

Mätning av metanpotentialen hos
slam på Henriksdal och Bromma
Metodutveckling och utvärdering
av labutrustningen "BCS-CH₄ Biogas"

Clara Borggren



Examensarbete
Stockholm 2007



**KTH Energi-
och miljöteknik**

Clara Borggren

MÄTNING AV METANPOTENTIALEN HOS SLAM PÅ HENRIKSDAL OCH BROMMA

METODUTVECKLING OCH UTVÄRDERING AV LABUTRUSTNINGEN
"BCS-CH4 BIOGAS"

Examinator:

Per Olof Persson, Industriell Ekologi

STOCKHOLM 2007

EXAMENSARBETE

UTFÖRT VID

INDUSTRIELL EKOLOGI

KUNGLIGA TEKNISKA HÖGSKOLAN

www.ima.kth.se

Handledare: Lars Lindblom, Stockholm Vatten
Daniel Hellström, Stockholm Vatten
Per Olof Persson, Industriell ekologi, KTH

TRITA-IM 2007:46

ISSN 1402-7615

Industriell Ekologi,
Kungliga Tekniska Högskolan
www.ima.kth.se

SAMMANFATTNING

I april 1999 satte Sveriges regering upp 15 miljömål (utökades till 16 under 2005) vilka strävar efter att lösa Sveriges stora miljöproblem till nästa generation. Det första miljömålet är ”begränsad klimatpåverkan” och ett av dess delmål är att utsläppen av växthusgaser under perioden 2008-2012 skall vara minst 4 procent lägre än utsläppen var år 1990. Ett sätt att minska utsläppen av växthusgaser är att byta ut de fossila fordonsbränslena mot förnyelsebara. Inom EU är målsättningen att andelen förnyelsebart bränsle skall vara 5,75 procent av allt fordonsdrivmedel år 2010 och 20 procent år 2020. Etanolblandningen uppgår till ca hälften av de förnyelsebara bränslena pga. att all 95-oktanig bensin i Stockholms län innehåller 5 procent etanol. Det bränsle som ökade mest i Stockholm under perioden 2001-2006 är dock biogasen. Detta är bra då biogasen klassas som det miljövänligt bästa fordonsbränslet.

Detta examensarbete utförs för Stockholm Vatten AB som i dagsläget producerar biogas från det slam som blir restprodukten vid rening av avloppsvatten. Syftet för examensarbete är att undersöka hur stor metanpotentialen är i detta slam samt att granska den nyinköpta laborationsutrustning, ”BCS-CH₄-biogas” med vilken försöken görs.

Slammet som beskickas till röt-kammarna vid Henriksdals reningsverk består av primärslam, förtjockat överskottslam samt fettslam. En sammansättning av detta slam, med värden från år 2006, exklusive fettslammet gav en biogas- respektive metangasproduktion på 0,50 Nm³ biogas/kg VS_{in} respektive 0,30 Nm³ CH₄/VS_{in} efter 35 dagar.

Ett jämförande försök vid JTI med samma sammansättning av slam, taget vid samma tidpunkt, gav en biogas- respektive metangasproduktion på ca 0,65 Nm³ biogas/kg VS_{in} respektive ca 0,33 Nm³ CH₄/kg VS_{in} efter 31 dagar.

En jämförelse mellan dessa två metoder och utrustningar gav följande fördelar och nackdelar för BCS-utrustningen:

Fördelar

- Enkel att handskas med, när man väl lärt sig
- Sköter sig själv, tar inte mycket tid
- Mycket data att laborera med
- Relativt robust
- Lätt att starta upp och avsluta
- God repeterbarhet inom ett försök

Nackdelar

- Kan köra väldigt få flaskor åt gången, max åtta per BACVis, jämfört med JTI där man kan köra så många man hinner analysera.
- Kan inte köra försöken lika länge som Hansen då flödesmätaren inte klarar mindre flöden än 1 ml per timme, varför de slutgiltiga värdena antagligen är lite mindre än de skulle kunna vara.

Efterrötning av rötslammet från primärslambehandlingen på Bromma reningsverk gav en ökning på 8,6 % på biogasproduktionen från primärslammet räknat på medelvärden från år 2006.

ABSTRACT

In April 1999 the Swedish government established 15 environmental goals (increased to 16 during 2005) that strive to solve Sweden's largest environmental issues until the next generation. The first of these goals are "limited climate change" and one of its sub goals is that the greenhouse gas emissions should decrease by 4 percent, compared to the emissions of 1990, during the period 2008-2012. One way of decreasing the emissions of greenhouse gas is to shift from fossil fuels to renewable. Within the European Union the goal is that the portion of renewable fuels should amount to 5, 75 percent of all fuels for vehicles before 2010 and 20 percent by the year 2020. In the district of Stockholm all of the 95-octane petrol is mixed with 5 percent ethanol, and this sums up to half of all the renewable fuels used in Stockholm. However biogas is the fuel that increased the most in Stockholm during the period 2001-2006. This is good because the biogas is classified as the most environmental vehicle fuel.

This master thesis is written for Stockholm Vatten AB who amongst other things clean the sewage water and from the sludge they produce biogas. The purpose of this master thesis is to examine the methane potential of different sewage sludge's and to develop a method to do this with new laboratory equipment, "BCS-CH₄-biogas", designed for this function.

The sewage sludge in the Henriksdal waste-water treatment plant is composed of primary, secondary (biosludge) and external fat sludge. A composition of this sludge given as a mean value from 2006, excluding the fat sludge, gave a biogas and methane production of 0,50 Nm³ biogas/kg VS_{in} and 0,30 Nm³ CH₄/kg VS_{in} after 35 days.

As a comparison the same sludge was digested at JTI and they got a biogas and methane potential of 0,65 Nm³ biogas/kg VS_{in} and 0,33 Nm³ CH₄/kg VS_{in} after 31 days.

An assessment of these two methods and equipments gave "BCS-CH₄-biogas" the following advantages and disadvantages:

Advantages:

- Easy to handle ones you know how it works
- Takes care of it self, doesn't take a lot of time
- A lot of data
- Relatively robust
- Easy to start and shut down
- Repeatable results

Disadvantages:

- One can run very few flasks at a time, maximum eight per BACvis, compared to JTI where you can run as many flasks as you have time to check on.
- It is not possible to run the experiment all the way till there is no organic matter left at all since the flow counter doesn't work when the flow count is lower than 1 mL per hour.

Post digestion of digested primary sludge from Bromma waste-water treatment plant showed an increase of 8,6 % of the biogas production, counted from the mean value of year 2006.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING.....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte.....	1
1.3 Frågeställningar.....	2
1.4 Metod.....	2
1.4.1 Praktiska försök.....	2
1.4.2 Definition av metangaspotential.....	3
1.5 Avgränsningar.....	3
2. RENINGSVERK.....	5
2.1 Henriksdals reningsverk.....	7
2.2 Bromma reningsverk.....	7
3. TEORI/LITTERATURSTUDIE.....	9
3.1 Röttningsprocessen.....	9
3.1.1 Mikrobiologiska processen.....	10
3.1.2 Slam.....	12
3.1.3 Processdesign och temperatur.....	13
3.1.4 Processövervakningsparametrar.....	16
3.1.4 Kinetik.....	20
3.2 Bio- och metangasproduktion.....	20
3.2.1 Metod för fastställande av den teoretiska metanpotentialen.....	21
3.2.2 Verklig biogaspotential.....	22
3.2.3 Prognos av biogasens sammansättning.....	22
3.2.4 Potentiella problem vid estimering av metangasproduktion från avfall.....	22
3.2.5 Metod för fastställande av den anaeroba nedbrytningen.....	23
3.3 Beskrivning av jämförande metod och utrustning.....	23
4. UTRUSTNING OCH MÄTMETODER.....	25
4.1 BCS-CH ₄ biogas – Laborationsutrustning.....	25
4.1.1 Sensorn.....	26
4.1.2 Flödesmätaren.....	27
4.2 Beräkning av metangasproduktionen.....	28
5. KARTLÄGGNING AV RÖTNINGEN PÅ HENRIKSDAL OCH BROMMA UNDER 2006.....	29
5.1 Parametrar för kartläggning av röt-kammardriften.....	29
5.2 Resultat från kartläggning av röt-kammardriften på Henriksdal och Bromma.....	30
6. UTFÖRANDE.....	33
6.1 Metangaspotential vid mesofil batch-rötning.....	33
6.1.1 Analyser.....	34
6.1.2 Testförsök i 13 dagar.....	35
6.1.3 Metanpotentialen hos beskikningsslammet.....	35
6.1.4 Biogas-/metanpotentialen hos blandning av primär- och överskottslam.....	35
6.1.5 Jämförelse med försök på JTI.....	36

6.1.6 Biogas- och metangaspotentialen hos rötslam från Bromma reningsverk.....	36
7 RESULTAT	39
7.1 Försök 1: Beskicknings slam.....	39
7.2 Överrensstämelse mellan ”Försök 2” och Henriksdalprocessen.....	40
7.3 Överrensstämelse mellan ”Försök 2” och försök på JTI.....	42
7.4 Potentialen hos rötslammet i Bromma	43
7.5 Bromma under 2006 med och utan eventuell ökning från efterrötning	45
7.6 Jämförelse inom och mellan de tre försöken.....	46
8. DISKUSSION	49
8.1 Uträkning av metanhalten i den producerade biogasen	49
8.2 Jämförelse mellan satsvis utrötning och Henriksdalsprocessen.....	49
8.3 Jämförelse mellan ”BCS-CH4 Biogas” och Hansens (2004) batchmetod.....	50
8.4 Satsutrötning av rötslam från Bromma reningsverk	51
8.4.1 Satsvis utrötning med omrörning	51
8.4.2 Jämförelse mellan omrörning och ingen omrörning	52
8.5 Jämförelse inom och mellan de olika försöken.....	52
9. SLUTSATSER	53
10. FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE	54
REFERENSER.....	55
BILAGA 1	1
BILAGA 2.....	1
BILAGA 3.....	1
BILAGA 4.....	1
BILAGA 5.....	1
BILAGA 6.....	1
BILAGA 7.....	1
BILAGA 8.....	1

1. INLEDNING

1.1 Bakgrund

I april 1999 satte Sveriges regering upp 15 miljömål (utökades till 16 under 2005) vilka strävar efter att lösa Sveriges stora miljöproblem till nästa generation. I praktiken betyder detta att alla viktiga åtgärder för att realisera dessa mål ska vara genomförda till år 2020.

Det första miljömålet är ”begränsad klimatpåverkan” (genomfört till år 2050) och ett av dess delmål är att utsläppen av växthusgaser under perioden 2008-2012 skall vara minst 4 procent lägre än utsläppen var år 1990. (miljomal.se)

Ett sätt att minska utsläppen av växthusgaser är att byta ut de fossila fordonsbränslena mot förnyelsebara. Inom EU är målsättningen att andelen förnyelsebart bränsle skall vara 5,75 procent av allt fordonsdrivmedel år 2010 och 20 procent år 2020 (biogasrapport juni 2006). De förnyelsebara fordonsbränslen som används i Stockholm är biogas, etanol (E85), etanolinblandning, rapsolja samt vätgas och de utgjorde år 2005 ca 2,8 procent av all fordonsbränsle. Etanolinblandningen uppgår till ca hälften av de förnyelsebara bränslena pga. att all 95-oktanig bensin i Stockholms län innehåller 5 procent etanol. Det bränsle som ökade mest i Stockholm under perioden 2001-2006 är dock biogasen. I hela Sverige såldes under 2006 totalt 24 miljoner Nm³ biogas till fordon, vilket är en ökning med 47 procent jämfört med 2005 (gasforeningen.se). I år, 2007, beräknar man att 30-40 nya tankställen kommer att tas i drift (gasforeningen.se). Biogasen klassas som det miljövänligt bästa fordonsbränslet, enligt statliga alternativbränsleutredningen. Detta eftersom den inte bidrar till växthuseffekten och förbränns utan att bilda slagg eller sot (svenskbiogas.se).

Detta examensarbete utförs för Stockholm Vatten AB som i nuläget producerar biogas för uppvärmning av reningsverken inom företaget, men även för elproduktion samt för uppgradering till fordonsgas. Eftersom det första miljömålet kräver en minskning av växthusgaser skulle Stockholm Vatten kunna bidra till detta genom att producera ännu mer biogas. I detta examensarbete undersöks hur stor metanpotentialen är i det slam som i dag bildas som restprodukt från reningen av avloppsvatten.

1.2 Syfte

Syftet med detta examensarbete har varit att utvärdera en nyinköpt laborationsutrustning för rötning av olika slam samt att med denna mäta metangaspotentialen hos olika organiska substrat och undersöka om den kan användas för driftsoptimering.

Utvärderingen har bestått i att undersöka om resultaten av utrötningen stämmer överrens med den verkliga processen i Henriksdals reningsverk och om utrustningen följaktligen kan användas för driftsoptimering. Därefter skulle samma typ av slam behandlas med någon typ av enzymtillsats för att se om gaspotentialen kunde ökas.

Vidare skulle även slam från Bromma reningsverk testas. Här skulle det rötade primärslammet från Bromma reningsverk behandlas genom att fortsätta rötningen i laborationsutrustningen. Syftet med detta var att undersöka hur mycket mer biogas man kan

får ut av det redan rötade primärslammet. Motivet till försöket var att Bromma reningsverk ska bygga en ny rötkammare och ett förslag är då att röta slammet i två omgångar.

Under arbetets gång var det nödvändigt att ändra på delar av syftet på grund av tidsbrist och praktiska problem. Behandlingen av slammet med enzym gick inte att genomföra praktiskt inom tiden för examensarbetet.

1.3 Frågeställningar

1. Går det att mäta biogas- och metangaspotentialen hos olika slam med laborationsutrustningen ”BCS-CH4 biogas”?
2. Går det att använda ”BCS-CH4” biogas för att simulera biogas- och metangasproduktion i fullskala? Stämmer resultaten överens med den verkliga produktionen?
3. Vad är metangaspotentialen hos beskickningsslammet på Henriksdals reningsverk?
4. Är en ökad gasproduktion möjlig, genom t.ex. efterrötning av rötslam från Bromma reningsverk?
5. CH4-snabbtest? Är det möjligt att avgöra/beräkna vad biogas- och metanproduktionen kommer att bli efter ett visst antal dagar, exempelvis 35, genom att mäta metanproduktionen efter bara några få dagar.

1.4 Metod

För att kunna svara på frågeställningarna och uppfylla syftet för detta examensarbete har kunskap hämtats in genom en litteraturstudie och muntliga kontakter med personer på Henriksdal, Bromma och JTI (Institutet för jordbruks- och miljöteknik). Därefter utfördes praktiska försök och analyser. Litteraturstudie och praktiska försök knöts ihop med en resultatbearbetning och diskussion om processen idag och i framtiden

1.4.1 Praktiska försök

De praktiska försöken beskrivs i kapitel 6 och resultaten redovisas i kapitel 7. Den övergripande tanken med de praktiska försöken var att undersöka metanpotentialen hos olika organiska substrat för att undersöka hur mycket biogas och metan man får ut idag av vad som är teoretiskt möjligt samt praktiskt möjligt med dagens teknik på plats. Som referensförsök användes slam från Henriksdals reningsverk. De försök som har gjorts är:

Beskickningsslam

Först undersöktes metanpotentialen hos det slam som i dagsläget skickas till rötkammarna på henriksdals reningsverk.

Försök på JTI

För att kontrollera hur väl metoden för att mäta metanpotentialen med den nyinköpta utrustningen är jämfördes ett av försöken med en mer välbeprövad metod hos JTI.

Rötslam från Bromma

På uppdrag av Bromma reningsverk undersöktes även metanpotentialen i rötslam från primärslamsrötningen på Bromma. Detta för att granska hur mycket mer gas man kan få ut jämfört med det man producerar idag.

1.4.2 Definition av metangaspotential

Metanpotentialen skulle undersökas hos de olika slammen och den definieras som den ultimata specifika mängd metangas som bildas på obestämd tid. I verkligheten säger man att metanpotentialen är uppnådd när kurvan över den producerade gasen i princip har planat ut och det har gått minst 30 dagar (se kapitel 3 för förklaring av den biologiska processen).

Metanpotentialen ges i detta examensarbete framför allt som mängd metangas per tillsatt organiskt material: $\text{Nm}^3 \text{CH}_4 / \text{kg VS}_{\text{in}}$.

1.5 Avgränsningar

På grund av tidsbegränsning har vissa avgränsningar varit tvungna att göras. Till dessa hör att rötningen endast skedde i form av satsvis utrötning och alltså inte som kontinuerlig. Varje slamsort testades bara en gång, men då med tre uppsättningar prover. Från början var tanken att examensarbetet inte bara skulle undersöka de slam som finns idag på Henriksdals och Brommas reningsverk utan även att de skulle förbehandlas på något sätt för att se om det på så sätt går att utvinna mer gas ur samma slam. Det som inte hanns med på grund av tidsbrist och tekniska problem var undersökning av inverkan från tillsats av olika enzym.

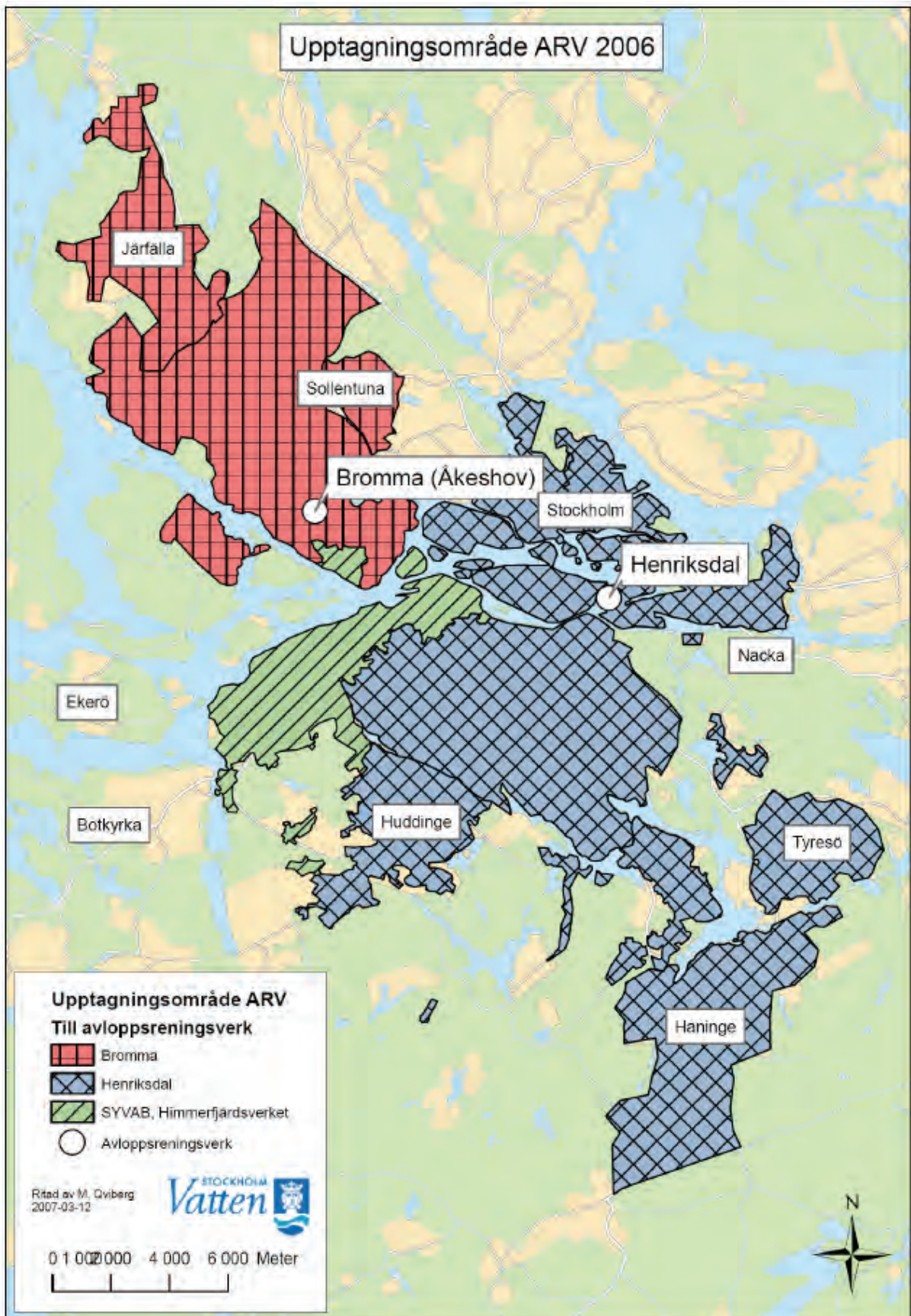
2. RENINGSVERK

Stockholm Vatten AB äger de två reningsverken Henriksdal och Bromma som tillsammans renar vatten från Stockholm, Huddinge och sex grannkommuner (se figur 2.1). Totalt renade de två reningsverken ca 134,2 miljoner m³ avloppsvatten år 2006. (Miljörapport 2006- Stockholm Vatten AB)

I båda verken sker reningen i tre steg genom mekanisk, kemisk och biologisk rening (se figur 2.2 och 2.3). I den mekaniska reningen, som består av ett grovrens och ett sandfång, avlägsnas fasta föroreningar. Efter den mekaniska reningen följer försedimenteringen där framförallt forsfor faller ut och bildar flockar, under förluftning, genom tillsatts av järnsulfat. I flockarna hamnar även en stor del av vattnets organiska innehåll i slammet, vilket ger att en stor del av den organiska avskiljningen sker redan i försedimenteringen. Det slam som bildas vid försedimenteringen kallas primärslam (se avsnitt 3.1.2). Den betydande avskiljningen av organiskt material i försedimenteringen minskar belastningen på den biologiska reningen som följer efter. I den biologiska reningen sker framförallt två processer; aktivslamprocesser samt biofilmsprocesser. I dessa processer och den påföljande eftersedimenteringen bildas ett bioslam. Den största delen av slammet recirkuleras tillbaka till luftningsbassängerna och den resterande mängden, överskottslammet, tas ur systemet och förtjockas genom centrifugering. Utöver organiskt material avskiljs i detta steg även suspenderat material, kväve, fosfor samt oorganiskt lösta och fasta ämnen, som metaller. Som polering får vattnet passera ett filter av sand och lera. (stockholmvatten.se, Miljörapporten 2006- Stockholm Vatten AB)

Primär- och överskottslam rötas (se kapitel 3) i en rötningsanläggning och avvattnas därefter eftersom det rötade slammet har en vattenhalt på ca 96 %. Efter avvattningen är vattenhalten nere i ca 65-75 %. År 2006 producerades 75 959 ton rötat och avvattnat slam sammanlagt i de två reningsverken. 3 100 ton av detta slam användes till åkermarksspridning och den resterande mängden, ca 72 900 ton användes till återställning av markområden vid gruvor av gråbergssupplag och sandmagasin.

Vid rötningsprocessen bildas biogas, vilken består av mestadels CO₂ och CH₄, (se kapitel 3) som samlas upp i en gasklocka. I Bromma reningsverk producerades ca 3,2 miljoner m³ biogas under år 2006. Ca 1,4 miljoner m³ metangas såldes som fordonsbränsle till AGA Gas som i sin tur ser till att den distribueras till personbilar och lastbilar. Den resterande mängden biogas användes för uppvärmning av reningsverket. I Henriksdals reningsverk bildades under 2006 ca 10 miljoner biogas m³, vilket motsvara ca 6,5 miljoner m³ metangas. Av dessa användes ca 2,2 miljoner m³ till produktion av fordonsbränsle. Den resterande mängden används för att producera el och värme. (stockholmvatten.se, Miljörapporten 2006- Stockholm Vatten AB)



Figur 2.1: Upptagningsområden för Henriksdals och Brommas reningsverk samt Himmerfjärdsverket. (Miljörapporten 2006-Stockholm Vatten AB)

2.1 Henriksdals reningsverk

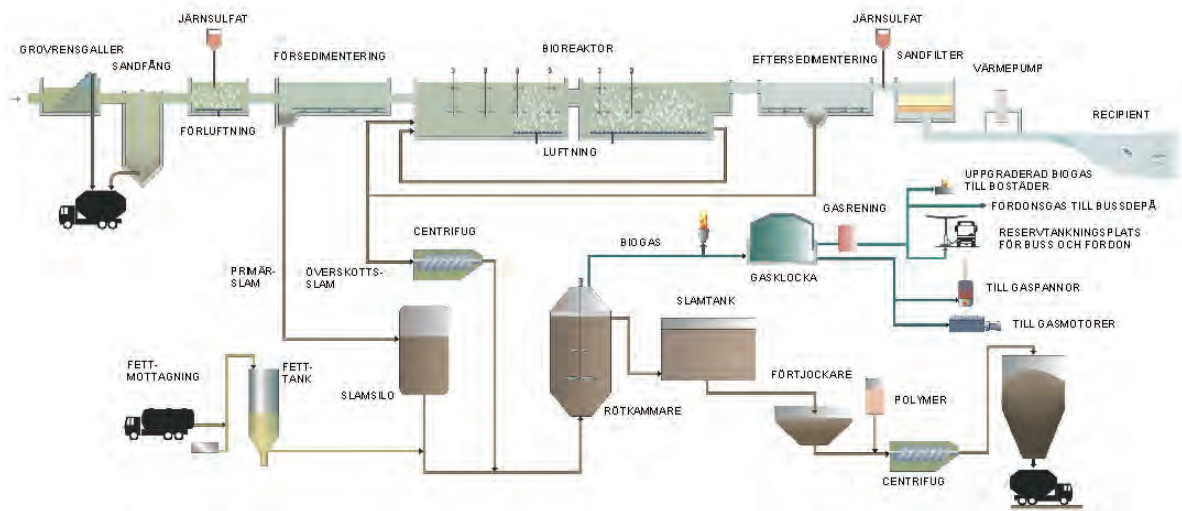
Henriksdals reningsverk, som är ett av Sveriges största, ligger till största delen insprängt i Henriksdalsberget. Här renas vatten från framför allt södra och centrala Stockholm samt kommunerna Nacka, Tyresö, Haninge och Huddinge. Anläggningen är dimensionerad för ett medelflöde på 370 000 m³ per dygn. (stockholmvatten.se)

Rötningen sker genom kontinuerlig enstegsprocess i sju stycken rötammare. Den totala rötammarevolymen är 39 000 m³, varav två stycken har en storlek på 7 000 m³ och de resterande fem är 5 000 m³ stora (teknisk broschyr över Henriksdal). Primärslammet pumpas till två slamsilos varifrån primärslammet pumpas in i beskickningsledningen. Överskottslammet pumpas direkt från förtjockningen in i beskickningsledningen. Ett tredje slam, fettslam, beskickas också till rötammarna. Beskickningen sker i ett rullande schema mellan de sju rötammarna så att belastningen fördelas jämt. Slammet beskickas i botten på rötammarna och tas ut i toppen genom bräddning. (Vallin, 2007)

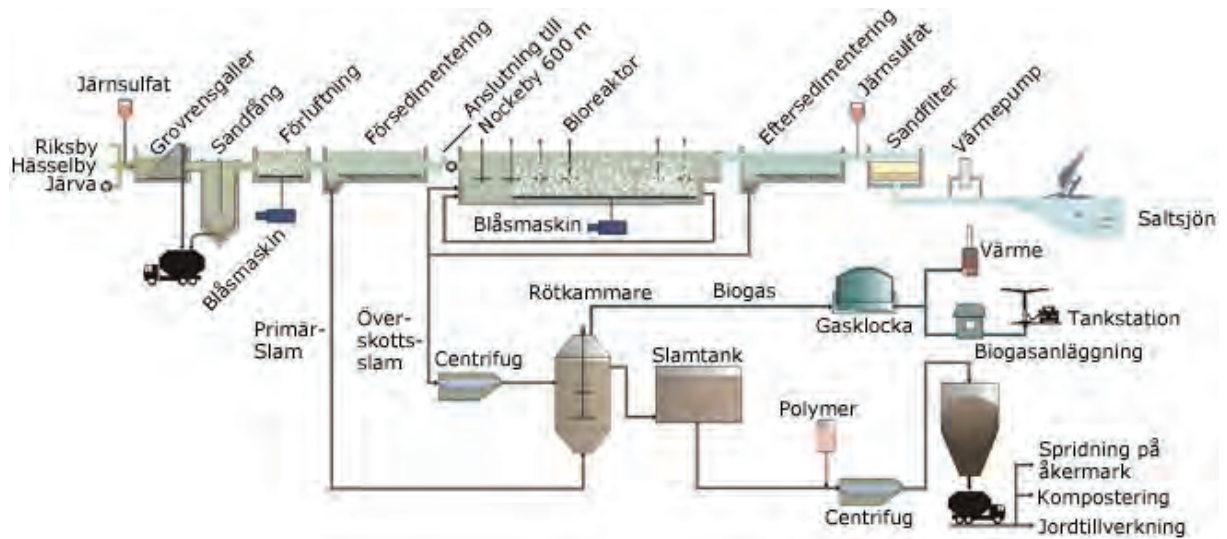
2.2 Bromma reningsverk

Bromma reningsverk är uppdelat i de två delarna Åkeshov och Nockeby och betjänar tillsammans Stockholms norra och västra delar, Sundbyberg samt delar av kommunerna Järfälla och Ekerö. Uppdelningen är gjord så att vid Åkeshov finns förbehandling, försedimentering och slambehandling. Härifrån leds avloppsvattnet via en bergtunnel på ca 600 m till Nockebyanläggningen. Vid Nockebyanläggningen finns aktivslam- och filteranläggningarna. Bromma reningsverk är dimensionerat för att rena 160 000 m³ avloppsvatten per dygn. (stockholmvatten.se)

I dag sker rötningen av primär och överskottslam normalt separat i Bromma. Rötningen sker genom kontinuerlig enstegsrötning i sex stycken rötammare, var av fyra är på ca 2 500 m³ och två stycken på 1000 m³. Den totala volymen är ca 12 000 m³. En av de större rötammarna används för rötningen av överskottslammet och detta är vanligtvis rötammare 3. I framtiden kommer man att ändra rötningen. Snart står en ny rötammare på 6 000 m³ klar. En tanke är att allt primärslam ska rötas i den nya rötammaren först och sen efterrötas i nuvarande rötammare. Efterrötningen kan ske på olika sätt. Det är inte klart hur rötningen kommer att gå till i framtiden, men ett förslag är att efterrötningen av primärslammet kan komma att ske tillsammans med rötningen av överskottslammet. Denna kombination används i dag på Käppala reningsverk på Lidingö. I avsnitt 7.5-6 kommer en redogörelse för resultaten från laborationsförsök på efterrötning av Brommas rötade primärslam.



