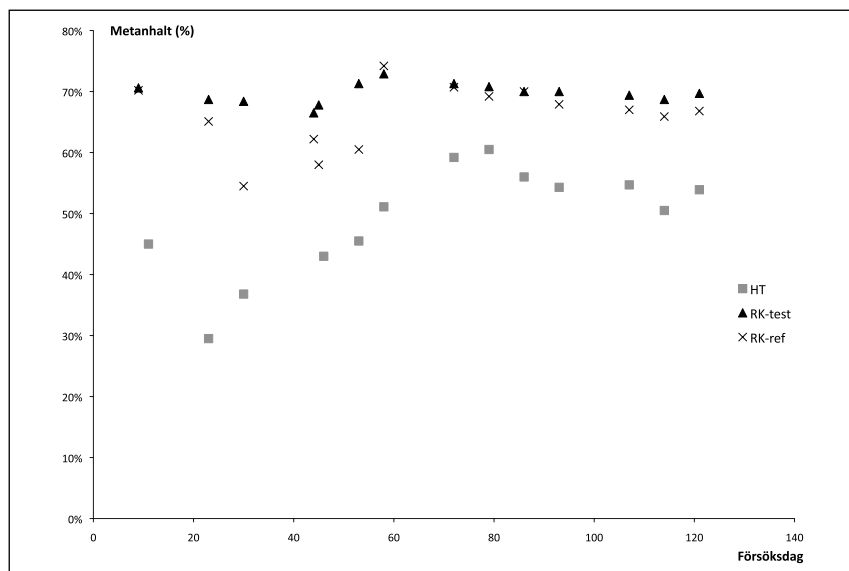
Metanhaltsproverna från hydrolystanken och rötkammarna togs ut i slutet av varje matningscykel. Vid ett tillfälle gjordes extra mätningar för att undersöka om halten varierade i hydrolystanken över de sex timmarna som ingen inmatning skedde. Resultaten visade att metanhalten och gasflödet var relativt konstant över de 6 timmarna, se Tabell 19, varför det bedömdes att proverna även fortsättningsvis kunde tas ut i slutet av matningscykeln.



Figur 17 Ackumulerad gasproduktion plottad mot ackumulerad inmatad VS för HT, HT + RK_{test} samt RK_{ref} för dag 70–123. Lutningen på linjäranpassningen av data anger utbytet för respektive process.



Figur 18 Ackumulerad metanproduktion plottad mot ackumulerad inmatad VS för HT, HT + RK_{test} samt RK_{ref} för dag 70–123. Lutningen på linjäranpassningen av data anger utbytet för respektive process.



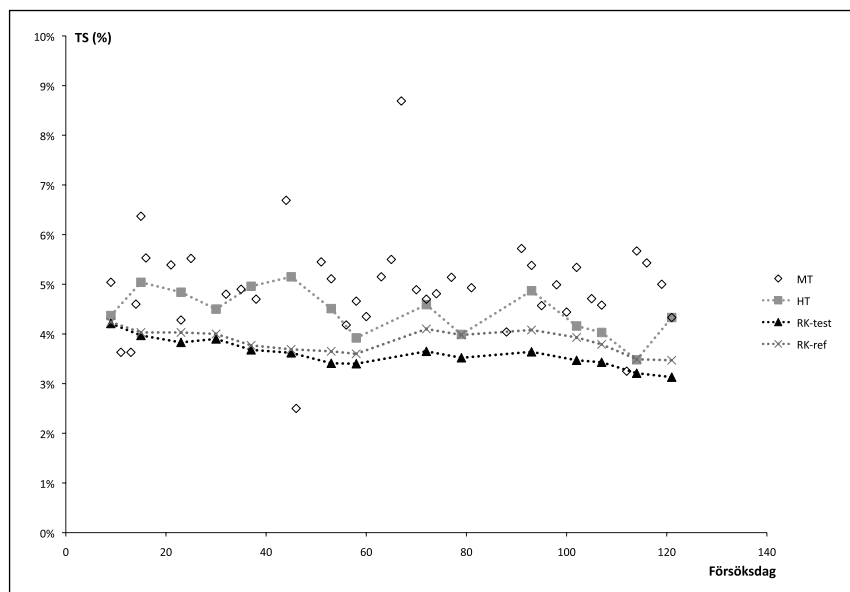
Figur 19 Metanhalt under hela försöksperioden i hydrolystanken samt RK_{test} och RK_{ref}

Tabell 19 Metanhalt i hydrolystanken vid cykelstudie.

Klockslag	10.00	11.40	13.00	14.30
Metanhalt	54,1%	52,9%	52,8%	53,3%
Gasproduktion sedan föregående metanhaltsprov (liter)	21*	25	16	17

* Gasproduktion sedan inmatning kl. 9.

Vid tre tillfällen togs prov ut från hydrolystanken för analys av vätgas, proverna togs ut i slutet av matningscykeln precis innan nästa inmatning skedde. Dessa prover skickades sedan till ett externt laboratorium för analys. Halten vätgas i de tre proven låg mellan 200–300 ppm. En beräkning gjordes över hur mycket metan som skulle kunnat bildas från denna vätgas



Figur 20 TS-halt i matningstanken (MT), hydrolystanken (HT) samt RK_{test} och RK_{ref}

och resultatet visade att denna mängd är obetydlig och skulle inte bidra till en väsentlig ökning av metanutbytet från testlinjen.

Vid driftsproblem vid Källbys ordinarie verksamhet (driftstopp i centrifug, svårighet med okulärbedömning mm.) stämde inte alltid den bedömda TS-halten eller var svår att uppskatta vilket gett några enstaka tillfällen med extra hög eller låg TS-halt i matningstanken, se Figur 20. Här syns också att TS-halten varit något lägre i RKtest under hela utvärderingsperioden. TS-reduktionen var under denna period 35 % respektive 27 % i testlinjen och referenslinjen, VS-reduktionen var under motsvarande period 49 % i testlinjen och 40 % i referenslinjen.

4.3.3 Karakterisering

Vid ett tillfälle utfördes karakterisering med avseende på fett, protein och kolhydrater på prov från alla tankar/reaktorer, resultaten presenteras i Tabell 20. Ekvationerna som använts för beräkningarna visas i Bilaga A.

Tabell 20 Resultat från karakterisering.

	Fett		Protein		Kolhydrat		Inert (g/l)	TS (g/l)
	(g/l)	% av VS	(g/l)	% av VS	(g/l)	% av VS		
Matningstank	8,2	18	15,2	33	22,6	49	11	57
Hydrolystank	5,3	22	8,8	37	9,9	41	11	35
RK _{test}	1,8	9	7,7	39	10,5	52	12	32
RK _{ref}	2,3	11	8,6	39	11,1	50	13	35

Beräknas det teoretiska metanutbytet utifrån hur mycket fett, protein respektive kolhydrater som brutits ned i respektive linje blir utbytet 0,33 samt 0,3 Nm³ CH₄/kg VS för testlinjen respektive referenslinjen. Det ska dock noteras att karakteriseringen är utförd på stickprov från ett tillfälle och att värdena skiljer sig något från de som erhöles vid karakteriseringarna av inkommande slam från VA SYD i labförsöket.

4.3.4 pH, VFA, COD & NH₄-N

pH, VFA samt löst COD låg större delen av testperioden stabilt i de båda rötammarna. Under perioden med låg temperatur (dag 45–50) sjönk dock pH något (Figur 38, Bilaga C) och VFA-halten (Figur 39, Bilaga C) samt halten löst COD (Figur 40, Bilaga C) steg vilket gjorde att vi tog beslutet att stoppa inmatningen. Fram till dag 54 låg pH i hydrolystanken på 6,3–6,7. Därefter ökade pH och låg under den resterande delen av testperioden på pH 6,8–7. Troligtvis fylldes matningstanken på med rötat slam (på grund av dåligt mottryck från Källbyverkets pumpar, dock oklart hur stor andel som var rötat slam) dag 53 vilket styrks av att halten ammoniumkväve i prov från matningstanken var mycket högre än normalt vid detta tillfälle (Figur 42, Bilaga C). Eventuellt kan rötat slam också ha fyllts på dag 56 men inga analysdata finns att tillgå från detta tillfälle. För att undvika att det inträffade igen stängde driftspersonalen fortsättningsvis recirkuleringen mellan de båda fullskalerötammarna vid påfyllningen av matningstanken så att inte rötat slam skulle kunna tryckas tillbaka.

Efter att rötat slam fyllts på i matningstanken ökade metanproduktionen från hydrolysen och låg sedan kvar på en relativt stabil nivå, se Figur 41 Bilaga C.

Under utvärderingsperioden var halten löst COD 716 ± 41 mg/l i RK_{test} medan den var 674 ± 175 mg/l i RK_{ref} . Halten ammoniumkväve skiljde mer mellan de båda linjerna. I RK_{test} låg halten på $1\,300 \pm 73$ mg/l och i RK_{ref} låg den på $1\,100 \pm 39$ mg/l, se Figur 42 Bilaga C.

4.3.5 Bakteriologiska tester

Vid ett antal tillfällen har prov tagits ut för bakteriologisk analys. Från matningstanken, hydrolystanken och rötkammarna har 4, 5 respektive 3 prov tagits ut för analys och alla prover togs ut i desinficerade kärl. Vid samtliga tillfällen påvisades Salmonellabakterier i matningstanken och i RK_{ref} medan inga salmonellabakterier kunde påvisas i hydrolystanken eller RK_{test} . De parametrar som analyserades förutom salmonella var; E. Coli samt Enterokocker, resultaten presenteras i Tabell 21 och Tabell 22.

Tabell 21 Analysresultat E. Coli (CFU/g)

Datum	Matningstank	Hydrolystank	RK_{test}	RK_{ref}
2011-07-27	43 000	<10		
2011-09-26		<10		
2011-10-26	130 000	.*	<10	8 400
2011-11-01	68 000	<10	<10	3 000
2011-11-08	150 000	<10	<10	6 500

* inget provresultat pga felaktig provtagning

Tabell 22 Analysresultat Enterokocker (CFU/g)

Datum	Matningstank	Hydrolystank	RK_{test}	RK_{ref}
2011-07-27	31 000	<100		
2011-09-26		<100		
2011-10-26	55 000	.*	<100	3 600
2011-11-01	58 000	<100	<100	3 500
2011-11-08	220 000	<100	<100	6 400

* inget provresultat pga felaktig provtagning

4.4 Diskussion

Gasutbytet var under utvärderingsperioden något större från testlinjen än från referenslinjen medan metanutbytet för de båda linjerna var lika. De teoretiska beräkningarna av metanutbytet utifrån hur mycket fett, proteiner och kolhydrater som brutits ner i respektive linje gav ett högre metanutbyte från testlinjen än från referenslinjen, men så var inte fallet. I pilotförsöket har alltså potentiell metanproduktion på något sätt gått förlorad i testlinjen. En anledning skulle kunna vara att vätgas som bildats i hydrolyssteg avgått och inte ombildats till metan, dock har inte motsvarande mängd vätgas kunnat uppmätas från hydrolyssteg för att stökiometriskt kunna förklara skillnaden. En möjlig förklaring är att vätgashalten underskattades vid analys, och egentligen är högre men detta kan inte styrkas. Det är också möjligt att flyktiga fettsyror (VFA) avgått med gasen och därför inte ombildats till metan. En tredje förklaring är att syre kommit in tillsammans med substratet, vilket isåfall skulle möjliggöra aerob nedbrytning av VS.

Dock visade resultaten från cykelstudien av metanhalten i hydrolystanken att mängden luft var mycket låg och konstant över matningscykeln (resultat ej presenterade) vilket gör aerob nedbrytning till en mindre trolig orsak till förlusten av organiskt material.

I samband med att matningstanken fylldes på med rötat slam och pH ökade i hydrolystanken ökade även metanproduktionen i densamma. Både pH och metanproduktionen låg sedan kvar på samma nivå under utvärderingsperioden. Trots den korta uppehållstiden (1,5 dag) fortsatte metanproduktionen att vara relativt stor från hydrolystanken. Detta kan bero på att snabbväxande metanogener selekterats fram men också på att metanogener finns närvarande i det inkommande materialet. Att metanproduktionen och pH inte var lika högt i labförsöket som i pilotförsöket kan ha att göra med att i labförsöket skedde in-/utmatning en gång per dag istället för uppdelat på fyra gånger per dag som i piloten. När inmatning sker en gång per dag blir belastningen per matningstillfälle mycket hög medan förhållandena med inmatning uppdelat på fyra gånger per dag ger förutsättningar för stabila förhållanden för metanogenerna.

Skillnaden i löst COD var inte signifikant mellan de båda linjerna, medan skillnaden i ammoniumkväve var desto större. Den ökade ammoniumkvävehalten är ett resultat av en ökad nedbrytning av proteiner och kommer vid en implementering av förhydrolys, om slammet avvattnas, bidra till en ökad internbelastning på reningsverket.

Den bakteriologiska analysen visar att en process med termofil förhydrolys med 6 timmars exponeringstid klarar kraven på frånvaro av *Salmonella* i både hydrolystanken och RK_{test} . *E. Coli* och Enterokocker var under detektionsgränsen i både hydrolystanken och RK_{test} vid samtliga tillfällen, medan de var över detektionsgränsen i RK_{ref} samt matningstanken vid alla tillfällen.

Detektionsgränsen för de bakteriologiska analyserna var <10 CFU/g prov för *E. Coli* samt <100 CFU/g prov för Enterokocker. I förslaget till förordning är de nivåer som ska uppnås satta som < 1 000 CFU/g TS för Enterokocker samt *E. Coli*, vilket gör att vi med en utgående TS-halt på 3–4 % kan visa att kraven som ställs på salmonella samt *E. Coli* kan uppfyllas, men inte de ställda kraven på enterokocker. Samtliga krav som ställs på hygienisering i ABP-förordningen uppfyllades med termofil förhydrolys.

5 Modellering av försöken

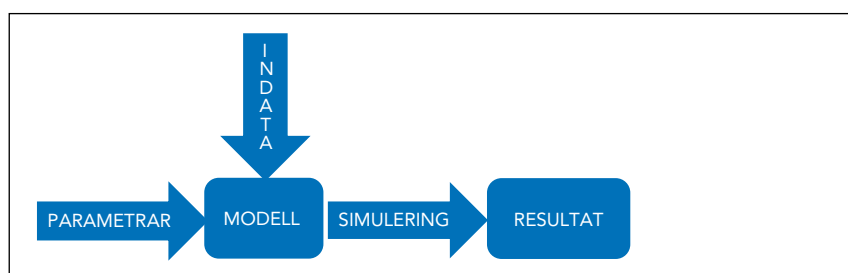
5.1 Syfte med modelleringen

Modellering är ett sätt att beskriva en process, och bygger i grunden på försök. En modell kan användas för att simulera en verklig process, eller för att undersöka nya processlösningar. I den här studien undersöks om en anpassad ADM1-modell som kalibrerats och validerats med data från ett labförsök kan appliceras dels på försök med annan processkonfiguration, dels på försök med andra slam. Syftet med detta är att undersöka om modellering kan bidra till att minimera antalet praktiska försök samt att i större utsträckning förklara resultat från försök i lab- och pilotskala.

5.2 Använd modell och anpassning av denna

En modell för en specifik process används genom att kända uppgifter om inflöden och processen matas in. Processen simuleras sedan, och värdet på utvalda resultatparametrar, t.ex. pH och gasproduktion, erhålls. Figur 21 visar en översikt över simuleringsprocessen.

Ett flertal olika modeller med varierande komplexitet har föreslagits för att simulera anaerob nedbrytning. Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) är en ofta använd modell för anaerob nedbrytning. Den är framtagen av ledande forskare inom området genom International Water Association (IWA), och publicerades i Batstone m.fl. (2002). Därefter har den använts i flera publikationer, bl.a. Ramirez m.fl. (2009) och Blumensaat och Keller (2005). I modellen finns partikulärt substrat och biomassa, hydrolyserat material och VFA samt ämnen i gasfas. Alla dessa ämnen betecknas som koncentrationer av COD eller mol, och beräknas med modellen. Modellen innefattar tillväxt, nedbrytning och inhibering av bakterier. I ADM1 inkluderas även masstransport av väte, koldioxid och metan från vätskefas till gasfas. För en mer detaljerad beskrivning av olika modeller och exempel på tillämpningar av modeller, se förstudien till denna rapport (Persson m.fl., 2010).



Figur 21 Översikt över simuleringsprocessen.

5.2.1 Metod

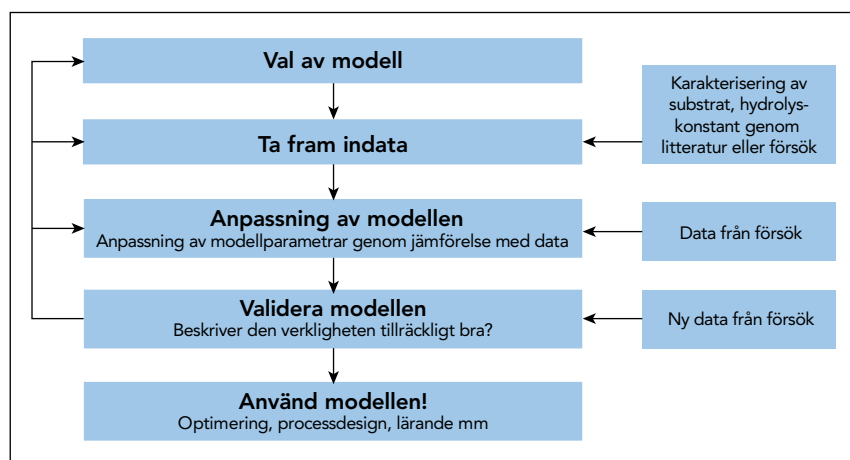
Nedan visas en schematisk bild över en metod för att använda modellering (Figur 22). Först väljs en lämplig modell, sedan tas den indata fram som behövs för att kunna simulera processen. Parametrar anpassas och kalibre-

ras sedan för att minska skillnaden mellan modellens simulerade resultat och uppmätta värden. Det görs för att erhålla bättre resultat i simuleringarna. Efter kalibreringen jämförs modellens resultat med nya mätdata för att validera att modellen ger en tillräckligt bra bild av verkligheten. Mätdata som ska användas till validering, får inte användas i ett tidigare skede. Om modellen inte beskriver verkligheten tillräckligt bra får en ny kalibrering göras eller får en annan modell väljas.

Hydrolysen är ofta den långsammaste delprocessen vid anaerob nedbrytning av partikulärt material, och därmed hastighetsbestämmande för biogasproduktionen. En fördel med att utforma processen i två steg med en termofil förhydrolys är att hydrolysen kan optimeras separat och därmed kan hydrolyshastigheten öka. Därför anses hydrolyskonstanterna vara viktiga att kalibrera. För de andra konstanterna i modellen används vedertagna värden om inget annat anges.

Följande arbetsgång används i detta projekt:

1. Kalibrering av hydrolyskonstanter med data från satsvisa försök
2. Kalibrering av hydrolyskonstanter med data från kontinuerliga labförsök
3. Validering av modellen med data från kontinuerliga labförsök
4. Simulering av rötning i pilotskala, både med och utan termofil förhydrolys
5. Simulering av rötning med och utan termofil förhydrolys för olika slam



Figur 22 Schematisk bild för kalibrering, validering och användning av en modell.

Indata till modellen baserades så långt som möjligt på analyser av slammet, som VS, pH, ammoniumhalt, löst COD m.m. För andra processer och inhiberingsfunktioner har värden från Batstone m.fl (2002) och Rosén och Jeppsson (2005) använts. För redogörelse av implementering, indata, m.m, hänvisas till dokumentet "Kompletterande modelleringsdata" som finns att ladda ner på www.sgc.se. För beskrivning av kalibrering och validering av termofila och mesofila hydrolyskonstanter från de olika försöken, med uppdelning på hydrolys av fett, proteiner respektive kolhydrater, se Bilaga D – Kalibrering och validering för modellering.

5.2.2 Sammanfattning och slutsatser av kalibrering och validering

En sammanställning av resultaten från kalibreringarna visas nedan i Tabell 23. I kommande simuleringar används de kalibrerade värdena från kontinuerliga försök.

Tabell 23 Kalibrerade hydrolyskonstanter för kolhydrater, proteiner och fett.

Process	Kolhydrater		Proteiner		Fett	
	Hydrolyskonstant (/dygn)	Nedbrytningsgrad (%)	Hydrolyskonstant (/dygn)	Nedbrytningsgrad (%)	Hydrolyskonstant (/dygn)	Nedbrytningsgrad (%)
Termofil satsvis	-	65	1,0	60	0	95
Termofil kontinuerlig	0,15	65	1,6	60	0	95
Mesofil satsvis	0,5	65	0,5	60	0,08	95
Mesofil kontinuerlig	0,1	65	0,5	60	0,07	95

Att göra satsvisa försök för att kalibrera hydrolyskonstanten för kontinuerlig drift är tyvärr svårt, då dynamiken i en kontinuerlig process i många fall ger en avvikande hydrolyshastighet jämfört med en satsvis process. Här har konstanterna justerats så att hydrolyshastigheten för proteiner i termofil kontinuerlig drift har ökat jämfört med det satsvisa försöket. I Batstone (2008) framförs olika anledningar till att nedbrytningen kan gå snabbare vid kontinuerlig drift än satsvis försök; bl.a. att dynamiken styrs mer av den mest lättnedbrytbara fraktionen av substratet vid kontinuerlig drift, och att parametrar är konstanta över tid. I det här fallet är skillnaden svårare att förklara, eftersom ympen vid de satsvisa försöken har tagits från en förhydrolysreaktor, och driften av förhydrolysreaktorerna har varit semikontinuerliga eftersom matning endast skett en gång om dagen. En möjlig anledning till skillnaden kan istället vara att omrörningen i de satsvisa försöken inte är lika effektiv som i förhydrolysreaktorerna. Mätvärdena från det mesofila metanpotentialförsöket gav å andra sidan en högre hydrolyskonstant för kolhydrater jämfört med kalibrering med mätdata från det kontinuerliga labförsöket.

När slammets innehåll av kolhydrater, proteiner och fett räknas om till COD finns risk för att koncentrationen av COD i slammet över- eller undervärderas. Proteiner kan t.ex. ha olika sammansättning och energiinnehåll. Eftersom det inte är möjligt att få fram bra mätvärden på COD i ofiltrerat prov går det inte att jämföra simulerade värden med analysdata.