Figur 2.2: Processbeskrivning av Henriksdals reningsverk.



Figur 2.3: Processbeskrivning av Bromma reningsverk

3. TEORI/LITTERATURSTUDIE

I detta kapitel beskrivs teorin bakom rötningen, både de biologiska och kemiska mekanismerna samt tekniken som används för att röta organiskt material till biogas. Här återges även en del tekniker som skulle kunna användas i framtiden för att öka gasproduktionen och slammets kvalitet.

3.1 Röttningsprocessen

Anaerob nedbrytning i form av rötning sker genom en serie av mikrobiologiska processer som omvandlar organiska föreningar till i huvudsak metan och koldioxid samt reducerar biomassan med 35-60 %. Metan produceras naturligt i bl.a. glaciäris, sediment, sumpmarker, oljefält, mm. De metanbildande mikroorganismernas karaktär upptäcktes för mer än ett sekel sedan, och från början användes röttningsprocessen för att stabilisera avloppsslammet (ta bort patogener mm) och göra det luktfritt (Bitton, 1999). På senare år har även en viktig drivkraft varit att utvinna biogas och framförallt metanet i biogasen. Gasutbytet varierar mellan 0,2 m³/kg och 0,4 m³/kg torrsustans (Nationalencyklopedin, ne.se). Gasen kan användas direkt för förbränning, men på grund av sin höga halt av koldioxid, ca 25%, är den dock en lågvärdesgas utifrån energisynpunkt. Energivärde ligger på 20-23 MJ/m³ att jämföra med naturgas som brukar innehålla 35-38 MJ/m³ (nationalencyklopedin, www.ne.se). Om gasen ska användas som bränsle till fordon måste den först renas från det mesta av koldioxiden.

Nedan listas för och nackdelar med anaeroba processer jämfört med aeroba processer.

Anaeroba processer för nedbrytning av organiskt material har flera fördelar jämfört med aeroba processer:

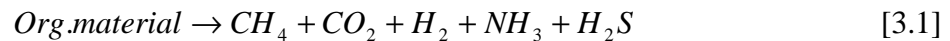
- + Kräver mindre energi än aerob vattenrening eftersom anaeroba processer använder CO₂ som elektronacceptor och därför inte behöver syre, vilket är dyrt att tillhandahålla.
- + Producerar 3-10 gånger mindre mängder slam eftersom energiutbytet vid bildning av anaeroba bakterier är relativt låg. Den mesta energin från nedbrytningen av substrat hamnar i slutprodukten metan. 20 - 150 kg celler bildas per ton COD som brutits ned.
- + Den producerade metangasen kan användas som energikälla. Metangas innehåller ca 37 681 kJ/Nm³.
- + Aktiviteten hos de anaeroba mikroorganismerna kan bevaras även om röttkammaren inte har matats med nytt substrat på länge
- + Lämpar sig bra för högmolekylärt industriavfall.

Det finns dock några viktiga nackdelar med anaeroba processer:

- Långsammare än aeroba, vilket ger att det krävs större anläggningsvolym
- Känsliga för gifter
- Lång uppstartstid

3.1.1 Mikrobiologiska processen

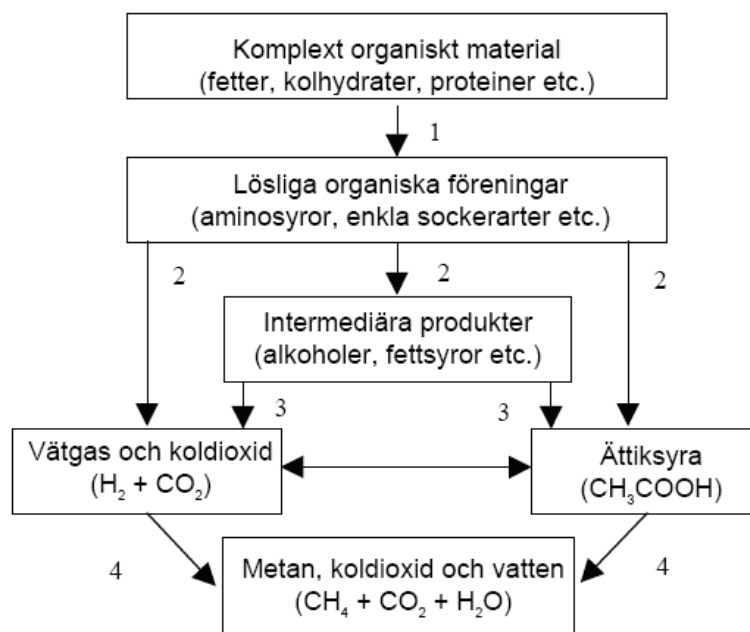
Under rötningsprocessen omvandlas organiskt kol, genom på varandra följande oxidations- och reduktionsreaktioner, till sitt mest oxiderade tillstånd, CO_2 , och sitt mest reducerade tillstånd, CH_4 . Ju mer reducerad det organiska innehållet är desto mer CH_4 kommer att bildas (Angelidaki och Sanders, 2004). Ca 50-65 % av gasen består av CH_4 och 25-40 % består av CO_2 men även ett antal andra gaser bildas – se reaktionsformel 3.1 och tabell 3.1 (Bitton 1999):



Ämne	Kemisk formel	Volymprocent
Metan	CH_4	50-65
Koldioxid	CO_2	25-40
Kolmonoxid	CO	0-0,3
Vätgas	H_2	0-3,0
Kvävgas	N_2	1-5,0
Syrgas	O_2	0-0,5
Svavelväte	H_2S	0,05-1,5

Tabell 3.1: Sammansättning hos biogasen som bildas vid rötning (Thyselius, 1982).

Metanbildningen sker i de fyra stegen: hydrolys, jäsning (syrabildning), anaerob oxidering samt metanbildning. Nedan följer en utförligare beskrivning av de olika delstegen (se även figur 3.1).



Figur 3.1: Schematisk bild över hur organiskt material omvandlas till metan och koldioxid genom fyra steg (Nilsson, 2000).

1. Hydrolys

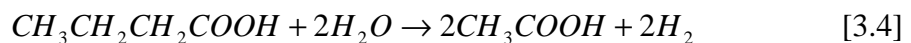
Hydrolysen är det första steget i den anaeroba nedbrytningsprocessen. Under hydrolysen omvandlas partikulärt material till lösliga föreningar som kan hydrolyseras vidare till monomerer, som i sin tur kan användas av bakterier vid jäsningen. Exempelvis bryts proteiner, lipider, cellulosa och lignin ner till aminosyror, glukos, fettsyror och glycerol. Hydrolysen är relativt långsam och kan vara begränsade vid nedbrytning av avfall som innehåller lignin. Processen katalyseras av enzymer som cellulaser, proteaser, och lipaser. Temperaturen är en viktig faktor under hydrolysen. Rötningstemperaturens totala effekt på hydrolysen beror av den sammantagna temperatureffekten från både enzymkinetiken, bakterietillväxten och lösligheten av substratet. Hydrolyshastigheten är högre för lösta polymerer än för partikulära. Hydrolyshastigheten begränsas även av andelen tillgänglig yta hos det organiska materialet som ska brytas ner. Om andelen enzymer som finns i substratet är i överskott jämfört med den tillgängliga ytan bestäms hydrolyshastigheten av ytarealen och inte av enzymaktiviteten (Hobson, 1987). (Angelidaki & Sanders, 2004; Bitton, 1999; Metcalf & Eddy, 2003)

2. Jäsning – syrabildning

Syrabildningen är oftast andra steget i anaerob nedbrytning, men i vissa avloppsvatten kan acetat och H₂ även bildas direkt från det primära substratet utan hydrolyssteg (Scragg, 1999). Här omvandlas socker, aminosyror och fettsyror till organiska syror, alkoholer och ketoner, acetat, CO₂ samt H₂. Vid jäsning av kolhydrater är acetat oftast huvudprodukten. I de fall där produkten blir något annat varierar produkterna med bakterietypen som är verksam men även med temperatur, pH och redoxpotentialen (Bitton G. 1999). Det organiska substratet tjänar som både elektrondonator och -acceptor (Metcalf & Eddy, 2003).

3. Anaerob oxidation

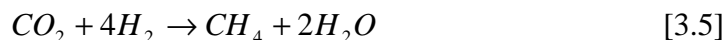
Fettsyror och alkoholer från det syrabildande steget omvandlas vid anaerob oxidation till acetat, H₂ och CO₂. Denna omvandling sker med hjälp av acetatgenererande bakterier. Den här gruppen organismer kräver låg koncentration av H₂ för att omvandla fettsyror, <10⁻⁴ atm (Metcalf & Eddy, 2003). Vid för högt partiellt vätetryck reduceras bildningen av acetat och substratet omvandlas istället till propionsyra och smörsyra samt etanol istället för metanol. Lyckligtvis nyttjas vätet i nästa fas av den anaeroba processen och på så sätt kan vätetrycket hållas nere. Några reaktioner i denna fas (Bitton G. 1999):



4. Metanbildning

I det sista delsteget sker själva bildningen av metangasen. De metanbildande mikroorganismerna kallas metanogener och växer väldigt långsamt i avloppsvatten. Generationstiderna spänner mellan 3 dagar, vid 35°C, till 50 dagar vid 10°C. Metanogener använder ammonium och sulfid som kväve- respektive svavelkälla. Samtidigt som sulfid är huvudkälla till svavel så är icke-joniserad sulfid giftigt för metanogener vid koncentrationer över 150-200 mg/L. Spårämnen som järn, kobolt, molybden och nickel är viktiga för processen. Metanbildande organismer delas upp i två undergrupper:

1. *Hydrogenotrofa*, dvs. väteutnyttjande, metanogener som använder väte som elektrondonator och CO₂ som elektronacceptor:



Det är dessa metanogener som hjälper till att hålla nere vätetets partialtryck, som är så viktigt för omvandlingen av flyktiga syror och alkoholer till acetat. I denna fas kan dock acetogenerna använda CO₂ för att oxidera H₂ och bilda acetat igen. (Metcalf & Eddy, 2003)

2. *Acetotrofa metanogener* (acetatsplittrande) omvandlar acetat till metan och koldioxid:



Eftersom dessa acetotrofa metanogener omvandlar den acetat, som eventuellt, bildades av de hydrogenotrofa metanogenerna till CH₄ sker ingen minskning av metanproduktionen i slutändan. Ca 72 % av all metan som bildas, bildas från acetat. (Metcalf & Eddy, 2003)

En bakteriegrupp som konkurrerar med metanogenerna om samma elektrondonatorer, dvs. acetat och H₂, är de sulfatreducerande bakterierna. Vid höga acetatförhållanden kan dessa bakterier konkurrera ut metanogenerna, vilket ger sulfatreduktion istället för metanproduktion. (Bitton, 1999)

3.1.2 Slam

I detta avsnitt beskrivs de olika slammen som finns i reningsverken och som analyseras i de praktiska försöken som utförts inom ramen för detta examensarbete.

Primärslam

Primärslam genereras vid den primära vattenreningen, och järnsulfatfällningen, och ackumuleras i försedimenteringen. TS (torrsubstansen) ligger här generellt mellan 3-8 % (Bitton G., 1999). I Henriksdalsprocessen var under år 2006 produktionen av primärslam ca 1 520 m³/dygn med en TS-halt på 2,7 - 5,5 % med ett medel på 3,6 % och en VS-halt (mått på organiskt material, se avsnitt 3.1.4) på 57,1 - 79,7 % av TS med ett medel på 72,7 % av TS.

Överskottslam, sekundärt slam

Överskottslammet, även kallat biologiskt slam, genereras i den biologiska reningen. I detta slam befinner sig de flesta organiska föreningarna i fast fas. Biomassan är relativt svårnedbrytbar jämfört med primärslammet, vilket ger att gasproduktionen från detta slam inte blir så hög. I Henriksdalsprocessen var under 2006 produktionen av förtjockat överskottslam ca 455 m³/dygn. TS-halten ligger på ca 0,5 % innan det förtjockats och efter förtjockningen på ca 5 % beroende på vilken biologisk rening som tillämpas och vilken förtjockningsmetod som används (Bitton G., 1999). I Henriksdal låg TS-halten under år 2006 på 1,9 - 6,3 % med ett medel på 4,0 %. Innehållet av organiskt material varierade mellan en VS-halt på 50,3 % till 66,3 % med ett årsmedel på 62,4 %.

Fettslam

Utöver primär- och överskottslam behandlas i Henriksdal även fettslam, som går under benämningen externt organiskt material (EOM). Fettslammet transporteras flera gånger om

dagen till reningsverket med lastbilar och pumpas in i beskickningsledningen där det blandas med reningsverkets slam. 96 % av fettslammet är fettavskiljareslam vid livsmedelsproduktion och restauranger (Vallin, 2007). I Henriksdal var flödet av fettslam under år 2006 ca 78,9 m³/dygn.

Beskickningsslam

Beskickningsslammet är benämningen på den blandning av olika slamtyper som skickas in till röt-kammarna. I Henriksdal består blandning av primärslam, överskottsslam och fettslam. I Henriksdal var under år 2006 sammansättningen av beskickningsslammet med avseende på TS-mängd: 68,5 % primärslam, 22,2 % förtjockat överskottsslam och 9,3 % fettslam (Daniel Hellström, 2007-01-22). Som framgår av tabell 3.2 ska ett bra slam ur energisynpunkt innehålla så mycket fett som möjligt (Nilsson, 2000).

Ämne	Gasmängd m ³ /kg	Metanhalt vol%	Koldioxidhalt vol%	Energi i gas kWh/kg substrat
Fett	1,200	67	33	7,9
Protein	0,700	70	30	4,8
Kolhydrat	0,800	50	50	3,9

Tabell 3.2: Typiska värden för gasmängd, -sammansättning samt energi vid rötning av fett, protein och kolhydrater.

I bilaga 2 och 3 visas de olika slamflödena hos Henriksdal och Bromma under 2006 i form av grafer.

Patogener och parasiter

I slammet finns en hel del patogener i form av bakterier, virus och parasiter. Uppehållstiden och temperaturen i reaktorerna är de två viktigaste faktorerna för att reducera patogener. Längre uppehållstid och högre temperatur ger bättre reduktion av patogener. Beträffande matnings- och avtappningsförfarandet av röt-kammaren menar Bitton (1999) att det är bättre att tappa av först och fylla sen, än tvärtom, detta för att reducera så mycket patogener som möjligt. Vid kontinuerlig rötning är det svårt att få en fullständig avdödning av patogener eftersom fyllandet och avtappandet sker samtidigt och en del av slammet kan gå igenom röt-kammaren utan att behandlas alls eller under en kortare period än den teoretiska uppehållstiden.

3.1.3 Processdesign och temperatur

Rötningen av slammet kan ske på tre olika sätt; genom satsvis rötning, pluggflöde eller genom kontinuerlig rötning. Vid satsvis rötning fylls en röt-kammare med slam som får rötas under en viss tid och därefter töms reaktorn på sitt innehåll för att åter fyllas med nytt slam. En satsvis utrötning ger en ojämn gasproduktion. Vid pluggflöde beskickas slammet till röt-kammaren i omgångar, vilket ger en jämnare gasproduktion. Kontinuerlig rötning innebär att det hela tiden är ett kontinuerligt flöde av slam in och ut ur röt-kammaren. Lika mycket slam som för in i kammaren för samtidigt ut ur kammare. Gasproduktionen blir jämn men slammet blir inte fullständigt utrötat. En del av slammet kommer i princip att gå rakt igenom utan att hinna brytas ner eller producera någon gas.

Temperaturen är, enligt Westermann et al. (1989), den viktigaste kontrollparametern när det gäller hastigheten hos metabolismen i anaerob miljö. Exempelvis är metanogener väldigt känsliga för förändringar i temperatur eftersom de växer så långsamt (Bitton 1999). För varje 10°C ökning, upp till en viss övre gräns, fördubblas de biokemiska reaktionerna (Metcalf & Eddy, 2003). Men den optimala temperaturen för varje intervall, se nedan, vad gällande tillväxt ligger nära den övre gränsen för varje intervall och en ökning över optimum kan resultera i en kraftig minskning av tillväxthastigheten (Nilsson, 2000).

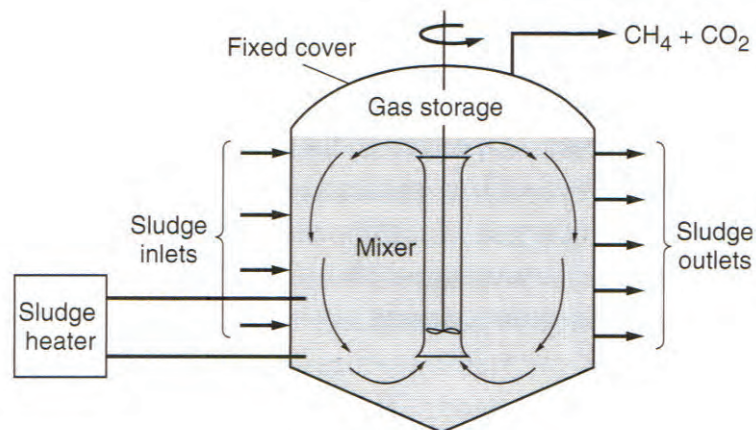
Psykrofil rötning

Psykrofil rötning kallas det när rötningen sker inom intervallet 15-30°C (Nilsson, 2000), men denna typ används sällan i industriella processer pga. den långsamma tillväxten.

Mesofil rötning

Mesofil rötning är det vanligaste temperaturintervallet för rötprocesser vid behandling av slam i kommunal avloppsrening. Beskrivningen av temperaturintervallet skiljer sig lite mellan olika källor, men ligger sammantaget mellan 25-40°C med optimum vid 35°C.

Mesofil rötning sker vanligtvis i ett steg i en stor rötningstank utrustad med omrörning, värmning, gasuppsamling samt slammatning och avtappning (figur 3.2). Slamflödet fram till rötkammaren förtjockas innan matning. Omrörning i rötkammaren är viktigt för att förbättra nedbrytningen av material (genom att materialet blandas), föra bort gasbubblor, fördela värmen i rötkammaren, förhindra svämtäcken och sedimentation av material (Nilsson S, 2000). En jämnt fördelad och kontinuerlig matning är viktig för att upprätthålla konstanta förhållanden i reaktorn. TS minskas generellt med 45-50 %. Uppehållstiderna (se 3.1.4) ligger generellt mellan 10-20 dagar. (Metcalf & Eddy, 2003)



Figur 3.2: Schematisk bild över enstegs kontinuerlig mesofil rötning (Metcalf & Eddy, 2003)

Termofil rötning

Termofila bakteriesträngar som kan växa vid temperaturer mellan 63 - 97°C har hittats i varma källor på Island (Bitton, 1999), men generellt ligger intervallet mellan 50 - 70°C för kommunal avloppsrening (Metcalf & Eddy, 2003). Eftersom temperaturen är så mycket högre än vid mesofil rötning ger det att processen blir mycket snabbare, beroende på att bakterierna i biogasprocessen ökar omsättningshastigheten av nedbrytbart material vid en ökande temperatur (Nilsson, 2000). Andra positiva egenskaper är att termofil rötning klarar högre belastning än mesofil rötning, ger ökad avvattning och har effektivare nedbrytning av

patogener. Däremot är denna process mindre stabil, (känsligare för gifter, se 3.1.4), har högre energikrav för värmning, avger mer lukt samt ger större mängder olöst material i slammet. Varför processen är mindre stabil beror bl.a. på att hög temperatur och högt pH leder till ökad andel ammonium och därmed ökade problem i processen (Nilsson, 2000) (se 3.1.4). Termofil rötning är relativt ovanlig än så länge och i de fall den används i kommunal avloppsvattenrening ingår den generellt i en serie av reaktorer, oftast med olika temperaturintervall, se tabell 3.3.

Temperaturområde	Uppehållstid	Belastning
Mesofil (37°C)	min 15-25 dygn	2-4 kg VS/(m ³ *d)
Termofil (55°C)	min 10-15 dygn	5-8 kg VS/(m ³ *d)

Tabell 3.3: Typisk uppehållstid och organisk belastning för mesofil respektive termofil rötning. (Nilsson, 2000)

Rötning i flera steg

Flerstegsrötning består oftast av två steg i serie, men det kan även vara fler steg. Sökandet efter förbättrad röttningsförmåga, med bättre patogenreduktion och bättre gasutvinning, har lett till ett antal förslag på flerstegsrötning (Metcalf & Eddy, 2003):

- o *Flerstegs mesofil rötning (Fig. 3.4 och 3.5a)*
Vid flerstegs mesofil rötning (Staged mesophilic anaerobic digestion) är den första tanken av samma typ som vid enstegsrötningen med omrörning, värmning och kontinuerlig matning. Det är i den första tanken som man får en stabilisering av slammet. Tank nummer två är till för förtjockning och lagring innan slammet slutgiltigt bortskaffas och här sker nedbrytning och sedimentering samtidigt. Enligt Metcalf & Eddy (2003) används tvåstegsrötning inte i modern processdesign och detta framförallt för att det är dyrt att bygga en stor tank som inte nyttjas fullt ut och för att tidigare studier visade att det inte gav någon vinning i VS-reduktion (mått på nedbrytning av organiskt material, se 3.1.3) eller gasproduktion. Men enligt Bitton (1999) tillåter tvåstegsrötning högre belastning och kortare hydraulisk uppehållstid än enstegsrötning och enligt Metcalf & Eddy har mer nyligen gjorda försök visat att tvåstegs mesofil rötning kan ge ett mer stabilt slam med mindre lukt och bättre avvattningsegenskaper.
- o *Temperaturuppdelad rötning*
Tekniken med temperaturuppdelad rötning (Temperature-phased anaerobic digestion, TPAD), är utvecklad i Tyskland och tar vara på fördelarna med termofil rötning och kompletterar med mesofil för att öka stabiliteten. Eftersom termofil rötning är ca fyra gånger snabbare än mesofil ger det att den sammanlagda uppehållstiden bli ca 15 dagar, jämfört med vanligtvis nästan 20 dagar för enstegs mesofil rötning. Rötningen kan ske med antingen det termofila steget först och det mesofila därefter, typ 1, eller tvärtom, typ 2 (Fig. 3.5b-c). Rötningstemperaturerna är generellt 35°C för det mesofila steget och 55°C för det termofila. Enligt Metcalf & Eddy (2003) ökar VS-nedbrytningen i typ 1 med 15-25 % jämfört med enstegs mesofil rötning. Det finns endast begränsade resultat från anläggningar av typ två, men de visar att VS-reduktionen är bättre än vid enstegs mesofil rötning.

- o *Syra/gas uppdelad rötning*
Vid syra/gas uppdelad rötning (Acid/Gas phased digestion), som är en typ av tvåstegsrötning, används det första steget för upplösning av partikulärt material och bildande av flyktiga syror. pH är under 6 och uppehållstiden är kort eftersom acidogenernas generationstid endast är några dagar lång. I det andra steget är pH neutralt och uppehållstiden mycket längre. Detta för att metanogenerna ska trivas och för att ge maximal gasproduktion. Denna typ av flerstegsrötning ger bättre VS-reduktion än mesofil enstegsrötning (50-60 % reduktion) och bättre kontroll på skumning. Båda stegen kan köras antingen mesofilt eller termofilt (Fig. 3.5d-e).

- o *Flerstegs termofil rötning*
Flerstegsrötning kan precis som vid mesofil rötning ske med termofila rötkammare i serie (Fig. 3.5f). Flerstegs termofil rötning (Staged thermophilic anaerobic digestion) består av en stor termofil reaktor följt av en eller flera små. Enligt Metcalf & Eddy (2003) finns det ett avloppsvattenreningsverk i Vancouver i Kanada som använder denna typ (med tre steg efter första reningen) och de har en VS-reduktion på 63 %.

3.1.4 Processövervakningsparametrar

Enligt Björnsson et al. (2000) körs rötkammare oftast med en lägre organisk belastning, OLR (organic loading rate), än vad de skulle kunna köras med, för att inte riskera en överbelastning av processen. Parametrar som hjälper till att övervaka processen är: temperaturen (se 3.1.2), uppehållstid, pH, alkalinitet, ammoniumhalt, VFA, gasproduktionshastighet (se 6.2.x), nedbrytningen av organiskt material (se 6.2.x), TS, VS och COD samt mängden väte, metan och koldioxid i gasen. Dessa parametrar samt organisk belastning kommer att beskrivas närmare i avsnitten som följer.

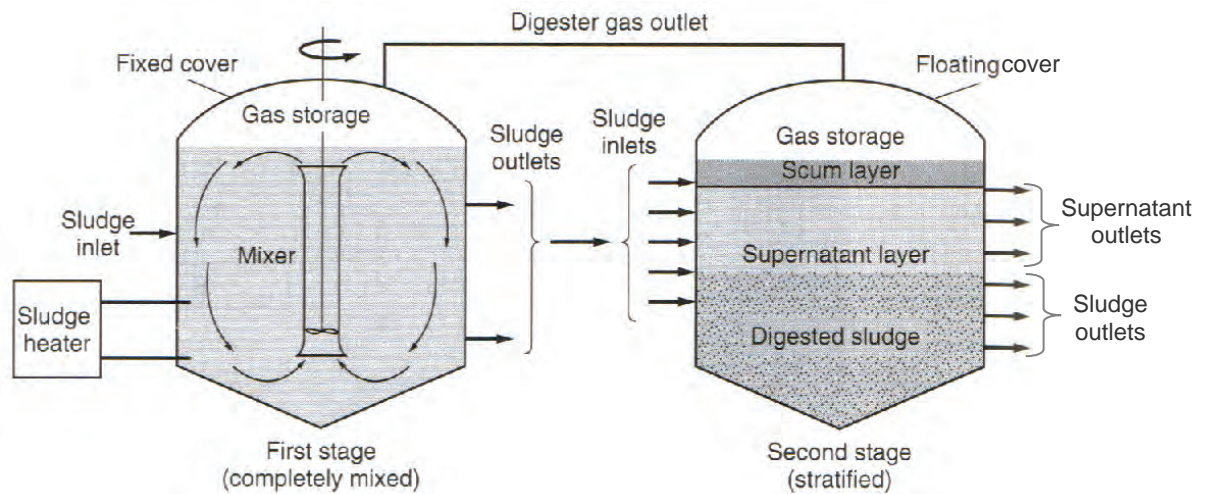
Uppehållstider

Storleken på reaktorn baseras på uppehållstiden som krävs i en väl omrörd reaktor för att nedbrytning av VS (mått på organiskt material, se nedan) ska kunna ske, alltså att den tillåter metabolism av anaeroba bakterier (Bitton 1999). Man skiljer på två olika uppehållstider; SRT, solid retention time, som är genomsnittlig tid som det fasta materialet befinner sig i reaktorn och HRT, hydraulisk uppehållstid, som är den genomsnittliga tiden som vätskan befinner sig i reaktorn. Vid totalomblandad omrörning är SRT = HRT (Metcalf & Eddy, 2003). Storleken av reaktorn baseras även på belastningen av organiskt material som den utsätts för (se nedan). Uppehållstiden definieras som:

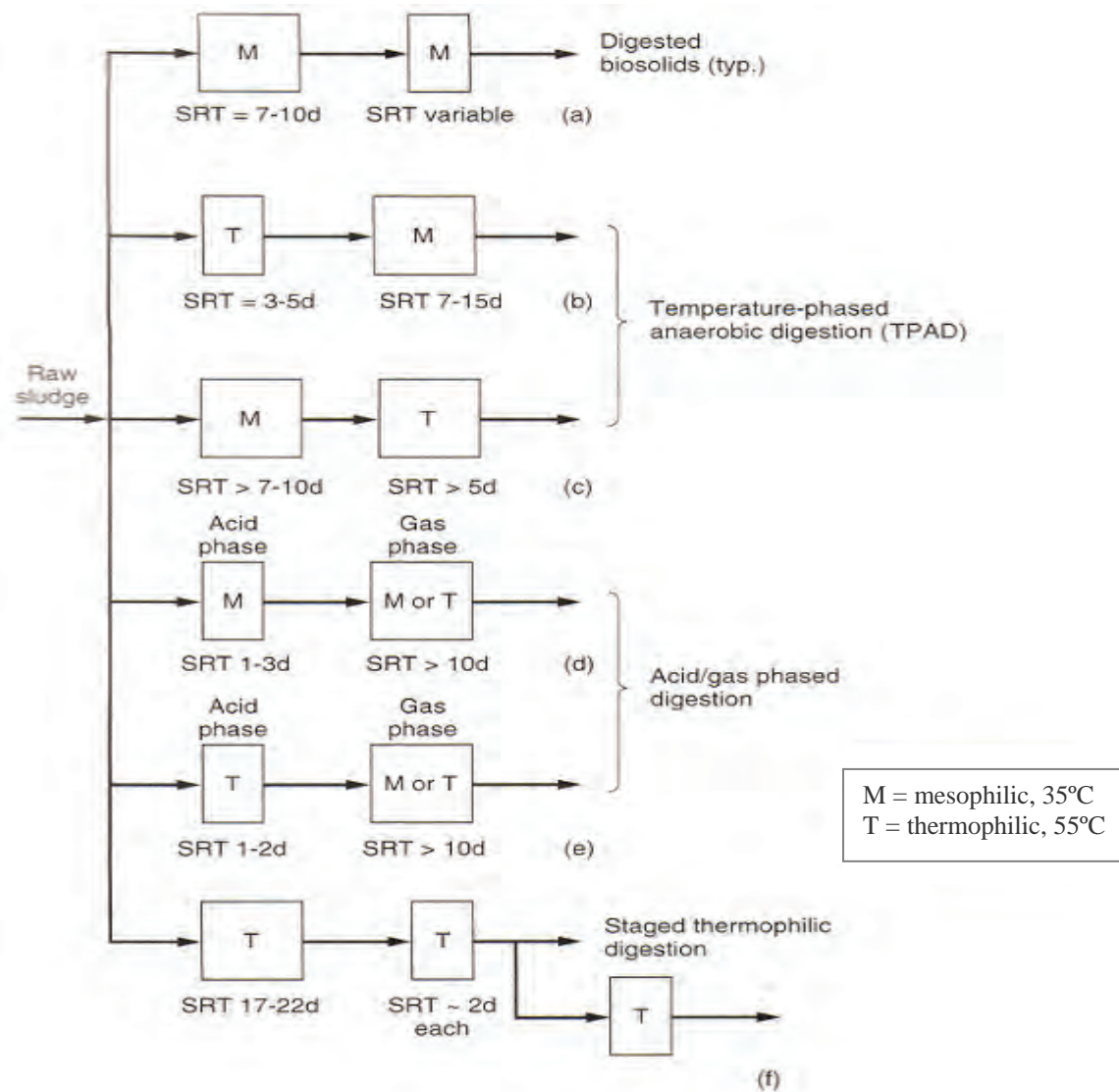
$$\text{Uppehållstid (d)} = \frac{\text{rötkammarens volym (m}^3\text{)}}{\text{mängd slam ut per dygn (m}^3\text{ slam, dygn)}} \quad [3.7]$$

pH

Anaerob nedbrytning har optimum mellan pH 6,0-8,3 där metanogenernas optimum ligger mellan pH 7-8 (Angelidaki & Sanders, 2004), medan acidogenernas optimum ligger något lägre (Angelidaki & Ahring 1997). Om pH närmar sig 6,0 kan processen haverera. Bildningen av organiska fettsyror gör att pH sjunker, vilket medför att ökningen av flyktiga syror tjänar som en tidig indikator på störning i systemet. Förhållandet mellan halten totala flyktiga syror och total alkalinitet borde vara <0,1 (Bitton, 1999).



Figur 3.4: Schematisk bild över tvåstegs mesofil rötning (Metcalf & Eddy, 2003).



Figur 3.5: Schematisk bild över olika sätt att kombinera reaktorer för flerstegs-rötning. SRT, solid retention time = slammets uppehållstid i rötammaren. (Metcalf & Eddy, 2003)

Alkalinitet

Hög alkalinitet, 3000-5000 mg/L, krävs för en stabil process. I slamnedbrytningsprocessen uppehålls alkaliniteten genom att NH_3 tillsammans med CO_2 och H_2O bildar $\text{NH}_4(\text{HCO}_3)$ (Metcalf & Eddy).

Kväve (Ammonium)

Ammoniumhalten i substratet mäts för att se hur mycket löst ammonium som finns, eftersom ett högt värde kan verka hämmande (inhiberande) på den metanbildande processen. Enligt Wellinger m.fl., (1991 i JTI-rapport 21) kan en halt på 2-3 g ammonium/L ge problem i processen. Men ammonium är inte bara hämmande för processen, det behövs även som näring för bakterierna. Enligt Angelidaki & Ahring (1997) är koncentrationer på 50-200 mg ammonium/L gynnsamt för bakterietillväxten. De menar även att VFA ökar under processen om koncentrationen av löst ammonium är under 100 mg/L.

Torrsubstans, TS

Torrsubstansen i ett slam eller avloppsvatten är den torra delen av slammet som blir kvar efter att det torkats i en ugn vid 105°C . TS halten mäts genom att dela den torkade vikten med den våta enligt formeln (APAH, 1989):

$$TS (\% \text{ av våtvikt}) = \frac{\text{vikt efter värmning vid } 105^\circ\text{C}}{\text{våtvikt}} \cdot 100\% \quad [3.8]$$

VS och COD

VS (volatile solids), även kallad glödförlust, och COD (chemical oxygen demand) är de vanligaste metoderna för att bestämma mängden organiskt material i avloppsvatten och slam. COD används oftast för vatten med låg TS-halt och VS används oftast när man vill karakterisera t.ex. slam, som har högre TS.

VS, volatile solids

- Innehållet av organiskt material i avfallet
- Mäts i g VS/L, % av TS eller % av våtvikt.
- Definieras som mängden förlust, glödförlusten, av ett material i ett prov som torkats i en timme i luft vid ca 550°C (APHA, 1989). De flesta organiska föreningar förbränns vid denna temperatur medan de flesta oorganiska föreningar kräver högre temperaturer för att förbrännas. Det som blir kvar kallas för glödrest, GR, och beräknas enligt formeln (APAH, 1989):

$$GR (\% \text{ av TS}) = \frac{\text{vikt efter värmning vid } 550^\circ\text{C} - \text{vikt TS}}{\text{vikt TS}} \cdot 100\% \quad [3.9]$$

VS som % av TS beräknas därefter genom formeln:

$$VS (\% \text{ av TS}) = 100 - GR \quad [3.10]$$

Om man istället vill veta VS som % av våtvikten används följande formel:

$$VS (\% \text{ av våtvikt}) = TS \cdot \left(\frac{100 - GR}{100} \right) \quad [3.11]$$

COD, chemical oxygen demand

- Mäts som mg O₂/L
- Beskriver mängden O₂ som åtgår för att oxidera det organiska materialet i avfallet
- Fastställs experimentellt genom mätning av mängden av en kemisk oxidant som behövs för att fullständigt oxidera en del av avfallet
- Endast 90-95 % av det organiska materialet oxideras dock, beroende på vilken metod som används.
- Dikromat har den bästa oxideringsförmågan.

Organisk belastning

Den organiska belastningen, OLR, (organic loading rate) är ett mått på hur mycket organiskt material man pumpar in i reaktorn per dygn och definieras som (Metcalf & Eddy, 2003):

$$OLR(\text{kg VS}_{in} / \text{m}^3 \text{ reaktorvolym, dygn}) = \frac{\text{organiskt material in i rötchammare (kg VS}_{in})}{\text{rötchammarsvolym och dygn (m}^3, \text{ dygn)}} \quad [3.12]$$

Flyktiga fettsyror, VFA

Den mesta produktionen av flyktiga fettsyror, VFA, sker under den första dagen av den anaeroba processen (Angelidaki & Sanders, 2004). Eftersom fettsyrorna är mellanprodukter i nedbrytningsprocessen kan de användas som en tidigare indikator än pH på störningar i processen. Ett exempel på störning är överbelastning av processen varpå fettsyrorna då anrikas. Man kan även använda enskilda fettsyror som indikatorer. Vid överbelastning är exempelvis halten av propionat en bra indikator (Nilsson, 2000).

Gifter som hämmar metanproduktionen

Nedan följer en lista på några av de ämnen som kan vara giftiga och hämma metanproduktionen (Bitton, 1999):

1. Syre: metanogener är obligata anaerobier och tål inte syre, men har dock visat en viss tåligghet i kornigt slam där de är skyddade från kontakt med syret.
2. Ammonium: Icke-joniserat ammonium är relativt giftigt för metanogener och ökar vid högt pH, varför neutralt pH är att föredra. Inhibering har observerats vid ammonium nivåer på 1 500-3 000 mg/L.
3. Bensenringsföreningar
4. Klorerade kolväten: Klorerade alifater är mycket giftiga för processen. Kloroform i koncentrationer över 1mg/L leder till total inhibering.
5. Formaldehyd: Allvarligt hämmande vid nivåer på 100 mg/L.
6. Flyktiga fettsyror, volatile fatty acids (VFA); har redan diskuterats.
7. Tungmetaller: tungmetaller som Cu²⁺, Pb²⁺, Cd²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺ och Cr²⁺ är allvarligt hämmande för rötningsprocessen.

8. Sulfid: En av de starkaste inhibitorerna. Starkt pH-beroende. Giftiga för metanogener vid nivåer över 150-200 mg/L. De väteoxiderande metanogenerna verkar enligt Bitton (1999) känsligare än de acetatklyvande.

3.1.4 Kinetik

Det finns två viktiga hastighetsbestämmande faktorer inom rötningen (Metcalf & Eddy, 2003):

1. Hydrolyshastigheten

Hydrolyshastigheten påverkar inte processens funktion och stabilitet, men är en viktig faktor för den totala mängden partikulärt material som omvandlas till lösligt. I anaerob kommunal rötning av avloppsslam krävs minst 30 dagars uppehållstid för att allt partikulärt material ska ha löst sig (Metcalf & Eddy).

Första ordningens kinetik är den mest använda för att beskriva hydrolyseringen av partikulära substrat under anaeroba förhållanden (Angelidaki & Sanders, 2004):

$$\frac{dX_{\text{deg}}}{dt} = -k_h \cdot X_{\text{deg}} \quad [3.13]$$

X_{deg} = koncentration av biologiskt nedbrytbart substrat [kg m^{-3}]
 t = tid [dagar]
 k_h = första ordningens hydrolyskonstant [dag^{-1}]

2. Hur snabbt det lösta materialet utnyttjas:

Enligt Metcalf & Eddy (2003) är det andra hastighetsbegreppet, kinetiken för utnyttjandet av löst material, mycket viktigt för processtabiliteten. Det hastighetsbestämmande steget är acidogenernas nedbrytningen av VFA, tillsammans med metanogenernas metanbildning.

Det är alltså kinetiken hos de metanbildande bakterierna som är mest intressant för processen. Vid 20, 25 respektive 35°C är minsta SRT 7,8; 5,9 respektive 3,2 dagar och med en säkerhetsfaktor på 5 ger det 40, 30 respektive 15 dagars SRT (Metcalf & Edd, 2003).

3.2 Bio- och metangasproduktion

Metanpotentialen definieras som det ultimata specifika mängd metan som bildas på obestämd tid (Angelidaki & Sanders, 2004). I verkligheten är ju tiden bestämd och metanpotentialen estimeras då genom extrapolering av den kurva som visar metanproduktionen som funktion av tiden. Metanpotentialen kan redovisas på olika sätt. Ett antal sätt är:

- mängd metan per mängd avfall – $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{m}^3 \text{avfall}$
- mängd metan per massan av tillsatt glödförlust, VS, - $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$
- mängd metan per tillsatt mängd COD – $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg COD}$

I detta examensarbete kommer framförallt $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}$ att användas.

3.2.1 Metod för fastställande av den teoretiska metanpotentialen

Metcalf & Eddy (2003) menar att en COD-balansräkning kan göras för att redogöra för förändring av COD under rötning. COD-ekvivalenten för metan kan bestämmas genom stökiometri. Den COD-mängd som omvandlas till metan motsvarar mängden syre som behövs för att oxidera metan till koldioxid och vatten:

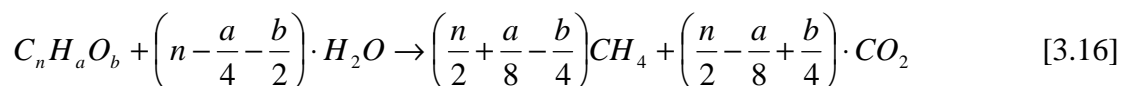


COD per mol metan är $2 \cdot (32 \text{ g O}_2/\text{mol}) = 64 \text{ g O}_2/\text{mol CH}_4$. Volymen av en mol CH_4 vid STP (standard temperature and pressure, 0°C och 1 atm) är 22,414 L. Vilket enligt stökiometrin ger att COD omvandlat under anaeroba förhållanden är $22,414/64 = 0,35 \text{ L/g COD (g O}_2)$.

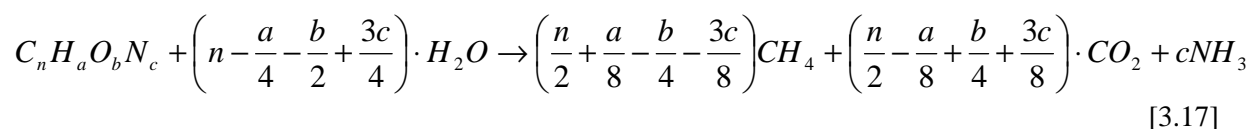
$$COD_{\text{metan}} = COD_{\text{in}} - COD_{\text{effluent}} - COD_{\text{VS}} \quad [3.15]$$

Från detta kan man beräkna den teoretiska mängden metan som skulle kunna bildas om allt organiskt material bröts ner och även hur mycket som borde ha bildats utifrån hur mycket som faktiskt bröts ner.

Den teoretiska metanpotentialen kan även beräknas om sammansättningen av det organiska materialet är känt och allt material antas omvandlas till biogas. Här visas hur den teoretiska metanutbytet beräknas från Buswells ekvation (Angelidaki & Sanders, 2004):



om man även inkluderar kväve blir formeln (Åsa Davidsson, 2007):



I likhet med Metcalf & Eddy (2003) menar Davidsson (2007) (eller egentligen Angelidaki, 2002) att COD-innehållet i det organiska materialet kan användas till att beräkna den teoretiska metanpotentialen hos ett substrat. Davidsson menar att man kan beräkna den teoretiska metanpotentialen om man använder sig av Buswells formel som säger att metanet som bildas ges av:

$$\left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3c}{8}\right) \text{ mol CH}_4 \text{ per mol organisk substans} \quad [3.18]$$

och att syret som behövs för att oxidera den organiska substansen ges av (Davidsson, 2007):

$$\left(n + \frac{a}{4} - \frac{b}{2} - \frac{3c}{4}\right) \text{ mol O}_2 \text{ per mol organisk substans} \quad [3.19]$$

Även detta ger enligt Davidsson (2007) att metanpotentialen blir $0,35 \text{ Ndm}^3/\text{g COD}$.

3.2.2 Verklig biogaspotential

Den verkliga biogaspotentialen kommer alltid att vara mindre än den teoretiska pga.:

- o En del av det organiska materialet används för att syntetisera nya bakterier
- o Vid en bestämd uppehållstid kommer en del av det organiska materialet att förloras i utflödet. Typiskt 10 %.
- o En del av det organiska materialet är otillgängligt pga. av bindningarna eller strukturen hos materialet.

När det mesta av materialet är löst kan man vänta sig en 90-95 % -ig omvandling till biogas. Men om det mesta materialet är partikulärt omvandlas bara 30-60 % av materialet till biogas. Det bästa sättet att få reda på den verkliga biogaspotentialen är enligt Angelidaki & Sanders (2004) att utföra satsvisa utrötningar på det slam som man är intresserad av.

Den verkliga gasproduktionen mäts vanligtvis som specifik gasproduktion, vid 0°C och 1 atmosfär:

$$\text{Specifik gasproduktion (Nm}^3 \text{ gas / kg VS}_{in}) = \frac{\text{volymen gas som bildats vid 0}^\circ\text{C och 1 atm (Nm}^3\text{)}}{\text{mängd organiskt material in i röt-kammaren (kg VS}_{in})}$$

[3.20]

eller som volymetrisk gasproduktion, vid 0°C och 1 atm:

$$\text{Volymetrisk gasproduktion (Nm}^3 \text{ gas / m}^3 \text{ slam in)} = \frac{\text{volym bildad gas (Nm}^3\text{)}}{\text{röt-kammarsvolym och dygn (m}^3 \text{ slam in)}}$$

[3.21]

3.2.3 Prognos av biogasens sammansättning

Att förutspå biogasens sammansättning är svårt och beror på:

- o mängden CH₄ och CO₂ som producerats
- o pH i reaktorinnehållet
- o att det mesta av CH₄ som produceras transporteras till gasfasen medan en del av CO₂ som produceras löses i vätskefasen eller omvandlas till bikarbonat, som en funktion av pH.

Dessa punkter ger att procenthalten av CH₄ i biogasen som producerats generellt kommer att vara högre än den stökiometriska halten.

3.2.4 Potentiella problem vid estimering av metangasproduktion från avfall

Sulfatreducerande mikroorganismer och denitrifierande mikroorganismer kan utkonkurrera metanogenerna eftersom mer energi erhålls genom reduktion av sulfat och nitrat jämfört med metangenering, som beskrivits i tidigare avsnitt. Detta ger således att en hög koncentration av sulfat eller nitrat borde resultera i lägre metanpotential hos avfallet.

Sorption är en annan faktor som har betydelse för metanpotentialen. Om en förening finns i en miljö med hög sorptionskapacitet kan den bli otillgänglig för anaerob nedbrytning.

3.2.5 Metod för fastställande av den anaeroba nedbrytningen

Fastställande av den biologiska nedbrytningen, utrötningen, av slammet görs antingen genom mätning av bildningen av en eller fler produkter eller genom mätning av substratförbrukning. Produkterna som bildas kan vara antingen slutprodukter, som metan, eller mellanprodukter, som VFA. Det vanligaste är att metanbildningen mäts med en gaskromatograf, GC. Substratförbrukning kan mätas genom t.ex. VS, COD, TOC etc. (Angelidaki & Sanders, 2004). I detta examensarbete används två formler för utrötning. Den första formeln visar på nedbrytningen av organiskt material genom att mäta mängden glödförlust, VS, i slammet innan och efter rötningen:

$$\text{Utröttningsgrad 1, } VS_{\text{deg}} [\%] = \frac{g VS_{\text{in}} - g VS_{\text{ut}}}{g VS_{\text{in}}} \cdot 100\% \quad [3.22]$$

Detta sätt att mäta utröttningsgraden på är väldigt känslig för variationer i TS-halten och därmed även VS-halten. Genom att även beräkna utröttningsgraden genom att multiplicera svaret från utröttningsgrad 1 med kvoten av glödresten in/ut kan man få en uppfattning om denna utröttningsgrad är realistisk. Utröttningsgrad 2 blir exakt samma som utröttningsgrad 1 om glödresten in är samma som glödresten ut:

$$\text{Utröttningsgrad 2 } [\%] = \left(1 - \frac{GR_{\text{in}} * GF_{\text{ut}}}{GR_{\text{ut}} * GF_{\text{in}}}\right) * 100\% \quad [3.23]$$

Denna ekvation användes i försöken, men resultatet har inte en avgörande roll då volymerna slam var väldigt små och dessutom späddes ut i en större volym ymp (se avsnitt 3.3).

3.3 Beskrivning av jämförande metod och utrustning

För att undersöka hur BCS-CH₄ Biogas-utrustningen står sig mot en mer beprövad metod har ett av försöken (som beskrivs nedan) jämförts med ett försök som gjordes på JTI (Institutet för jordbruks- och miljöteknik) samtidigt med samma sammansättning av primärslam och förtjockat överskottslam taget från Henriksdal vid samma tidpunkt, vecka 4 2007.

Batch-metoden

I litteraturen (Hansen et al. 2004; Leksell 2004; Angelidaki & Ahring, 1997) beskrivs batchmetoden som att en liten andel substrat rötas tillsammans med en ymp, vanligtvis 400 ml utrötat slam (Owen et al., 1979), i en labbreaktor av glas på 1 alt. 2L med ett tjockt gummiseptum (Angelidaki och Ahring 1997). En så liten andel ymp som möjligt är att fördra så att den inte påverkar resultatet från substratet för mycket. Däremot får det inte heller vara för liten andel ymp för då finns det risk för överbelastning (Angelidaki & Sanders, 2004). Ca 2 g VS per 100 ml total lösning rekommenderas, för att undvika inhibering av VFA. Enligt Wawrzynczyk et al. (2003) är en bra uppdelning att 40 % av totala vikten av VS finns i substratet och 60 % i ympen. Ympen kan även låtas ”gasas av” vid inkuberingstemperaturen några dagar innan försöket för att minska dess påverkan på resultatet ännu lite till (Angelidaki & Sanders, 2004).

Försöken utförs i exemplar om tre; tre flaskor med ymp och substrat och tre referensflaskor med bara ymp och vatten. I flera av försöken från litteraturen används även tre uppsättningar

av en kontroll med cellulosa. Varje flaskas specifika volym uppmäts för att på så sätt räkna ut varje flaskas kvarvarande volym ovanför vätskan, så kallad "headspace". Flaskans headspace beräknas genom att subtrahera ympvolym och substratvolym från flaskans totala volym. Eftersom man bara vill mäta den gas som bildats från substratet subtraheras den volym som bildats från ympen från den totala gasvolymen.

Efter uppställning av glasflaskorna med slammet i sköljs flaskorna med en gasblandning av 80 % N₂ och 20 % CO₂ för att garantera anaerob miljö ovanför slammet. Även ren N₂-gas är möjlig att använda, men kan ge en pH-förändring i vattenfasen som resultat av bortskaffandet av CO₂.

Flaskorna placeras i en inkubator vid den temperatur som rötningen skall utföras. I denna metod används ingen omrörning av slammet.

Dagliga mätningar av gasen görs första veckan, då gasproduktionen är hög, men senare görs mätningarna mer sällan. Mätningarna består i att 0, 2 ml gasprov tas med en glasspruta med trycklock som tillåter att provuppsamlingen kan göras vid verkligt tryck i flaskan. Proven analyseras med en GC (gas chromatograph) utrustad med FID-detektor och metanstandarder i kvävgas. En linjär kalibreringskurva gjord på fem olika metanstandarder (0 - 100 % CH₄) används för kalibrering.

Försöken utförs under 30-50 dagar för att allt partikulärt material ska hinna lösa sig. Litteraturen visar att 80-90 % av metanpotentialen producerades under de första 8-10 dagarna. Metanpotentialen mäts i STP (standard temperature and pressure) Ndm³/g VS enligt formeln:

$$X_{STP} = X_m \cdot \frac{T_{standard} \cdot P_m}{T_m \cdot P_{standard}} \quad [3.24]$$

STP: Standar temperature and pressure – 0°C och 1 atmosfär

X_{STP} = producerad metan per gram VS vid STP som funktion av tiden

T_m = verklig temperatur

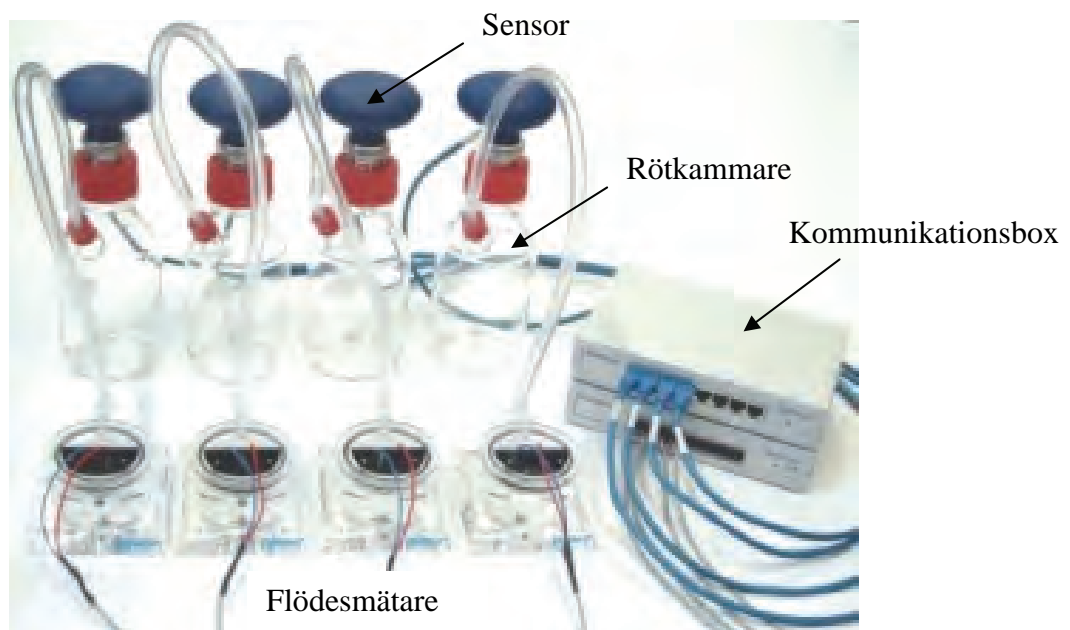
P_m = verkligt tryck

X_m = metan som bildats vid T_m och P_m.

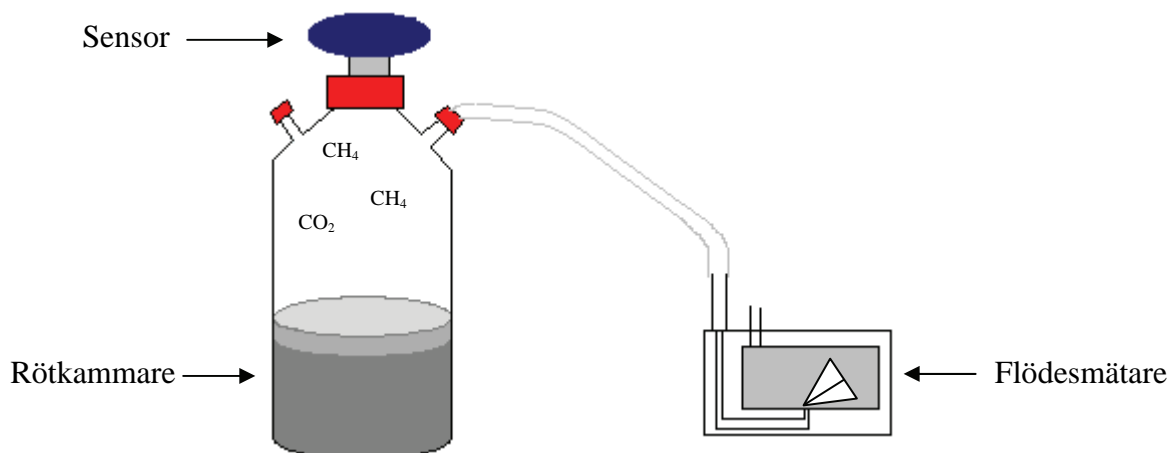
4 UTRUSTNING OCH MÄTMETODER

Som beskrivits i kapitel 3 finns det redan utformade metoder för att mäta metangaspotentialen hos organiska substrat, men syftet med detta examensarbete var att undersöka om en nyinköpt laborationsutrustning kan göra det lika bra eller bättre, men framförallt enklare. I detta kapitel beskrivs hur utrustningen är uppbyggd och hur den fungerar rent tekniskt. I avsnitt 4.2 beskrivs även hur man skall gå till väga för räkna ut metangaspotentialen med hjälp av denna utrustning.