Följande slutsatser kan dras av kalibrering och validering:

- Hydrolyskonstanterna kunde inte kalibreras endast från de satsvisa försöken, men rimliga nedbrytningsgrader kunde fås fram.
- Med nedbrytningsgraden kunde hydrolyshastigheterna anpassas med data från de kontinuerliga försöken.
- Eftersom kolhydrater inte mäts, utan beräknas från de andra fraktionerna, är det svårt att kalibrera hydrolyskonstanten. Den mesofila hydrolyskonstanten visade sig vara lägre i den kontinuerliga processen än i metanpotentialförsöket.
- Simuleringarna visar att dynamiken vid semi-kontinuerlig drift är intressant och resultaten kan användas för att analysera rötningsprocessen samt följa hur slammet hydrolyseras och ger metanproduktion.

- Validering med resterande data från kontinuerliga försök visar att modellen kan användas för att göra en uppskattning av flera viktiga processparametrar.
- Simulering av VFA i förhydrolyssteg, och metanhalt i det mesofila rötningssteg, korrelerade inte lika väl mot mätdata. Även parametrar i syrabildningen och metanbildningen skulle ha behövt justeras för att få en bättre korrelation av alla parametrar.

5.3 Simulering av pilotanläggningen

5.3.1 Metod

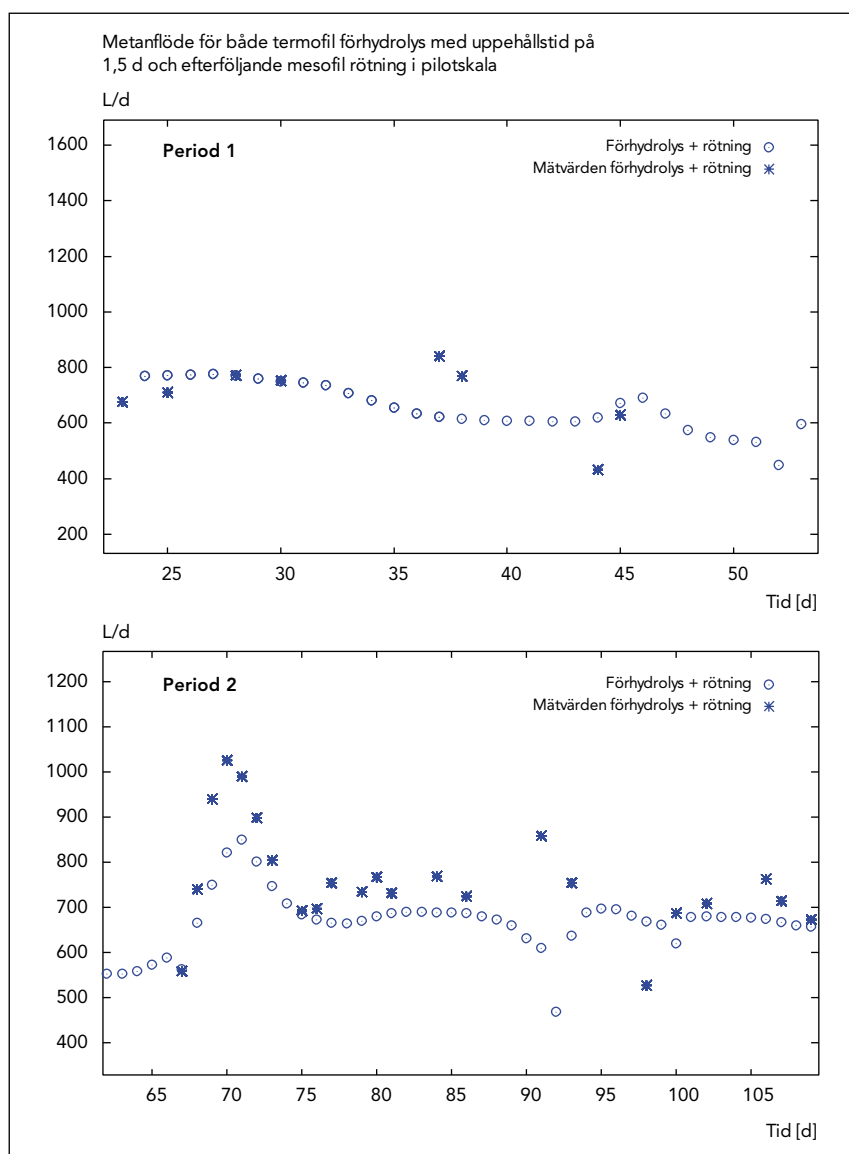
Istället för att matningen sker en gång per dag, som i labförsöken, matas pilotanläggningen var 6:e timme. Processen hade därför kunnat simuleras som satsreaktorer, med nya startvärden 4 ggr om dagen då matningen sker. Eftersom denna typ av simulering är tidskrävande betraktas processen istället som kontinuerlig. Försök med att simulera satsvist jämfört med att simulera kontinuerligt visade att de genomsnittliga värdena för den satsvisa metoden stämde väl överens med resultaten från den kontinuerliga modellen. Till simuleringarna valdes två tidsserier; mellan dag 23–55 (period 1) och mellan dag 55–110 (period 2). Uppdelningen i två perioder gjordes för att förenkla simuleringarna och för att kunna bearbeta data efterhand. För att erhålla en högre metanhalt i förhydrolyssteg antogs ett högre värde för inflöde av metanbildande bakterier. Startvärden och indata för inkommande slam för varje vecka visas i dokumentet ”Kompletterande modelleringsdata” som finns att ladda ner på www.sgc.se.

5.3.2 Resultat

5.3.2.1 Mesofil rötning med termofil förhydrolys

Simulering av den summerade metanproduktionen från både förhydrolyssteg och rötningssteg (Figur 23) visar att trender kan följas, och att metanproduktionen kan förutsägas relativt bra. Jämfört med mätdata är den simulerade metanproduktionen något lägre under period 2. Under den första perioden är fördelningen av den simulerade metanproduktionen mellan förhydrolyssteg och rötningssteg mycket lik den uppmätta (Figur 24). Under den andra perioden, är den simulerade metanproduktionen för låg från förhydrolyssteg, och något för hög i rötningssteg. Det kan bero på att sammansättningen av bakterier i förhydrolyssteg har ändrats under försökets gång, så att processen inte längre fungerar som tidigare. En sådan förändring i biomassan är svår att inkludera i en modell, vilket kan förklara att överensstämmelsen med mätdata är sämre under försökets senare del.

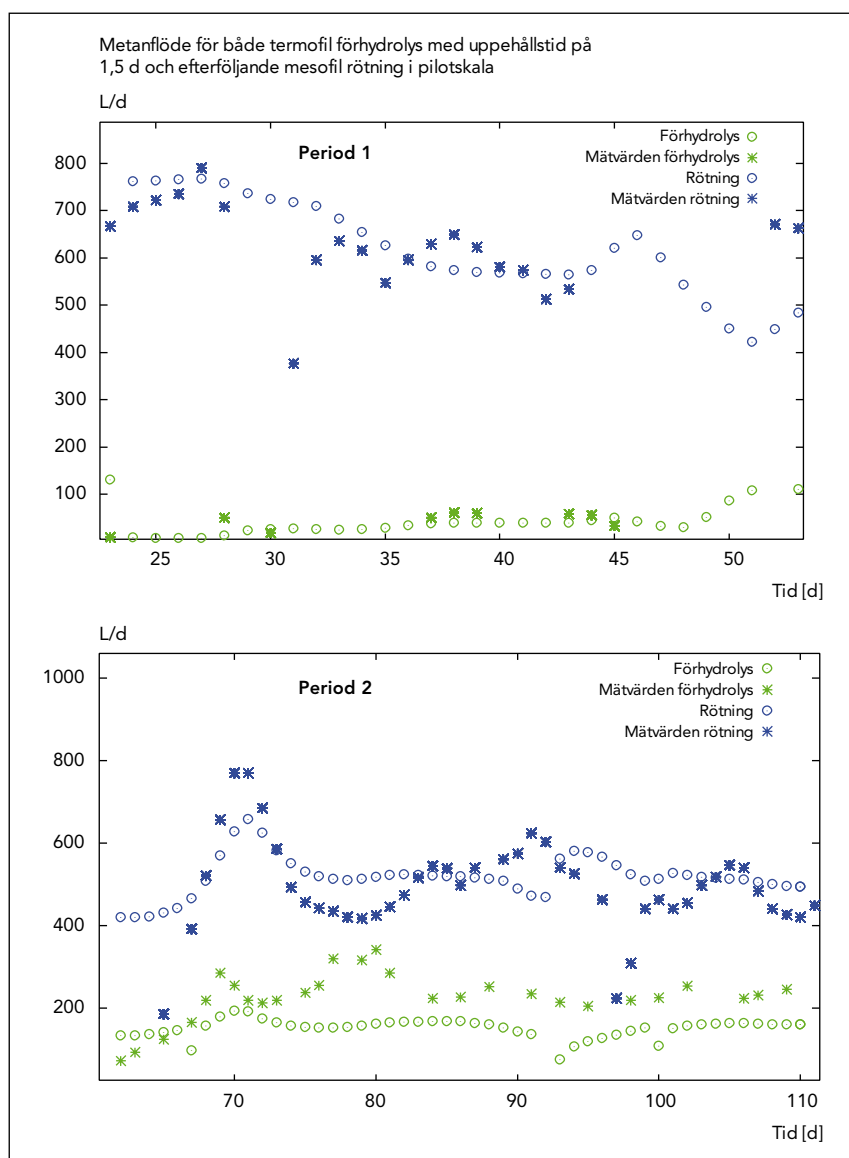
Simuleringen av $\text{NH}_4\text{-N}$ följer i stort mätdata under period 1, men halten är underskattad med ca 200–300 mg/L under period 2 (Figur 25). En orsak kan vara en ökad nedbrytning av protein.



Figur 23 Simulering av metanproduktion från pilotanläggningen, summerat från både förhydrolyssteg och rötningsssteg. Ringar markerar simulerade värden, stjärnor markerar uppmätta värden.

VFA kunde simuleras med bättre korrelation till mätdata under den senare tidsperioden än under den första (Figur 26). Eftersom antalet mätvärden är begränsat är det svårt att utvärdera hur trender följs, men resultatet tyder på att modellen inte kan ge en bra bild av variationen av VFA över tid.

Simulering av pH i rötningsssteg stämde väl överens med mätdata, både under första och andra perioden (Figur 27). Däremot kunde trenden för pH i förhydrolyssteg inte simuleras väl med de indata som användes. Resultatet från simuleringen visar en trend som inte fanns i mätdata under den första perioden. Det ökade pH-värdet i förhydrolyssteg under den andra perioden kunde simuleras, men skillnaden mellan mätdata och simulerade värden var ca 0,5 enheter.

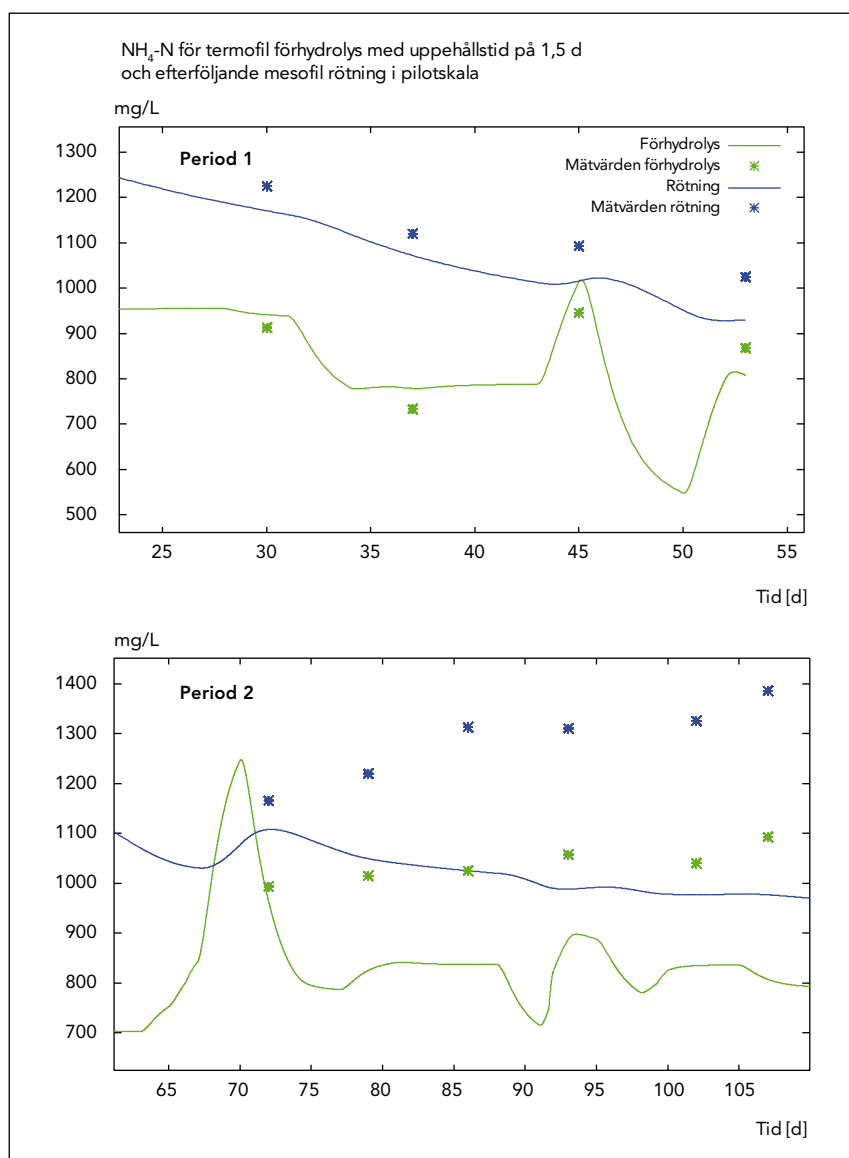


Figur 24 Simulering av metanproduktion från pilotanläggningen, från både förhydrolyssteg och rötningssteg. Ringar markerar simulerade värden, stjärnor markerar uppmätta värden.

I början av den andra perioden ökade halten av VS i matningstanken under några dagar från 3,5 % till 6,4 %. I simuleringarna ledde detta till en ökning av VFA och ammonium, samt variationer i pH i förhydrolyssteg, men några motsvarande toppar kunde inte ses i mätdata. Däremot gav det ökade inflödet av COD en topp i gas- och metanproduktionen i både förhydrolyssteg och rötningssteg, vilket även syntes i simuleringarna.

5.3.2.2 Mesofil rötning i ett steg

Pilotanläggningen utan inledande förhydrolys simulerades också, med hydrolyskonstanter för det mesofila rötningssteg. Under den första tidsperioden överskattade modellen metanproduktionen, och under den senare tidsperioden blev den istället underskattad i simuleringarna (Figur 28).

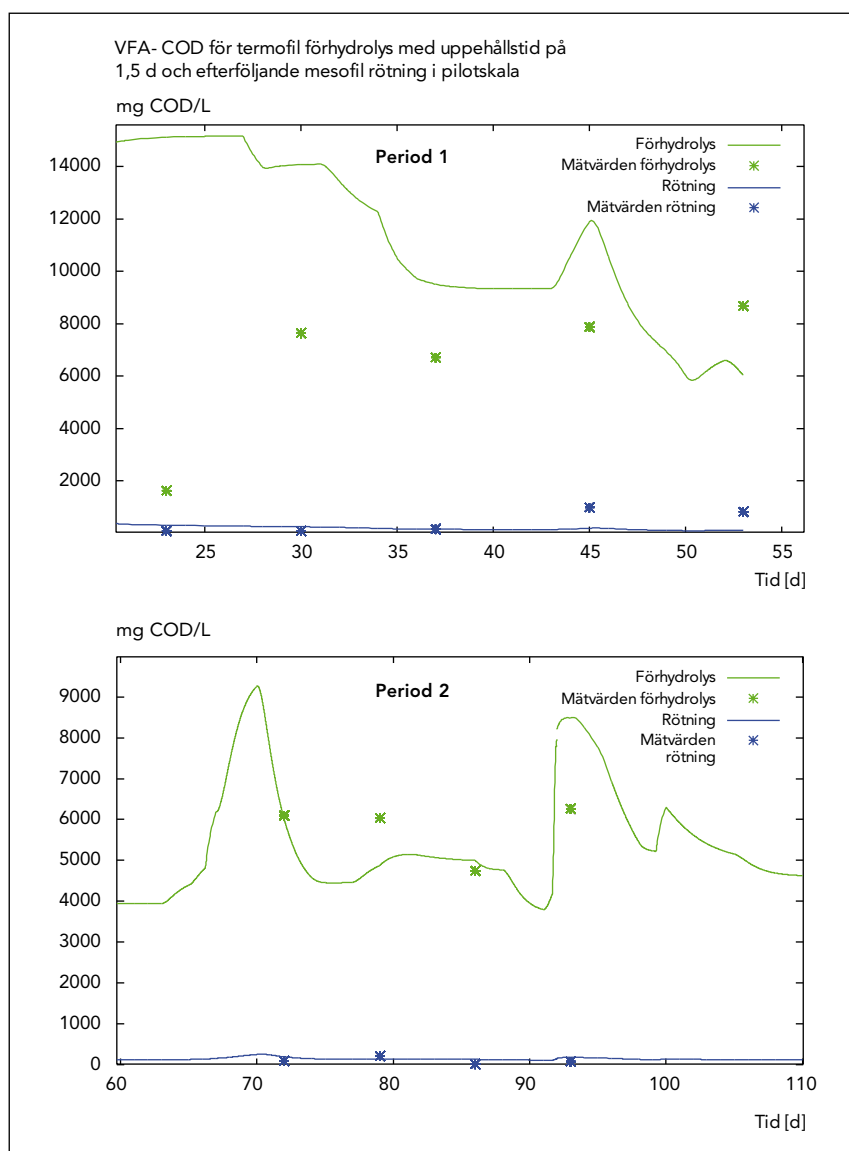


Figur 25 Simulering av ammoniumhalt i pilotanläggningen, från både förhydrolyssteg och rötningsssteg. Linjer markerar simulerade värden, stjärnor markerar uppmätta värden.

Jämfört med simulering av rötning med inledande förhydrolys var korrelationen för metanproduktionen sämre för rötning i ett steg.

Resultaten för NH₄-N tyder på att nedbrytningen av protein är något lägre i simuleringarna än vad mätvärdena visar (Figur 29). Skillnaden är inte så stor relativt sett, ammoniumhalten är ca 900 mg/l i simuleringsresultaten, jämfört med ca 1 050 mg/l i mätresultaten.

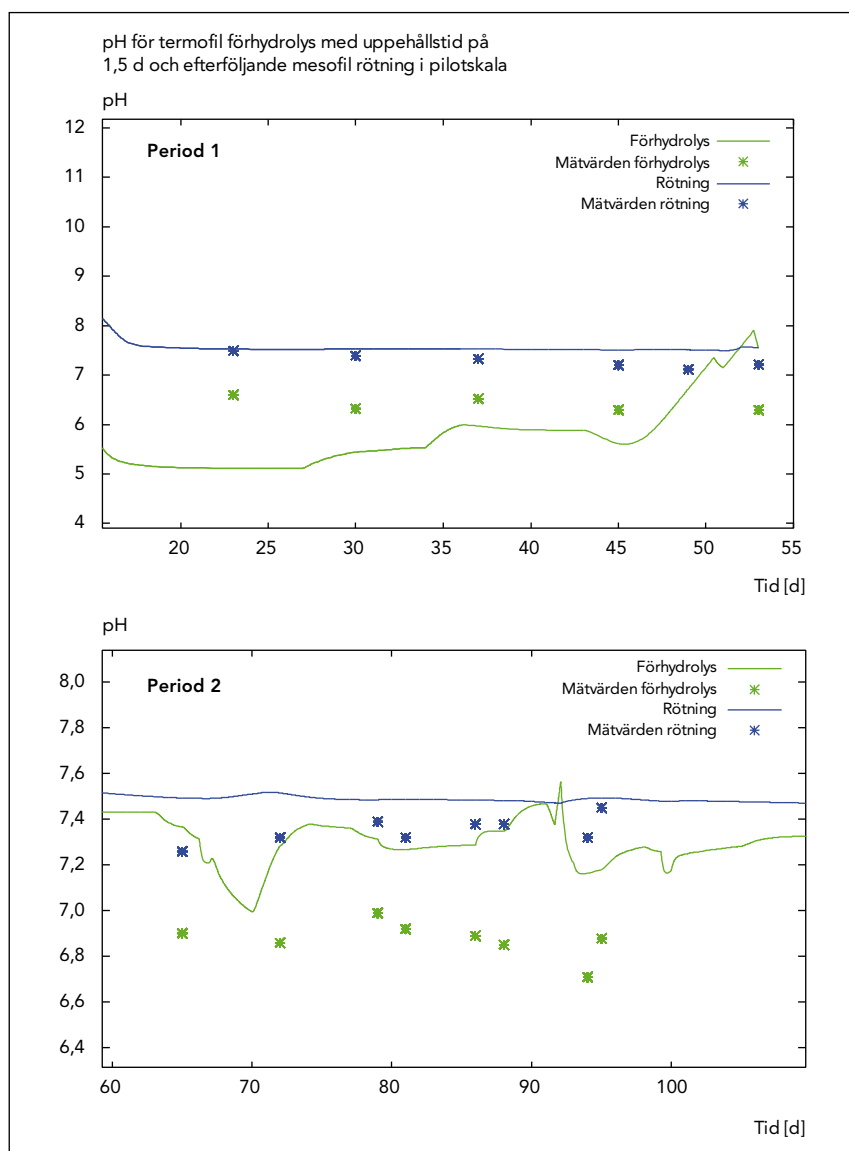
Simulering av pH visar inte i bild, men resultaten visade på en bra korrelation till mätdata med simulerade värden på ca 7,4 och uppmätta värden på ca 7,2. Även VFA uppvisade en relativt bra korrelation, med simulerade värden på ca 150 mg/l, och uppmätta värden på ca 100 mg/l.



Figur 26 Simulering av VFA-COD i pilotanläggningen, från både förhydrolyssteg och rötningsssteg. Linjer markerar simulerade värden, stjärnor markerar uppmätta värden.