4.1 BCS-CH₄ biogas – Laborationsutrustning



Figur 4.1: Den inköpta apparaturen bestående av 4 reaktorer med sensorer, flödesmätare och de två kommunikationsboxarna BACCom och BACCom BC.

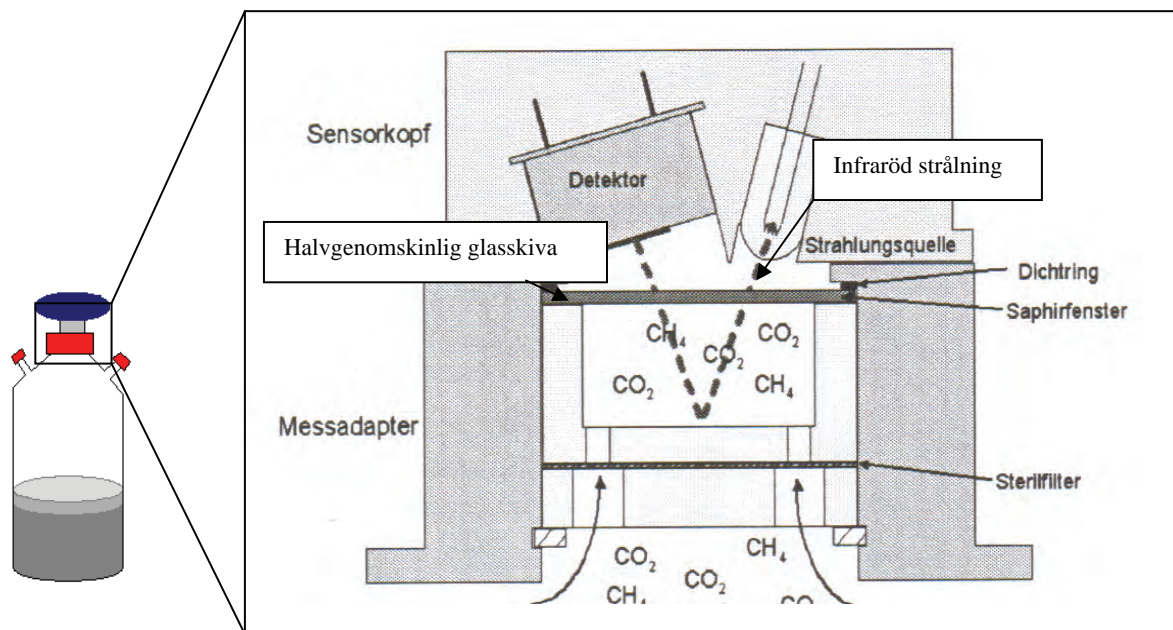


Figur 4.2: Schematisk bild över den inköpta apparaturen bestående av reaktor, sensor och flödesmätare.

Apparaturen som har utvärderats i detta examensarbete och också har använts för att bestämma metanpotentialen hos olika slam är inköpt från företaget Blue Sens i Tyskland och består av fyra stycken 1-liters glasflaskor som ska simulera rötchammare, se figur 4.1 och 4.2. Till varje glasflaska hör en sensor (vilken skruvas på som ett lock) som mäter metanets partialtryck, och en flödesmätare som är kopplad till flaskan med en lufttät PVC-slang. Flödesmätaren mäter hela tiden volymen gas som puttrar ut ur flaskan. Volymen som mäts är hela gasvolymen som har bildats, varför volymen metan som bildats får räknas ut med hjälp av andelen metan som mäts i flaskan av sensorn (för ekvationer se avsnitt 4.2). Sensorn och flödesmätaren är båda kopplade till två kommunikationsboxar, BACCom och BACCom CB. Kommunikationsboxarna är i sin tur kopplade till en dator som plottar kurvor för metanhalten, i flaskorna, respektive ackumulerad gas ut genom flödesmätaren (se instruktionshäfte för MilliGascounter), med ett av användaren förutbestämt intervall (dock minst var 10e sekund och högst var 120e minut).

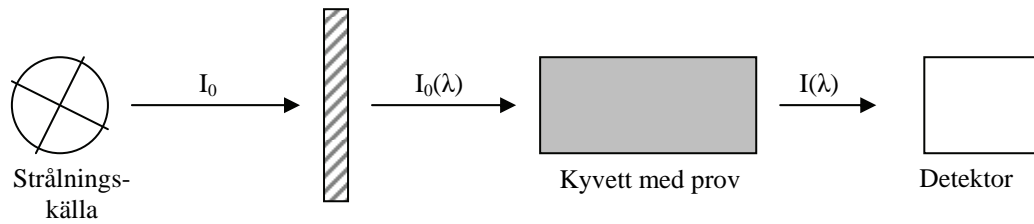
4.1.1 Sensorn

Sensorns funktion består i att infraröd strålning sänds ut högst upp i sensorn och reflekteras i botten på mätninglocket så att detektorn kan mäta minskningen i intensitet, vilken beror av mängden gas (figur 4.3). En halvgenomskinlig glasskiva hindrar gasen i locket att försvinna ut. För att skydda sensorn från kondenserande fukt värms den upp. Detta tar ca en timme och därför bör försöket inte startas innan.



Figur 4.3: Tekniken inuti sensorhuvudet

Principen man använder vid infraröd absorption är att många gaser absorberar strålning vid en viss våglängd och omvandlar den till rotations- eller oscillationsenergi. Om man kan mäta denna våglängd blir mätmetoden selektiv. En vanlig uppsättning för mätning av gaskoncentrationen i ett prov visas i figur 4.4. I_0 är den utsända strålningen, $I_0(\lambda)$ anger den våglängdsselektiva strålningen och $I(\lambda)$ är strålningsminskningen som resultat av gasens absorption av strålning.



Figur 4.4: Principen för infraröd absorption

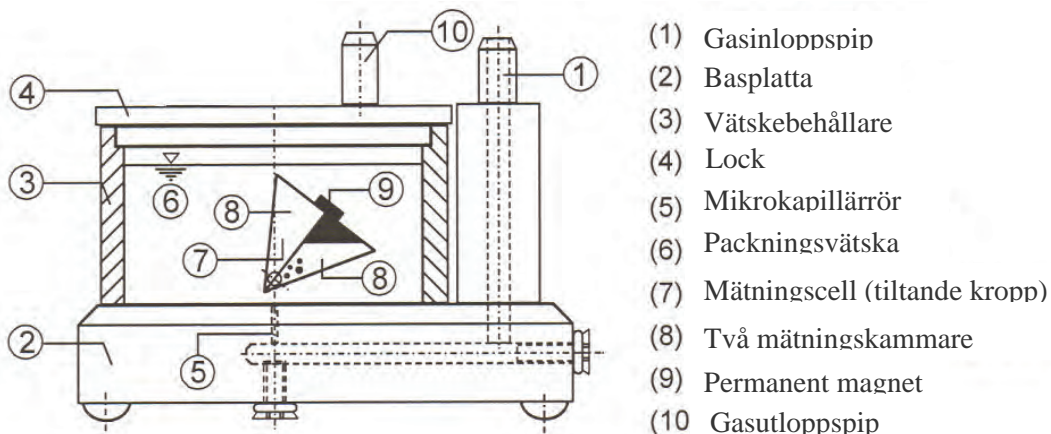
Gasmolekylernas absorption av strålning beskrivs av Lambert-Beersches lag:

$$\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \exp(-a(\lambda) \cdot c \cdot l) \quad [4.1]$$

där: $I(\lambda)$ som ovan är den kvarvarande strålningen av en viss våglängd
 I_0 som ovan är den utsända mängden av strålningen av en viss våglängd
 a är absorptionskoefficienten hos gasen vid en viss våglängd
 c är gaskoncentrationen
 l är längden på ljusets väg

4.1.2 Flödesmätaren

Flödesmätaren är uppbyggd enligt figur 4.5, med ett inlopp kopplat till reaktorn. Från inloppet trycks gasen upp i en mätningcell som är omgiven av en silox-vätska. Mätningen av gasen sker genom räkning av antalet "tiltningar" som mätningcellkroppen gör, med hjälp av en magnet. Bara en i taget av mätningkammarna kan vara öppna för insläpp av gas. När den ena kammaren är full vippar den över så att nästa kammare kan fyllas med gas. Varje kammare rymmer 1 ml vilket ger att varje tiltning räknas som 1 ml bildad gas (varje flödesmätare är individuellt kalibrerade med avseende på sin specifika volym).



Figur 4.5: Teknisk beskrivning av flödesmätaren

4.2 Beräkning av metangasproduktionen

I början av mätningen av bio- och metangasproduktionen, med hjälp av ”BSC-CH₄ biogas” utrustningen, finns en fri volym på minst 500 ml (vilket instruktionerna rekommenderar). Detta betyder att den gas som bildas till en början blir väldigt utspädd och att halten metan som mäts av sensorn inte visar på halten metan i den nyss bildade gasen utan visar på halten metan i hela den fria volymen. I bilaga 1 finns ett förslag på beräkningsgång för att beräkna hur mycket metan som faktiskt har bildats för varje mängd total gas (biogas) som bildats. Med hjälp av den beräkningsgången kan man sedan beräkna hur mycket metangas som bildats totalt och därmed även hur många procent av biogasen, vid varje mätningstillfälle, som är metan.

5. KARTLÄGGNING AV RÖTNINGEN PÅ HENRIKSDAL OCH BROMMA UNDER 2006

En kartläggning över rötningen på Henriksdals och Bromma reningsverk har gjorts, inom ramen för detta examensarbete, för år 2006. Detta för att ha ett underlag av analysresultat och beräkningar att jämföra laborationsförsöken med (se kapitel 6 och 7). Värdena för kartläggningarna har hämtats ur databasen WASTE på Stockholm Vatten VA AB.

5.1 Parametrar för kartläggning av röt-kammardriften

De undersökta parametrarna visas i tabell 5.1. Från dessa värden i WASTE har sedan organisk belastning, uppehållstid, gasproduktion och reduktion av organiskt material beräknats. Grafer över parametrar ur WASTE samt över de beräknade parametrarna finns i bilaga 2.

Värden från WASTE	
Primärslam	% TS, % GR (% av TS), Flöde till röt-kammarna (m ³ /dygn)
Överskottslam	% TS, % GR (% av TS), Flöde till röt-kammarna (m ³ /dygn)
Fettslam	Flöde till röt-kammarna (m ³ /dygn)
Röt-kammare 1-7	% TS, % GR (% av TS), Gasproduktion (Nm ³ /dygn), pH, temperatur (°C), metanhalt i gasen (% av gasprod.)
Slam efter slamtank	% TS, % GR (% av TS),

Tabell 5.1: Dessa parametrar från databasen WASTE har undersökts för att kunna göra en kartläggning av rötningen i Henriksdal under 2006.

I tabell 5.2 visas parametrar som har hämtats från databasen WASTE för en kartläggning av rötningen på Bromma under 2006. Resultaten av denna kartläggning finns i avsnitt 5.2 och grafer över resultaten finns i bilaga 3.

Värden från WASTE	
Primärslam	% TS _p , % GR _p (% av TS), Flöde till röt-kammarna 1,2,4-6 (m ³ /dygn)
Överskottslam	% TS _ö , % GR _ö (% av TS), Flöde till röt-kammare 3 (m ³ /dygn)
Röt-kammare 1,2 och 4-6	% TS, % GR (% av TS), Gasproduktion (Nm ³ /dygn), pH, temperatur (°C)
Röt-kammare 3	% TS, % GR (% av TS), Gasproduktion (Nm ³ /dygn), pH, temperatur (°C)
Avvattnat slam (primär- + överkottsslam)	% GR (% av TS)

Tabell 5.2: Dessa parametrar har undersökts i databasen WASTE för att kunna göra en kartläggning över rötningen i Bromma under år 2006.

5.2 Resultat från kartläggning av rötkammardriften på Henriksdal och Bromma

Beräknat från värden hämtade ur WASTE, för år 2006				
	HENRIKSDAL RK 1-7: <i>Primär-, överskott- och fettslam</i>	BROMMA RK 1,2,3-6 <i>primärslam</i>	RK 3: <i>Överskott- slam</i>	RK 1-6: <i>Primär- och överskott- slam</i>
Organiskbelastning (kg VS _{in} /m ³ reaktor,d)	1,48 (<i>inklusive fett</i>) ⁽¹⁾	1,5 (RK 1,2)	2,06	
	1,29 (<i>exklusive fett</i>) ⁽²⁾	1,2 (RK4-6)		
Organiskt material till rötning (ton VS _{in} /dygn)	50,47	12,15	5,04	17,19
Upphållstid (d)	18,98	21,1 (RK 1,2)	13,2	
		26,4 (RK4-6)		
Gasproduktion (Nm ³ /dygn)	26410 (<i>inklusive fett</i>) ⁽¹⁾	6929	1922	8851
	23770 (<i>exklusive fett</i>) ⁽²⁾			
Metnhalt (%CH ₄)	65,7	65 ⁽³⁾	65 ⁽³⁾	65 ⁽³⁾
Specifik gasproduktion (Nm ³ /kg VS _{in} , d)	0,46 (<i>inklusive fett</i>) ⁽¹⁾	0,57	0,38	0,51
	0,47 (<i>exklusive fett</i>) ⁽²⁾			
Specifik gasproduktion, metan (Nm ³ /kg VS _{in} , d)	0,30 (<i>inklusive fett</i>) ⁽¹⁾	0,37 ⁽³⁾	0,25 ⁽³⁾	0,33 ⁽³⁾
	0,31 (<i>exklusive fett</i>) ⁽²⁾			
Volymetrisk gasproduktion (Nm ³ /m ³ slam _{in} ,d)	13,5 (<i>inklusive fett</i>) ⁽¹⁾	18,31	10,16	15,59
	12,6 (<i>exklusive fett</i>) ⁽²⁾			
Volymetrisk gasproduktion, metan (Nm ³ /m ³ slam _{in} ,d)	8,9 (<i>inklusive fett</i>) ⁽¹⁾	11,9 ⁽³⁾	6,6 ⁽³⁾	10,1 ⁽³⁾
	8,3 (<i>exklusive fett</i>) ⁽²⁾			
Utröttningsgrad 1, VS_{red} (%)	49,6 (<i>inklusive fett</i>) ⁽¹⁾	46,6	31,2	43,5
Utröttningsgrad 2, m.a.p VS_{red} och GR (%)	48,7 (<i>inklusive fett</i>) ⁽²⁾	51,6	36,2	50,7

Tabell 5.3: Parametrar beräknade ur WASTE. Alla värden är dygnsmedelvärden under år 2006. Flera av parametrarna visas som grafer i bilaga 2 och 3. Där det står exklusive fett betyder det att organiskt material eller gasproduktion från fettslammet har räknats bort. Förkortningen RK står för rökammare.

⁽¹⁾Inklusive fett beskriver gasproduktionen som den totala gasproduktionen per VS_{intot} där VS_{intot} = VS_{primärslam} + VS_{förtj. överskottslam} + VS_{fettslam}. Fettslammet antas ha en TS-halt på 9,9 % och att VS är 95 % av TS (Vallin, 2007)

⁽²⁾Exklusive fettslam beskriver gasproduktionen som gasproduktion av enbart primär och förtjockat överskottslam. Detta visas genom att anta att gasproduktionen från fettslammet är 10 % av den totala gasproduktionen. Gasproduktionen är 90 % av den totala gasproduktionen per VS_{in} = VS_{primärslam} + VS_{förtj. överskottslam}

⁽³⁾Ingen officiell mätning av metanhalten i Bromma. Metanhalten satt till 65 % för uträkningarna i denna tabell.

Resultaten från kartläggningen av rötkammardriften på Henriksdal och Bromma, under 2006, visas i tabell 5.3. Här redovisas dygnsmedelvärden över viktiga parametrar för respektive rötkammardrift.

I Henriksdal rötas primärslam, överskottslam och fettslam tillsammans. Till beräkningarna kallat "exklusive fett" har ett antagandet att fettslammet bidrar med 10 % av den producerade gasvolymen (muntlig, Michael Medoc) använts. Specifika gasproduktionen för enbart primärslam plus överskottsslam har alltså beräknats på 90 % av den totala gasproduktionen för 2006. För att kunna beräkna den specifika gasproduktionen "inklusive fett" har ett antagande använts som säger att TS för fettslam är ca 9,9 % och VS är ca 95 % av TS (Vallin m.fl, 2007). Några av parametrarna för Henriksdal, i tabell 5.3, kan jämföras med arbetsrapporten Vallin m.fl (2007) där en kartläggning är gjord för Henriksdal under åren 2000 till 2005. Rötkammarna i Henriksdal är sju stycken med en total volym på 39 000 m³. Rökammare 2 användes inte under en stor del av år 2006, vilket har tagits hänsyn till vid beräkningarna i tabell 5.3.

Rötningsprocessen i Bromma skiljer sig från Henriksdal på det sättet att de inte rötar något extra slam, utöver primärslam och överskottslam, samt att de behandlar dessa två slam för sig. Som nämnts tidigare har Bromma sex rökammare varav fyra stycken har en volym på ca 2500 m³ vardera och de andra två är på ca 1000 m³ vardera. Överskottsslammet behandlas separat i en av de större rökammarna och vanligtvis i rökammare 3. På grund av detta har kartläggningen av Bromma delats upp i tre delar med avseende på primärslammet, överskottsslammet respektive det totala slammet.

Resultaten från kartläggningen för Henriksdal och Bromma redovisas även som grafer i bilaga 2 respektive 3.

6. UTFÖRANDE

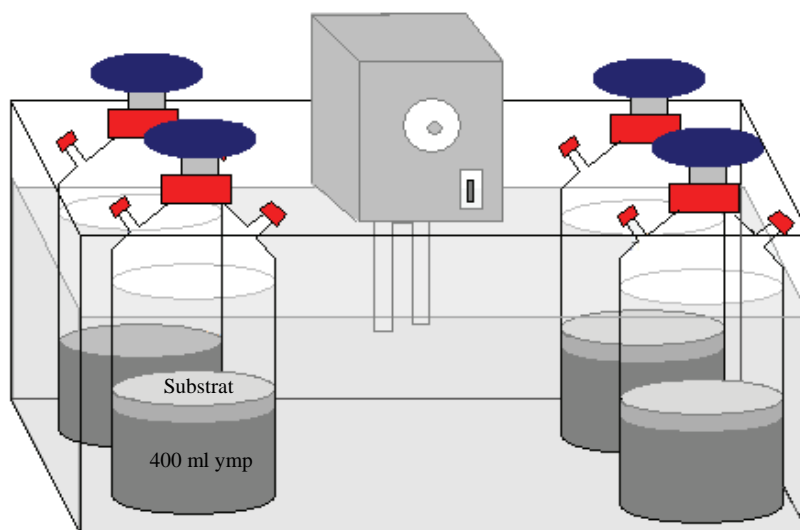
Då första frågeställningen var att utvärdera den nya utrustningen, BCS-CH₄ biogas, och mäta metanpotentialen i slammet blev valet att göra detta som satsvis utrötning i minst 30 dagar. Fyra stycken glasflaskor à 1 liter, med två utgångar, användes som röt-kammare.

6.1 Metangaspotential vid mesofil batch-rötning

För att ha möjlighet att utvärdera och jämföra BCS-CH₄ utrustningen och metoden med andra mättekniker och utföranden utgick metodutvecklingen i detta examensarbete från batchmetoden i Hansen et al. 2004, Leksell 2004, Angelidaki & Ahring, 1997. I likhet med nämnda referenser tillsattes, i alla försök med substrattillsats, 400 ml ymp till glasflaskorna. Ympen togs från röt-kammare 5 på Henriksdal. Precis som i batchmetoden användes principen att ca 40 % av VS ska vara från substratet och ca 60 % av VS från ympen. Ympen gasades av innan försöken startades för att dess gasproduktion skulle störa resultaten från substratets gasproduktion så lite som möjligt. Då det bara fanns tillgång till fyra flaskor användes endast en av dem som referens (enbart ymp och vatten) och resterande tre till utrötning av substratet. Detta för att erhålla så tillförlitliga resultat som möjligt och för möjligheten att undersöka hur väl flödesmätningen och mätningen av metanhalt hos den producerade gasen överensstämde mellan de tre flaskorna.

Flaskorna placerades i ett vattenbad, se figur 5.1, för att temperaturen skulle hållas så jämn som möjligt. Temperaturen som valdes var 36°C, detta för att rötningen skulle ske vid liknande temperatur som hos Henriksdalsprocessen, som hålls vid 35-37°C. Till skillnad från jämförelsemetoden användes i detta examensarbete omrörning i flaskorna. Omrörningen skedde genom magnetomrörare.

Försöken utfördes i regel under 35 dagar.



Figur 6.1: Försöksuppläggning för mätning av biogas- och metangaspotentialen hos ett substrat. En referensflaska med 400 ml ymp och tre flaskor med 400ml ymp plus substratet. Utöver det som syns i figuren är varje flaska kopplad till en flödesmätare som i sin tur, precis som sensorerna, är kopplade till en dator som plottar kurvor på metanhalter och ackumulerad biogasproduktion för varje flaska för sig.

6.1.1 Analyser

Analyser på de olika slammen utfördes för att karakterisera slammet och för att ta reda på hur mycket slam flaskorna skulle laddas med samt för att kunna beräkna teoretisk metanproduktion och utbyte.

En del analyser skickades iväg för analys till Stockholm Vattens laboratorium på Torsgatan och en del analyser utfördes på plats med Dr. Langes analyser (spektrofotometrisk metod). I tabell 6.1 och 6.2 redovisas de olika analyserna.

Analyser på Torsgatan		
<i>Analys</i>	<i>Enhet</i>	<i>Standard</i>
Torrsubstans	% TS	SS028113-1
Glödningsrest	% av TS GR	SS028113-1
COD	mg/L CODcr	SS028142-2
TOC	mg/L C	SS-EN 1484-1
pH	pH	SS028122-2
Kjeldahlkväve	mg/L N	AN300/ASN350
Ammoniumkväve	mg/L NH ₄ -N	AN 30/87

Tabell 6.1: Enheter och standarder för de analyser som gjorts på Stockholm Vattens laboratorium på Torsgatan.

Dr. Lange			
<i>Analys</i>	<i>Metod</i>	<i>Mätområde</i>	<i>Artikelnr.</i>
COD	Kromsvavelsyra	100-2000 mg/L	LCK 514
		1000-10000 mg/L	LCK 014
Organiska fettsyror, VFA	Esterfiering	50-2500 mg/L	LCK 365
Ammonium	Indofenolblått	2-47 mg/L NH ₄ -N	LCK 303
		47-130 mg/L NH ₄ -N	LCK 302

Tabell 6.2: Dessa Dr. Lange snabbanalyser har gjorts som ett komplement till analyserna på Torsgatan.

Torrsubstans och glödningsrest är de analyser som används direkt för att beräkna mängden organisk material i form av VS (= 100 % - % GR) som reaktorerna laddas med.

För att kunna beräkna den teoretiska metangasproduktionen använder man sig av mängden COD_{tot} i materialet som skall rötas. Som visades i avsnitt 3.2.1 fås den teoretiska metangasproduktionen genom att multiplicera mängden COD i slammet med 0,35. Genom att mäta mängden COD som finns kvar vid avslutandet av ett försök erhålls information om hur

mycket mer gas som teoretiskt kan bildas och om den producerade gasmängden stämmer överens med mängden nedbrutet organiskt material.

TOC analyserades för att karakterisera vad den totala mängden organiskt kol var i slammen samt att se vad kvoten COD/TOC visade sig vara.

Kjeldhlkväve analyserades för att beräkna kvoten C/N, genom COD/Kj-N och TOC/Kj-N.

Ammonium och VFA analyserades för att försäkra sig om att reaktorn inte har blivit överbelastad och att rötningen har skett under bra förhållanden utan VFA- eller ammoniumförgiftning. Dessa analyser är viktigare vid en kontinuerlig process då man kan följa utvecklingen genom att analysera prover från det utgående slammet.

I bilaga 7 och 8 visas resultaten från alla analyser som gjorts på de olika slammen innan och efter försöken. Typiska värden för de slam som användes i försöken har samlats i tabell 6.3.

Analys: slam in	TS_{in} (% av våtvikt)	VS_{in} (% av våtvikt)	COD (mg/L)	pH
Beskickningsslam	2,7	1,56	-	7,7
Ymp (R5)	2,6	1,39/1,5	20000	7,3/7,7
Primärslam	4,5	3,33	54000	6,1
Förtjockat överskottslam	5,4	3,45	50000	6,7
Röttslam, Bromma	3,2	1,8	19000	7,3

Tabell 6.3: Karakterisering av de olika slamtyper som användes, inför uppstart av försöken.

6.1.2 Testförsök i 13 dagar

Ett testförsök gjordes under 13 dagar för att se hur alla olika delar av utrustningen reagerade. Då allting såg ut att fungera som det skulle avbröts detta försök och förberedelser för de ”riktiga” försöken startades.

6.1.3 Metanpotentialen hos beskickningsslammet

För att kunna jämföra resultaten från laborationsförsöken med Henriksdalsprocessen bestämdes att den första rötningssomgången skulle köras på det slam som beskickas till röt-kammarna. Detta slam består av en blandning av primärslam, förtjockat överskottslam och fettslam av olika slag.

Ympen togs från röt-kammare 5 på Henriksdals reningsverk. Till tre av flaskorna tillsattes även 200 ml beskickningsslam. Den fjärde flaskan, som innehöll 400 ml ymp och 200 ml kranvatten, användes som referens för att se hur mycket biogas respektive ren metan som bildas enbart från ympen. Den organiska belastningen var 3,12 g för substratet och totalt 1,52 g per 100 ml slamvolym.

6.1.4 Biogas-/metanpotentialen hos blandning av primär- och överskottslam

Inför försök 2 bestämdes att sammansättningen av substratet skulle vara lite mer kontrollerad, för att få ett representativt prov, än att bara ta den blandning av beskickningsslam som var för dagen. Primärslam och förtjockat överskottslam samlades således upp en gång om dagen under en arbetsveckas tid (måndag till fredag) och blandades sedan med avseende på genomsnittlig sammansättning i Henriksdal under år 2006. Denna sammansättning var, med

avseende på TS, 68,5 % primärslam, 22,2 % förtjockat överskottslam och 9,3 % fettslam. Då typen av fettslam varierar väldigt mycket från dag till dag bestämdes att bara en blandning av primär- och förtjockat överskottslam skulle rötas. Denna blandning beräknades då till 75,5 % primärslam och 24,5 % förtjockat överskottslam, med avseende på TS, efter bidraget av fettslam dragits av. Precis som i förra försöket tillsattes 400 ml avgasad ymp från röt-kammare 5 till alla fyra flaskorna. Till tre av flaskorna tillsattes ca 99 ml primärslam och ca 28 ml förtjockat överskottslam, som tillsammans gav en VS belastning på ca 4,2 g (tabell 5.4). Referensflaskan fylldes, förutom ympen, upp med 128 ml vatten. Den organiska belastningen från ympen var ca 5,6 g VS. Detta ger att den organiska belastningen på ymp/substratblandningen var ca 1,85 g VS/100 ml slam. Efter 35 dagar avslutades försöket.

Beräkningar: slam in	Primärslam + Förtj. överskottslam	Ymp (R5)
Total VS _{in} per substratvolym (g)	4,18-4,25	5,55
Teoretisk metanproduktion (Ndm ³)	2,32-2,35	2,8
Teoretisk metanproduktion (Ndm ³ /gVS _{in})	0,55-0,56	0,50
COD/TOC	4,84	4,65
COD/N	26,4	11,8
TOC/N	5,45	2,5

Tabell 6.4: Beräkningar från analyser på en blandning av primär- och överskottslam som röts ut i "Försök 2".

6.1.5 Jämförelse med försök på JTI

Samtidigt som försök 2 genomfördes med utrustningen "BCS-CH₄ biogas" genomfördes ett försök på JTI (Institutet för jordbruks- och miljöteknik) i Ulltuna med samma blandning av primär- och förtjockat överskottslam från Henriksdal. Slammen som användes i de båda körningarna samlades in av samma personer under samma tidsperiod, vecka 4 2007. Metoden som används på JTI är den jämförande batchmetoden (Hansen et al., 2004), som beskrivs i avsnitt 3.3. TS och VS samt pH analyser genomförda på JTI på de olika slammen redovisas i tabell 6.5.