5.3.3 Diskussion och slutsatser

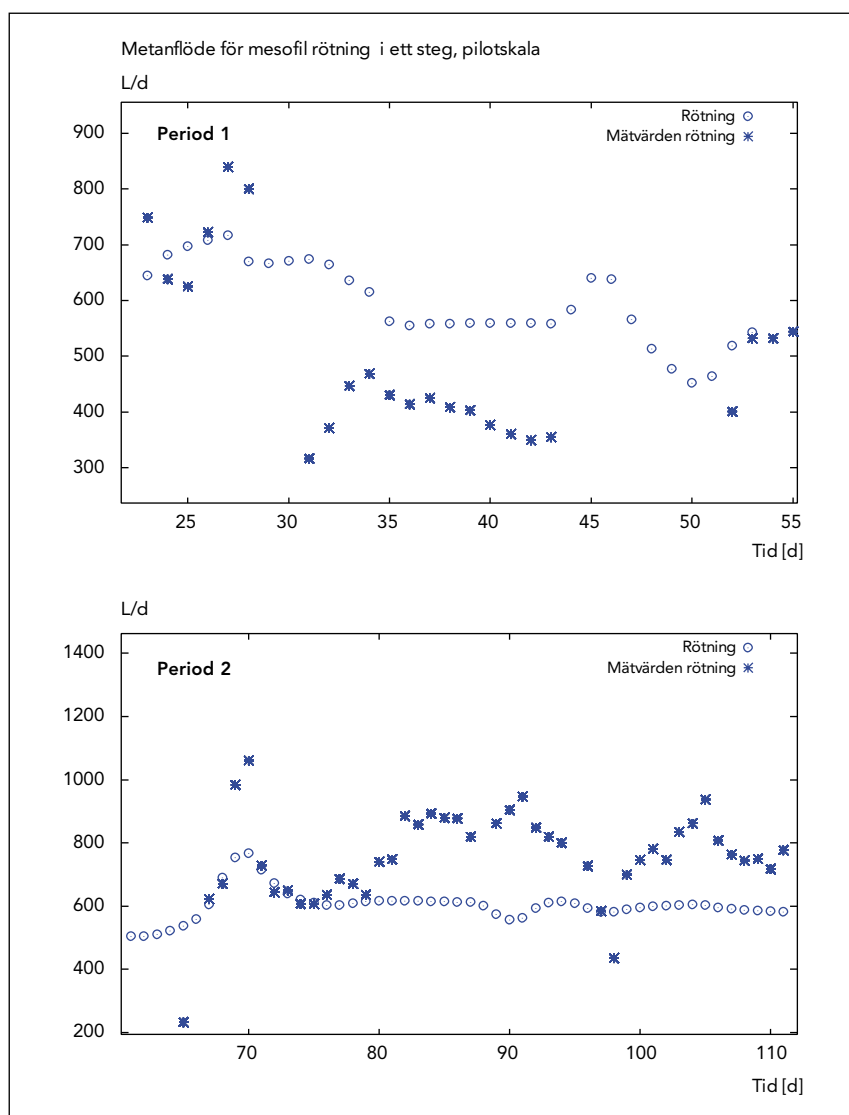
Metanproduktionen från pilotanläggningen med termofil förhydrolys kunde simuleras med relativt bra träffsäkerhet. VFA kunde också simuleras väl överlag. Däremot var korrelationen för ammonium och pH delvis sämre, främst i förhydrolyssteg. Dynamiken i förhydrolysisprocessen kunde överlag inte simuleras tillräckligt bra. Den verkliga processen var mer robust vid förändringar, såsom ett ökat inflöde av VS, än vad den simulerade processen var. Modellen som använts är utvecklad främst för att simulera rötning, och inte förhydrolys. Simuleringarna av rötningssprocessen gav också bättre överensstämmelse med mätdata generellt sett än simuleringarna av förhydrolysisprocessen.



Figur 27 Simulering av pH i pilotanläggningen, från både förhydrolyssteg och rötningsteget. Linjer markerar simulerade värden, stjärnor markerar uppmätta värden.

Överensstämmelsen mellan simulerade värden och mätdata är bättre under den första perioden, än under den andra perioden för tvåstegsprocessen. Det ökade pH-värdet, och den ökade metanproduktionen under den andra perioden tyder på en förändring i processen. En förändring i biomassans känslighet för t.ex. höga halter av VFA är svårt att föra in i en modell, och förändringen kunde därför inte simuleras. Det är emellertid intressant att titta på resultaten för att se hur processen kunde ha sett ut om den inte hade ändrats.

Simuleringarna av pH, ammonium och VFA för rötning i ett steg gav resultat som låg relativt nära mätvärdena, men resultatet för metanproduktionen avvek mycket jämfört med mätdata. Det kan bero på att de kalibrerade hydrolyskonstanterna från rötning med inledande förhydrolys inte passade lika bra för rötningssprocessen i ett steg.



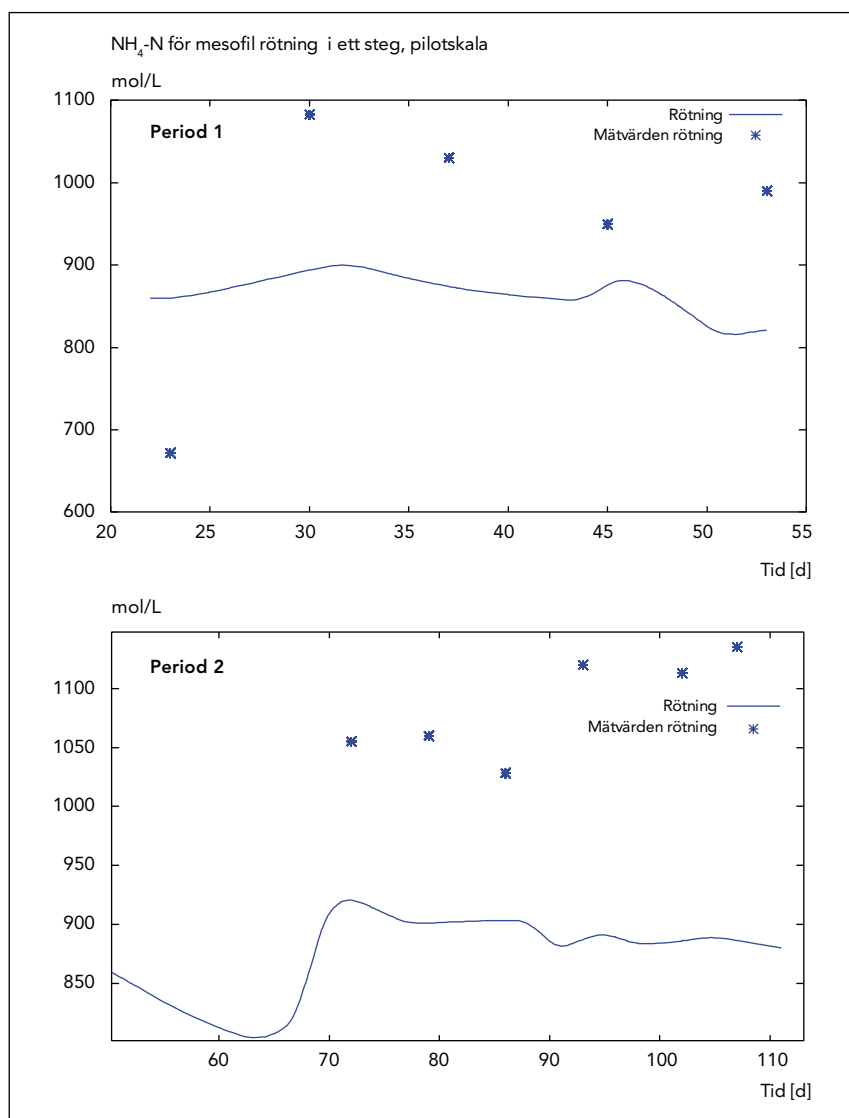
Figur 28 Simulering av metanproduktion från pilotanläggningen med rötning i ett steg. Ringar markerar simulerade värden, stjärnor markerar uppmätta värden.

Om modellen kan anses vara användbar beror på syftet med simuleringen, och den noggrannhet som krävs. För att kunna simulera processen med större noggrannhet skulle slammets sammansättning av kolhydrater, proteiner och fett eventuellt behöva mätas kontinuerligt och eventuellt mer fraktionerat.

5.4 Simulering med olika slam

5.4.2 Syfte och metod

Simulering av rötning både med och utan termofil förhydrolys gjordes för slamm från NSVA, Gryaab och Umeva. Syftet var att se hur slammets sammansättning påverkar utfallet av simulering av processen; passar termofil förhydrolys bättre för vissa typer av slam än för andra? Huvudsyftet var inte att jämföra med mätdata, utan att se om samma slutsatser vad gäller ter-



Figur 29 Simulering av ammoniumhalt i pilotanläggningen med rötning i ett steg. Ringar markerar simulerade värden, stjärnor markerar uppmätta värden.

moofil förhydrolys och slamtyper kan dras från simuleringsförsök som från labförsök. Därför gjordes simuleringarna först, och slutsatser drogs baserat på resultaten därifrån. Först därefter analyserades mätdata, och slutsatser som kunde dras från labförsöken jämfördes med dem som erhöles från simuleringarna.

Alla processerna simulerades med kontinuerligt flöde vid stabil drift. För att kunna jämföra resultaten med labförsöken användes samma volymer och uppehållstid i förhydrolysreaktorerna på 1,5 dag. Startvärden och indata för inkommande slam visas i dokumentet "Kompletterande modelleringsdata" som finns att ladda ner på www.sgc.se.

5.4.2 Resultat

Resultaten från steady-state från simuleringarna visas i Tabell 24. pH och koncentrationer av COD, VFA samt ammonium är relativt lika i enstegs-rötningarna och rötning med termofil förhydrolys. Ammonium-halterna är

något högre i rötningsprocesserna med inledande förhydrolys på grund av den ökade nedbrytningen av proteiner. Gasflödena från rötningsprocesserna är också jämförbara, men gasproduktionen i förhydrolyssteg ger totalt sett en ökning av både gas- och metanproduktion. I Tabell 25 visas att denna ökning enligt simuleringarna motsvarar ca 5 % för slammet från UMEVA samt ca 8 % för slammen från NSVA och Gryaab. Det totala utbytet är emellertid högst för slammet från UMEVA.

Tabell 24 Resultat från simulering av enstegs rötning och rötning med inledande förhydrolys i labbskala (volym förhydrolyssreaktor 0,8 l, volym rötkammare 3,8 l). Uppehållstid förhydrolys 1,5 dag, rötkammare 15 dagar. Data från karakterisering av slam från NSVA, Gryaab och Umeva.

	Löst COD (mg/L)	VFA-COD (mg/L)	pH	NH4 (mg/L)	Gasflöde (mL/d)	Metanflöde (mL/d)	Metanhalt (%)
Enstegsrötning							
NSVA	380	170	7,5	860	3 800	2 440	64
Gryaab	440	230	7,5	1 100	4 800	2 960	62
UMEVA	330	120	7,4	500	2 920	1 900	65
Rötning med termofil förhydrolys							
Förhydrolys							
NSVA	9 800	9 600	5,8	820	770	300	39
Gryaab	14 000	13 000	5,5	1 080	960	310	32
UMEVA	8200	8030	5,5	540	460	170	36
Rötning							
NSVA	360	160	7,5	940	3 800	2 480	65
Gryaab	450	250	7,5	1 240	4 800	3 060	64
UMEVA	300	110	7,4	510	2 960	1 920	65
Summa förhydrolys + rötning							
NSVA					4 570	2 780	
Gryaab					5 760	3 370	
UMEVA					3 420	2 090	

Tabell 25 Utbyten och ökning av gas- och metanproduktion för rötning med inledande termofil förhydrolys jämfört med enstegs rötning. Utbytena är beräknade för den summerade metan- och gasproduktionen från både rötning och förhydrolys. Data från karakterisering av slam från NSVA, Gryaab och Umeva

	Utbyte ensteg Nm ³ /kg VS	Utbyte med förh. Nm ³ /kg VS	Ökning gasflöde %	Ökning metanflöde %
NSVA	0,22	0,24	11	8,2
Gryaab	0,21	0,23	8,3	8,1
UMEVA	0,26	0,27	10	5,2

5.4.3 Diskussion och slutsatser

Alla tre slam gav stabila förhydrolys- och rötningsprocesser i simuleringarna, med rimliga pH och koncentrationer av COD och ammonium i de två processtegen. Förhållandena i rötningssteget påverkades inte mycket av att införa en inledande förhydrolys i något av fallen. Slammet från Gryaab har en högre VS-halt än de andra slammen, vilket leder till att koncentrationerna av COD m.m. är högre i förhydrolyssteg.

I kalibreringarna som baserades på labförsök med slam från VA SYD visades att protein bröts ned snabbare i den termofila förhydrolysen än i den mesofila rötningssteget. Fett bröts däremot inte ned alls, medan kolhydrater bröts ned något snabbare i förhydrolyssteg än i en mesofil process. Därför kan man vänta sig att ett slam med hög proteinhalt och låg fetthalt ger ett

större metanutbyte i en process med termofil förhydrolys, än ett slam med hög fetthalt och låg proteinhalt. I simuleringarna ger slammen från NSVA och Gryaab, en större ökning av metan med förhydrolyssteg, än slam från UMEVA. Den största skillnaden mellan dessa slam är att UMEVA har en avsevärt högre andel fett per VS, vilket skulle kunna förklara skillnaden i simulerad effekt. Gasflödet ökar procentuellt sett mer än metanflödet, vilket kan bero på att en större del av gasen avgår som koldioxid och vätgas (se vidare kap. 5.5). Det innebär att VS-reduktionen ökar mer än vad metanproduktionen gör med inledande förhydrolys. Den processtörning som uppstod i NSVA-försöket visade sig inte vid simuleringen.

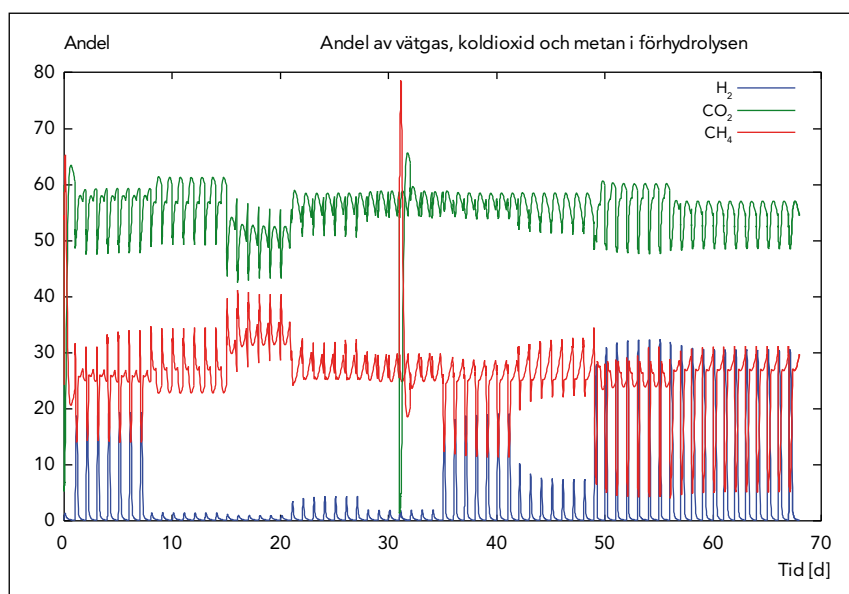
Enligt resultaten från simuleringarna ökar metanutbytet från samtliga slam då förhydrolys appliceras innan rötning. Denna trend kunde inte uppvisas i lab- eller pilotförsök. Dock kunde trenden med en ökad VS-reduktion genom implementering av förhydrolys innan rötning påvisas i labb- och pilotskala.

5.5 Simulering av vätgasbildning för att studera skillnad i VS-nedbrytning och metanproduktion

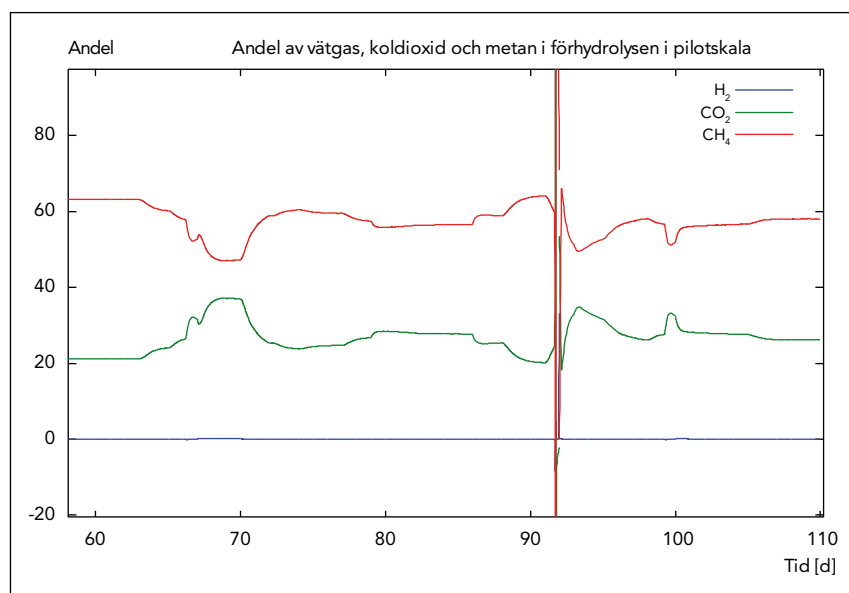
I de praktiska försöken som genomförts i studien har en högre VS-nedbrytning erhållits vid rötning med inledande förhydrolys jämfört med utan förhydrolys, men den ökade utröttningsgraden har i de flesta fall inte följts av en ökad metanproduktion. En möjlig förklaring till detta är att delar av det organiska materialet omvandlats till vätgas i hydrolystanken, som avgått i gasfasen utan att först omvandlas till metan av hydrogenotrofa metanogener.

I genomförda försök från pilotanläggningen togs vätgas prov ut för analys vid tre olika tillfällen. Proverna visade då på mycket låga halter av vätgas, ca 200–300 ppm. I labförsöken togs inga prover ut för vätgasanalys. Från piloten togs vid ett tillfälle ut flera prover för metanhaltanalys under en matningscykel, d.v.s. från det att hydrolystanken matas med nytt material tills det att en ny inmatning ska ske, för att se på eventuella skillnader i gasfasen. Det sågs då att metanhalten låg stabilt strax över 50 % (se Tabell 19), men eftersom vätgas ej samtidigt analyserades finns inte motsvarande information om variationen av denna. De tre vätgasanalyserna som därefter genomfördes vid tre på varandra följande veckor togs alla ut i den senare delen av hydrolystankens matningscykel, i samband med att övriga provuttag skedde.

För att få mer information kring hur vätgasbildningen i en förhydrolys kan se ut har simulering över skillnader i tid med ingående data från lab- och pilotförsök för gassammansättningen genomförts. I Figur 30 visas simulering av förhydrolysen från labförsök med blandslam från Källby avloppsreningsverk vid matning av förhydrolystanken 1 gång/dag och i Figur 31 visas simulering av förhydrolysen från pilotförsöken på Källby avloppsreningsverk. Simuleringen av pilotförsöken gjordes som om att matningen till hydrolystanken skedde kontinuerligt, men i praktiken skedde ju inmatningen här 4 gånger per dygn för att upprätthålla 6 h exponeringstid för materialet.



Figur 30 Simulering av andel vätgas, koldioxid och metan i förhydrolysstegets med data från labförsök med blandslam från Källby avloppsreningsverk och matning 1 gång/dag.



Figur 31 Simulering av andel vätgas, koldioxid och metan i förhydrolysstegets med data från pilotförsök på Källby avloppsreningsverk. Simuleringen gjord som om att matning sker helt kontinuerligt.

Simulering av gassammansättningen i förhydrolysstegets för labförsöket visar på kraftiga svängningar i gassammansättningen (se Figur 30). Matning har här skett endast 1 gång/dag och med endast 1,5 d HRT vilket har medfört att det blir stora variationer över dagen. Efter varje matningstillfälle kan man utläsa en momentan topp av vätgas, samtidigt som andelen metan minskar. Hur stor andel vätgas som bildas efter inmatning varierar med sammansättningen av inmatat slam och analysdata från förhydrolysisbehållaren och eftersom slam hämtats en gång per vecka kan man se en skillnad i gassammansättningsmönstret uppdelat veckovis. För simuleringen av för-

hydrolyssteg i pilotanläggningen med antagen kontinuerlig matning ses däremot ingen bildning alls av vätgas och variationerna i metan och koldioxid är mindre plötsliga (se Figur 31). Variationerna i gassammansättning baseras även här på skillnader i data från analyser av ingående blandslam och analysdata från förhydrolystanken. I båda figurerna ses att grafen vid ett tillfälle bildar ett vertikalt streck över diagrammet, ca vid dag 30 i Figur 30 och ca vid dag 90 i Figur 31, vilket kan antas bero på att indata för tidpunkten ger ett orimligt svar med modellen och den använda beräkningsmetoden.

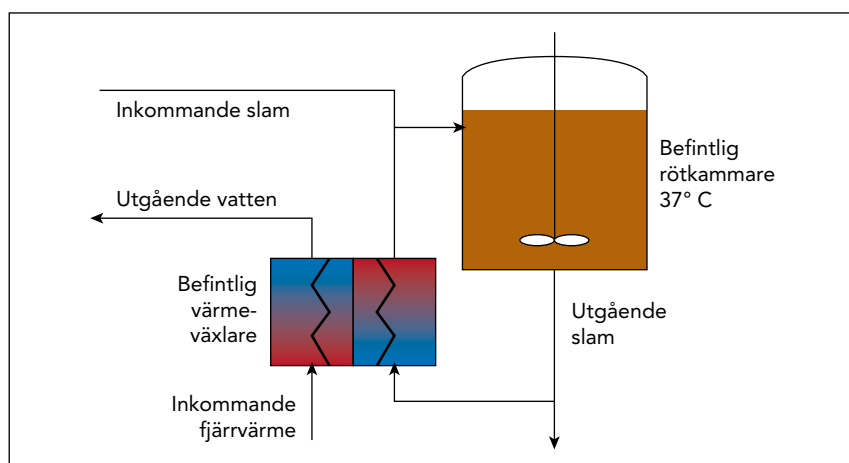
Skillnaden gentemot simuleringen av pilotanläggningen och den faktiska driften är att matning i praktiken skett var 6:e timme för att erhålla 6 h exponeringstid. Resultaten från simuleringen av labförsöken visade på en kraftig kortvarig bildning av vätgas efter ny inmatning av material och det är rimligt att anta att ett liknande gasbildningsmönster kan ha uppstått i pilotförsöken efter den intermittenta matningen som också skedde där. Eftersom matning i pilotanläggningen skedde 4 gånger/dag istället för 1 gång/dag är det troligt att skillnaden i variation i gassammansättning här var mindre, men att relativt högre vätgashalter än de uppmätta kan ha förekommit strax efter inmatning av nytt material.