Analys: slam in	Primärslam	Förtj. överskottslam	Ymp
TS _{in} (% av våtvikt)	4,85	4,50	2,62
VS _{in} (% av våtvikt)	3,22	3,11	1,43
pH (blandningen)	6,55		7,32

Tabell 6.5: Analyser på blandningen av primär- och överskottslam som användes i försöket på JTI.

6.1.6 Biogas- och metangaspotentialen hos rötslam från Bromma reningsverk

På uppdrag av Bromma reningsverk, som är en del av Stockholm Vatten AB, avslutades den praktiska delen av detta examensarbete med att undersöka biogas- och metangaspotentialen hos rötslam från röt-kammare 2 på Bromma reningsverk. Syftet var att ta reda på hur mycket det är möjligt att röta vidare det "utrötade" slammet. Det slamprov som togs den 5 mars 2007 hade en uppehållstid på ca 21,6 dagar (medelvärde på de 24 timmar som var innan provet togs, medel under 2006 var 21,1 dagar), se tabell 6.6. Som nämnts tidigare rötas primär- och

överskottslam separat på Bromma och i detta försök användes rötslam från primärslamsrötningen. Beräkningar gjorda från analyser på rötslammet redovisas i tabell 6.6.

Beräknat: slam in, 2007-03-05	Rötslam röt-kammare 2
Total VS _{in} per reaktor (g)	11,04
Teoretisk metanproduktion (NmL)	5670
Teoretisk metanproduktion (Nm ³ /g VS _{in})	10,66
COD/TOC	5,76
COD/N (Kj-N)	9,5
TOC/N (Kj-N)	1,65

Tabell 6.6: Beräkningar från analyser på rötslam från Bromma.

Tre flaskor fylldes med 600 ml rötslam. För att undersöka vad det blir för skillnad i gasproduktion med eller utan omrörning användes omrörning på två av flaskorna men inte på den tredje.

På grund av tidsbrist avslutades detta försök efter 14 dagar.

7 RESULTAT

I detta avsnitt redovisas resultaten från de tre laborationsförsöken som beskrevs i kapitel 6. Resonemang och kommentarer kring resultaten samt slutsatser framförs i avsnitt 8 respektive 9.

7.1 Försök 1: Beskickningsslam

Försök 1: Beräkningar på slam efter försök	Substrat
Total VS _{ut} från substratet (g)	2,0
Biogasproduktion (NmL)	536
Metangasproduktion (NmL)	360
Slutlig metanhalt, beräknad (Vol. %)	66,4
Specifik gasproduktion (Nm ³ biogas/kg VS _{in})	0,059
Specifik metanproduktion (Nm ³ metan/kg VS _{in})	0,040
Volymetrisk gasproduktion (Nm ³ biogas/m ³ slam _{in})	2,68
Volymetrisk metanproduktion (Nm ³ metan/m ³ slam _{in})	1,80
Metanprod per VS _{deg} (Nm ³ CH ₄ /kg VS _{deg})	0,32
Utröttningsgrad VS _{deg} (%)	36,8
Utröttningsgrad 2 (%)	34,1
Utbyte CH ₄ (bildad/teoretisk) %	27,8
COD/TOC	7,1
COD/N (Kj-N)	11,3
TOC/N (Kj-N)	1,6

*Tabell 7.1: Beräknade värden för försök 1, från analyser på beskicknings-
slam. Alla värden är medelvärden. Detta försök har inte bidragit till någon
resultatdiskussion då fel slam användes.*

Försök 1 avslutades efter 35 dagar, men redan efter 28 dagar stod det klart att det var någonting som inte stämde med försöket. Den specifika gasproduktionen var ca 0,06 Nm³ biogas/kg VS_{in} respektive 0,04 Nm³ CH₄/kg VS_{in}, vilket bara är drygt 10 % av vad ett genomsnittligt slam från avloppsreningsverk borde producera. Efter en undersökning av ledningarna som leder slammet till röt-kammarna i Henriksdalsverket visade det sig att vid den delen av ledningen, in till röt-kammaren, som slammet tagits från hade beskickningsslammet redan blandats med returslam från röt-kammaren. Det beslutades därför att försöket skulle göras om, eftersom försöket på beskickningsslam skulle stå som grund för fortsatta försök. För resultat av detta försök i form av grafer se bilaga 4.

7.2 Överrensstämmelse mellan ”Försök 2” och Henriksdalprocessen

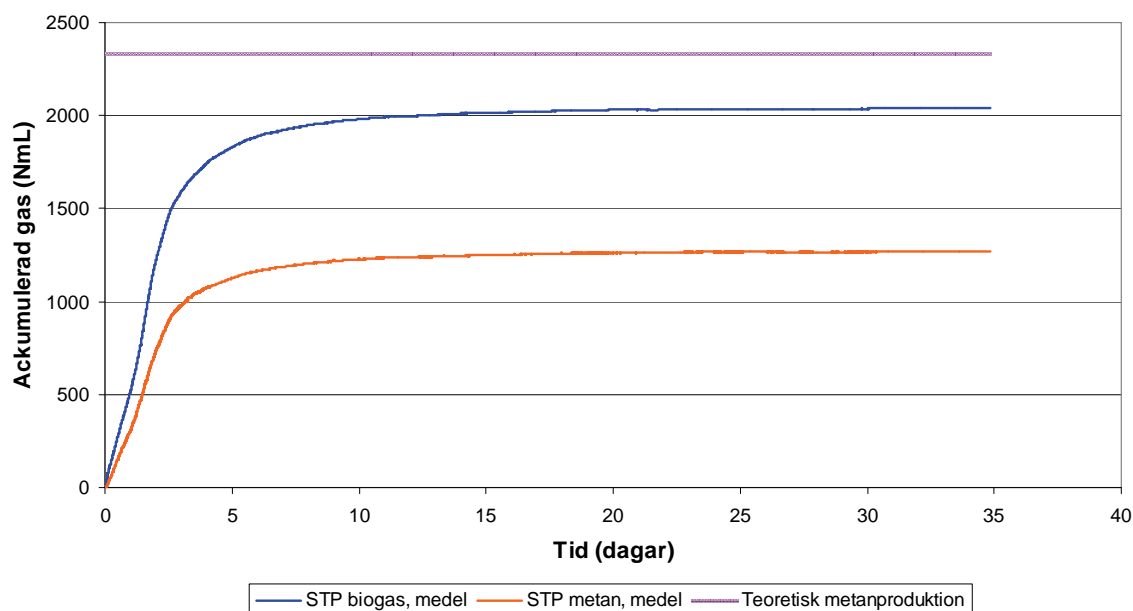
Då ”Försök 1” rötades med fel sorts slam gjordes ett nytt försök att röta beskicknings slam under mer kontrollerade förhållanden med bara primär- och överskottslam, som beskrevs i avsnitt 6.1.4.

Försök 2: Beräkningar från analyser på slam ut	Substrat
Teoretisk metangasproduktion (NmL)	2334,8
Total VS _{ut} per substratet (g)	1,49
Biogasproduktion (NmL)	2042
Metangasproduktion (NmL)	1272
Slutlig metanhalt, beräknad (Vol %)	63,5
Specifik gasproduktion (Nm ³ biogas/kg VS _{in})	0,49
Specifik gasproduktion (Nm ³ metan/kg VS _{in})	0,30
Volymetrisk gasproduktion (Nm ³ biogas/m ³ slam _{in})	16,26
Volymetrisk gasproduktion (Nm ³ metan/m ³ slam _{in})	10,13
Metanprod per VS _{deg} (Nm ³ CH ₄ /kg VS _{deg})	0,47
Metanprod per COD _{deg} (Nm ³ CH ₄ /kg COD _{deg})	0,27
Utröttningsgrad 1, VS _{deg} (%)	64,5
Utröttningsgrad 2 (%)	70,9
Utbyte CH ₄ , bildad/teoretisk (%)	54,5
COD/TOC	5,71
COD/N (Kj-N)	16
TOC/N (Kj-N)	2,8

Tabell 7.2: Beräknade värden över försök 2 från analysvärden på Blandningen av primär- och överskottslam. Alla värden är medelvärden.

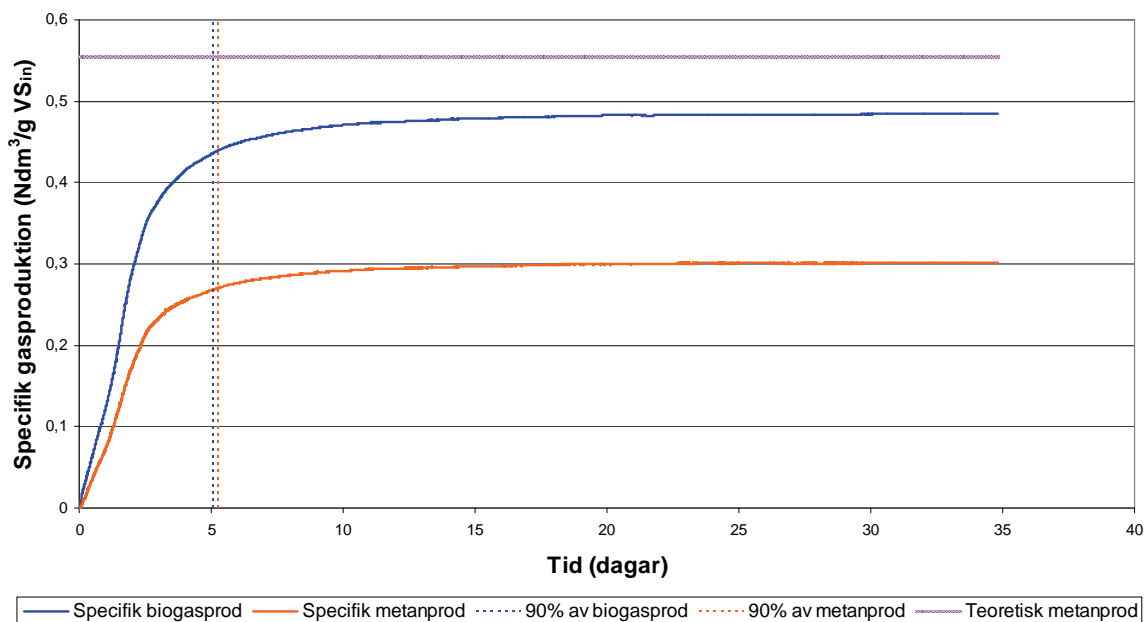
Den specifika gas- och metangasproduktionen var, när försöket avslutades efter 35 dagar, 0,47-0,50 Ndm³/g VS_{in} respektive 0,31-0,32 Ndm³ CH₄/g VS_{in} (tabell 7.2), med en metanhalt på ca 63,5 Vol. %. Metanproduktionen var ca 54 % av den teoretiskt möjliga och utröttningsgraden blev ca 64,5 % med avseende på nedbrutet organiskt material som VS och 70,9 % om man även tar hänsyn till glödrestvariationen in och ut. Resultaten som har beräknats fram med hjälp av analyser, värden från försöket och beräkningsgången för metanproduktionen (bilaga 1) visas i tabell 7.2 och delvis i figur 7.1 - 7.3 (resterande grafer redovisas i bilaga 4).

Försök 2: Biogas- o metanproduktion



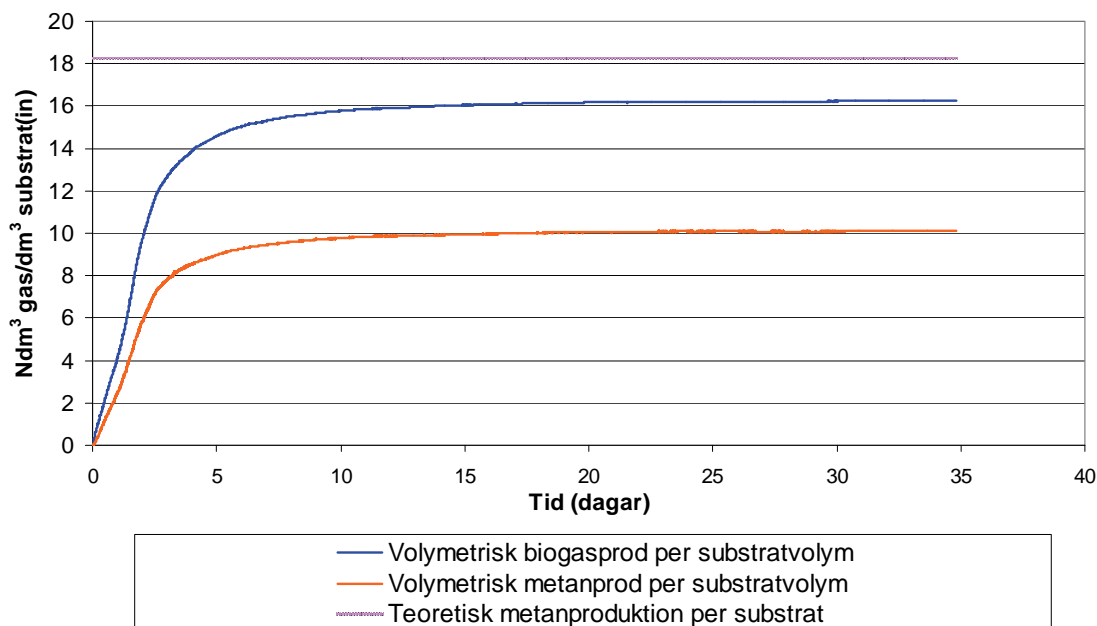
Figur 7.1: Den ackumulerade gasproduktionen från satsvis utrötning av en blandning av primär- och överskottslam från Henriksdal. Det organiska materialet i blandningen var ca 4,2 g.

Försök 2: Specifik gasproduktion



Figur 7.2: Ackumulerad biogas- och metanproduktion per organiskt material i form av VS i primär- och överskottsblandningen.

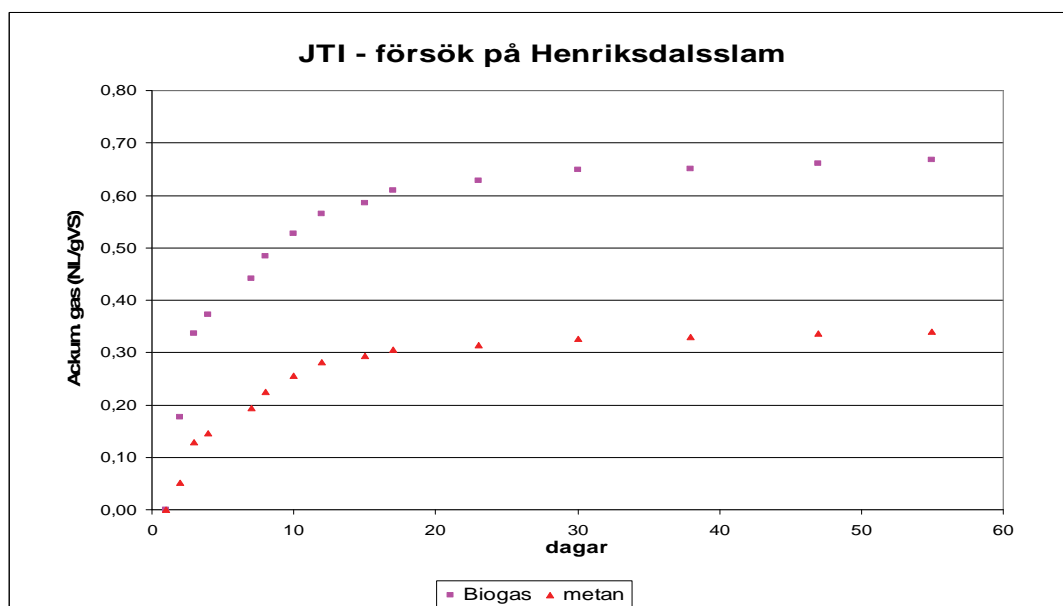
Försök 2: Volymetrisk gasprod per substratvolym



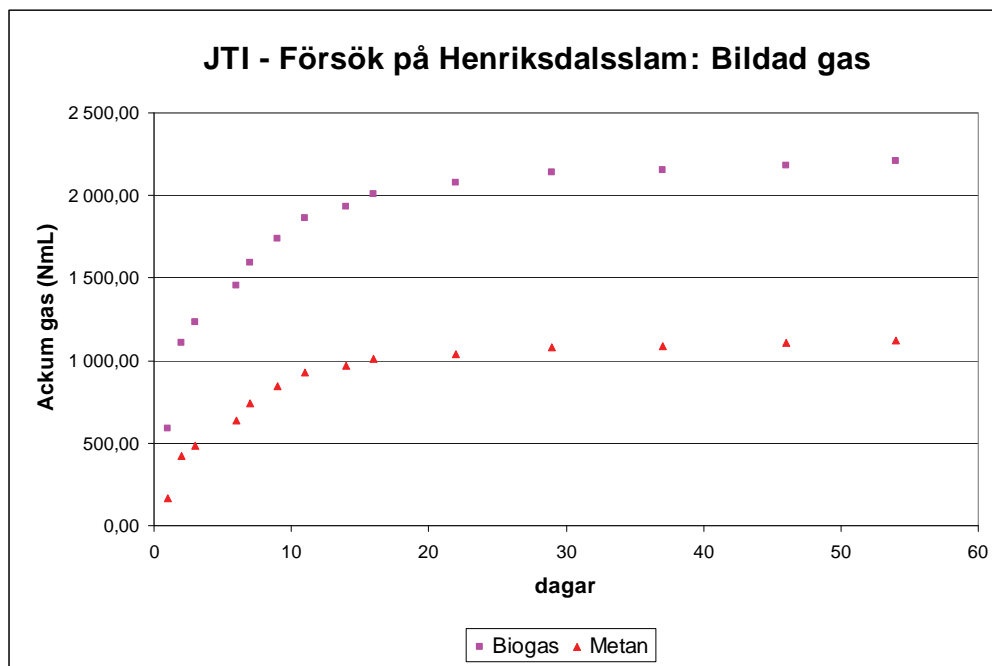
Figur 7.3: Ackumulerad gasproduktion per volym substrat in i reaktorn.

7.3 Överrensstämmelse mellan ”Försök 2” och försök på JTI

Det jämförande försöket som gjordes på JTI samtidigt som försök 2, kördes i 55 dagar. Efter 31 dagar var den specifika biogaspotentialen ca $0,65 \text{ Nm}^3$ biogas/kg VS_{in} och den specifika metangaspotentialen var ca $0,33 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4$ /kg VS_{in} . När försöket avslutades efter 55 dagar hade gasproduktionen ökat till $0,67 \text{ Nm}^3$ biogas/kg VS_{in} och $0,34 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4$ /kg VS_{in} . Den slutliga metanhalten var ca 68 % i substrat/ymp-blandningen och ca 71 % i ympen.



Figur 7.4: Ackumulerad gas från blandningen av primär- och överskottsslam per organiskt material i blandningen.



Figur 7.5: Bildad gas från blandningen av primär- och överskottsslam i försöket på JTI.

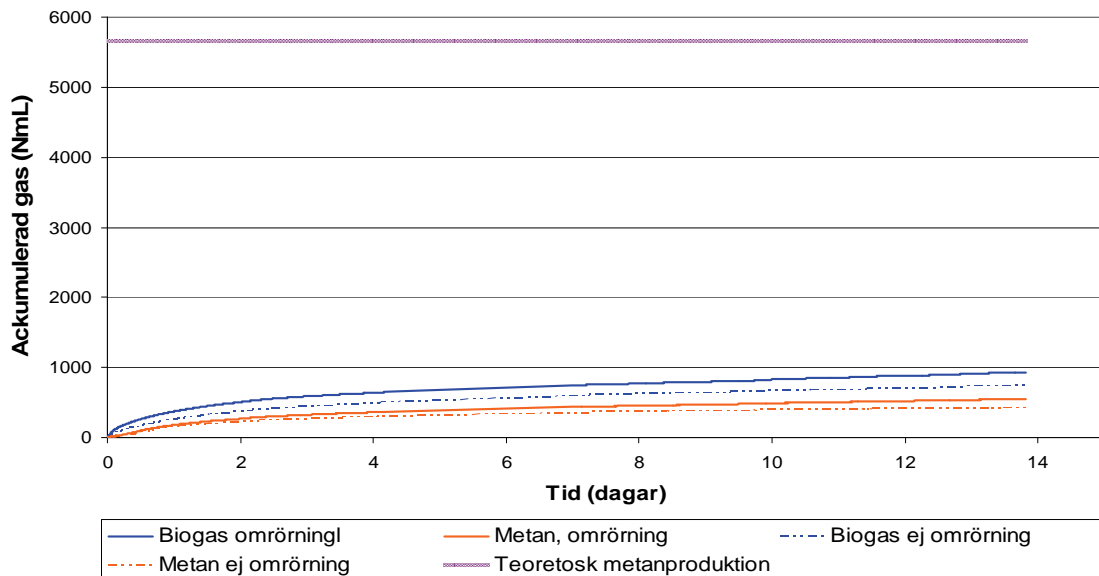
7.4 Potentialen hos rötslammet i Bromma

Försök 3: Beräkningar från analyser på slam ut	Rötslam efter med omrörning	Rötslam efter utan omrörning
Total VS _{ut} från substratet (g)	7,1	8,4
Biogasproduktion (NmL)	932	738
Metangasproduktion (NmL)	549	420
Slutlig metanhalt, beräknad (Vol %)	58,9	56,9
Specifik gasproduktion (Nm ³ biogas/kg VS _{in})	0,084	0,067
Specifik gasproduktion (Nm ³ metan/kg VS _{in})	0,050	0,038
Volymetrisk gasproduktion (Nm ³ biogas/m ³ slam _{in})	1,55	1,23
Volymetrisk gasproduktion (Nm ³ metan/m ³ slam _{in})	0,92	0,70
Biogasprod per VS _{deg} (Nm ³ biogas/kgVS _{deg})	0,25	0,27
Metanprod per VS _{deg} (Nm ³ CH ₄ /kgVS _{deg})	0,13	0,14
Metanprod per COD _{deg} (Nm ³ CH ₄ /kg COD _{deg})	0,13	0,15
Utröttningsgrad 1, VS _{deg} (%)	34,1	24,7
Utröttningsgrad 2, VS _{deg} och GR (%)	14,0	15,1
Utbyte CH ₄ , bildad/teoretisk (%)	9,7	7,4
COD/TOC	5,13	5,45
COD/N (Kj-N)	10,5	12,6
TOC/N (Kj-N)	1,3	2,3

Tabell 7.3: Beräkningar från analyser på det efterrottade rötslammet

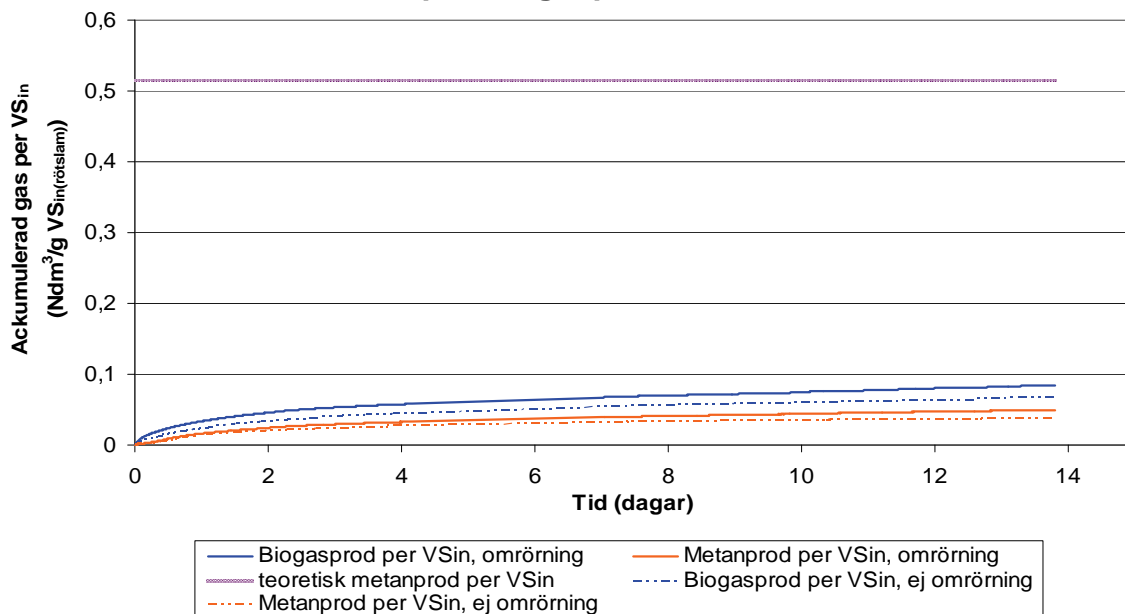
Det sista försöket, att röta vidare rötslam från Bromma, kunde som nämnts tidigare bara testas i 14 dagar på grund av tidsbrist. För att undersöka om det blir någon märkbar skillnad med och utan omrörning användes omrörning i två av flaskorna och den tredje flaskan fick rötas utan omrörning. Resultaten redovisas i tabell 7.3. Efter de 14 dagarna hade det bildats 0,087 Nm³ biogas/kg VS_{in} respektive 0,069 Nm³ biogas/kg VS_{in} och 0,050 Nm³ CH₄/kg VS_{in} respektive 0,038 Nm³ CH₄/kg VS_{in}. Utröttningsgraden med avseende på bara VS in och ut blev 34,1 % respektive 24,7 %, medan utröttningsgraden som även tar hänsyn till GR in och ut endast blev 14,0 % respektive 15,9 %. Metangasutbytet jämfört med den teoretiska mängden gas blev 9,7 % respektive 7,4 %. Den ackumulerade-, specifika- och volymetriska gasproduktionen visas i figur 7.6-7.8. Övriga grafer för detta försök redovisas bilaga 6.

Försök 3: Beräknad biogas- o metanproduktion

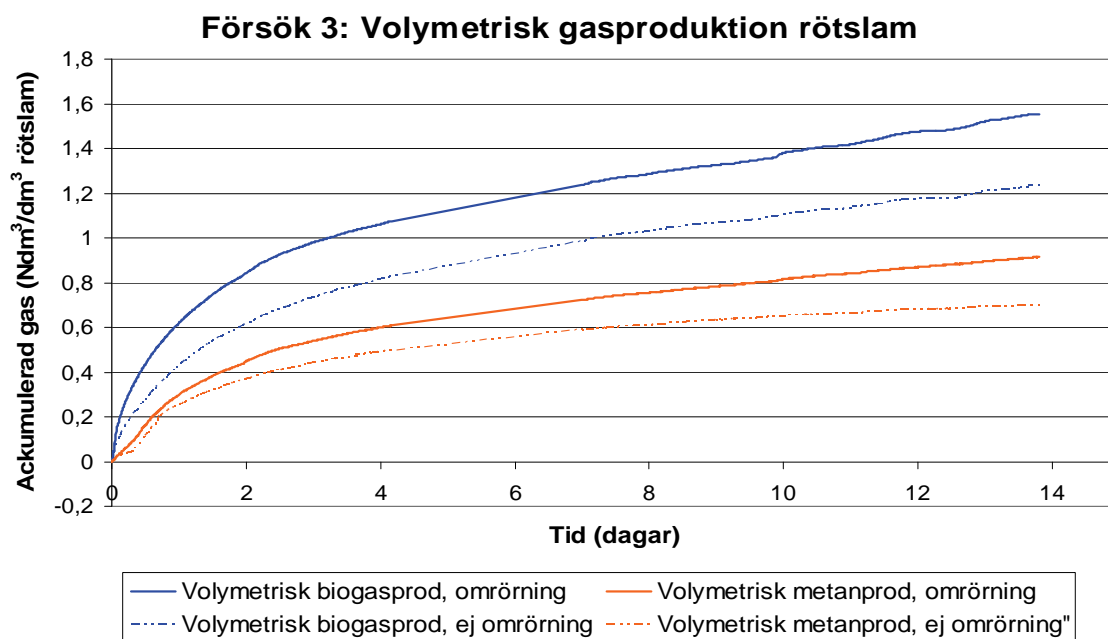


Figur 7.6: Producerad biogas- och metanproduktion från efter rötning av rötslam i 14 dagar. Som referens visas även den teoretiska metanproduktionen.

Försök 3: Specifik gasproduktion, 600 ml rötslam



Figur 7.7: Specifik biogas- och metangasproduktion från 600 ml rötslam. Som referens visas även den teoretiska specifika metanproduktionen.



Figur 7.8: Volymetrisk biogas- och metanproduktion. Producerad gas per volym slam till rötning.

7.5 Bromma under 2006 med och utan eventuell ökning från efterrötning

En ny rötchammar ska som tidigare nämnts byggas vid Bromma reningsverk. Den kommer att bli 6000 m³ i volym, vilket med 2006 års primärslamflöde ger slammet en uppehållstid på ca 16,4 dagar. Tabell 7.5 visar jämförande värden mellan kartläggningen av 2006 års rötning på Bromma, av primärslam samt total mängd slam (avsnitt 5.2), med pålagd ökning enligt laborationsförsöket (avsnitt 7.4) på efterrötning av rötslammet från Brommas primärslamrötning. Ökningen av total gasproduktion blev efter de 14 dagarna av extra satsutrötning ca 8,6 % för primärslammet, vilket ger att det blev ca 6,7 % ökning av den totala gasproduktionen per dygn. Vid kartläggningen av Bromma reningsverk beräknades utröttningsgrad 1 på primärslammet till 46,6 %. Resultaten från analyserna på rötslammet som användes vid satsutrötningen ger att detta rötslam hade en utröttningsgrad 43,3 %. Efter 14-dagars satsutrötning ökar utröttningsgraden på det analyserade rötslammet till 60,7 %.

BROMMA: Rötning av primär- och överskottslam med och utan efterrötning				
	<u>År 2006</u> Rötning av primär-slam	<u>År 2006</u> Rötning av primär- och överskottslam	<u>Framtiden</u> 2006 års rötning av primärslam Samt efter- rötning av primärslam	<u>Framtiden</u> 2006 års rötning av primärslam och överskott-slam Samt efterrötning av primärslam
Organiskbelastning (kg VS _{in} /m ³ reaktor,d)	1,5 (RK 1,2) 1,2 (RK4-6)	-	1,28	-
Organiskt material till rötning (ton VS _{in} /dygn)	12,15	17,19	12,15	17,19
Upphållstid (d)	21,1 (RK 1,2) 26,4 (RK4-6)	-	+14 dagar ⁽¹⁾	+14 dagar ⁽¹⁾
Gasproduktion (Nm ³ /dygn)	6929	8851	7522	9450
Specifik biogasproduktion (Nm ³ biogas/kg VS _{in} , d)	0,57	0,51	0,62	0,57
Specifik gasproduktion, metan (Nm ³ CH ₄ /kg VS _{in} , d)	0,37 ⁽²⁾	0,33 ⁽²⁾	0,40 ⁽²⁾	0,37 ⁽²⁾
Volymetrisk biogasproduktion (Nm ³ biogas/m ³ slam _{in} ,d)	18,3	15,6	20,2	16,7
Volymetrisk gasproduktion,metan (Nm ³ CH ₄ /m ³ slam _{in} ,d)	11,9 ⁽²⁾	10,1 ⁽²⁾	12,9 ⁽²⁾	10,8 ⁽²⁾
Utröttningsgrad 1, VS_{red} (%)	46,6 (43,3 ⁽³⁾)	43,5	60,7	53,1
Utröttningsgrad 2, VS_{red} m.a.p GR (%)	51,6 (53,1 ⁽³⁾)	50,7	62,6	54,5
Ökning i gasproduktion per dygn (%)	-	-	8,6	6,7

Tabell 7.4: Beräknade värden för den eventuella ökningen på 2006 års värden över primärslamsrötningen i Bromma.

⁽¹⁾Satsvis utrötning av rötslam i 14 dygn

⁽²⁾Det finns ingen dokumenterad metanhalt för biogasen vid Bromma reningsverk så för dessa beräkningar har en metanhalt på 65 % antagits.

⁽³⁾Beräknat med avseende på rötslammet som användes i försöket.

7.6 Jämförelse inom och mellan de tre försöken

I detta avsnitt utvärderas analysmetoden med avseende på jämnhet i resultat.

Försöksuppställningen består som förklarats tidigare av fyra stycken glasflaskor à ca 1100 mL. En av dessa flaskor användes som referens i försök 1 och 2, alltså de fylldes med ca 400 mL ymp från en rötkammare. De tre övriga flaskorna fylldes med samma mängd ymp som i

referensflaskan och med det substrat man ville undersöka. Tre flaskor användes för att undersöka repeterbarheten av metoden. I det tredje försöket användes ingen referens eftersom substratet som undersöktes var en ymp från en röt-kammare på Bromma reningsverk. Den tredje flaskan i försök tre skiljde sig visserligen från de andra två på så sätt att den inte hade någon omrörning. Detta för att verifiera att gasbildningen går långsammare utan omrörning.

I tabell 7.5 redovisas resultat från alla försöken tillsammans. För varje försök redovisas även resultaten från rötningen i varje flaska för sig för att kunna göra en jämförelse mellan flaskorna och granska hur väl de överrensstämmer med varandra. I tabellen visas även en beräkning av hur många dygn det tar innan en viss andel av den totala mängden gas har bildats. De andelar som valdes var 50 % av den teoretiska gasmängden, $T_{50(\text{teoretisk})}$, 50 % av den slutliga gasmängden, $T_{50(\text{max})}$, hos det aktuella försöket samt 90 % av den slutliga gasmängden, $T_{90(\text{max})}$. Denna beräkning gjordes för att undersöka om det i framtiden går att endast röta ett substrat några få dagar och ändå kunna beräkna ungefär hur mycket det skulle ha blivit efter en total satsutrotning.

Försök	1 (35 dygn)			2 (35 dygn)			3 (14 dygn)		
	2	3	4	2 (28 dygn)	3	4	2	3	4 (ej omrörning)
TS_{in} (g)	5,5	5,5	5,5	5,95	5,86	5,93	19,2	19,2	19,2
TS_{ut} (g)	4,20	4,20	4,20	4,00	3,50	3,50	12,98	14,16	15,54
GR_{in} (g)	2,28	2,28	2,28	1,70	1,68	1,70	8,16	8,16	8,16
GR_{ut} (g)	2,23	2,23	2,16	2,36	2,07	2,07	5,80	6,78	7,23
VS_{in} (g)	3,12	3,12	3,12	4,25	4,18	4,23	11,04	11,04	11,04
VS_{ut} (g)	1,97	1,97	2,04	1,64	1,43	1,43	7,18	7,38	8,31
Utröttningsgrad 1 (%) m.a.p VS	36,86	36,86	34,62	61,41	65,79	66,19	34,96	33,15	24,73
Utröttningsgrad 2 (%) m.a.p VS och GR	35,44	35,44	30,98	72,20	72,23	72,24	8,50	19,55	15,05
Bildad CH₄ (mL)	350	356	373	1310	1298	1245	494	604	420
Slutlig metanhalt (%)	70,7	63,3	68,9	74,3	65,2	65,2	59,1	58,8	56,9
Specifik gasproduktion, (Nm ³ CH ₄ /kgVS _{in})	0,11	0,11	0,12	0,31	0,31	0,29	0,045	0,055	0,038
Utbyte CH₄ bildad/teoretisk (%)	26,89	27,30	28,68	56,12	55,58	53,34	8,71	10,66	7,40
T_{50(teoretisk)}	-	-	-	ca 5,6 d	ca 5,0 d	ca 7,7 d	-	-	-
T_{50(max)}	ca 44 h	ca 42,7 h	ca 38,8 h	ca 48 h	ca 41 h	ca 43 h	ca 47,5 h	ca 54 h	ca 43 h
T_{90(max)}	ca 24,8 d	ca 25,5 d	ca 26,1 d	ca 6,0 d	ca 5,0 d	ca 5,9 d	ca 10,5 d	ca 10,0 d	ca 8,8 d

Tabell 7.5: Resultat från alla tre försöken och från varje flaska inom varje försök.

8. DISKUSSION

8.1 Uträkning av metanhalten i den producerade biogasen

Att räkna ut metanproduktionen hos den bildade biogasen var inte det enklaste då det var en hel del information som inte stod med i instruktionsboken. Efter flitig e-posttrafik till leverantören i Tyskland gjorde jag ett förslag till beräkningsgång som redovisas i bilaga 1. Allmänt kan sägas att metanproduktionen torde vara något högre än den som räknats fram med hjälp av flödesmätare och uppmätt metanhalt pga. antagandet att den fria volymen i flaskan inte ökar. I verkligheten ökar volymen något då en liten del av vätskevolymen dunstar och följer med gasen ut. Denna ökning borde dock inte ha så stor inverkan på den slutgiltiga metanhalten och därmed inte nämnvärt påverka de slutsatser som dras från resultaten.

8.2 Jämförelse mellan satsvis utrötning och Henriksdalsprocessen

En satsvis utrötning av primär- och förtjockat överskottsslam från Henriksdal gjordes för att både utvärdera om utrustningen visar resultat som går att jämföra med verkligheten och för att i så fall mäta den potentiella metanproduktionen av detta slam.

Resultaten från den satsvisa utrötningen på $0,50 \text{ Nm}^3$ biogas/kg VS_{in} stämmer mycket väl överrens med medelvärdet över Henriksdalsprocessen under år 2006, som var $0,47 \text{ Nm}^3$ biogas/kg VS_{in} . Motsvarande metangasproduktion var $0,30 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}_{\text{in}}$ för den satsvisa utrötningen och $0,31 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}_{\text{in}}$ för Henriksdalsprocessen, beräknad på bara primärslam plus överskottsslam samt $0,30 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}_{\text{in}}$ med bidraget från fettsslammet inräknat. Eftersom den satsvisa utrötningen gav en metanpotential något mindre än den som redan bildas i Henriksdal visar detta försök att det inte skulle ge signifikant mer gas att ha en längre uppehållstid än man har idag. Uppehållstiden under år 2006 var ca 18,9 dygn. Uppehållstiden från en satsvis utrötning kan inte jämföras rakt av med en totalomblandad kontinuerlig utrötning. I den satsvisa utrötningen rötas samma slam tills det inte bildas mer gas, medan det vid en totalomblandad kontinuerlig process hela tiden kommer in nytt slam samtidigt som en lika stor mängd slam förs ut, vilket ger att en del av slammet knappt kommer hinna rötas alls. Dessa uppehållstider går därför inte att jämföras med varandra rakt av, men den satsvisa utrötningen kan ändå ge svar på om det gör någon skillnad att öka uppehållstiden i den totalomblandade kontinuerliga rötningen.

Om man ska dra några slutsatser från enbart detta försök så blir det att det krävs mer än att öka uppehållstiden vid Henriksdals reningsverk för att få ut mer gas ur slammet. Förslag på sätt att öka gasproduktionen kan vara någon form av förbehandling av slammet eller inblandning av mer externt organiskt material.

Om vi istället tittar på den volymetriska gasproduktionen visar den satsvisa utrötningen en produktion på $16,7 \text{ Nm}^3$ biogas/ m^3 slam_{in} och från Henriksdal produceras $12,6 \text{ Nm}^3$ biogas/ m^3 slam_{in}. Metanproduktionen var $10,1 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{m}^3$ slam_{in} jämfört med $7,9 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{m}^3$ slam_{in}.

Utröttningsgraderna skiljer sig en hel del från Henriksdalsprocessen. Den första utröttningsgraden, som bara bygger på VS in och ut blev 66,0 % i försöket jämfört med 49,6 %

som medelvärde under 2006 på Henriksdal. I en idealisk process med perfekta analyser av slammet borde GR_{in} vara samma som GR_{ut} och då skulle detta sätt att beräkna utröttningsgrad ge samma resultat som den första utröttningsgraden. I detta försök blev den andra utröttningsgraden 72,2 % vilket är mycket mer än 48,7 % som är medelvärdet för Henriksdalsprocessen under 2006. En utröttningsgrad på 72,2 % är väldigt mycket och får inte stöd hos litteraturen för utrötning av vanligt avloppsslam. Detta kan bero på osäkerhet i analyserna av slammet och att volymen slam som används bara är ca 500 mL. Eftersom det handlar om relativt små volymer kan en variation i GR ge en stor skillnad på utröttningsgrad. De höga utröttningsgraderna skulle kunna antyda att det egentligen borde bildas mer gas än vad som uppmättes under försöket. En osäkerhetsfaktor är även att referensflaskan bildar drygt 25 % av den totala gasproduktionen i försöket. Eftersom det bara fanns möjlighet att använda en flaska till referens så blir osäkerheten därför relativt stor. Men eftersom utröttningsgraderna ändå inte verkar stämma överrens med uppgifter ur litteraturen och produktionen av metangas läggs det inte så stor vikt vid utröttningsgraderna i detta examensarbete. Det som framförallt tas fasta på är hur mycket gas som har bildats per kg VS_{in} . Det vanligaste sättet att jämföra olika försök med varandra är att man jämför den specifika gasproduktionen. För att få en riktigt bra jämförelse med den utrustning som använts i detta examensarbete skulle man behöva göra fler satsvisa försök och eventuellt även labbförsök med kontinuerlig rötning med liknande förhållanden som i verkligheten.

8.3 Jämförelse mellan "BCS-CH₄ Biogas" och Hansens (2004) batchmetod

Resultaten visar tydligt att biogasproduktionen var mycket högre i JTI-försöket än i det jämförande "Försök 2", men enligt Åke Nordberg på JTI skall man i deras metod fokusera på mängden producerad metangas och inte lägga så stor vikt vid hur mycket biogas som bildats. Efter 31 respektive 55 dagar var produktionen hos JTI 0,67 Nm³ biogas/kg VS_{in} respektive 0,65 Nm³ biogas/kg VS_{in} jämfört med 0,50 Nm³ biogas/kg VS_{in} i "Försök 2" efter 35 dagar. Metanproduktionen stämde däremot bra överrens. Den var efter 31 respektive 55 dagar 0,33 Nm³ CH₄/kg VS_{in} respektive 0,34 Nm³ CH₄/kg VS_{in} hos JTI jämfört med 0,30 Nm³ CH₄/kg VS_{in} i "Försök 2". Ett tecken på att det bildas mer metan i förhållande till mängd biogas i "Försök 2" än hos JTI kan man se hos metanhalterna. I "Försök 2" är metanhalten uppe i ca 62 % metan redan efter tre dygn, medan den hos JTI efter samma tid bara är uppe i 28 % metan. Först efter 8 dagar är metanhalten hos JTI uppe i ca 60 %. Den slutgiltiga metanhalten är dock högre hos JTI, ca 68 %, än i "Försök 2" där den endast kommer upp i drygt 63 %. Alla dessa olika resultat kan givetvis även bero på olikheter i slammen som testats. Provtagningen till båda försöken gjordes samtidigt, men slamproverna blandades ej med varandra, varför det kan ha varit lite olika karaktär på slammen. Detta kan vi även se av analyserna på TS och VS som var något olika för de olika försöken.

Metanproduktionen hos JTI var ca 9,7 % högre än för 2006 års produktion vid Henriksdal, beräknat på bara gasproduktion från primär- och överskottsslam.

Fördelar med BCS-utrustningarna och handhavandena jämfört med JTI och Hansen-metoden:

- Enkel att handskas med, när man väl lärt sig
- Sköter sig själv, tar inte mycket tid
- Mycket data att laborera med
- Relativt robust
- Lätt att starta upp och avsluta

Nackdelar

- Kan köra väldigt få flaskor åt gången, max åtta per BACCom/BACCom BC, jämfört med Hansen där man kan köra så många man hinner analysera.
- Kan inte köra försöken lika länge som Hansen då flödesmätaren inte klarar mindre flöden än 1 ml per timme, varför de slutgiltiga värdena antagligen är lite mindre än de skulle kunna vara.

8.4 Satsutrötning av rötslam från Bromma reningsverk

I det sista praktiska försöket var syftet att fortsätta röta rötslam från Bromma för att undersöka hur mycket mer gas man kan få ut ur slammet. Rötslammet togs från röt-kammare två och var således rötat primärslam. På grund av tidsbrist avslutades försöket efter 14 dagar.

8.4.1 Satsvis utrötning med omrörning

Efter 14 dagars satsvis utrötning var den specifika gasproduktionen hos den satsvisa rötningen $0,087 \text{ Nm}^3 \text{ biogas/kg VS}_{\text{in}}$. Överfört till stor skala, beräknat på medelvärden under 2006, ger detta en ökning på 8,6 % av biogasproduktionen från primärslammet samt 6,7 % ökning av den totala gasproduktionen. Visat i gasproduktion per dygn skulle detta innebära att produktionen från primärslammet ökar från $6929 \text{ Nm}^3/\text{dygn}$ till $7522 \text{ Nm}^3/\text{dygn}$. Ökningen av gas från primärslammet ger att den totala gasproduktionen ökar från $8851 \text{ Nm}^3/\text{dygn}$ till $9450 \text{ Nm}^3/\text{dygn}$.

Utröttningsgraden på rötslammet var 34,1 % med avseende på enbart VS in och ut. Kartläggningen av rötningen på Bromma reningsverk visade att utröttningsgraden under år 2006 låg som medelvärde på 46,6 % för primärslammet och på 43,5 % för primär- och överskottsslam tillsammans. Analyserna på rötslammet som användes i ”försök 3” gav att utröttningsgraden för detta slam var ca 43,3 % med avseende på VS_{deg} innan försöket. Efter den satsvisa vidare utrötningen i 14 dagar av rötslammet blev utröttningsgraden 60,7 % för primärslammet och 53,1 % för primär- och överskottsslam sammanslaget. Utröttningsgraderna ökar markant mer än vad gasproduktionen gör. Även i detta försök är gasproduktionen viktigare än utröttningsgraden då den varierar mycket med väldigt små förändringar och volymerna i försöken är små.

Det är svårt att ge några rekommendationer om huruvida man ska fortsätta att röta ut rötslammet eftersom att en ökning helt klart är tydlig men ändå inte är så väldigt stor. Många faktorer kan spela in som kan ändra på dessa siffror både upp och ned. Till dessa hör att den satsvis utrötade mängden slam bara var 600 mL. För att vara säker på hur stor ökningen skulle bli behöver man antingen röta en större mängd rötslam eller göra fler försök som styrker detta resultat samt att även ha möjlighet att röta slammet till det inte bildas mer gas. Kvaliteten på det rötslam som användes i försöket är självfallet också av stor betydelse dvs. att det är representativt för processen. Detta kontrollerades genom att jämföra uppehållstiden hos försöksslammet med medeluppehållstiden för rötslammet vid Bromma reningsverk. Uppehållstiden var vid provtagningen 21,6 dagar vilket stämmer bra överens med uppehållstiden för primärslammet under 2006 vid Bromma som var 21,1 dagar för den röt-kammare där slammet hämtades.

Precis som för Henriksdalsprocessen tror jag att det krävs mer än bara en ökad uppehållstid för att få någon betydande ökning i gasproduktionen.

8.4.2 Jämförelse mellan omrörning och ingen omrörning

Som förväntat visade undersökningen av rötning utan omrörning på en långsammare gasproduktion än för rötning med omrörning. Biogasproduktionen var ca 26 % mer för flaskorna med omrörning och ca 31 % mer metangasproduktion, under tidsperioden på 14 dagar. Däremot visade rötningen utan omrörning på en något högre gasproduktion, ca 7,7 %, per kilo nedbruten VS.

8.5 Jämförelse inom och mellan de olika försöken

I avsnitt 7.7 redovisas i tabell 7.6 resultaten från alla tre försöken och även resultaten från varje flaska för sig för att kunna bedöma repeterbarheten hos försöken. Resultaten visar på övervägande god repeterbarhet inom försöken. Det blir dock väldigt tydligt när resultaten ställs mot varandra i en och samma tabell att en liten skillnad i analysresultat kan ge en väldigt stor skillnad i olika uträkningar som exempelvis vid beräkning av utrotningsgraderna. Det är egentligen bara i försök 1 som analyserna av slammen med avseende på GR ger att $GR_{in} \approx GR_{ut}$. För både försök 2 och 3 skiljer sig GR_{in} och GR_{ut} ganska mycket ifrån varandra och även en del mellan flaskorna, framför allt för försök 3. I en ideal rötning med perfekta analyser borde $GR_{in} = GR_{ut}$ eftersom GR (glödresten) är den del av torrsubstansen i slammet som är av oorganisk karaktär och på så sätt inte bryts ner av bakterierna till biogas. I försök 2 är GR större efter rötningen än innan och i försök två GR är det tvärt om. Dessa variationer i analysresultaten ger även stora variationer mellan utrotningsgrad 1 och 2, men även mellan flaskorna. Om GR-vikten ut är högre än den in i försöket ger det att den andra utrotningsgraden kommer att bli högre än den första utrotningsgraden, som bara tar hänsyn till VS in och ut, och vice versa.

Försöket med att beräkna hur lång tid det tar för en viss andel, $T_{50(\text{teoretisk})}$, $T_{50(\text{max})}$ samt $T_{90(\text{max})}$, av gasen att produceras föll ut väl på så sätt att det stämde bra mellan flaskorna inom varje försök, men det är svårt att dra några specifika slutsatser efter bara ett försök. Eftersom alla tre försöken gjordes på så olika sammansättning av substratet går det inte att jämföra mellan försöken. Det som stämde rätt bra för alla försöken var att 50 % av den totala gasen som producerades var producerad efter 38-44 timmar för försök 1, 41-43 timmar för försök 2 samt efter 43-54 timmar för försök 3. För försök 2 (Henriksdalsjämförelsen) tog det 5-6 dagar för att producera 90 % av den maximala produktionen, medan det för försök 1 tog ca 26 dagar och för försök 3 (Bromma) tog ca 10 dagar. Det var endast försök 2 som producerade mer än 50 % av den teoretiskt möjliga gasen.

Detta sätt att använda utrustningen på kräver många analyser av samma sorts slam och är därför inte användbart då man vill testa metanpotentialen hos ett nytt substrat.

9. SLUTSATSER

- ”BCS-CH₄ biogas”-utrustningen kan användas för att mäta metan- och biogaspotentialen hos avloppsslam, genom satsvis utrötning. Repeterbarheten är god och resultaten har tillfredsställande jämförbarhet med den mer välkända metoden som används på JTI.
- För att simulera den fullskaliga biogas- och metangasproduktionen skulle även kontinuerliga försök behöva göras, men av den satsvisa utrötningen kan man se hur stor metanpotentialen är och på så sätt ta reda på hur mycket mer gas man kan få ut av det slam man rötar idag.
- Den satsvisa utrötningen av slam från Henriksdalsprocessen var något mindre än den verkliga processen, men stämde ändå relativt väl överrens med gasproduktionen under år 2006 och visade således att en ökad uppehållstid inte skulle ge någon signifikant ökning av gasproduktionen.
- Den satsvisa utrötningen på JTI visade på en potentiell ökning på ca 9,7 % vid fullständig utrötning av primär- och överskottslam från Henriksdal.
- En satsvis utrötning av rötslammet från primärslamsrötningen på Bromma reningsverk indikerade på en ökning av biogasproduktionen med 8,7 %. Sammanslaget med biogasproduktionen från överskottsslammet skulle det kunna ge en ökning på ca 6,7 %. Eftersom Bromma reningsverk inte rapporterar mätningen av metanhalten kan ingen uppgift om ökning av metangasen ges.
- Det är möjligt att det går att utveckla ett snabbtest där man vet resultatet av en fullgången satsutrötning (minst 30 dygn) genom att bara röta 5-7 dygn, men för detta krävs att många fler försök körs på varje substrat man vill undersöka.

10. FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE

För att granska utrustningen ordentligt med avseende på repeterbarhet och överrensstämmelse med JTI:s metod föreslår jag att fler försök görs i detta syfte.

Utöver test av utrustningen finns det mycket man kan använda den till. Det som inte hanns med inom tiden för detta examensarbete var att behandla slammet med enzym. Litteraturen visar att enzymtillsats kan ge en 60 % -ig ökning av gasproduktionen från överskottsslam (Davidsson, 2007). För Bromma reningsverk skulle till exempel ökad uppehållstid på primärslammet kunna kombineras med någon form av behandling på överskottsslammet. Förbehandlingsmetoder delas in i kemiska, fysikaliska samt biologiska. Exempel på dessa är (Davidsson, 2007):

Kemiska	Fysikaliska	Biologiska
NaOH	Värme	Hydrolys
KOH	Frysa/tina	Enzym behandling
Mg(OH) ₂	Ultraljudsbehandling	Aerob förbehandling
Ca(OH) ₂	Mekanisk behandling	
Syra	Högt tryck	
Oxidering, O ₃ eller H ₂ O ₂	Homogenisering	
	Elektriska fält	
	Lysering	

Ett annat sätt att öka gasproduktionen är att tillföra ännu mer externt organiskt material än man gör idag. Gas som utvinns från spannmål och vall kallas gröngas (svenskiogas.se) och är ett bra komplement till biogasen, som utvinns från avfall och inte själv kan tillgodose ett framtida behov.

REFERENSER

1. Manual för BACVis for Sensors and Milligascounter
2. BlueSens – Operating Instruktions, BCP-CH4
3. Manual till MilliGascounter®¹, Ritter
4. APHA (1989) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 17th edition, American Public Health Association, Washington, DC
5. Angelidaki I., Ahring B.K. (1997) *Codigestion of olive oil mill wastewaters with manure, household waste or sewage sludge*. *Biodegradation* **8**: 221–226
6. Angelidaki I., Sanders W. (2004) *Assessment of the anaerobic biodegradability of macro-pollutants*. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 3: 117-129
7. Bitton G. (1999) *Wastewater Microbiology*. 2nd edition. Wiley-Liss, Inc., New York.
8. Björnsson L., Murto M., Mattiasson B. (2000) *Evaluation of parameters for monitoring an anaerobic co-digestion process*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 54: 844-849
9. Chyi YT & Dague RR (1994) *Effects of particulate size in anaerobic acidogenesis using cellulose as a sole carbon source*, *Water Env. Res.* 66(5): 670–678
10. Davidsson Å. (2007) *Increase of biogas production at wastewater treatment plant- Addition of urban organic waste and pre-treatment of sludge*. Doktorsavhandling, Water and Environmental engineering, Department of Chemical Engineering, Lund University, Sweden
11. Gasföreningen (2006) *Biogasrapport juni 2006*.
12. Hansen, T.L., Schmidt, J.E., Angelidaki, I., Marca, E., Jansen, J. la Cour, Mosbæk, H. och Christensen, T.H. (2004). *Method for determination of methane potentials of solid organic waste*. *Waste Management* 24, 393-400.
13. Harmon J.L., Svoronos SA, Lyberatos G & Chynoweth D (1993) *Adaptive temperature optimization of continuous digesters*. *Biomass Bioenergy* 5: 279–288
14. Hobson P.N. (1987) *A model of some aspects of microbial degradation of particulate substrate*. *J. Ferment. Technol.* 65(4): 431–439
15. Metcalf & Eddy, Inc. (2003) *Wastewater Engineering*. McGraw-Hill, a business unit of The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
16. Nilsson S. (2000) *Gårdsbaserad biogas på Plönninge naturbruksgymnasium*. JTI-rapport KRETSLOPP & AVFALL, Nr 21 Jordbrukstekniska institutet, Uppsala.

17. Owen MF, Stuckey DC, Healy JB, Young LY & McCarthy PL (1979) *Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity*. *Wat. Res.* 13: 485–492
18. Scragg A. (1999) *Environmental Biotechnology*. Pearson Education Limited, England.
19. Stockholm Vatten AB (2007) *Miljörapport 2006*.
20. Thyselius L., (1982). *Biogas från gödsel och avfall*. Meddelande 391. Jordbrukstekniska institutet, Uppsala.
21. Vallin L., Hagland E., Medoc, M., Jonsson L., Pettersson F., Hellström D. (2007) *Real life case in Henriksdal waste water treatment plant in Stockholm, Sweden*. Rapportkoncept, Biogas max 2007-03-15.
22. Veecken A & Hamelers B (1999) *Effect of temperature on the hydrolysis rate of selected biowaste components*. *Biores. Technol.* 69(3): 249–255
23. Wawrzynczyk, J. and Dey, E.S. och Norrlöw, O. och Jensen, J. la Cour. (2003) *Alternative method for sludge reduction using commercial enzymes*. Presenterad vid 8e CIWEM/Aqua Enviro European Biosolids and Organic Residuals Conference, Workshop and Exhibition Cedar Court Hotel, Wakefield, West Yorkshire, England. 23-26 November 2003.
24. Westermann P, Ahring BK & Mah RA (1989) *Temperature compensation in Methanosarcina barkeri by modulation of hydrogen and acetate affinity*. *Appl. Environ. Microbiol.* 55: 1262–1266

Internet

25. www.bluesens.de 2006-11
26. www.gasforeningen.se 2007-04
27. www.getsens.com/getlab/www/web/getsens.nsf/main.html?open&lang=EN&id=tech_IRabsorb_EN 2007-01
28. www.miljomal.se 2007-04
29. www.ne.se 2006 -11
30. www.stockholmvatten.se/avlopp 2006-10
31. www.svenskbiogas.se 2007-04

Muntliga

32. Lars Lindblom, Stockholm Vatten AB

33. Daniel Hellström, Stockholm Vatten AB
34. Michael Medoc, Stockholm Vatten AB
35. Jes La Cour, Vatten- och miljöteknik, LTH
36. Johnny Ascue, JTI

BILAGA 1

Som beskrevs i avsnitt 4.2 visar sensorn inte på halten metangas av biogasen, utan på halten metan av den totala volymen gas i flaskan. Den totala volymen var från början ca 500 mL kvävgas, varför detta måste tas med i beräkningarna för att kunna räkna om den uppmätta metanhalten till den faktiska metanhalten. Ett antal antaganden har gjorts för att underlätta beräkningarna.