6 Processtekniska överväganden vid implementering på reningsverk

6.1 Behov av kompletterande utrustning vid införande av förhydrolys

6.1.1 Befintligt system

För att kunna införa termofil förhydrolys på ett avloppreningsverk med befintlig mesofil rötkammare krävs komplettering av utrustning; både med tillkommande volymer och värmeväxlare. I Figur 32 visas hur processen kan vara utformad i ett befintligt system med uppvärmning av rötkammaren genom cirkulation till en extern värmeväxlare. I exemplet finns anslutning till fjärrvärmenätet, men inte värmeåtervinning från det utrötade slammet.



Figur 32 Exempel på utformning av ett befintligt system.

6.1.2 Utformning med förhydrolys

Utformningen för ett system med förhydrolys bestäms av temperaturen och exponeringstiden i förhydrolystankarna. Kravet på 6 h exponeringstid för eventuellt godkänd hygienisering innebär att en buffertvolym krävs om processen utformas med en enda förhydrolystank som matas med ett intervall på minst 6 h. Med två förhydrolystankar går det att mata in oftare, och flexibiliteten ökar. Med tre förhydrolystankar blir flödet kontinuerligt, vilket kan vara fördelaktigt eftersom det ger minimal risk för igensättningar och en mycket stabil drift. Tre tankar blir emellertid dyrare och kräver mer plats och driftsmässigt kan både en och två tankar räcka. I Tabell 26 visas en översikt över fördelar respektive nackdelar med olika utformningar med avseende på antal förhydrolystankar. Vilket alternativ som är mest lämpligt bör avgöras från fall till fall och beror på slamflöden, befintlig utrustning m.m.

Ett system med termofil förhydrolys kan utformas på flera olika sätt. I exemplet nedan (Figur 33) finns två förhydrolystankar som matas var 4:e timme. Värmeväxlare 1A, 1B samt vattentankarna utgör värmeåtervinningen i systemet. Eftersom det inte går att pumpa in och ut från en förhy-

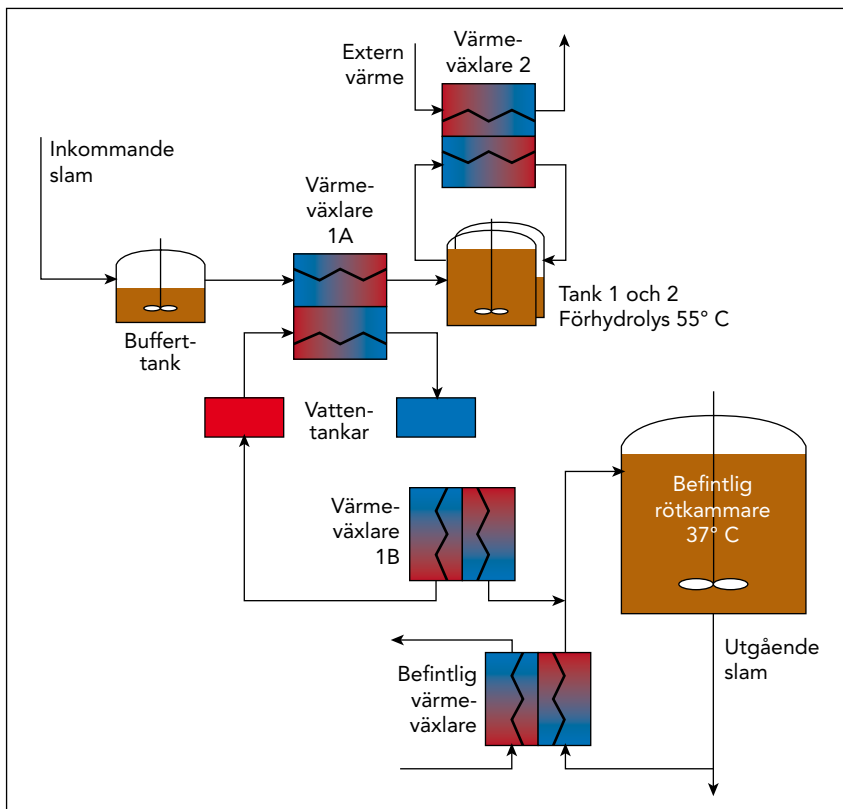
Tabell 26 Fördelar och nackdelar med olika utformningar av processen.

Antal förhydrolystankar	Fördelar	Nackdelar
1	Lägre investeringskostnad för tankar. Lägre energibehov.	Kräver förhållandevis högre kapacitet i värmeväxlare. Endast inmatning var 6:e timme.
2	Större flexibilitet än med bara en tank. Möjlighet till matning var 3:e timme.	Kräver förhållandevis högre kapacitet i värmeväxlare. Ökade värmeförluster från tankar.
3	Kontinuerligt flöde. Lägre investeringskostnad för värmeväxlare.	Högre investeringskostnad för tre tankar. Ytterligare ökade värmeförluster från tankar.

drolystank samtidigt, är det inte möjligt att värmeväxla flödena direkt mot varandra. Här är det löst så att strömmarna istället värms och kyls av vatten som pumpas runt mellan en kall och en varm tank. En liknande utformning kan göras med endast en hydrolystank.

Eftersom temperaturen behöver vara minst 55° C under hela exponeringstiden krävs extra tid för uppvärmning av slammet om detta sker med uppvärmning i förhydrolystanken. Värmeväxlare 2 är då kopplad mot en cirkulerande ström från hydrolystanken (Figur 33). Om värmning istället sker med värmeväxling innan förhydrolystanken går det snabbare att höja temperaturen. Värmeväxlare 2 är då placerad vid inkommande ström till hydrolystanken. Inmatning till och utmatning från röt-kammare och förhydrolys görs enligt ett sekvensschema (se exemplet i Tabell 27). I det här fallet antas att det tar en timme att pumpa in och värma slammet till 55° C.

Förutom tankar och värmeväxlare krävs annan utrustning, t.ex. omrörare och temperaturgivare i hydrolystankarna. Hydrolystankarna kopplas



Figur 33 Exempel på utformning av processen med två förhydrolystankar och värmning av förhydrolysen med cirkulation till värmeväxlare.

Tabell 27 Exempel på sekvensschema (1 dygn) för ett system med två förhydrolystankar och extra vattentankar.
Från Fredrik Karlsson, Läckaby Products (2011).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Tank 1																								
Tank 2																								

Förhydrolys
 Utpumpning
 Inpumpning

till gassystemet och utrustas med flödesmätare. För att på bästa sätt nyttiggöra gasen från hydrolystanken skulle denna eventuellt kunna bubblas genom rötkammaren, för att på så sätt omsätta bildad vätgas och koldioxid till metan av hydrogenotrofa metanogener i rötkammaren. En sådan lösning kräver dock trycksättning av gasen. Tanken för förhydrolys bör även utrustas för att kunna hantera eventuell skumbildning som kan uppstå här. Eventuellt bildat hydrolysskum kan då avledas, för att sedan matas in i förhydrolystanken igen när skummet lagt sig.

6.2 Värmebehov för termofil förhydrolys

Värmebehovet för rötning med termofil förhydrolys ökar jämfört med en mesofil enstegsprocess. Det ökade värmebehovet får vägas mot eventuella processfördelar som kan erhållas såsom exempelvis ökad slamreduktion, ökad biogasproduktion eller minskade variationer i materialflödet till metansteget. Huruvida krav på hygienisering finns inverkar också, och om krav på hygienisering förutsätts bör rötning med termofil förhydrolys jämföras med alternativa hygieniseringmetoder. För att få en uppfattning om hur värmebehovet för rötning med termofil förhydrolys kan se ut har några översiktliga beräkningar genomförts (se Tabell 28). De system som jämförs med ett befintligt mesofilt enstegssystem är: Termofil förhydrolys med 1 tank, termofil förhydrolys med 2 tankar, samt pastörisering med tre tankar. Endast värmeförluster från tankarnas väggar, tak och golv har beaktats. Alla övriga värmeförluster som kan uppkomma i ledningar, värmväxlare, eventuella vattentankar mm har därmed försumrats. I beräkningarna har tankarna förenklats så att deras höjd och diameter är lika stora och inga säkerhetsavstånd till tak (extra volymer) har medräknats. Samma värmegenomgångstal (U-värde) har använts för alla tankar såväl för väggar, golv och tak som för 55 och 70° C. Beräkningarna bygger således på flera antaganden och förenklingar och bör endast ses som ett grovt exempel.

Beräkningarna visar att värmebehovet är större för rötning med termofil förhydrolys jämfört med pastörisering med de antaganden som gjorts. Detta beror på att tankarna är avsevärt mycket större vid förhydrolys jämfört med pastörisering, vilket gör att värmeförlusterna genom den större mantelarean blir högre. Vid ett antaget inkommande slamflöde på 6 m³/h, vilket motsvarar högsta slamflödet på Källby avloppsreningsverk, blir värmeförlusterna vid termofil förhydrolys med 1 tank ca 68 000 kWh/år, med termofil förhydrolys med 2 tankar 86 000 kWh/år och med pastörisering med 3 tankar 25 000 kWh/år.

En viktig skillnad mellan förbehandling med termofil förhydrolys jämfört med pastörisering kan vara att termofil förhydrolys inte kräver lika hög temperatur på den externa värmen. I många fall är framledningstemperaturen i fjärrvärmenätet inte tillräckligt hög under hela året för att det ska vara möjligt att värma en pastörisering till 70° C, men uppvärmning till 55° C i en termofil förhydrolys kan vara möjlig. Det kan därför krävas en annan metod för uppvärmning av pastöriseringsprocessen, t.ex. att elda en del av den producerade biogasen i en gaspanna. Hur pastörisering eller termofil förhydrolys ska vägas mot varandra får övervägas för de individuella förutsättningarna som varje reningsverk har.

Sammanfattningsvis kan sägas att de ekonomiska förutsättningarna för termofil förhydrolys beror på eventuell ökning av metanproduktionen och ökad reduktion av slam för avsättning, framledningstemperatur i fjärrvärmenätet, fjärrvärmepris, värde av producerad biogas och kostnad för en alternativ värmekälla för uppvärmning till 70° C.

Tabell 28 Exempel på värmeförluster med termofil förhydrolys och pastörisering.

Beräkningsparametrar	
Flöde (m ³ /h)	6
U-värde (W/C·m ²)	0,8
Utomhustemperatur (° C)	6
Uppehållstid förhydrolys (dagar)	1,5
Fall 1: 1 förhydrolystank 55° C	
Vätskevolym 1 hydrolystank (m ³)	220
Mantelarea 1 hydrolystank (m ²)	200
Värmeförlust (kWh/år)	68 000
Fall 2: 2 förhydrolystankar 55° C	
Total vätskevolym 2 hydrolystankar (m ³)	2·110
Mantelarea 2 hydrolystankar (m ²)	250
Värmeförlust (kWh/år)	86 000
Fall 3: Pastörisering med 3 tankar 70° C	
Total vätskevolym 3 past. tankar (m ³)	3·6
Mantelarea 3 pastöriseringstankar (m ²)	55
Värmeförlust (kWh/år)	25 000

6.3 Påverkan på efterföljande processteg

Rötkammaren är en integrerad del av reningsverket och det är därför viktigt att beakta hur ett införande av en förhydrolys kan komma att påverka efterföljande processteg.

Avvattningen är en kritisk process när det gäller rötslam eftersom avsättningen av avvattnat slam ofta är förknippat med höga kostnader. En förändrad nedbrytning kan påverka det rötade slammets avvattningsegenskaper och olika förbehandlingar, såsom ultraljud och värmebehandling, har visat sig påverka avvattningsegenskaperna hos det rötade slamm (Pérez-Elvira et al. 2010; Barjenbruch och Kopplow 2003; Neyens och Baeyens 2003; Takashima 2008). En förbättrad avvattning innebär minskade slammängder för avsättning, medan en försämring i avvattningsegenskaper kan motverka den positiva effekten av en eventuell ökad nedbrytning. Ett mått på avvattningsbarhet är så kallad capillary suction time – CST, som visar hur

snabbt vätskan i slammet suggs upp av ett CST-papper. Ett försök att jämföra CST i de rötade slammen från pilotförsöket har gjorts för att påvisa eventuell effekt av förhydrolysen på avvattningsbarheten. Tyvärr var CST för båda slammen så pass lång att testet bedömdes som oanvändbart.

En ökad nedbrytning medför oftast en ökad mineralisering av näringsämnen, vilket medför högre halt av exempelvis kväve i rejektvattnet från avvattningen. Även halten COD kan öka om mer COD frigjorts vid hydrolysis än vad som sedan omvandlas till metan i rötkammaren. Både näringsämnen och COD medför en ökad internbelastning när rejektvattnet återförs till reningsprocessen. Resultaten från labförsöken i denna studie visar att förhydrolysis i en del fall leder till en ökning av COD och resultatet från pilotförsöket visar en ökad ammoniumhalt i vätskefasen. För specifika halter, se avsnitten om laboratorie- respektive pilotförsök.

6.4 Förhydrolysis som möjlighet att producera kolkälla

Biologisk förhydrolysis av avloppsslam kan, förutom att tjäna som förbehandlingsmetod till rötkammaren med syfte att erhålla effektivare utrotning och hygienisering, även utnyttjas för produktion av intern kolkälla till reningsverkets eventuella biosteg för kväve- och/eller fosforavskiljning. Ett förhydrolyssteg, såsom det beskrivits i denna rapport, skulle därför praktiskt kunna användas för att kombinera produktion av kolkälla med förbehandling och hygienisering av avloppsslam på reningsverken. En delström av det hydrolyserade materialet skulle då kunna tas ut från förhydrolystanken och, istället för att pumpas vidare in till rötkammaren, hanteras för att användas som kolkälla. Det hydrolyserade materialet avvattnas då, exempelvis i en centrifug, för att avskilja hydrolysatet (vätskefasen) där det lättnedbrytbara organiska materialet finns.

För att göra en inledande bedömning av kvaliteten på materialet ut från förhydrolysen i de olika försöken som ingått i denna studie har erhållna analyser här använts för att sammanställa parametrar som brukar användas för att bedöma ett hydrolysatets lämplighet som kolkälla (exempelvis Jönsson m.fl. 2006 och 2008 samt Norlander 2008). Eftersom fokus med denna studie inte specifikt varit produktion av kolkälla har inga försök med bakteriernas förmåga att använda kolkällorna genomförts. Vi kan därför här endast se på mängden COD och VFA som bildats i förhydrolysen samt hur mycket kväve som frisatts under hydrolysen (se Tabell 29). Ingen total-COD analys för slammen har kunnat göras, varför inte heller produktionen av kolkälla här relateras till lösligheten av COD.

I jämförelse med andra studier ser här generellt ut att erhållas en högre andel VFA i hydrolysatet (67–77 %) (se Tabell 29), jämfört med exempelvis Jönsson m.fl. 2006 (5–50 %), Jönsson m.fl. 2008 (43–60 %) och Norlander 2008 (50–60 %). Detta beror förmodligen på att hydrolysen i denna studie skett vid en högre temperatur, eftersom det verkar finnas ett temperaturberoende för andelen VFA i förhållande till det COD som gått i lösning (Jönsson m.fl. 2008). En hög andel VFA är betydelsefullt om kolkällan ska användas för biologisk fosforavskiljning. Mängden bildad kolkälla för de

olika slammen som använts i studien var ca 170–220 mg COD_{löst} per gram VS i ingående slam (se Tabell 29). Detta kan jämföras med 18–185 mg COD_{löst}/g VSS i Jönsson m.fl. 2006, 105–269 mg COD_{löst}/g VSS i Jönsson m.fl. 2008 och maximalt 350 mg COD_{löst}/g VSS i Norlander 2008. Produktionen av kolkälla som erhållits vid hydrolys av olika avloppsslam i denna studie kan därmed sägas ligga i samma storleksordning som försök med hydrolys av slam i andra studier, även om det i jämförelsen här ej tagits hänsyn till skillnader i processförhållanden m.m.

Frisättningen av ammonium vid hydrolys har för de studerade slammen här varit 18–27 mg NH₄-N/g VS, där den högsta halten erhållits för pilotanläggningen. För hydrolys av primärslam och blandslam i Norlander 2008 var halten löst NH₄-N 15–40 mg/g VSS och i Jönsson m.fl. 2008 anges att i Æsøy och Ødegaard 1994 var frisättningen 16 mg NH₄-N/g VS. Frisättningen av ammonium för slam i denna studie kan således anses vara jämförbar med resultat från andra studier.

Det bör i sammanhanget påpekas att syftet med denna studie ej varit hydrolys för produktion av kolkälla och att processen därför ej optimerats för detta. Första prioritet har istället varit att finna en processlösning som i första hand har gett en fullgod hygienisering vid en uppehållstid som valts bl.a. för att ge en kortare uppehållstid och därmed en ekonomiskt billigare teknisk lösning. Att processen ej optimerats för produktion av kolkälla gäller kanske speciellt för pilotförsöken där det i förhydrolysstegets erhöles en relativt omfattande metanproduktion, vilket innebär att kolkälla konsumeras av metanogenerna.

För mer djupgående studier för hydrolys med syfte att producera kolkälla bör även aspekter såsom möjlighet att avskilja hydrolysat från den fasta fasen, samt mikroorganismers förmåga att tillgodogöra sig den specifika kolkällan, beaktas.

Tabell 29 Erhållna parametrar för bedömning av ingående slams lämplighet som kolkälla efter förhydrolys vid 55° C och med 1,5 dygns genomsnittlig HRT.

Parameter	Enhet	NSVA	GRYAAB	UMEVA	KÄLLBY	KÄLLBY PILOT
Mängd kolkälla före hydrolys	(mg COD _{löst} /g VS)	54	54	106	55	35
Bildad kolkälla efter hydrolys	(mg COD _{löst} /g VS)	171	221	213	219	202
Andel VFA i hydrolysat	(mg COD-VFA/mg COD _{löst})	68 %	74 %	77 %	68 %	67 %
Mängd NH ₄ -N före hydrolys	(mg NH ₄ -N/g VS)	2	2	4	4	2
Bildad NH ₄ -N efter hydrolys	(mg NH ₄ -N/g VS)	18	23	18	19	27

6.5 Säkerhetsaspekter avseende uppkomst av vätgas

I en tank för separat förhydrolys kan vätgas produceras. Detta utnyttjas vid så kallad bio-hytanproduktion, där målsättningen är att producera såväl vätgas som metangas. Även om man inte direkt styr en förhydrolys mot vätgasproduktion är det troligt att vätgas erhålls. För att få en uppfattning om mängden vätgas som kan förväntas erhållas i ett förhydrolyssteg med

separat hydrolys av avloppsslam har vätgasprover vid tre tillfällen tagits ut från hydrolystanken på pilotanläggningen på Källby avloppsreningsverk. Proverna togs ut under tre på varandra följande veckor under stabil drift av pilotanläggningen och visade på låga halter av vätgas i producerad gas, ca 200–300 ppm vätgas för samtliga prov. Metanhalten i producerad gas var under denna tid ca 50–55 %, vilket visar att det fanns mycket metanogen aktivitet i förhydrolyssteg. Om förhydrolyssteg belastats mer är det troligt att det erhållits mindre metangas och mer vätgas under driften av pilotanläggningen. Eftersom vätgasproverna togs ut i den senare delen av matningscykeln till förhydrolystanken vet vi emellertid inte om mer vätgas har bildats direkt efter inmatning av nytt material. I de simuleringar som gjorts av gassammansättning i en förhydrolys vid matning 1 gång/dag (lab-försök) ses att en topp av vätgasproduktion kan erhållas direkt efter inmatning av nytt material (se kap. 5.5).

I en röt-kammare där hydrolys, syrabildning och metanbildning sker i ett och samma steg omvandlas bildad vätgas från syrabildningen till metangas av hydrogenotrofa metanogener, mikroorganismer som bildar metangas och vatten av vätgas och koldioxid. Om man inte avser att specifikt producera en blandning av metan- och vätgas skulle det därför vid processer med separat hydrolyssteg kunna vara önskvärt att låta hydrolysgasen gå genom röt-kammaren för att där omvandla vätgas till metangas.

Eftersom vätgas är en mycket explosiv gas kan den innebära en säkerhetsrisk om anläggningen inte är anpassad för detta. Brännbara gaser delas in i olika explosionsgrupper beroende på explosionsbenägenhet. Biogas, naturgas och metangas är i huvudsak samma gas och indelas i explosionsgrupp IIA. Vätgas indelas däremot i explosionsgrupp IIC, vilket innebär en högre explosionsbenägenhet. Explosionsgruppen styr vilka krav på utrustning som ställs och hur bedömning för EX-klassningen görs. När en gas är en blandning mellan olika gaser uppkommer frågeställningen vilken explosionsgrupp som denna gasblandning då tillhör. I regelverket (kapitel 5.2.4 i 60079-20-1 "Material characteristics for gas and vapour classification – Test methods and data") står att industriell metan, såsom naturgas, klassificeras som grupp IIA så länge den inte innehåller mer än 25 % (volym procent) vätgas. Vi kan därför betrakta en blandning av metan och vätgas där vätgasens innehåll (volym/volym) understiger 25 % som explosionsgrupp IIA. (Kent Ruuth Konsult AB, exkonsult i Kungälv, 2012-01-19)

Om vätgaskoncentrationen riskerar att bli högre än 25 % måste andra säkerhetsåtgärder vidtas än vad som en biogasanläggning redan idag konstrueras för. Vid explosionsgrupp IIC, vilket blir aktuellt om vätgashalten överstiger 25 %, kan det bli svårt att hitta mekanisk utrustning, i detta fall framförallt tryckhöjningsfläktar, som klarar explosionsgrupp IIC. Övrig utrustning såsom exempelvis temperturgivare finns att tillgå, och för pumpar av rötmassa finns ingen skillnad eftersom de anses pumpa vätska. För att komma runt detta, om man vill ha möjlighet att trycksätta sin gas från hydrolystanken och man misstänker att vätgaskoncentrationen kan riskera att överstiga 25%, kan man blanda in biogas från röt-kammaren i gasledningen från hydrolystanken för att hålla vätgaskoncentrationen tillräckligt låg för att kunna passera en tryckhöjningsfläkt. Detta är enligt Kent Ruuth

acceptabelt så länge man kan ha kontroll på koncentrationen av vätgas. För att säkerställa att vätgashalten underskrider gränsvärdet skulle exempelvis en onlinemätning av metan- och koldioxidkoncentrationerna kunna ske för att se att summan av dessa överstiger minst ett visst tröskelvärde, d.v.s. minst över 75 %. Ett annat alternativ är att kontinuerligt blanda in en så pass stor volym gas från rötkammaren i hydrolysgasen att man på så sätt kan visa att vätgas halten aldrig kan överstiga 25 %. (Kent Ruuth Konsult AB, exkonsult i Kungälv, 2012-01-19)

För avloppsslam har vi i den litteraturstudie som gjordes som förstudie till denna rapport inte hittat några studier som visar på någon stor vätgasproduktion under förhydrolys, och aldrig med halter närmare 25 % (Persson m.fl. (2010)). Detta kan bero på att avloppsslam, beroende på innehållet av primärslam, redan innehåller delvis nedbrutet material. För andra substrat, som exempelvis matavfall, finns högre halter av vätgas rapporterat i litteraturen (se exempelvis Cavinato m.fl. (2009) och Liu m.fl. (2006)). För ett avloppsreningsverk med stor industrianslutning från exempelvis livsmedelsberedande verksamhet ser det därför ut att finnas extra stor anledning till att vidta försiktighetsåtgärder, såsom att mäta vätgashalten direkt eller indirekt genom att mäta koldioxid- och metanhalt. De simuleringar som gjorts i denna studie över gassammansättning i ett förhydrolyssteg visar att man vid inmatning av nytt material till förhydrolysen med en frekvens av 1 gång/dag kan erhålla över 30 % vätgas momentant efter inmatningen (se kap. 5.5). Simuleringarna visar samtidigt att man vid en antagen kontinuerlig inmatning till förhydrolyssteg, vid de processförutsättningarna som undersöktes på Källby avloppsreningsverk, inte erhåller någon vätgas. Vid 6 h exponeringstid i förhydrolystanken kommer inmatning att ske 4 gånger/dag, vilket innebär att inmatningen är intermittent och att det därmed finns en ökad sannolikhet för momentant hög vätgasproduktion i analogi med resultaten från simuleringarna.

Av förstudien till denna studie (Persson m.fl., 2010) framkom att inga säkerhetsproblem med vätgasbildning har observerats för fullskaleanläggningar som använder sig av separat förhydrolys. En rimlig försiktighetsåtgärd för ett avloppsreningsverk som vill implementera förhydrolys kan ändå vara att mäta vätgas eller koldioxid- och metanhalt och ha ett larm kopplat till detta. Om tryckhöjning sker av gasen från förhydrolystanken, för att t.ex. bubblas genom rötkammaren, ska gasen kunna förbiledas denna så att den exempelvis endast genom självtryck kan ledas in på gasledningen från rötkammaren, alternativt att man alltid blandar in en konstant andel gas från rötkammaren före tryckhöjning för att säkerställa att vätgashalten aldrig kan överskrida 25 %. Med anledning av risken för momentant höga vätgashalter vid intermittent inmatning av nytt material till ett förhydrolyssteg (se kap. 5.5) bör detta undersökas vidare för att få en tydligare bild av nödvändiga säkerhetsåtgärder vid rötning med inledande förhydrolys.

7 Sammanfattande diskussion och slutsatser

Nedan följer sammanfattande diskussioner och slutsatser med återkoppling till studiens syften och mål. I Tabell 30 sammanfattas resultaten från utförda lab- och pilotförsök, med avseende på substratkaraktär, metanproduktion och nedbrytning.

7.1 *Effekt på biogas-/metanproduktion och nedbrytning*

En ökad gasproduktion erhöles vid rötning med förhydrolys i pilotskala, men metanproduktionen ökade inte. I labförsöken varierade effekten på metanproduktionen från -8 % till +18 % för de tre olika testade blandslammen.

- En högre TS- och VS-reduktion erhöles vid rötning med inledande förhydrolys.
- VS-reduktionen ökade mer än metanproduktionen med inledande förhydrolys, detta visar både simuleringen, pilotförsöket och labförsöken. Möjliga förklaringar till detta är förlust av vätgas och/eller flyktiga organiska föreningar i förhydrolyssteg, delvis aerob nedbrytning, samt fel i gasflödesmätning. Utförda mätningar och analyser kan inte säkerställa orsaken, men den troligaste antas vara förlust av metanpotential genom vätgasavgång i förhydrolyssteg.
- Rötning med förhydrolys ger en utjämnande effekt på rötkammaren. Processlösningen kan därför vara speciellt intressant för reningsverk med stora variationer i belastning till rötkammare.
- Förbehandling med pastörisering gav inte en högre metanproduktion med något av de testade blandslammen. En del flyktigt organiskt material kan ha avgått under behandlingen vid 70° C.

7.2 *Samband mellan substrategenskaper, processförhållanden och effekt på den anaeroba processen*

- Labförsöken visade att en ökning av uppehållstiden från 1,5 d till 3,5 d inte gav någon ytterligare hydrolyseffekt på blandslammet från VA SYD. Cykelstudie med blandslam från NSVA, Gryaab samt UMEVA visade på att en ännu kortare uppehållstid än 1,5 d skulle kunna vara möjlig i förhydrolyssteg.
- Effekten på metanutbytet av ett separat förhydrolyssteg innan rötning skiljde sig för blandslammen från de tre olika reningsverken från -8 % till +18 % i metanutbyte per VS. Detta skulle kunna kopplas till dels de olika blandslammens sammansättning och nedbrytbarhet, dels till de olika organiska belastningarna över respektive testlinje. Den testlinje som

Tabell 30 Sammanställning av resultat från utförda lab- och pilotförsök med fyra olika blandslam.

Reningsverk	Slammets ursprung och sammansättning					Försöks-skala
	Slamålder biosteg	Andel Industri (PE)	TS	VS av TS	Fett/protein/kolhydrat (% av VS)	
NSVA	10 d	14 %	5,2 %	76 %	16/35/49	Lab
Gryaab	2 d (AS)	5 %	6,7 %	69 %	11/32/57	Lab
VA SYD	6-8 d	3 %	5,0 %	78 %	15/37/48	Lab
VA SYD	6-8 d	3 %	4,8 % (max 5,7, min 3,3)	75 % (max 80, min 68)	18/33/49	Pilot
UMEVA	2-4 d	14 %	3,1 %	73 %	27/37/37	Lab

Reningsverk	HRT/ Matningsfrekv.		Resultat av förhydrolys Andel av metanproduktion	Resultat på totalprocess		
	Förhydrolys	Rötning		+/- metan-utbyte	+/- TS-red	+/- COD, NH ₄ -N i rejekt
NSVA	1,5 d/ 1 ggr per dag	15 d/ 1 ggr per dag	3 %	- 8 %	+	+0
Gryaab	1,5 d/ 1 ggr per dag	15 d/ 1 ggr per dag	4,8 %	+18 %	+	0/0
VA SYD	1,5 d/ 1 ggr per dag	15 d/ 1 ggr per dag	5,6 %	0	+	+0
VA SYD	1,5 d/ 4 ggr per dag	15 d/ 4 ggr per dag	33 %	0	+	0/+
UMEVA	1,5 d/ 1 ggr per dag Inget kontinuerligt metansteg					

hade högst organisk belastning (Gryaab) uppvisade även störst positiv effekt på metanutbytet. Detta blandslam hade även lägst andel fett och högst andel kolhydrat av VS, samt lägst metanpotential.

- Simuleringar visade att slam med låg proteinhalt kan förväntas ge en mindre ökning av metanproduktionen än slam med högre proteinhalt. Denna trend kunde inte påvisas i labförsöken. Det krävs mer arbete kring utveckling av modellen för att på ett mer tillförlitligt sätt kunna förutsäga prestandan för rötning med förhydrolys för ett nytt substrat.
- Metanpotentialtest kunde inte användas för att utvärdera effekten av de i studien utvärderade förbehandlingsteknikerna, vare sig med avseende på kinetik eller nedbrytbarhet.
- Matning var 6:e timme resulterade i en högre metanproduktion från förhydrolyssteg, jämfört med matning var 24:e timme, vilket troligen har sin förklaring i att en tätare matningsfrekvens ger förutsättningar för stabila förhållanden för metanogenerna.

7.3 Hygieniseringseffekt

- Termofil förhydrolys med 1,5 d HRT och 6 h exponeringstid med efterföljande mesofil rötning har i pilotskala visat sig uppnå hygieniseringskraven enligt ABP- förordningen och SPCR 120. Dagens analysmetoder klarar dock inte att verifiera de krav som Naturvårdsverket ställer för hygienisering av avloppsslam, om inte slammet först avvattnas.
- När motsvarande försök utfördes i labskala med 24 h exponeringstid kunde inte samma hygieniseringseffekt påvisas, och resultaten var inkonsekventa och svårtydbara. Inte heller pastörisering kunde i samtliga fall valideras i labskala. En anledning till de svårtydbara resultaten i labskala

kan ha varit att kontaktytans storlek i förhållande till volymen är större i labbskala än i pilotskala. Varken i lab- eller pilotförsök användes sterila kärl vid provtagningen till mikrobiologiska analyser. Resultaten tyder på att provhantering och eventuellt även försöksskala är av betydelse, samt att tydliga riktlinjer behövs för hur validering av nya hygieniseringsmetoder ska genomföras praktiskt.

7.4 Processtekniska följder

- De ekonomiska förutsättningarna för termofil förhydrolys beror på eventuell ökning av metanproduktionen och ökad reduktion av slam för avsättning, framledningstemperatur i fjärrvärmenätet, fjärrvärmepris, värde av producerad biogas och kostnad för en alternativ värmekälla för uppvärmning till 70° C.
- Resultaten från labförsöken i denna studie visar att förhydrolys i en del fall leder till en ökning av COD och resultatet från pilotförsöket visar en ökad ammoniumhalt i vätskefasen. Både näringsämnen och COD medför en ökad internbelastning när rejektvattnet återförs till reningsprocessen.
- För att bäst utnyttja systemet bör hydrolysgasen passera rötkammaren för att vätgas och koldioxid bildad under hydrolysen här ska kunna omvandlas till metan.
- Om vätgashalten i förhydrolyssteg riskerar att överstiga 25 volymprocent behöver EX-klassning av anläggningen, tillräcklig explosionsgrupp för utrustning och processlösning för eventuell användning av tryckhöjningsfläktar för hydrolysgas ses över. Enligt förstudien är det inte sannolikt att separat hydrolys av enbart avloppsslam kan ge så höga vätgashalter, men en försiktighetsåtgärd kan vara att direkt eller indirekt mäta vätgashalten i ett förhydrolyssteg. Med anledning av risken för momentant höga vätgashalter vid intermitterant inmatning av nytt material till ett förhydrolyssteg, som setts vid simulering av processen, bör detta undersökas vidare för att få en tydligare bild av nödvändiga säkerhetsåtgärder vid rötning med inledande förhydrolys.
- Ett förhydrolyssteg skulle kunna användas för att kombinera produktion av kolkälla med förbehandling och hygienisering av avloppsslam på reningsverken. Hydrolysatet från försöken med de olika blandslammen innehöll en relativt hög andel VFA, jämförbara mängder COD_{löst} och frisättningen av ammonium var liknande som för resultat från andra studier där produktion av kolkälla studerats.

7.5 Måluppfyllnad

Målet med studien var att ge ett underlag för att kunna avgöra nedanstående punkter. Här görs ett försök att analysera måluppfyllnaden för studien.

- Under vilka förutsättningar är termofil förhydrolys gynnsamt för ökad processeffektivitet?
 - För samtliga testade blandslam erhöles en högre TS- och VS-reduktion med termofil förhydrolys innan rötning.

- Med avseende på metanutbyte gav studien inget entydigt svar, men bäst resultat erhöles från testlinjen med högst organisk belastning, samt vars slam innehöll en låg andel fett och en hög andel kolhydrater av VS.
- Bildad gas i förhydrolyssteg måste ledas in i efterföljande rötkammare för att fullt kunna tillgodogöras.
- Vid stora variationer i inkommande slam kan förhydrolysen fungera som ett utjämningssteg.
- Karakteriseringsmetoden som använts är för grov för att fullt ut kunna förklara de skillnader i effekt som iakttogs.
- Kan termofil förhydrolys valideras som godkänd hygieniseringsmetod för Klass A-slam?
 - De hygieniseringskrav som ställs i förslaget till ny slamförordning kan ej uppfyllas med avseende på enterokocker, då detektionsnivån för denna ligger högre än uppställt krav i icke-avvattnat slam.
 - Samtliga krav som ställs på hygienisering i ABP-förordningen uppfyllades med termofil förhydrolys i pilotskala.
 - Resultaten från labbskala gav svårtydbara resultat med avseende på hygieniseringseffekt, både från termofil förhydrolys och pastörisering.
- Hur påverkar termofil förhydrolys patogener och anaerob nedbrytning i jämförelse med den etablerade metoden pastörisering?
 - Resultaten från labbskala gav svårtydbara resultat med avseende på hygieniseringseffekt, både från termofil förhydrolys och pastörisering.
 - Pastörisering i labbskala innebar en del praktiska problem. För att säkerställa att rätt temperatur uppnås i substratet under rätt tidsrymd, samtidigt som inget organiskt material förloras, skulle specialutvecklad utrustning behövas.
- Vilka aspekter måste beaktas vid implementering av termofil förhydrolys?
 - För implementering av förhydrolys i fullskala krävs komplettering av utrustning, både med tillkommande volymer och värmexchangers. Hur många tankar som krävs bör avgöras från fall till fall.
 - Om vätgashalten i förhydrolyssteg riskerar att överstiga 25 volymprocent behöver EX-klassning av anläggningen, tillräcklig explosionsgrupp för utrustning och processlösning för eventuell användning av tryckhöjningsfläktar för hydrolysgas ses över. Det bör undersökas vidare om så höga vätgashalter kan erhållas vid intermittent inmatning av avloppsslam i ett förhydrolyssteg.
 - De ekonomiska förutsättningarna för termofil förhydrolys beror på eventuell ökning av metanproduktionen och ökad reduktion av slam för avsättning, framledningstemperatur i fjärrvärmenätet, fjärrvärmepris, värde av producerad biogas och kostnad för en alternativ värmekälla för uppvärmning till 70° C.
 - Vid processer med separat hydrolyssteg är det önskvärt att låta hydrolysgasen gå genom rötkammaren för att där omvandla vätgas och koldioxid till metangas.
 - Implementering av termofil förhydrolys innan rötning kan medföra en ökad internbelastning när rejektvattnet återförs till reningsprocessen.
 - Effekt på avvattningsegenskaperna kunde ej utvärderas i denna studie, då metod saknas för att utvärdera detta i lab- och pilotskala.

7.6 Återkoppling till förstudien

- I förstudien framgick att en stor andel av publicerade studier angående rötning med förhydrolys gjorts på avloppsslam. I samtliga studier där rötning med och utan förhydrolys jämfördes för avloppsslam erhöles processfördelar som ökat metanutbyte och/eller ökad VS-reduktion. Där skillnad i metanutbyte studerades sågs en ökning på 7–31 % och där skillnad i VS-reduktion studerades en ökning på 0–25 % för blandslam respektive 0–70 % för överskottsslam. I denna studie erhöles en ökning av VS-reduktionen för de studerade blandslammen, men ingen enhetlig förbättring av metanutbytet.
- Förstudien visade på relativt stora skillnader i optimal uppehållstid i förhydrolysisprocessen för avloppsslam, 1–7 dagar. En studie visade på stabil metanproduktion i förhydrolysen vid 2 d HRT, men detta var för Cambi-behandlat slam. I denna studie har så låg uppehållstid som 1,5 d HRT visat på att stabila metanogena förhållanden kan erhållas. Denna studie pekar därmed mot att ytterligare lägre HRT kan vara optimalt.
- Förstudien visade på att förhydrolys kan ge en god patogenreduktion. Detta har verifierats i denna studie, och i pilotförsöken erhöles en patogenavdödning motsvarande kraven enligt ABP- förordningen och SPCR 120.

7.7 Förslag till fortsatta studier

- För att erhålla ett mer renodlat hydrolyssteg, utan eller med liten metanbildning, skulle kortare HRT och/eller högre organisk belastning behöva tillämpas. Processfördelar och processkillnader med ett sådant optimerat separat hydrolyssteg och dess hygieniseringspotential skulle behöva utvärderas.
- Dagens bakteriologiska analysmetoder klarar inte att verifiera de krav som Naturvårdsverket ställer för hygienisering av avloppsslam om inte slammet först avvattnas. Om kraven, såsom de är formulerade nu, ska verkställas måste först nya analysmetoder tas fram och godkännas alternativt kan endast avvattnat rötat slam analyseras.
- Det är av stort intresse att koppla substratsammansättning till metanpotential och förbehandlingseffekt. Vidare utveckling och känslighetsanalys av olika analysparametrar behövs.

8 Referenser

8.1 Publicerat material

- Barjenbruch, M., Kopplow, O. (2003). Enzymatic, mechanical and thermal pre-treatment of surplus sludge. *Advances in Environmental Research*, 7, 715–720.
- Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V., Pavlostathis, S.G., Rozzi, A.,
- Sanders, W.T.M., Siegrist H., Vavilin, V.A. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology* Vol 45 No 10.
- Blumensaat, F. Keller, J. (2005). Modelling of two-stage anaerobic digestion using the IWA
- Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1). *Water Research* 39 171–183.
- Bolzonella, D., Pavan, P., Battistoni, P., Cecchi, F. (2005). Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge: Influence of the solid retention time in the wastewater treatment process. *Process Biochemistry*, 40, 1453–1460.
- Cavinato, C., Fatone, F., Bolzonella, D., Pavan, P. (2009). Two-phase thermophilic anaerobic co-digestion of organic waste and activated sludge: process optimization for bio-hythane production in a integrated waste-wastewater treatment approach. Abstract och presentation vid IWA Water & Energy -mitigation in the water sector & potential synergies with the energy sector konferens 29-31 oktober, Köpenhamn.
- Gossett, J.M., Belser, R.L. (1982). Anaerobic digestion of waste activated sludge. *Journal – Environmental Engineering Division, ASCE*, 108, 1101–1120.
- Jönsson, K., Jansen, J. la C. (2006). Hydrolysis of return sludge for production of easily biodegradable carbon: effect of pre-treatment, sludge age and temperature. *Water Science and Technology*, Volym 53, Nr 12, s. 47–54.
- Jönsson, K., Pottier, A., Dimitrova, I., Nyberg, U. (2008). Utilising laboratory experiments as a first step to introduce primary sludge hydrolysis in full-scale. *Water Science and Technology*, Volym 57, Nr 9, s. 1397–1403.
- Livsmedelsverket (2007). Protein. Senast uppdaterad 2011-11-11. <http://www.slv.se/sv/grupp1/Mat-och-naring/Vad-innehaller-maten/Livsmedelsdatabasen-/Naringsamnen-och-varden/Protein/>
- Liu, D., Liu, D., Zeng, R.J, Angelidaki, I. (2006). Hydrogen and methane production from household solid waste in the two-stage fermentation process. *Water Research*, vol 40, 2230–2236.

- Lundqvist, P. (2009). Fjärrvärme för utökad biogasproduktion. Värmeforsk.
- Miron, Y., Zeeman, G., van Lier, J.B., Lettinga, G. (2000). The role of sludge retention time in the hydrolysis and acidification of lipids, carbohydrates and proteins during digestion of primary sludge in CSTR systems. *Water Research* 34, 1705–1713.
- Naturvårdsverket (2010). Redovisning av regeringsuppdrag 21: Uppdatering av "Aktionsplan för återföring av fosfor ur avlopp". 2010-04-07, Dnr 525-205-09.
- Neyens, E., Baeyens, J. (2003). A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability. *Journal of Hazardous Materials*, 98, 51–67.
- Norlander, H. (2008). Slamhydrolys för förbättrad denitrifikation på Klagshamns avloppsreningsverk. Examensarbete vid Lunds Tekniska Högskola, Institutionen för Kemiteknik, Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik.
- Parkin, G., Owen, W.F. (1986). Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges. *Journal of Environmental Engineering*, 112, 867–920.
- Pérez-Elvira, S.I., Ferreira, L.C., Donoso-Bravo, A., Fdz-Polanco, M., Fdz-Polanco, F. (2010). Full-stream and part-stream ultrasound treatment effect on sludge anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, 61, 1363–1372.
- Persson, E., Ossiansson, E., Carlsson, M., Uldal, M., Olsson, L.E. (2010). Förstudie; Rötning med inledande hydrolyssteg för utökad metanutvinning på avloppsreningsverk och biogasanläggningar. Rapport SGC 215.
- Ramirez, I., Motteta, A., Carrèrea, H., Délérisb, S., Vedrenne, F., Steyer, J-P. (2009). Modified ADM1 disintegration/hydrolysis structures for modeling batch thermophilic anaerobic digestion of thermally pretreated waste activated sludge. *Water research* vol.43, 3479-3492.
- Rosén, C., Jeppsson, U. (2005). Aspects on ADM1 Implementation within the BSM2 Framework. Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund Institute of Technology.
- Standard IEC 60079-20-1:2010 Material characteristics for gas and vapour classification – Test methods and data.
- Statens naturvårdsverks författningssamling, SNFS 1990:14 MS:32, Kungörelse med föreskrifter om kontroll av utsläpp till vatten- och markrecipient från anläggningar för behandling av avloppsvatten från tätbebyggelse.
- Takashima, M. (2008). Examination on process configurations incorporating thermal treatment for anaerobic digestion of sewage sludge. *Journal of Environmental Engineering*, 134, 543–549.

8.2 Övriga referenser

Karlsson, F. (2011). Exempel på sekvensschema för ett system med två förhydrolystankar. Läckaby Products.

Kent Ruuth Konsult AB, exkonsult i Kungälv, muntlig och skriftlig kontakt 2012-01-19.