Antaganden

För att göra det lite enklare har antaganden varit tvungna att göras. Till dessa hör att:

- den fria volymen inte ökar under tiden, trots att den gör det lite grann pga. att fuktig luft följer med gasen ut genom flödesmätaren. Vilket då ger att den verkliga mängden metan kommer att vara något större än den som beräknats fram.
- metanhalten mäts vid reaktorns temperatur och luftfuktighet (i detta fall vid 36°C)
- trycket som mäts är atmosfärstrycket
- trycket i reaktorn är atmosfärstrycket plus trycket från silox-vätskan, vilken är 2 mbar (instruktionsboken)
- volymerna mäts i sitt fuktiga tillstånd och inte som torr luft

Parametrar

$\Delta V_{prod,STP}$ = producerad mängd biogas för varje tidsenhet, vid 0°C och 1 atmosfär

$V_{22^{\circ}C}$ = biogasvolymen som passerat flödesmätaren vid rumstemperaturen

V_{head} = den fria volymen i flaskan ovanför slammet

$V_{CH_4,prod STP}$ = volymen metangas av den gas som passerat flödesmätaren

$V_{CH_4,head STP}$ = volymen metangas i den fria volymen i flaskan

$x_{CH_4,uppmätt}$ = volym- % metan som mäts av sensorn i flaskan

$x_{CH_4,beräknad}$ = den beräknade volym-% metan i flaskan

P_a = atmosfärstrycket, uppmätt

$P_{22^{\circ}C}^{H_2O}$ = vattnets partialtryck vid 22°C; 26,5 mbar

$P_{36^{\circ}C}^{H_2O}$ = vattnets partialtryck vid 36°C; 59,5 mbar

P_{liq} = siloxvätskans tryck; 2 mbar

P_N = normalt tryck; 1013,25 mbar

T_N = normal temperatur; 273,15 K

T_a = rumstemperaturen, uppmättes till ca 22°C

T_f = temperaturen i flaskan; 309,15 K

Beräkningsgång

Biogasproduktion vid 0°C och 1 atmosfär

Vid varje Δt :

$$\Delta V_{prod,STP}(t+1) = (V_{22^\circ C}(t+1) - V_{22^\circ C}(t)) \cdot \frac{(P_a(t) \cdot 1000 - P_{22^\circ C}^{H_2O} + P_{liq})}{P_N} \cdot \frac{T_N}{T_a(t)}$$

Total biogas produktion vid varje t, STP:

$$V_{tot,STP}(t) = \sum_0^i \Delta V_{prod,STP}(t)$$

Korrektion av den fria volymen i flaskan, vid 0°C och 1 atm

Korrektion av V_{head} vid STP:

$$V_{head,STP}(t) = \frac{T_N}{T_f} \cdot \frac{(P_a(t) - P_{36^\circ C}^{H_2O} + P_{liq})}{P_N}$$

Ny totalvolym vid varje t:

$$V_{tot}(t) = V_{head}(t) + \Delta V_{prod,STP}(t)$$

Metan i den producerade gasen

Metan i varje delvolym biogas vid varje Δt :

$$\Delta V_{CH_4,prod,STP}(t+1) = \Delta V_{prod,STP}(t+1) \cdot \frac{(x_{CH_4,uppmätt}(t) + x_{CH_4,uppmätt}(t+1))}{2}$$

Metan i V_{head} vid t:

$$V_{CH_4,head,STP}(t) = V_{head,STP}(t) \cdot x_{CH_4,uppmätt}(t)$$

Metan i V_{tot} vid varje t:

$$V_{CH_4,tot}(t) = V_{CH_4,prod,STP}(t) + V_{CH_4,head,STP}(t)$$

Producerad metan vid varje Δt :

$$\Delta V_{CH_4,prod,STP}(t+1) = V_{CH_4,tot}(t+1) - V_{CH_4,head,STP}(t)$$

Total volym producerad metan vid varje t:

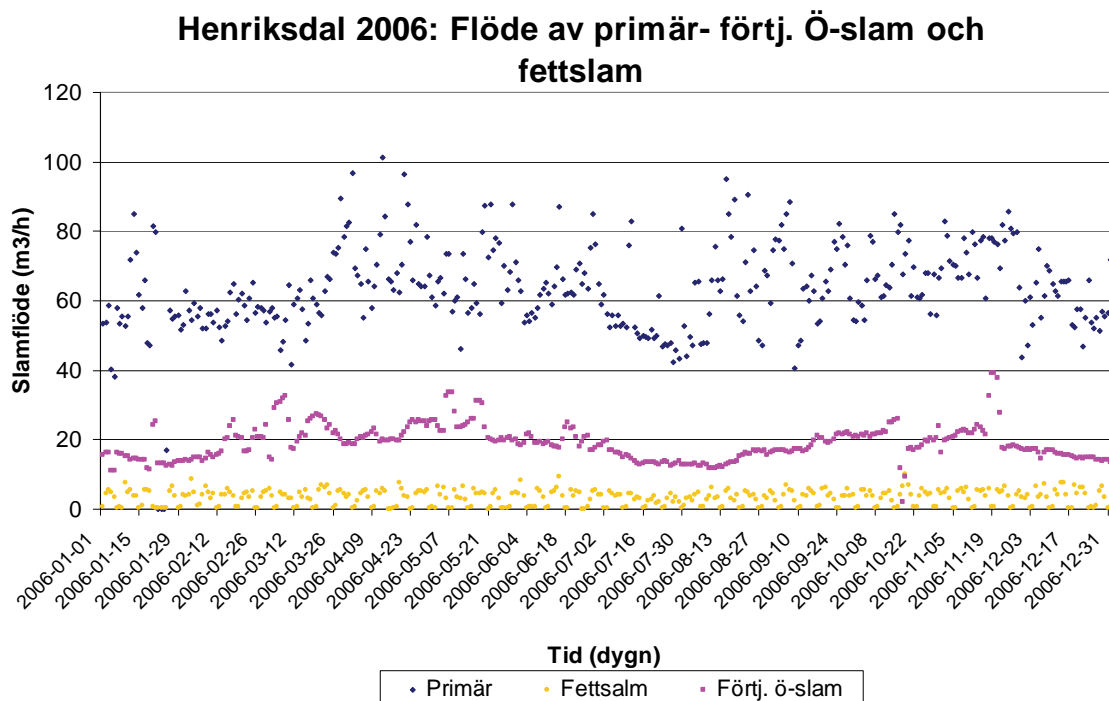
$$V_{CH_4,tot,STP}(t) = \sum_0^i \Delta V_{CH_4,prodSTP}(t)$$

Den beräknade metanhalt i hela den producerade gasen, vid varje t

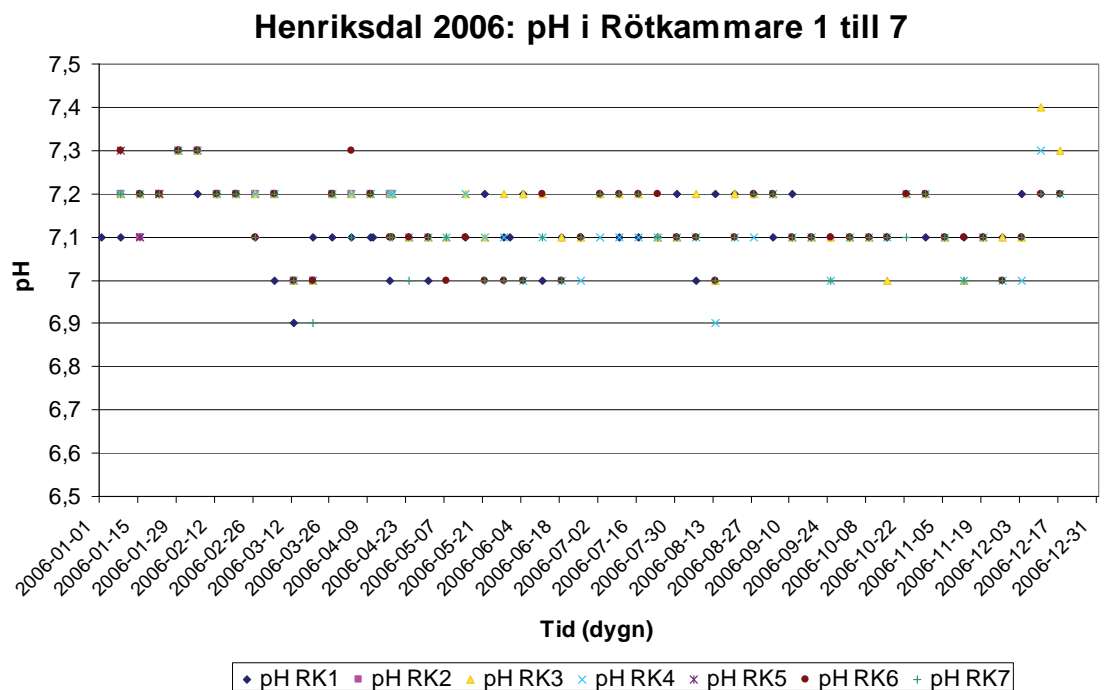
$$x_{CH_4,beräknad}(t) = \frac{V_{CH_4,tot,STP}(t)}{V_{tot,STP}(t)}$$

BILAGA 2

Kartläggning av viktiga parametrar hos Henriksdalsprocessen

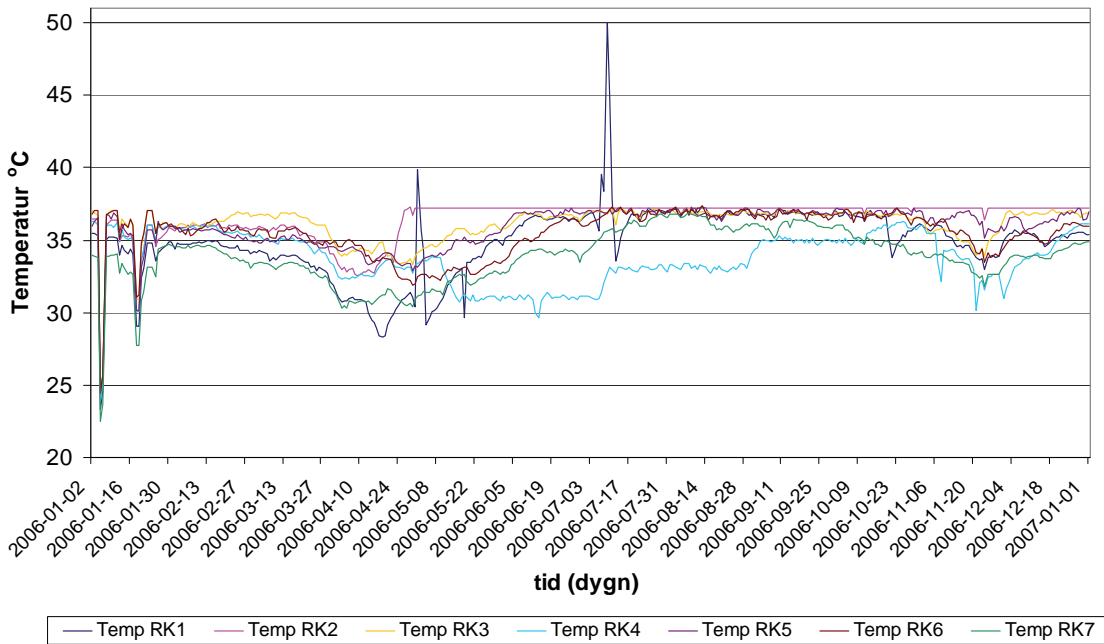


Figur B2.1: Primär-, överskott- och fettslamflöden in till rötammarna, per dygn.



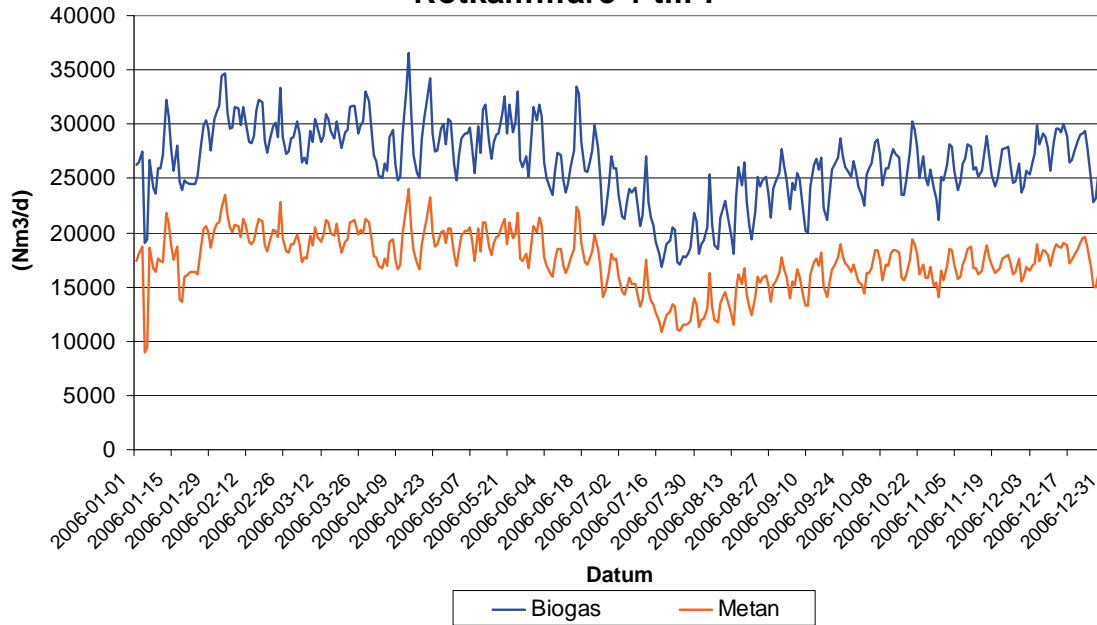
Figur B2.2: pH i varje rötammare, veckoprov.

Henriksdal 2006: Temperatur rötammare 1-7

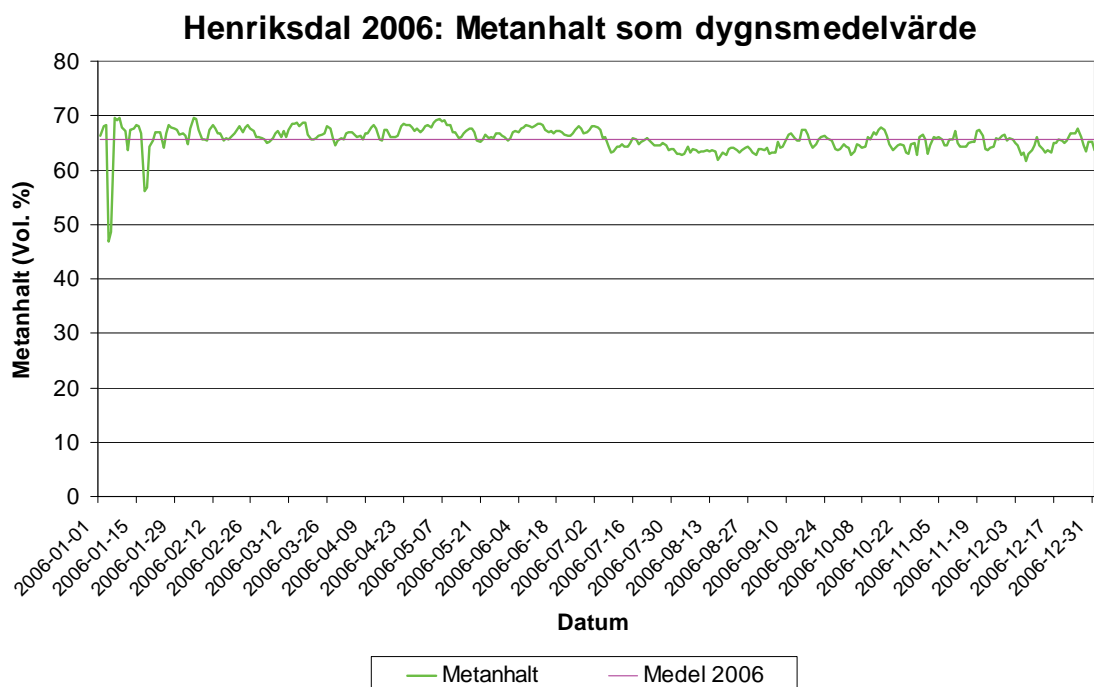


Figur B2.3: Temperatur i varje rötammare, per dygn.

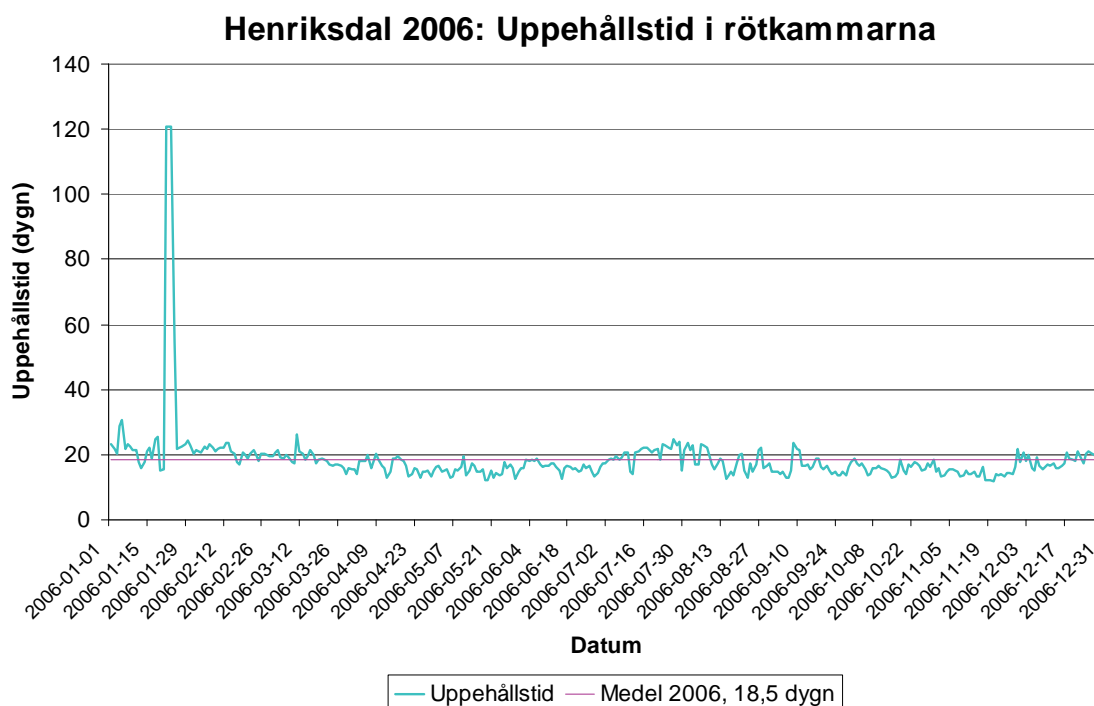
Henriksdal 2006: Biogas respektive metan ut per dag Rötammare 1 till 7



Figur B2.4: Den totala biogasproduktionen ut från alla sju rötammare, per dygn.

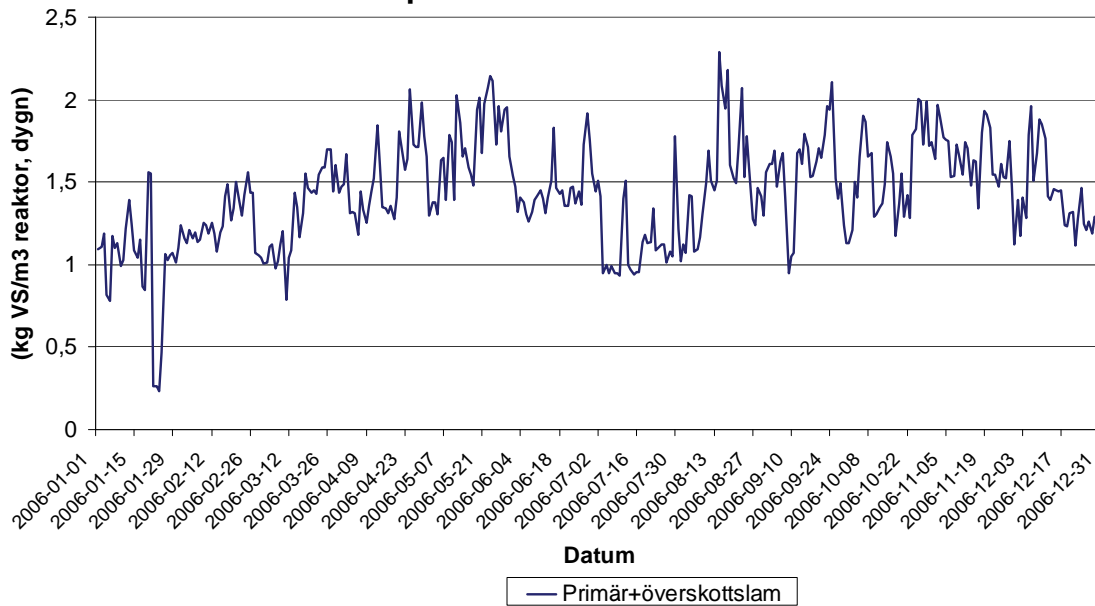


Figur B2.5: Metanhalten i den producerade biogasen per dygn. Varierar med sammansättningen av slammet.



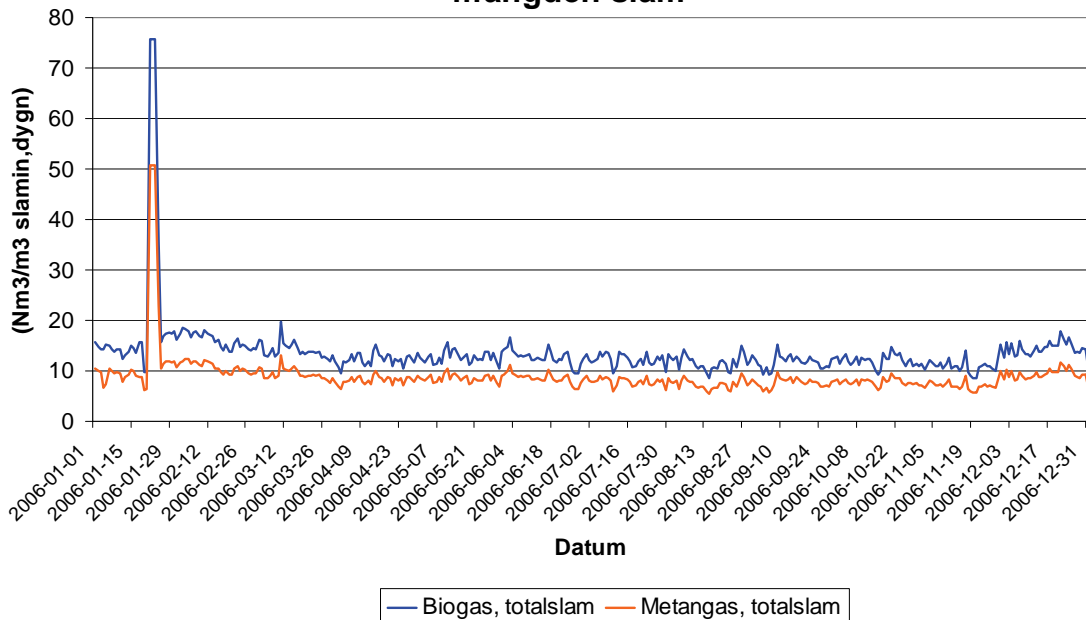
Figur B2.6: Uppehållstiden i röt-kammarna, per dygn och som årsmedelvärde.

Henriksdal 2006: Organisk belastning i rötammarna, från primär och överskottslam



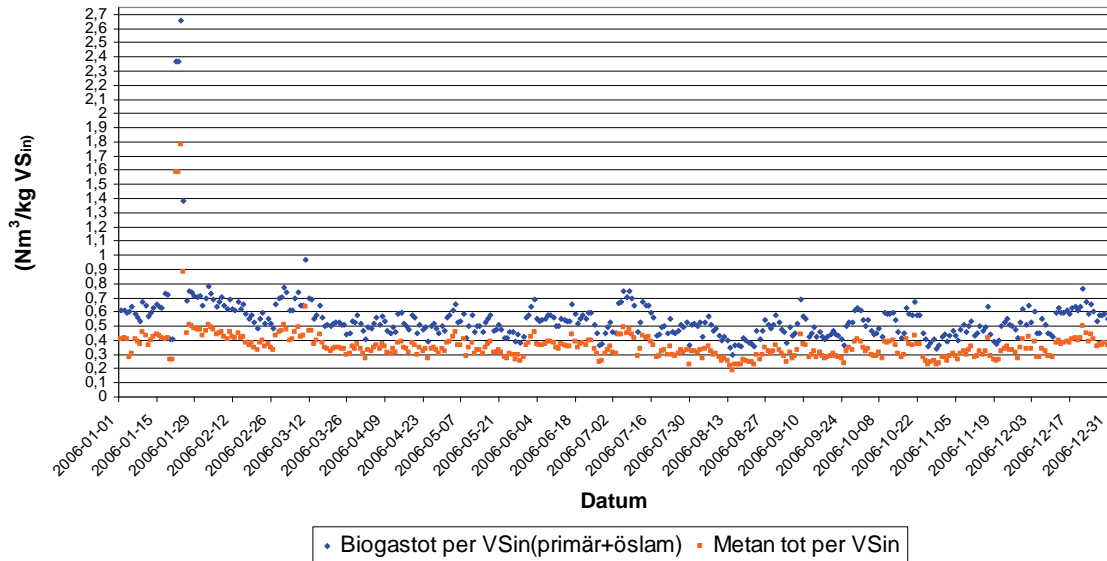
Figur B2.7: Den organiska belastningen på rötammarna från primär och förtjockat överskottslam. Egentligen är belastningen högre eftersom fettslammet inte är medräknat, på grund av osäkerhet i VS-innehållet i fettslammet.

Henriksdal 2006: Volymetrisk gasproduktion från totala mängden slam



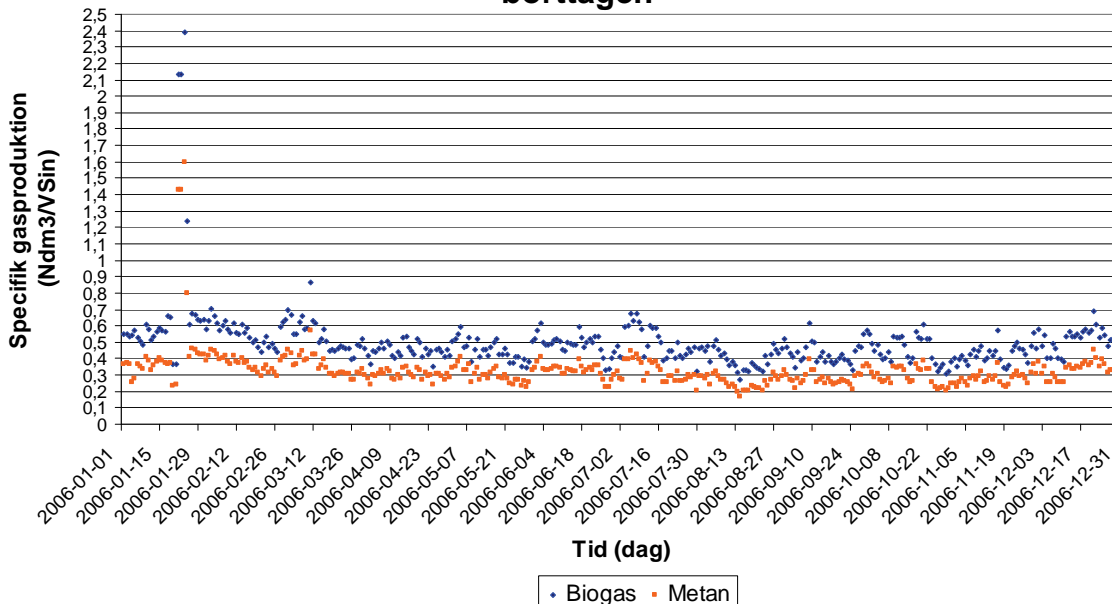
Figur B2.8: Bildad mängd bio- och metangas per inpumpad mängd slam i rötammarna.