Bilaga A – Analyismetoder

Analyser

Om inget annat anges i rapporten har metoderna i Tabell 31 använts i försöken. Alla kemiska analyser utom totalfett utfördes på AnoxKaldnes laboratorium. För totalfett skickades prov till AK Lab för analys.

Tabell 31 Metoder och standarder som använts för analyser i laborations- samt pilotförsök.

Analys	Metod	Mätosäkerhet
Metanhalt	GC-TCD	i.u.
Torrsubstans & Glödförlust, TS & VS	SS 028113, utg 1	14 %
pH	SS 028122-2, utg 2	2 %
Flyktiga fettsyror, VFA	GC-FID	i.u.
Kemiskt syreförbrukande ämnen, COD	Dr.Lange LCK 114	15 %
Ammoniumkväve, NH ₄ -N	Dr.Lange LCK 303	i.u.
Total Kjeldahlkväve, TKN	SS-EN 25663, utg 1	11 %
Totalfett	SS 028211-1	i.u.
Alkalinitet	Dr. Lange LC 362	i.u.

Karakterisering

Vid karakteriseringarna analyserades totalfett direkt för varje prov. Provets råproteininnehåll beräknades därefter genom att multiplicera mängden kväve i substratet med en faktor (6,25). Denna faktor är ett medelvärde för olika proteinstrukturer (Livsmedelsverket, 2007). Beräkningar gjordes enligt följande:

$$\text{Protein (g/kg)} = (\text{TKN}_{\text{tot}} - \text{TKN}_{\text{filt}}) \cdot 6,25$$

$$\text{Kolhydrater (g/kg)} = \text{VS} - \text{protein} - \text{totalfett}$$

$$\text{Inert material (g/kg)} = \text{TS} - \text{kolhydrat} - \text{protein} - \text{fett}$$

Teoretiskt metanutbyte

Vid beräkningar av teoretiska metanutbyten ha följande värden använts;

Fett 1,014 Nm³/ton

Protein 0,496 Nm³/ton

Kolhydrat 0,42 Nm³/ton

Satsvist metanpotentialförsök

Ett metanpotentialförsök ger information om ett substrats anaeroba nedbrytbarhet och maximala metanbildningspotential. Substratet blandas i försöket med en stor mängd ymp, det vill säga rötrest från välfungerande biogasanläggning, röt-kammare eller laboratorieförsök. Ympen bidrar, förutom med mikroorganismer, dels med kompletterande näring till substratet, dels med en utspädnings effekt av eventuella toxiska substanser. Information om näringsmässiga begränsningar i substratet, samrötningseffekter samt hämningseffekter kan därför inte hämtas från ett konventionellt utformat metanpotentialförsök.

I de aktuella försöken har 250 ml testflaskor använts. Flaskorna fylls med 100 ml vätska, därefter bubblas kvävgas i flaskorna som sedan försluts. Gasproduktionen följs genom att gasprover tas ut och analyseras i en gaskromatograf. Förhållandet mellan ymp och substrat anpassas så att VS från testsubstratet utgör 40 % och VS från ympen utgör 60 % av totala mängden VS. Därefter späds substrat-ympblandningen med kranvatten till önskad koncentration. Försöket avslutas när gasproduktionen klingat av.

Satsvist hydrolysförsök

Ett satsvist hydrolysförsök utförs primärt för att producera indata till modellering av hydrolyskonstant. Substratet blandas i försöket med en stor mängd ymp från en förhydrolyreaktor. Mängden ymp och substrat som tillsättes varje flaska justerades så att förhållandet mellan mängden våtvikt från substrat respektive ymp i varje testflaska var 1 g substrat/1 g ymp. Därefter spädades substrat-ympblandningen med kranvatten så att önskad volym uppnåddes i flaskorna. I det aktuella försöket användes 250 ml testflaskor vilka fylldes med 100 ml vätska, därefter bubblades kvävgas och sedan förslöts. Under hela försöksperioden förvarades testflaskorna i värmeskåp vid temperaturen 55° C. Gasproduktionen följdes genom att gasprover togs ut och analyserades i en gaskromatograf. En extra serie med identiska testflaskor sattes även för att möjliggöra uttag av prov ur vätskefasen vid varje tillfälle för gasuttag. Vätskefasen analyserades mät på TS, VS, alkalinitet, TKN, NH₄-N samt totalfett enligt metoder angivna i Bilaga A. Försöket avslutades efter 4 dagar, eftersom endast själva hydrolyprocessen studerades.

Bakteriologiska tester

För bakteriologiska tester skickades prov till Statens Veterinärmedicinska Anstalt (SVA) med expressbud för leverans inom 24 h. Spädningsserie av proverna gjordes enligt NMKL 91:3:2001. Analys av enterokocker utfördes enligt metod NMKL 68:4:2004. Analys av E Coli gjordes enligt en modifierad variant av NMKL 125:4:2005, där endast VRG-agar använts istället för både TSA-agar och VRG-agar samtidigt. Analys av salmonella gjordes enligt MSRV-metoden.

Bilaga B – Analysdata labförsök

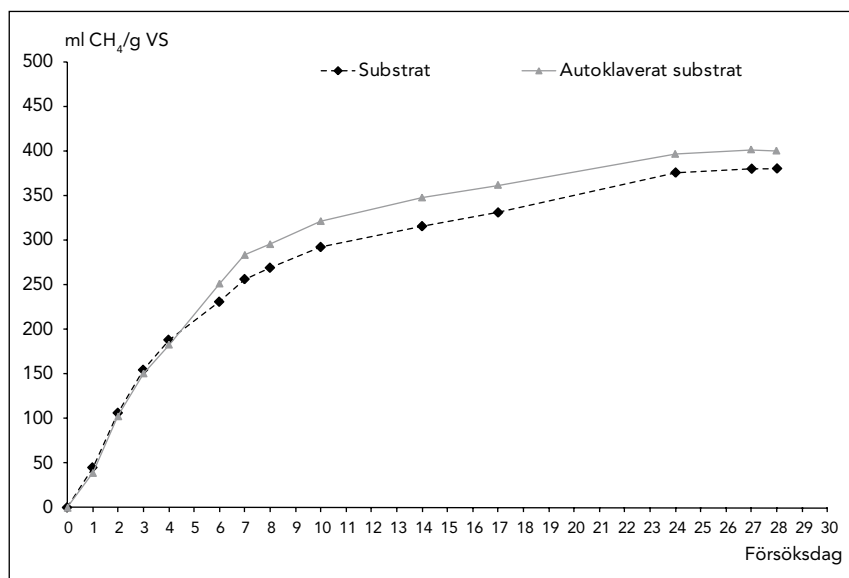
Tabell 32. Data från kontinuerliga labförsök med blandslam från VA SYD, NSVA, Gryaab samt UMEVA. Medelvärden för perioden samt standardavvikelse. Analysdata från förbehandlingssteg samt obehandlat inkommande blandslam.

	Förbehandling								Inkommande blandslam					
	VA SYD				NSVA		Gryaab		UMEVA	VA SYD	NSVA	Gryaab	UMEVA	
	FH 1,5d	FH 2,5d	FH 3,5d	P	FH 1,5d	P	FH	P	FH					
TS (%)	4,4%	4,1%	4,1%	4,8%	4,6%	5,2%	5,5%	6,5%	5,5%	5,0%	5,1%	6,2%	3,1%	
STDAV	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,4%	0,5%	0,7%	1,1%	0,7%	0,4%	0,4%	0,9%	0,6%	
VS(%)	3,2%	3,0%	3,0%	3,7%	3,4%	3,9%	3,7%	4,6%	3,7%	3,9%	3,9%	4,4%	2,3%	
STDAV	0,2%	0,3%	0,2%	0,3%	0,3%	0,3%	0,6%	0,9%	0,6%	0,4%	0,3%	0,7%	0,4%	
TS-red (%)	8,1%	14,3%	14,0%	2,1%	10,2%	0,3%	13,2%	4,6%	13,2%	14,0%				
STDAV	2,9%	4,0%	2,5%	1,3%	3,3%	1,7%	4,3%	3,2%	4,3%	4,9%				
VS-red (%)	13,3%	18,3%	18,3%	2,6%	12,9%	0,9%	18,1%	6,0%	18,1%	17,8%				
STDAV	7,6%	5,0%	3,8%	1,4%	3,8%	1,9%	4,0%	3,2%	4,0%	4,9%				
COD (mg/l)	10 700	10 329	11 286	6 771	8 804	7 827	12 196	10 793	12 196	7 300	2 140	2 108	2 402	2 424
STDAV	772	1 502	488	3 435	675	495	1 950	1 461	1 950	288	741	571	416	271
VFA-COD (mg/l)	7228	7 440	8 234	2 151	5 999	1 299	8 997	1 670	8 997	5 620	1 729	1 451	1 632	2 505
STDAV	532	898	358	326	751	505	1 279	378	1 279	440	370	495	402	615
TKN (mg/l)	2 471	2486	2 500	2 386	2 625	2 425	2 775	3 038	2 775	1 600	2 170	1 976	2 475	1 500
STDAV	198	204	100	279	423	183	362	410	362	100	499	837	654	216
TKN _{fit} (mg/l)	1 034	1 079	1 200	579	943	751	1 243	1 000	1 243	613	268	121	154	114
STDAV	86	173	58	408	85	74	244	150	244	23	350	39	32	28
NH ₄ -N (mg/l)	887	950	1 100	131	808	154	1 122	218	1 122	511	143	91	102	91
STDAV	74	148	58	35	62	26	152	27	152	8	213	27	28	15
pH	5,8	5,9	5,9	5,6	5,9	5,5	6,2	6,2	6,2	6,1	5,6	5,6	6,4	6,4
STDAV	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
Alkaninitet	2 445	2 693	2 613	1 416	2 269	603	3 800	990	3 800	2 105	776			
STDAV	299	270	284	680	118	23	0	12	0	212	135			
Metanutbyte (Nm ³ CH ₄ /kg VS)	0,011	0,017	0,019		0,005		0,011		0,011	0,022				
CH ₄ (%)	29%	30%	33%		23%		29%		29%	24%				
STDAV	5,6%	2,0%	2,8%		4,7%		1,5%		1,5%	0,7%				

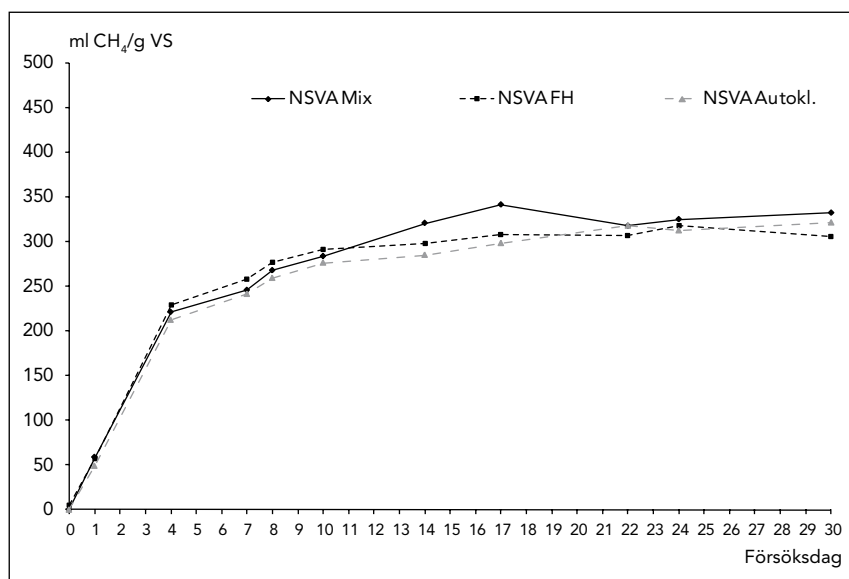
Tabell 33. Data från kontinuerliga labförsök med blandslam från VA SYD, NSVA samt Gryaab. Medelvärden för perioden samt standardavvikelse. Analysdata från metansteget (rötkammare).

	Förbehandling										Inkommande blandslam			
	VA SYD				NSVA		Gryaab		UMEVA	VA SYD	NSVA	Gryaab	UMEVA	
	FH 1,5d	FH 2,5d	FH 3,5d	P	FH 1,5d	P	FH	P	FH					
TS (%)	4,4%	4,1%	4,1%	4,8%	4,6%	5,2%	5,5%	6,5%	5,5%	2,7%	5,1%	6,2%	3,1%	
STDV	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,4%	0,5%	0,7%	1,1%	0,7%	0,6%	0,4%	0,9%	0,6%	
VS (%)	3,2%	3,0%	3,0%	3,7%	3,4%	3,9%	3,7%	4,6%	3,7%	1,9%	3,9%	4,4%	2,3%	
STDV	0,2%	0,3%	0,2%	0,3%	0,3%	0,3%	0,6%	0,9%	0,6%	0,5%	0,4%	0,7%	0,4%	
TS-red (%)	8,1%	14,3%	14,0%	2,1%	10,2%	0,3%	13,2%	4,6%	14,0%					
STDV	2,9%	4,0%	2,5%	1,3%	3,3%	1,7%	4,3%	3,2%	4,9%					
VS-red (%)	13,3%	18,3%	18,3%	2,6%	12,9%	0,9%	18,1%	6,0%	17,8%					
STDV	7,6%	5,0%	3,8%	1,4%	3,8%	1,9%	4,0%	3,2%	4,9%					
COD (mg/l)	10 700	10 329	11 286	6 771	8 804	7 827	12 196	10 793	7 300	2 140	2 108	2 402	2 424	
STDV	772	1 502	488	3 435	675	495	1 950	1 461	288	741	571	416	271	
VFA-COD (mg/l)	7 228	7 440	8 234	2 151	5 999	1 299	8 997	1 670	5 620	1 729	1 451	1 632	2 505	
STDV	532	898	358	326	751	505	1 279	378	440	370	495	402	615	
TKN (mg/l)	2 471	2 486	2 500	2 386	2 625	2 425	2 775	3 038	1 600	2 170	1 976	2 475	1 500	
STDV	198	204	100	279	423	183	362	410	100	499	837	654	216	
TKN _{fit} (mg/l)	1 034	1 079	1 200	579	943	751	1 243	1 000	613	268	121	154	114	
STDV	86	173	58	408	85	74	244	150	23	350	39	32	28	
NH ₄ -N (mg/l)	887	950	1 100	131	808	154	1 122	218	511	143	91	102	91	
STDV	74	148	58	35	62	26	152	27	8	213	27	28	15	
pH	5,8	5,9	5,9	5,6	5,9	5,5	6,2	6,2	6,1	5,6	5,6	6,4	6,4	
STDV	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	
Alkaninitet	2 445	2 693	2 613	1 416	2 269	603	3 800	990	2 105	776				
STDV	299	270	284	680	118	23	0	12	212	135				
Metanutbyte (Nm ³ CH ₄ /kg VS)	0,011	0,017	0,019		0,005		0,011		0,022					
CH ₄ (%)	29%	30%	33%		23%		29%		24%					
STDV	5,6%	2,0%	2,8%		4,7%		1,5%		0,7%					

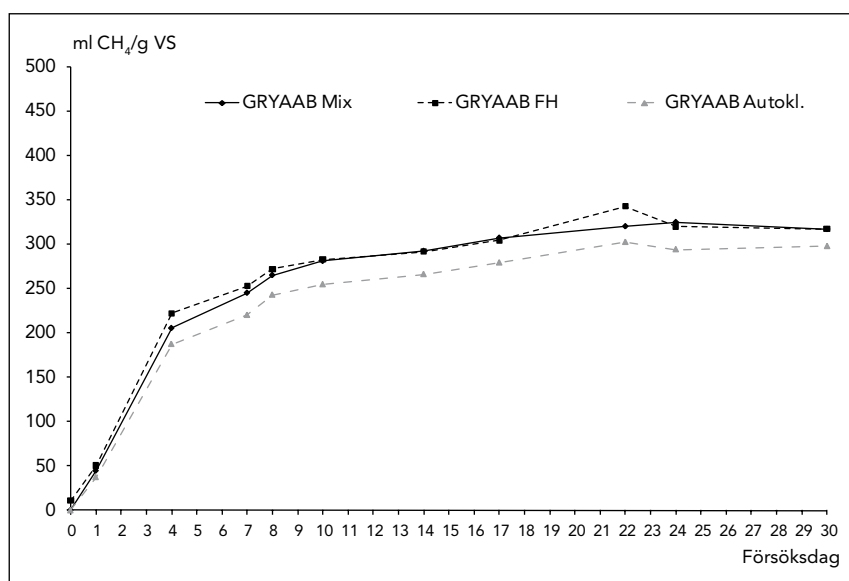
Metanpotentialförsök



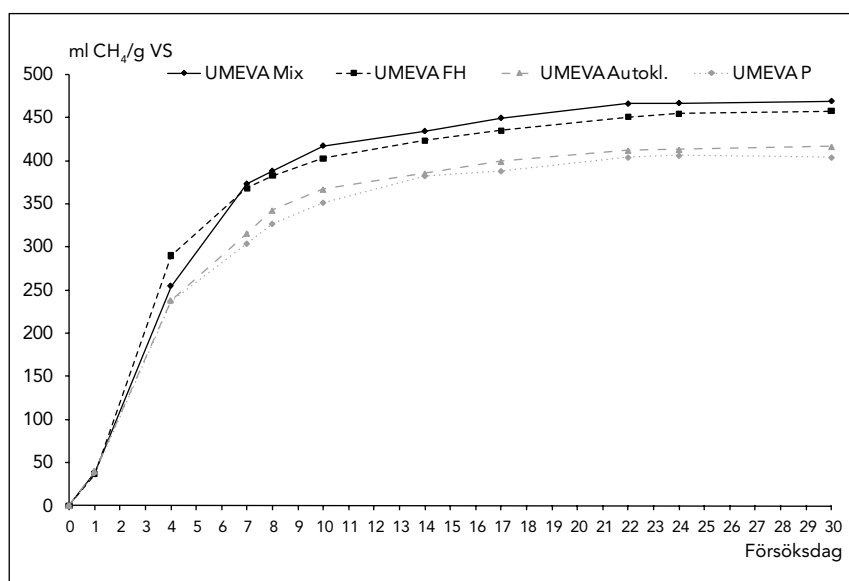
Figur 34 Resultat från nedbrytning av blandslam från VA SYD. Kurvan visar ackumulerat metanutbyte från testsubstrat och har korrigerats för ympens bidrag. Medelvärde från triplikat.



Figur 35 Resultat från nedbrytning av blandslam från NSVA. Kurvan visar ackumulerat metanutbyte från testsubstrat och har korrigerats för ympens bidrag. Medelvärde från triplikat.

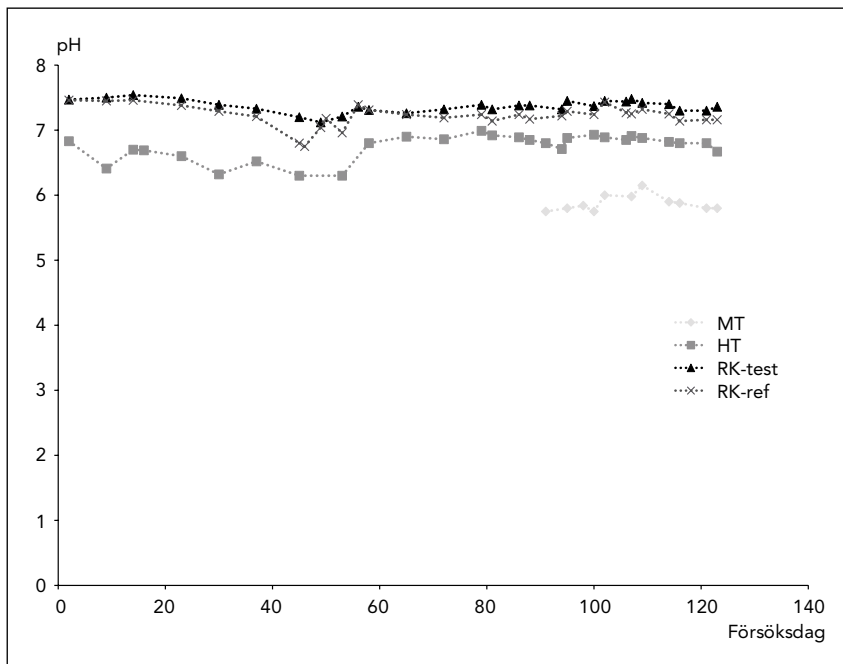


Figur 36 Resultat från nedbrytning av blandslam från GRYAAB. Kurvan visar ackumulerat metanutbyte från testsubstrat och har korrigerats för ympens bidrag. Medelvärde från triplikat.

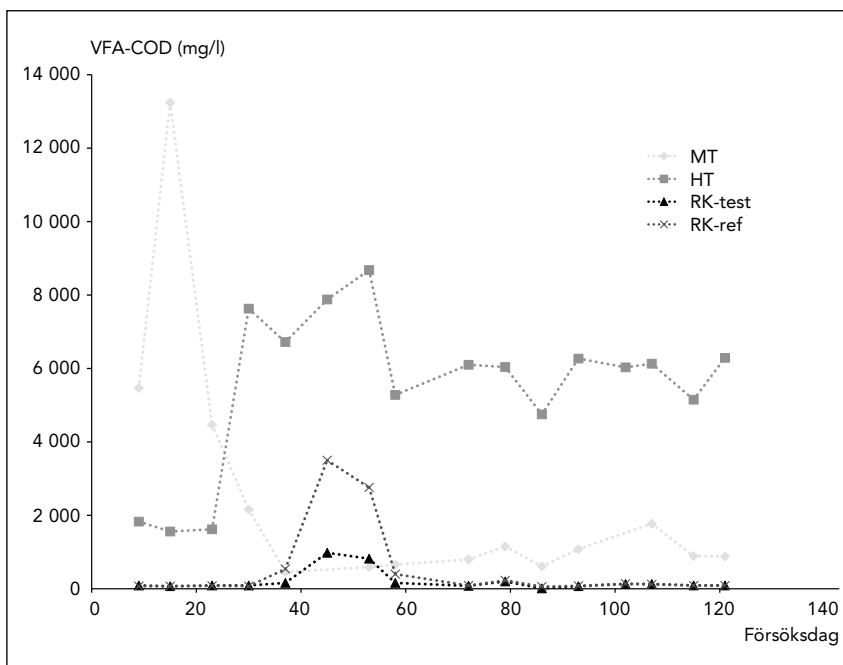


Figur 37 Resultat från nedbrytning av blandslam från UMEVA. Kurvan visar ackumulerat metanutbyte från testsubstrat och har korrigerats för ympens bidrag. Medelvärde från triplikat.

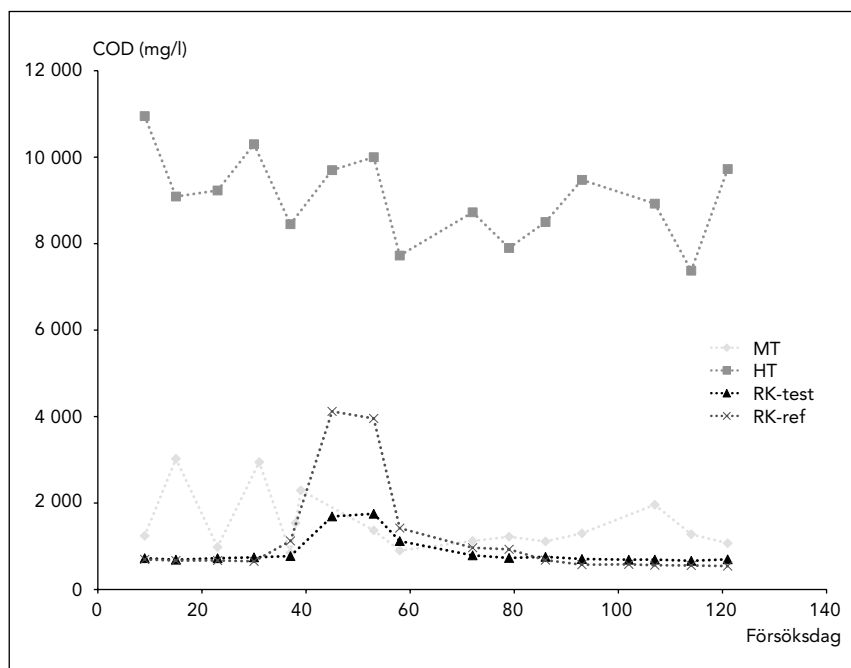
Bilaga C – Övriga grafer pilot



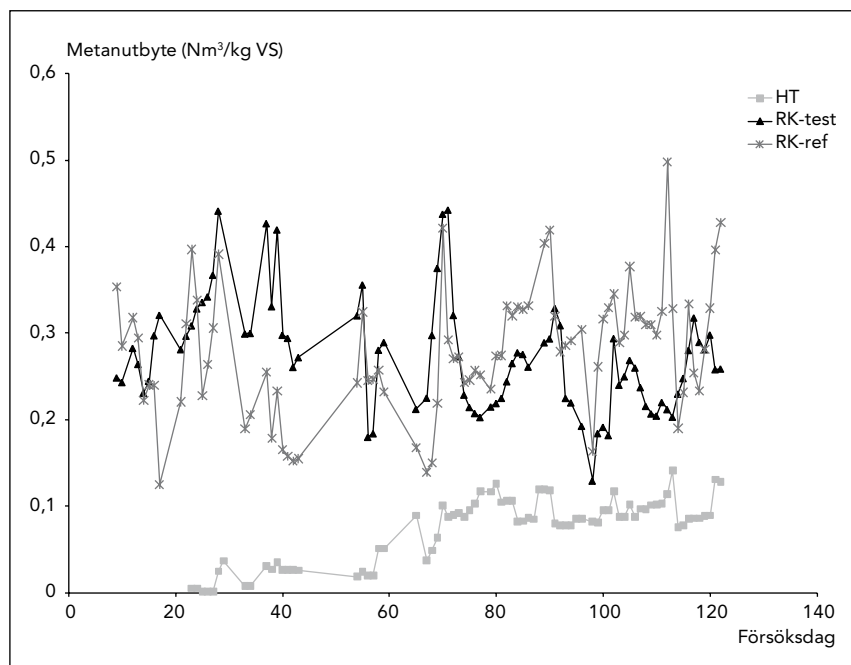
Figur 38 pH i matningstanken, hydrolystanken samt de båda rötkammarna.



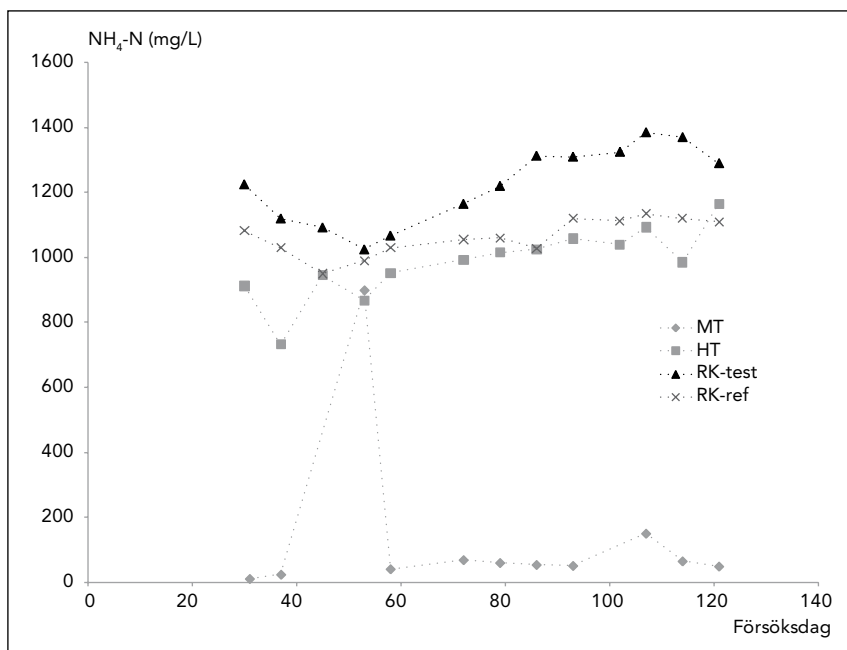
Figur 39 VFA-COD (mg/l) i matningstank, hydrolystank samt de båda rötkammarna.



Figur 40 Löst COD (mg/l) i matningstank, hydrolystank samt de båda rötkammarna.



Figur 41 Metanutbyte ($\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$) från hydrolystanken, samt de båda rötkammarna.



Figur 42 Ammoniumkväve (mg/l) i matningstanken, hydrolystanken samt de båda rötkammarna.

Bilaga D – Kalibrering och validering för modellering

Kalibrering av termofila hydrolyskonstanter från satsvisa försök

Satsvisa försök gjordes, där den termofila nedbrytningen av kolhydrater, proteiner och fett följdes under några dagar för att kalibrera hydrolyskonstanterna. Endast hydrolysmodellen i ADM1 användes. Omräkningsfaktorer för fett, protein och kolhydrater, samt indata till modellen visas i dokumentet ”Kompletterande modelleringsdata” som finns att ladda ner på www.sgc.se.

Hydrolys av fett

Eftersom variationerna i mätningarna från de satsvisa förhydrolys-försöken var stora för fett, kunde inga slutsatser dras om nedbrytningsförloppet. Mätvärdena varierade mellan 0,07 och 0,28 g/kg, och ingen tydlig trend kunde utläsas. Detta tyder på att analysmetoden och provtagningen tillsammans gav stor osäkerhet när substratet var mycket utspädd för att undvika högt tryck i flaskorna under försöket. Analyserna i de kontinuerliga förhydrolysureaktorerna visade på att hydrolys av fett sker i mycket begränsad omfattning under termofila förhållanden med lågt pH. Det är i linje med de resultat som andra har fått (se Persson m.fl. 2010). Därför är det troligt att hydrolysen av fett är långsam i termofil förhydrolys, och det är därför inte oväntat att resultaten inte uppvisade en tydlig nedbrytning. Slutsatsen är att nedbrytningen av fett inte kunde kalibreras med föreliggande data. Den antogs vara mycket långsam i förhydrolysen och sattes därför till 0.

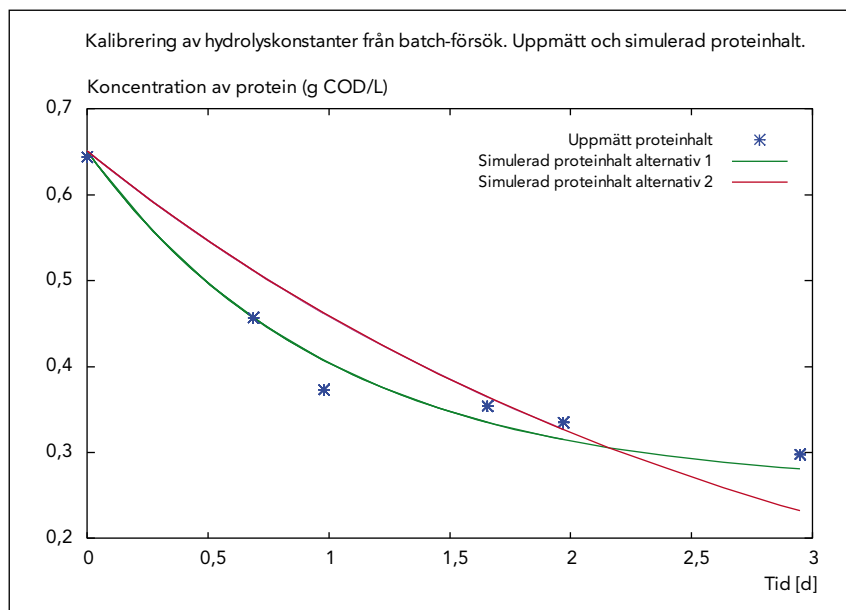
Hydrolys av proteiner

Analyserna av TKN och NH_4^+ , som indikerar nedbrytning av proteiner, gav mer sammanhängande resultat än fettmätningarna, och de ansågs vara tillräckligt tillförlitliga för att använda till kalibrering. I försöket var skillnaden mellan löst TKN och $\text{NH}_4\text{-N}$ liten, vilket tyder på att nedbrytbarheten av aminosyror var hög.

Det är troligt att en del av proteinet i slammet är svårnedbrytbart, och att det inte kan brytas ned i processen. Om en modell med hög hydrolyshastighet och låg maximal nedbrytningsgrad passar bra till data kan det styrka denna hypotes. Alternativt är hydrolyshastigheten lägre, men maximala nedbrytningsgraden högre. Det är svårt att identifiera hydrolyshastighet och nedbrytningsgrad i kontinuerliga processer eftersom olika kombinationer av dessa kan ge liknande resultat. Med satsvisa försök är det lättare att skilja hydrolyshastighet och nedbrytningsgrad åt.

För att beskriva nedbrytningen av protein testades två olika alternativ:

- 1: 100 % Maximal nedbrytningsgrad
- 2: 60 % Maximal nedbrytningsgrad



Alternativ 1: 60 % maximal nedbrytningsgrad, hydrolyskonstant 1/dygn.

Alternativ 2: 100 % maximal nedbrytningsgrad, hydrolyskonstant 0,35/dygn.

Figur 43 Kalibrering av hydrolyskonstanter från satsvisa försök.

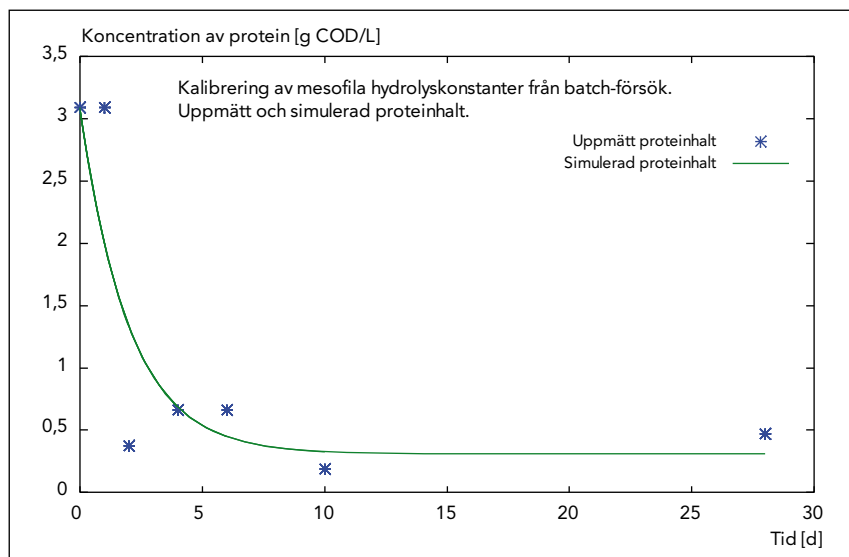
För båda alternativ kalibrerades modellen genom att minska det beräknade totalfelet jämfört med mätdata. I Figur 44 visas nedbrytningen av protein i de satsvisa försöken, och simulering av nedbrytningen enligt alternativ 1 och alternativ 2 med kalibrerade värden på hydrolyskonstanten för protein (1 d^{-1} respektive $0,35 \text{ d}^{-1}$). Alternativ 1 gav det minsta totalfelet, 0,012 jämfört med 0,014 för alternativ 2. Det innebär att en modell med lägre nedbrytbarhet och högre hydrolyshastighet stämde bättre överens med mätdata, och används därför.

Hydrolys av kolhydrater

Eftersom koncentrationen av kolhydrater är svår att mäta beräknas denna genom att subtrahera protein och fett från den totala VS-halten. Det innebär att den beräknade koncentrationen av kolhydrater inte är tillförlitlig under dessa försök eftersom osäkerheten i mätning av fetthalten var stor. Hydrolyskonstanten för kolhydrater kan därför inte kalibreras fram med resultaten från de termofila satsvisa försöken.

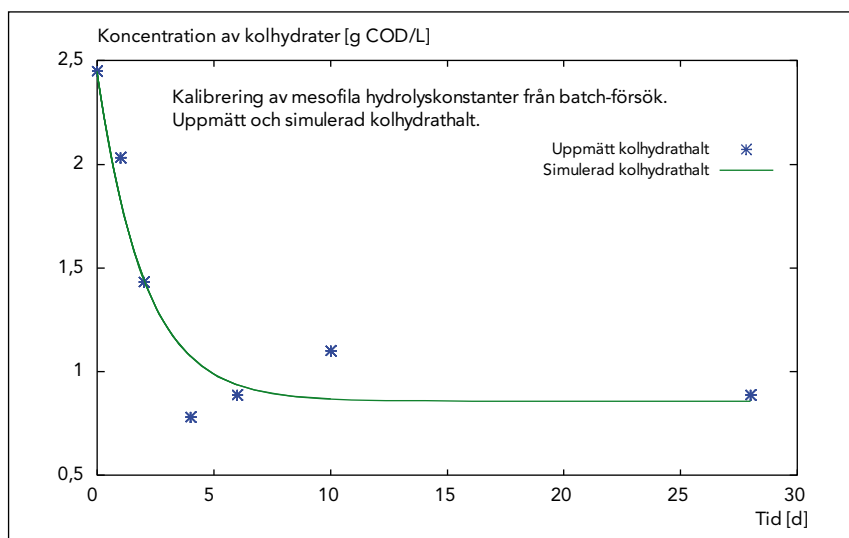
Kalibrering av mesofila hydrolyskonstanter från metanpotentialförsök

Mesofila metanpotentialförsök gjordes för att uppskatta substratets metanpotential, men kunde även användas för att uppskatta de mesofila hydrolyskonstanterna och nedbrytningsgraderna. Även här gjordes kalibreringen genom att hydrolyskonstanter testades, och det beräknade felet jämfört med mätdata minimerades. Kalibreringarna (Figur 44–Figur 46) gav de minsta avvikelserna från mätdata. Hydrolyskonstanterna uppskattades till 0,5/dygn för kolhydrater och protein, och 0,08/dygn för fett. Motsvarande nedbrytningsgrader uppskattades till 60 %, 65 % och 95 %.



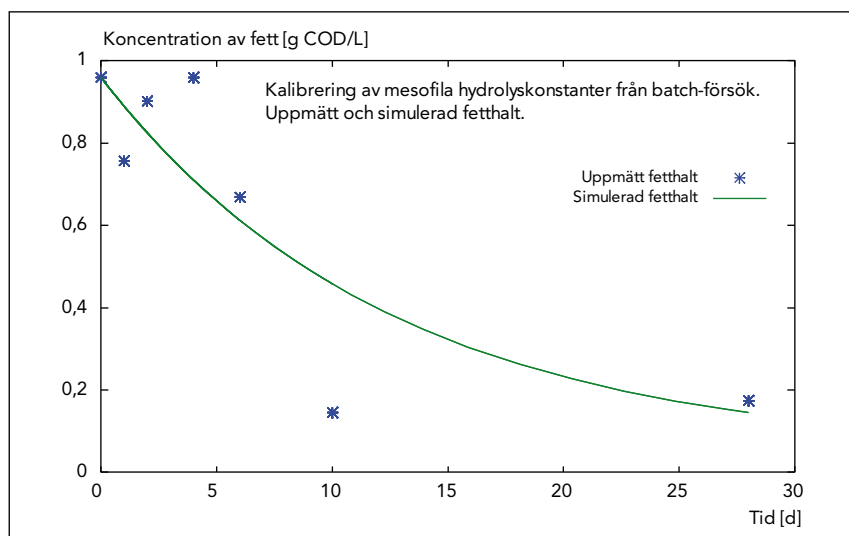
Figur 44

Kalibrering av mesofila hydrolyskonstanten för protein: 0,5/dygn.
Nedbrytningsgrad: 60 %.



Figur 45

Kalibrering av mesofila hydrolyskonstanten för kolhydrat: 0,5/dygn.
Nedbrytningsgrad: 65 %.



Figur 46

Kalibrering av mesofila hydrolyskonstanten för fett: 0,08 /dygn.
Nedbrytningsgrad: 95 %.

Kalibrering och validering av hydrolyskonstanter från kontinuerliga labförsök

Eftersom andras erfarenheter har visat att hydrolyshastigheten vid kontinuerlig drift kan vara snabbare än i satsvisa försök (Batstone, 2008), gjordes även en kalibrering och validering av hydrolyskonstanterna med data från de kontinuerliga labförsöken.

I labförsöken matades reaktorerna endast på vardagarna, utom under en tid i slutet av försöksperioden. I simuleringarna antogs däremot att matning skedde varje dag under hela perioden. Därför har anpassning av t.ex. gasproduktionen gjorts så att värden från simuleringen ska passa till de högre värdena, snarare än de värden som gäller för måndagar och tisdagar, då reaktorerna inte har blivit matade under helgen.

Liksom i de tidigare kalibreringarna anpassades hydrolyskonstanten för protein med halten av kväve från nedbrytningen (ammonium). Därefter justerades hydrolyskonstanterna för kolhydrater och fett.

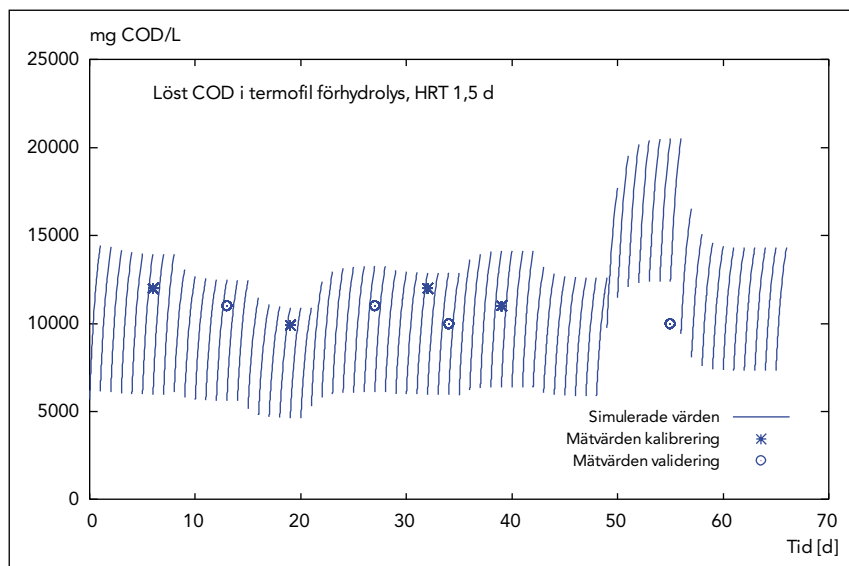
Mer information om hur simuleringarna gjordes finns i dokumentet ”Kompletterande modelleringsdata” som finns att ladda ner på www.sgc.se.

Termofil förhydrolys

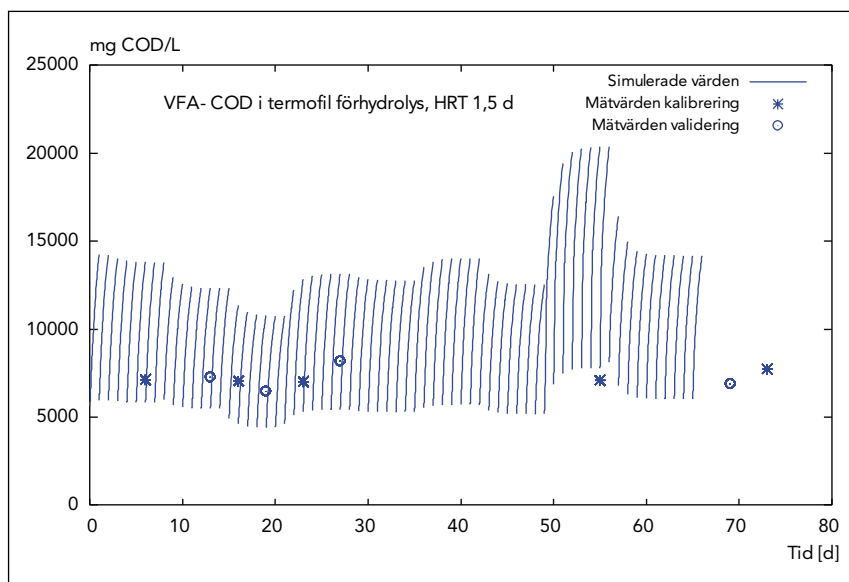
För att kunna göra både kalibrering och validering med data från samma försök användes varannan mätpunkt till kalibrering, och varannan till validering för den termofila förhydrolysen. Först gjordes kalibreringen med varannan mätpunkt, och hydrolyskonstanterna anpassades för att ge ett bra resultat. I nästa steg lades resterande mätdata in i figurerna för att validera resultatet, och utvärdera om kalibreringen var tillräckligt bra. I figurerna visas därför simuleringarna med mätdata från både kalibrering och validering. Labförsök med en uppehållstid på 1,5 dag i förhydrolyssteg användes för att kalibreringen ska motsvara pilotanläggningen så långt som möjligt. Kalibrerade värden på hydrolyskonstanterna visas i Tabell 23, under 5.2.2.

Resultaten (Figur 47–Figur 52) visar att den semi-kontinuerliga driften leder till stora svängningar för flera parametrar. Varje dag matas reaktorn, och koncentrationer och gasproduktion simuleras. I graferna representerar varje ”streck” förloppet under en dag. Eftersom nya startvärden beräknas då förhydrolysen matas med nytt slam blir strecken inte kontinuerliga. Skillnaden mellan resultaten för de olika veckorna beror på substratets egenskaper, där bl.a. VS-halten varierar i slammet som hämtats en gång i veckan. Under den vecka som börjar vid dag 50 är VS i slammet högt, vilket påverkar resultatet för COD och ammonium i simuleringarna mycket. Mätdata visar emellertid inte några större skillnader denna vecka jämfört med föregående veckor. En anledning till detta kan vara att modellen inte kan användas för att ge en korrekt bild vid stora svängningar i inflödet. En annan, men mindre trolig orsak, är mätfel vid VS-mätningen i inkommande slam som används som indata till modellen.

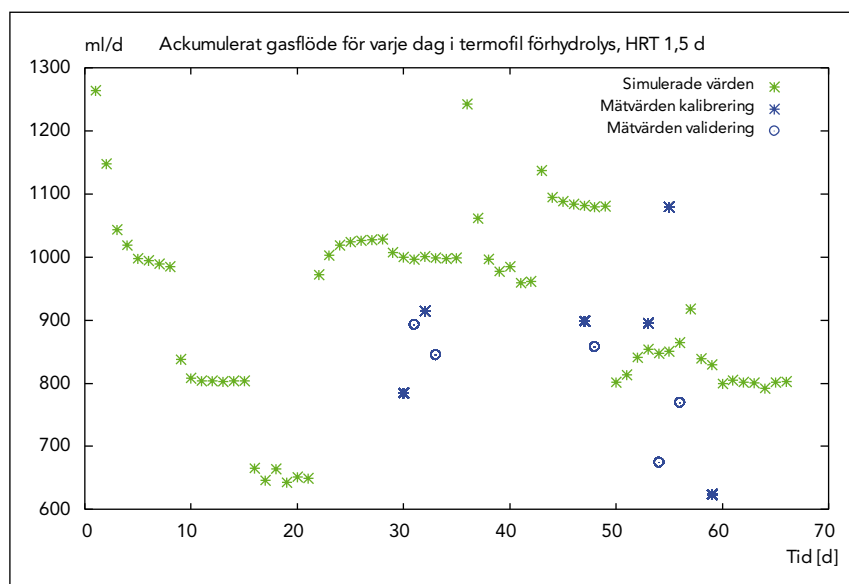
COD i löst fas (Figur 47) produceras och konsumeras i snabb takt. Det är därför viktigt att uttag av prov sker vid samma tidpunkt varje dag för att få en representativ bild av processen. Provtagningarna har i detta fall skett dagligen någon gång inom ett intervall på 4 timmar innan reaktorerna matas, och koncentrationen simuleras med ett nytt streck i grafen.



Figur 47
COD i filtrerat prov (löst COD),
kalibrering och validering av hydro-
lyskonstanterna i den termofila
förhydrolysen.



Figur 48
VFA-COD, kalibrering och validering
av hydrolyskonstanterna i den termo-
fila förhydrolysen.



Figur 49
Ackumulerat metanflöde för varje
dag, kalibrering och validering av
hydrolyskonstanterna i den termofila
förhydrolysen.

Mätpunkterna som jämförs med resultaten från simuleringarna bör därför vara lika stora som slutvärdet för varje dag, eller något lägre. COD kan även minska i provet innan mätningen, vilket ytterligare förstärker att mätvärdena bör vara något lägre jämfört med resultatet från simuleringen. Korrelationen för löst COD kan därmed anses vara tillräckligt bra. Resultaten från kalibreringen ger en godtagbar passning till mätdata för de flesta uppmätta parametrar, med undantag för VFA. Jämfört med mätdata är halten VFA i simuleringen för hög (Figur 48), vilket tyder på att syrabildningen i modellen är för snabb, eller att metanbildningen är för långsam.

Gas- och metanproduktionen i förhydrolyssteg, (Figur 49 och Figur 50) mättes inte i början av försöksperioden, och därför fanns ett begränsat antal mätpunkter för kalibrering och validering. Gasproduktionen kunde simuleras med något bättre precision än metanproduktionen. Den ökade VS-halten under näst sista veckan gav i simuleringarna en ökad koncentration av COD, snarare än en ökad gasproduktion. Det innebar en sämre korrelation även för gas- och metanproduktionen, vilka var för låga i simuleringarna. Metanhalten låg runt 25–30 % både i mätningar och i simuleringar.

Simulering av pH uppvisar en topp varje dag, men svängningarna är inte stora relativt sett (Figur 51). Korrelationen till data får anses vara god. Ammonium (Figur 52) är en viktig parameter, då den indikerar nedbrytning av protein. Under största delen av mätserien korrelerar mätdata och simuleringsvärden bra.

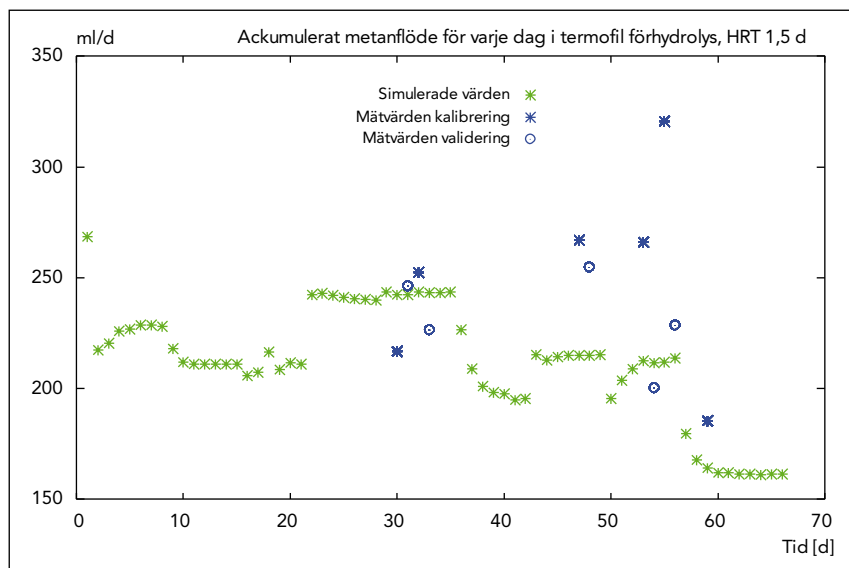
Valideringen anses ge ett tillräckligt bra resultat för att modellen ska kunna användas för uppskattning av viktiga processparametrar.

Mesofil rötning

I sista steget kalibrerades och validerades den efterföljande mesofila rötningen. Den första delen av mätserien användes för kalibrering, och den senare till validering. I resultaten visas hur tidsserien delades in för kalibrering och validering. De kalibrerade värdena från den kontinuerliga termofila processen användes till förhydrolyssteg. Endast mätdata som använts i valideringen av förhydrolysmodellen visas i resultaten. Kalibrerade värden på hydrolyskonstanterna visas i Tabell 23, under 5.2.2.

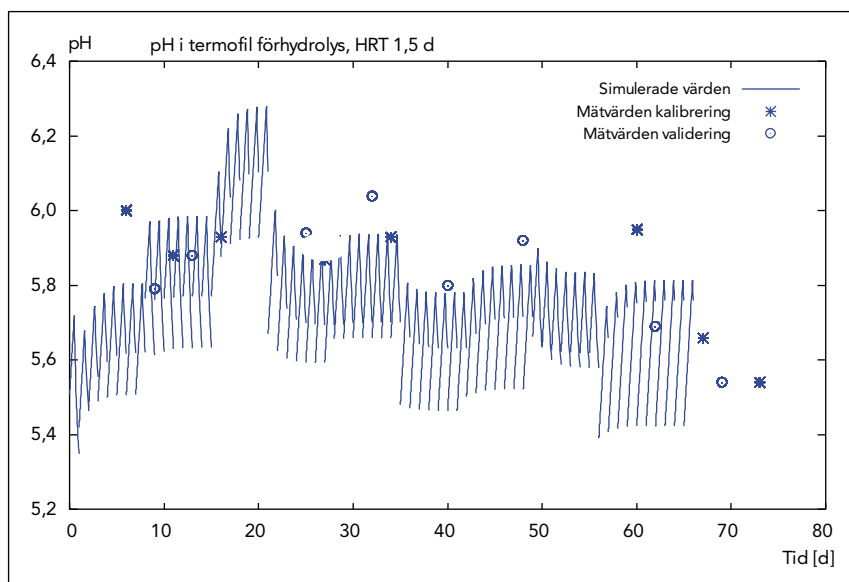
Ammonium (Figur 53) produceras främst i förhydrolyssteg, där en stor del av nedbrytningen av proteiner sker. I rötningsssteget sker också nedbrytning av proteiner, men ammonium tas upp av växande bakterier i högre takt. De simulerade värdena följer i stort trenden för mätvärdena, och ligger i samma storleksordning som dessa, med det kalibrerade värdet för proteinhydrolys från det satsvisa försöket.

I (Figur 54–Figur 55) visas exempel på resultat från simuleringarna av metan- och gasproduktionen. Metanproduktionen är stabil i simuleringsresultaten, men varierar mycket i mätdata. En anledning till detta är att matningen var ojämn i försöken, och att detta inte inkluderats i simuleringarna. Därför kalibrerades hydrolyskonstanterna för kolhydrat och fett för att passa de högre värdena, snarare än de lägre. Metanhalten var något lägre i de simulerade resultaten, än de uppmätta värdena. Därför är det simulerade gasflödet något högre än det uppmätta. Det bedömdes emellertid vara vik-



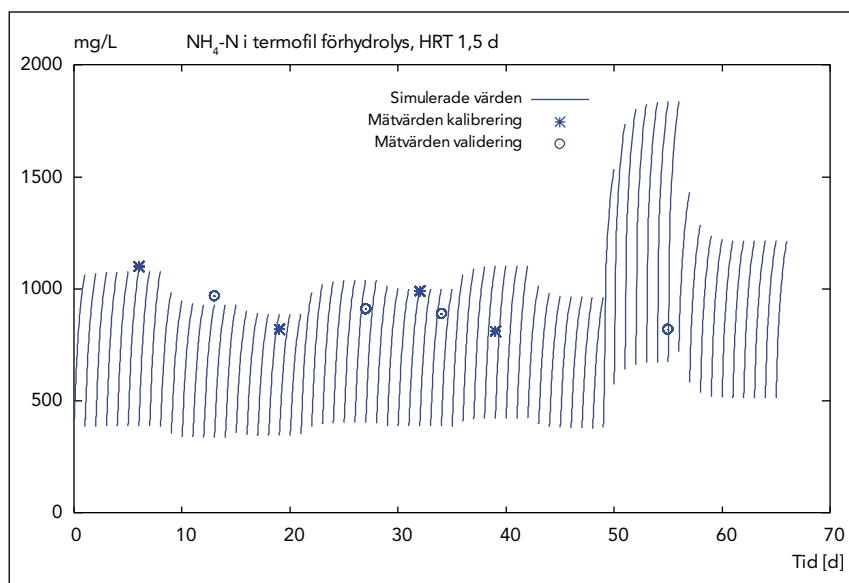
Figur 50

Akkumulerat gasflöde för varje dag, kalibrering och validering av hydrolyskonstanterna i den termofila förhydrolysen.



Figur 51

pH, kalibrering och validering av hydrolyskonstanterna i den termofila förhydrolysen.

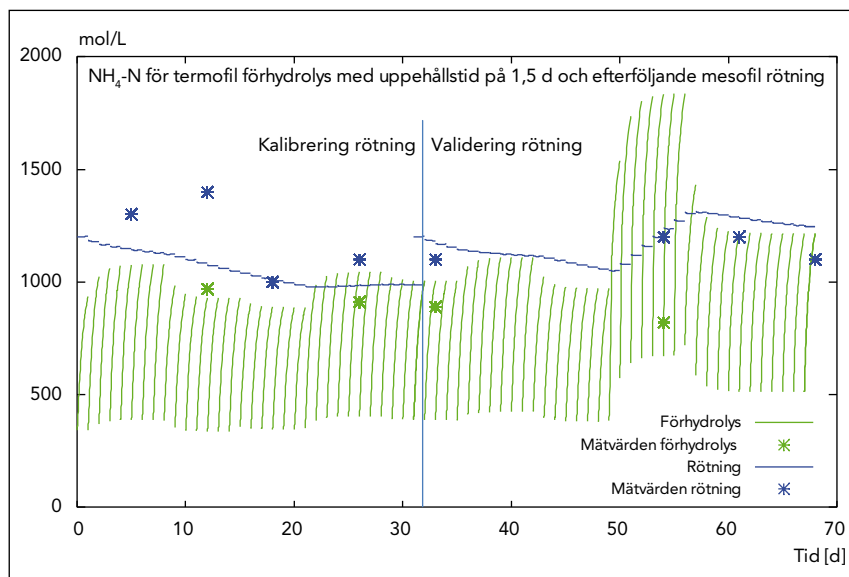


Figur 52

Ammonium, kalibrering och validering av hydrolyskonstanterna i den termofila förhydrolysen. Till höger: ammonium.

tigast att kalibrera parametrarna så att metanproduktionen gav en bra korrelation till data. För att få alla mätresultat att stämma så långt som möjligt till modellen, skulle parametrar i samtliga processer behöva kalibreras, vilket ligger utom ramen för detta projekt.

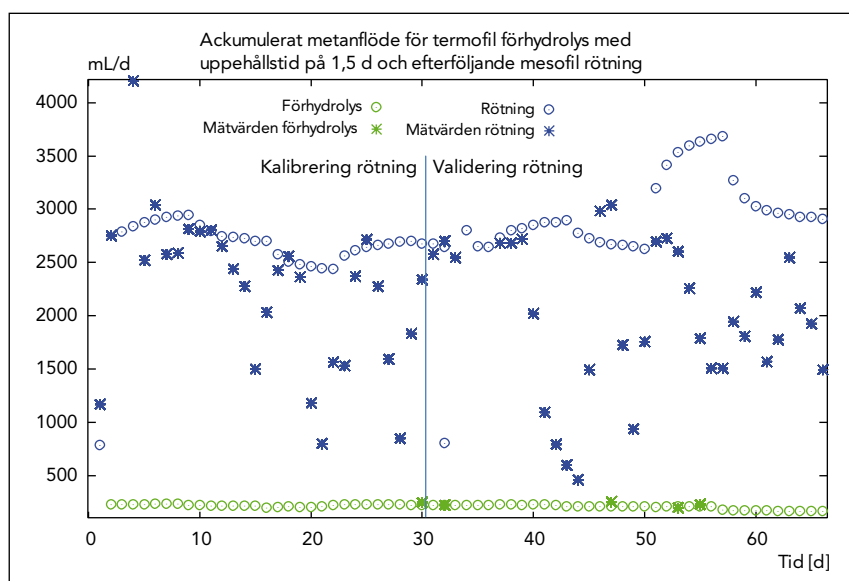
Figur 56 visar tydligt hur löst COD produceras i förhydrolysen och konsumeras i rötningen. Halten av COD var något lägre i mätdata än i modellen, men skillnaden ansågs vara godtagbar. pH (Figur 57) kunde simuleras relativt väl, men var lite för låg i röttningssteget (jämför mätdata mot de övre simulerade värdena för varje dag).



Figur 53

Ammonium i termofil förhydrolys med uppehållstid på 1,5 dag och efterföljande mesofil rötning i lab-skala med slam från Källby reningsverk, Lund.

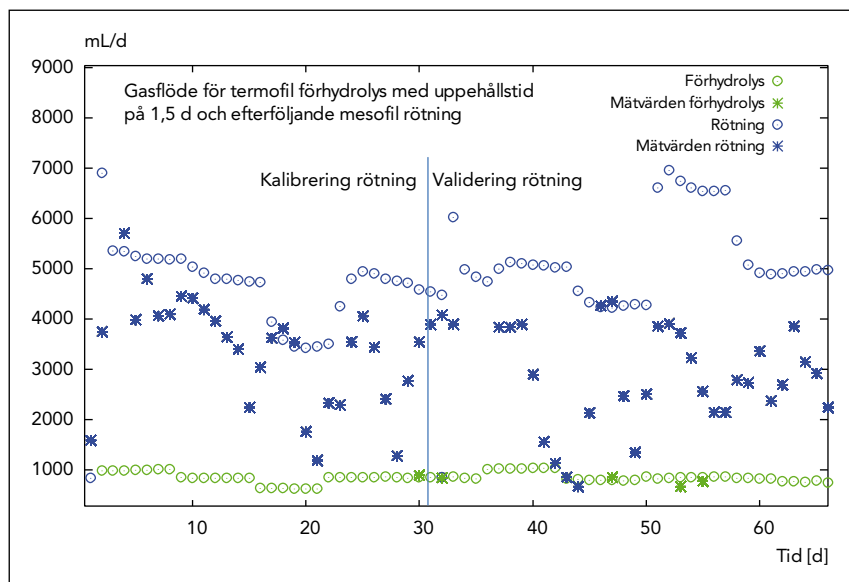
Kalibrerade hydrolyseparametrar används för förhydrolysen. Hydrolysekonstanter för rötningen kalibreras under första delen av mätserien, och valideras under sista delen.



Figur 54

Metanflöde för termofil förhydrolys med uppehållstid på 1,5 dag och efterföljande mesofil rötning i lab-skala med slam från Källby reningsverk, Lund.

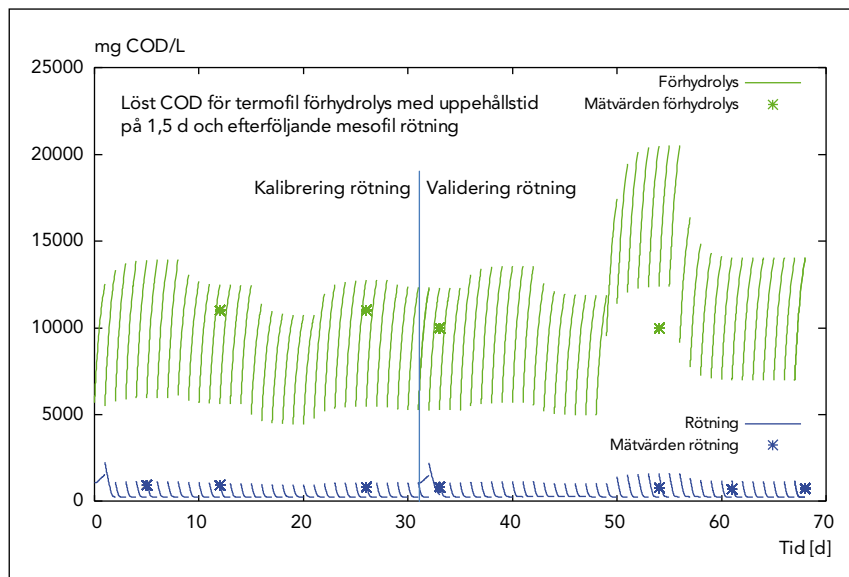
Kalibrerade hydrolyseparametrar används för förhydrolysen. Hydrolysekonstanter för rötningen kalibreras under första delen av mätserien, och valideras under sista delen.



Figur 55

Gasflöde för termofil förhydrolys med uppehållstid på 1,5 dag och efterföljande mesofil rötning i lab-skala med slam från Källby reningsverk, Lund.

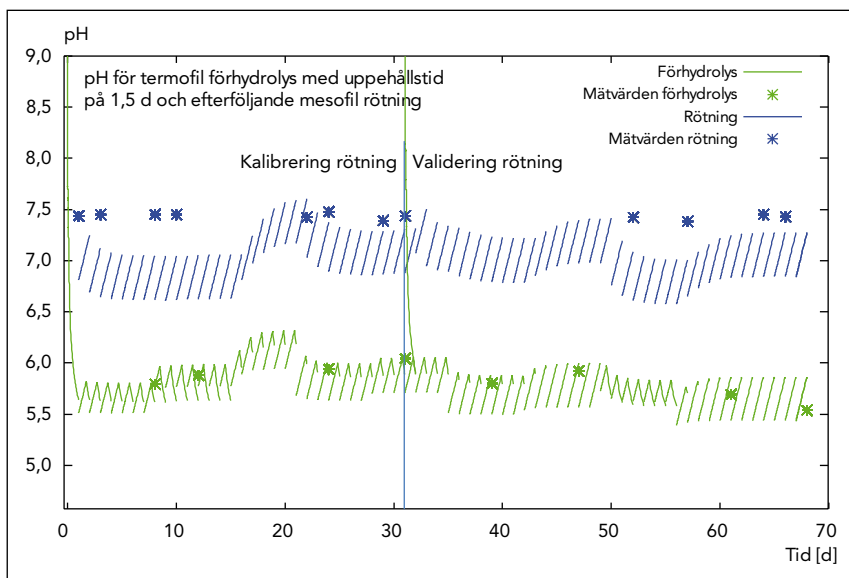
Kalibrerade hydrolysisparametrar används för förhydrolysen. Hydrolysis-konstanter för rötningen kalibreras under första delen av mätserien, och valideras under sista delen.



Figur 56

Löst COD för termofil förhydrolys med uppehållstid på 1,5 dag och efterföljande mesofil rötning i lab-skala med slam från Källby reningsverk, Lund.

Kalibrerade hydrolysisparametrar används för förhydrolysen. Hydrolysis-konstanter för rötningen kalibreras under första delen av mätserien, och valideras under sista delen.



Figur 57

pH för termofil förhydrolys med uppehållstid på 1,5 dag och efterföljande mesofil rötning i lab-skala med slam från Källby reningsverk, Lund.

Kalibrerade hydrolysisparametrar används för förhydrolysen. Hydrolysis-konstanter för rötningen kalibreras under första delen av mätserien, och valideras under sista delen.



Box 47607, 117 94 Stockholm
Tel 08 506 002 00
Fax 08 506 002 10
E-post svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se