Henriksdal 2006: Specifik gasproduktion från primär- och överskottslam

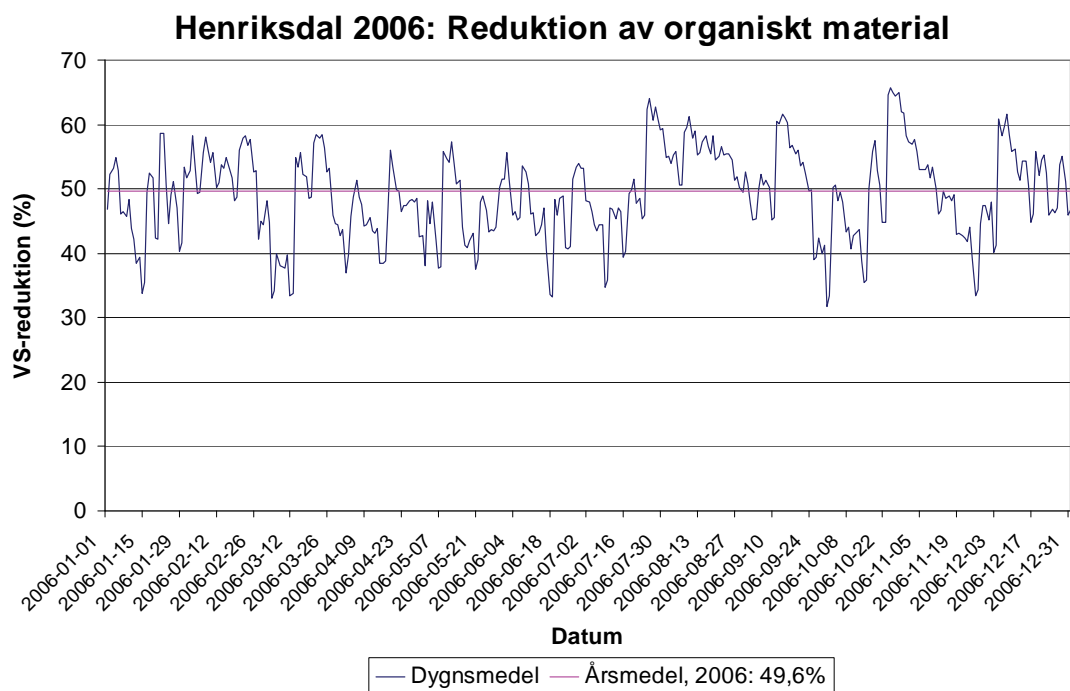


Figur B2.9: Den totala mängden producerad bio- och metangas per organisk material in i rötammarna från enbart primär- och förtjockat överskottslam. Fettslammets organiska, mängd är osäker och räknas därför inte med.

Henriksdal 2006: Specifik gasproduktion, fettgasen borttagen



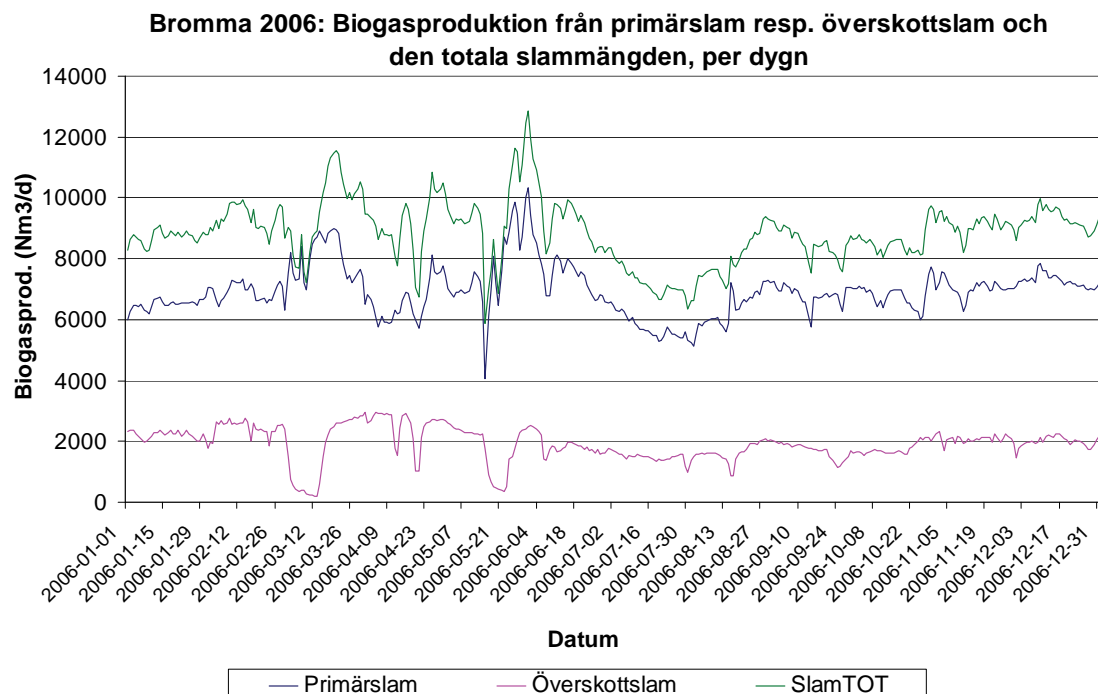
Figur B2.10: Producerad gas från enbart primär- och förtjockat överskottslam per organiskt material in från samma slam. Fettslammets gasproduktion uppskattas till 10% av den totala gasproduktionen.



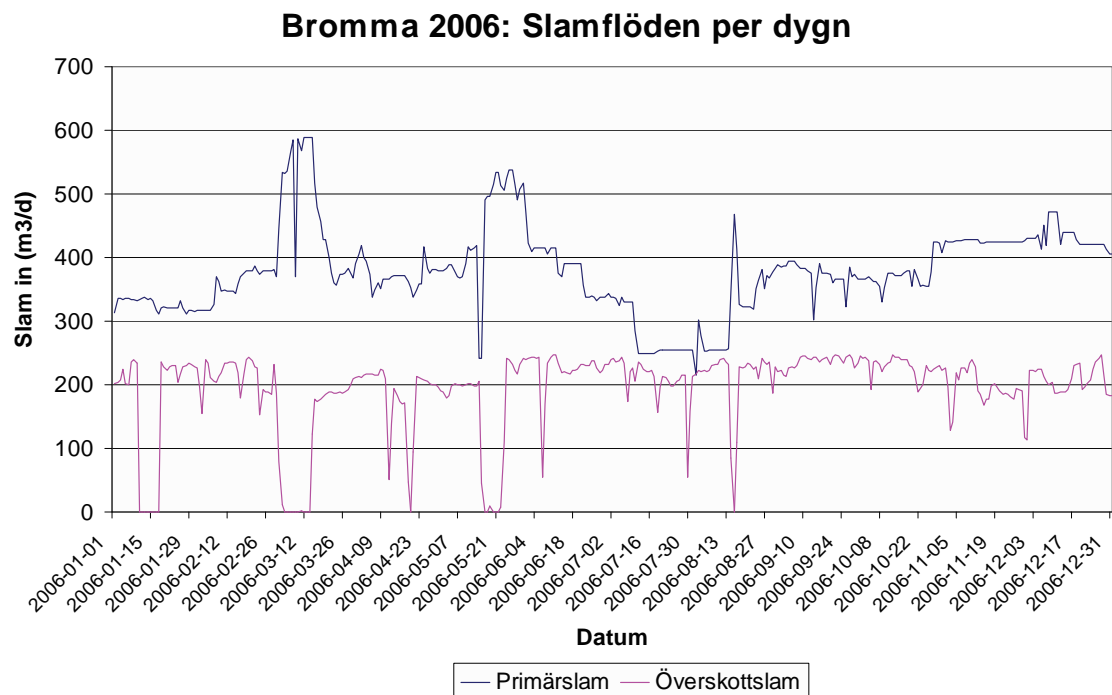
Figur B2.11: Andelen organiskt material som reducerats i rötammarna angivet som procent av VS in i rötammarna. Medelvärdet för hela 2006 vad 49,6 %.

BILAGA 3

Kartläggning av viktiga parametrar hos Bromma under 2006:

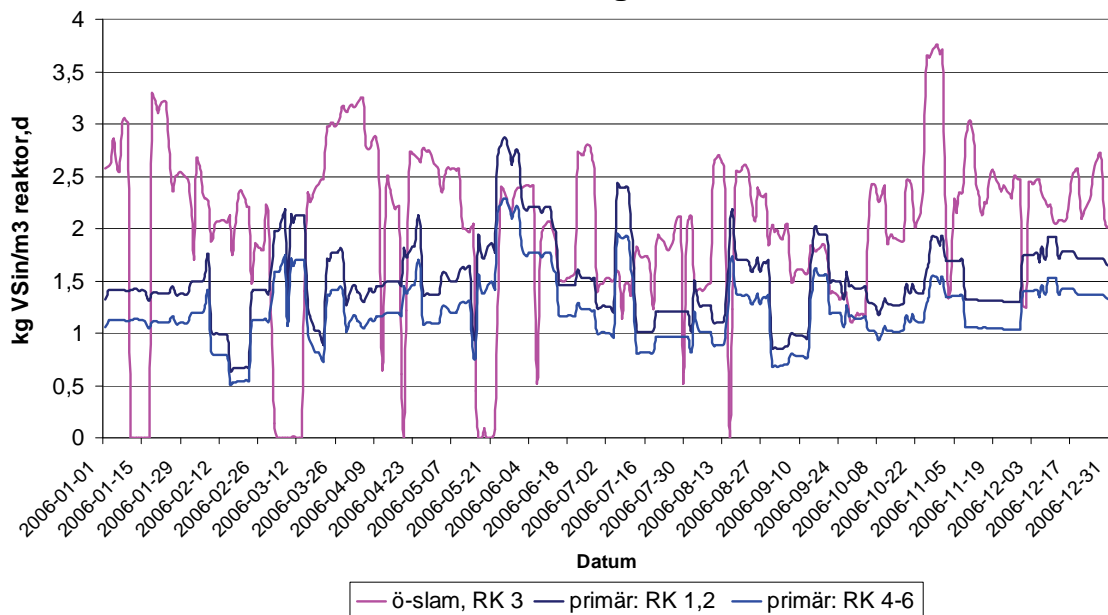


Figur B3.1: Mängden biogas som produceras varje dygn från primär- och överskottslam samt från den totala mängden slam



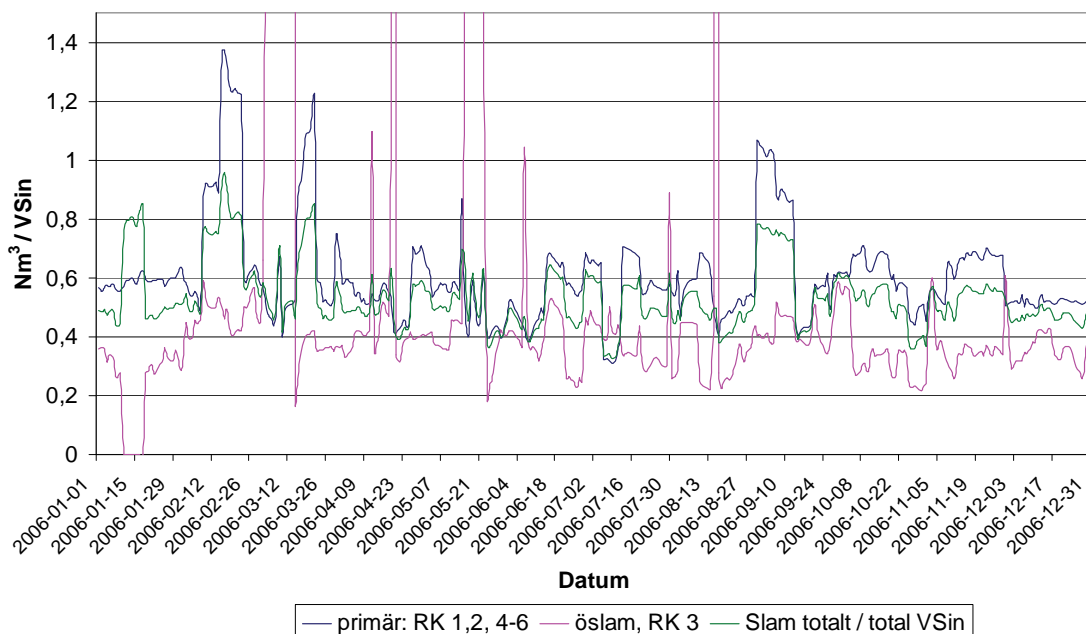
Figur B3.2: Slamflöden in rötammarna per dygn.

Bromma 2006: Organisk belastning per reaktorvolym och dag



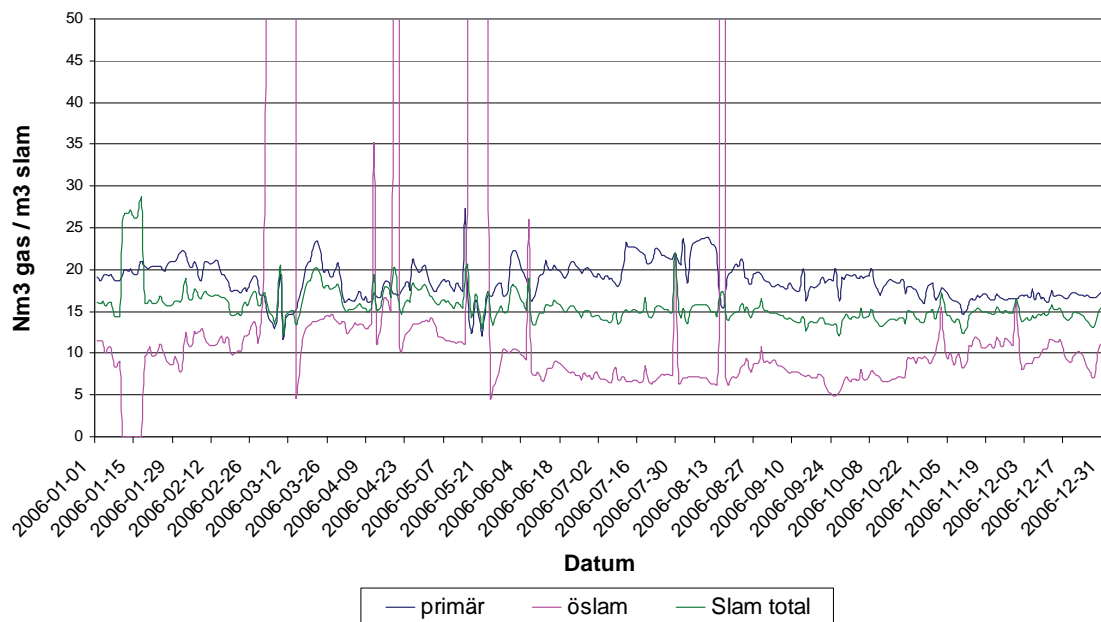
Figur B3.3: Organisk belastning från primär- och överskottslam på de olika rötammarna. Överskottslammet rötas i rötammare 3 och primärslammet i rötammare 1,2 och 4-6, men eftersom 1:an och 2: an är ca hälften så stora som rötammare 4-6 blir belastningen olika.

Bromma 2006: Specifik gasproduktion



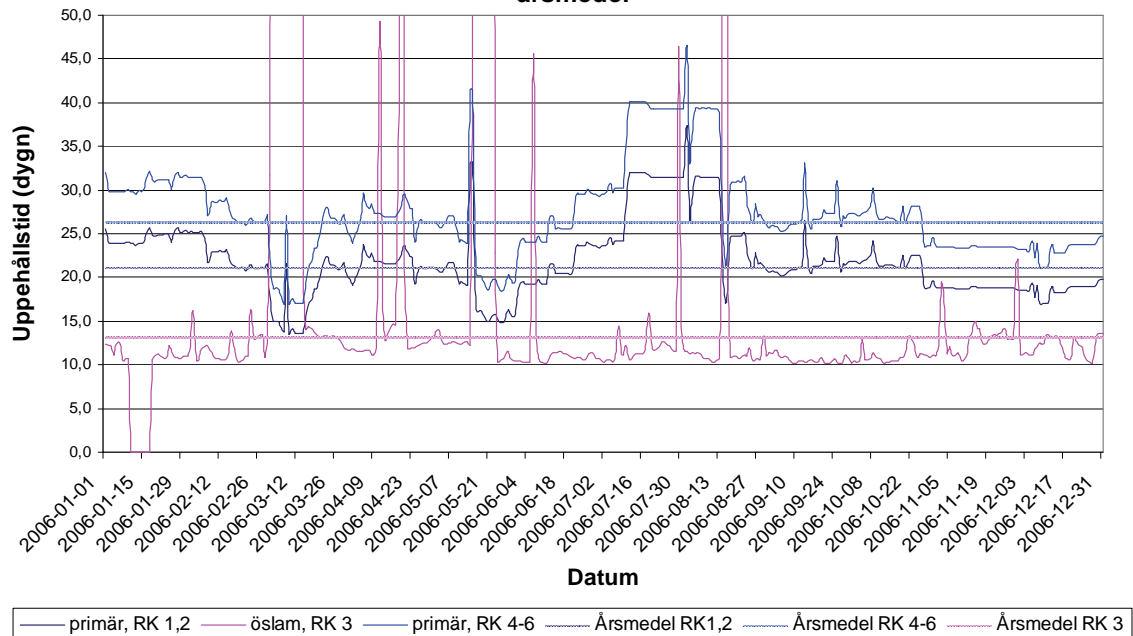
Figur B3.4: Producerad mängd biogas per mängd organiskt material in i respektive rötammare. Här visas den specifika gasproduktionen för primär- och överskottslam och för den totala mängden slam in i rötammarna.

Bromma 2006: Volymetrisk gasproduktion



Figur B3.5: Producerad mängd biogas per volym slam in i röt-kammarna. Visas för både primär- och överskottslam separat samt för den totala volymen slam.

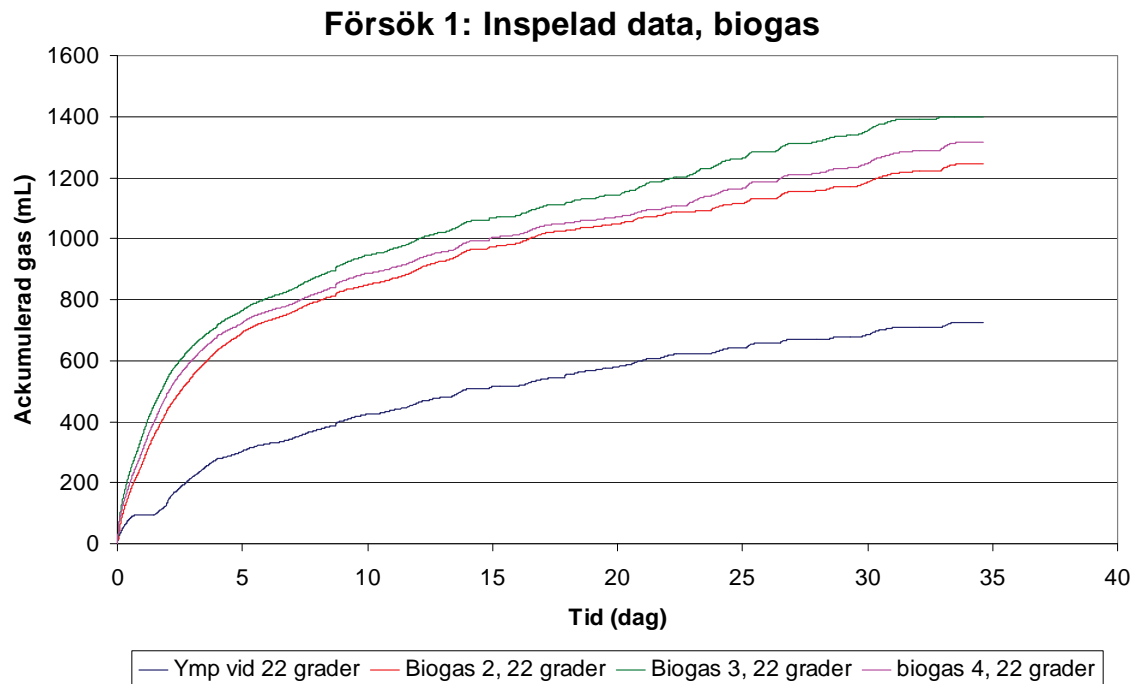
Bromma 2006: Uppehållstid i de olika röt-kammarna per dygn och som årsmedel



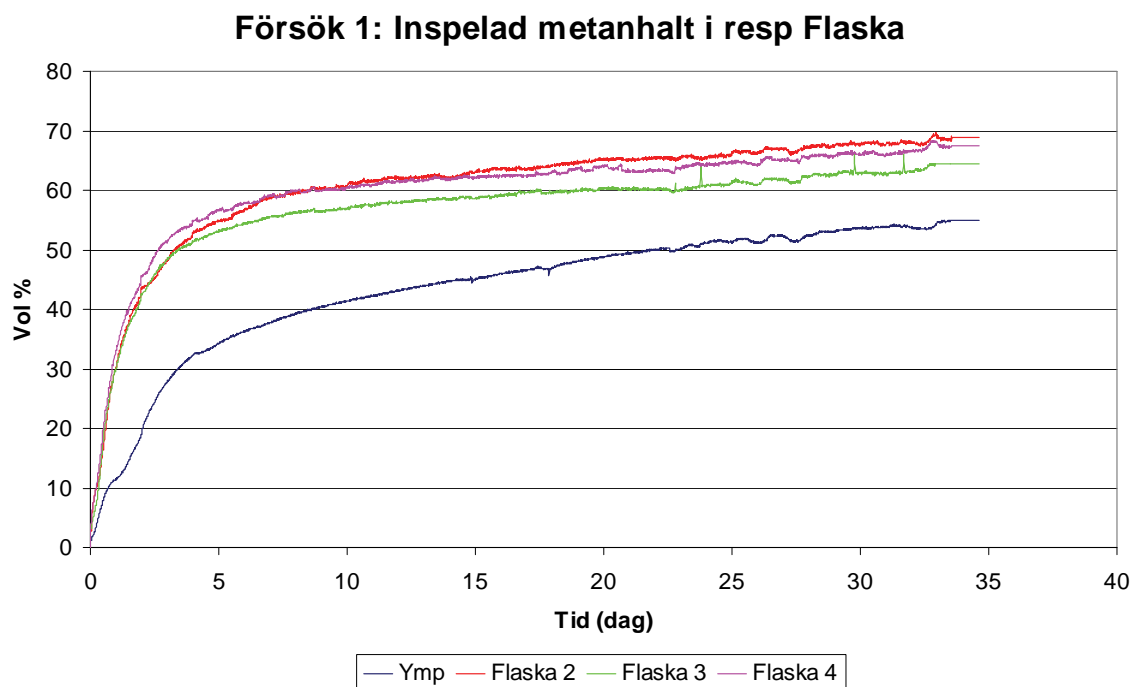
Figur B3.6: Uppehållstiden i de olika röt-kammarna beräknas på volymen slam in och på storleken på reaktorn. Röt-kammare 3 har en separat uppehållstid eftersom den ensam röter allt överskottslam. Röt-kammare 1 och två är mindre än hälften så stora som röt-kammare 4-6 varför har olika uppehållstid.

BILAGA 4

Resultat från försök 1

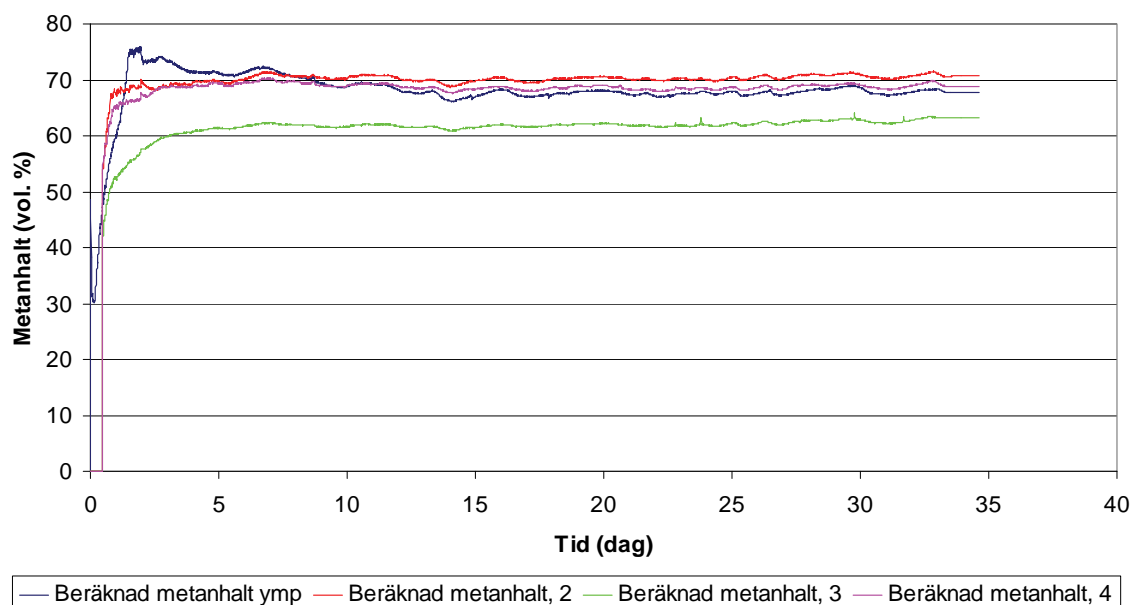


Figur B4.1: Inspelad data från flödesmätningen för alla flaskorna vid rumstemperatur, ca 22°C. I flaska 1 var 400 mL ymp samt 200 mL vatten och i de resterande tre flaskorna var från början 400 mL ymp och 200 mL beskickningsslam.



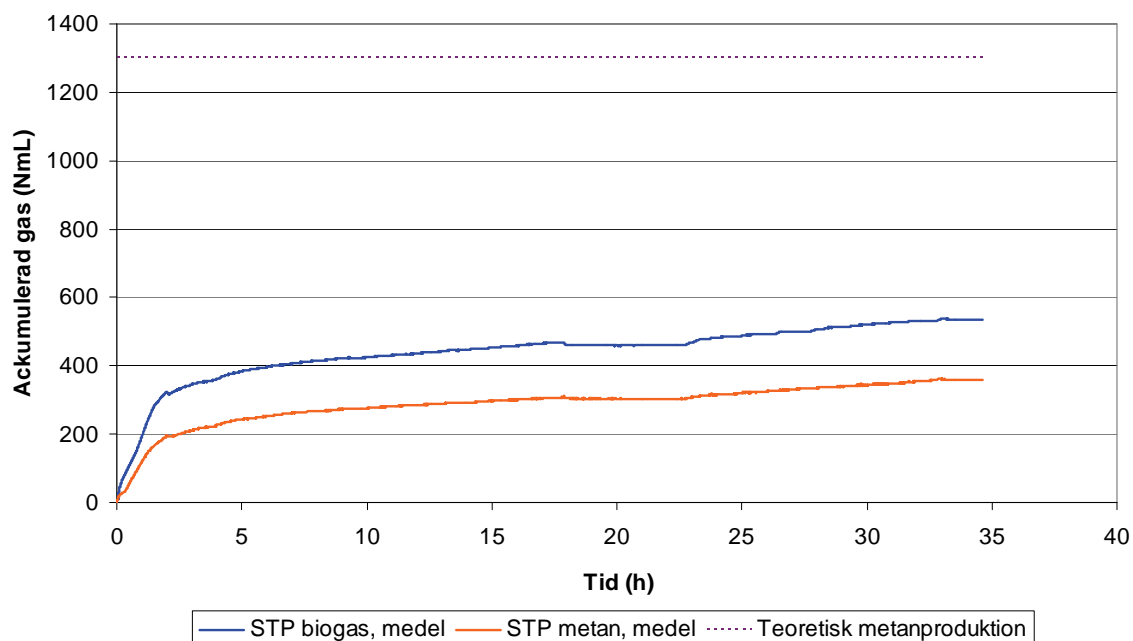
Figur B4.2: Den av sensorn inspelade metanhalten för varje flaska vid varje tidsintervall.

Försök 1: Beräknad metanhalt i processen



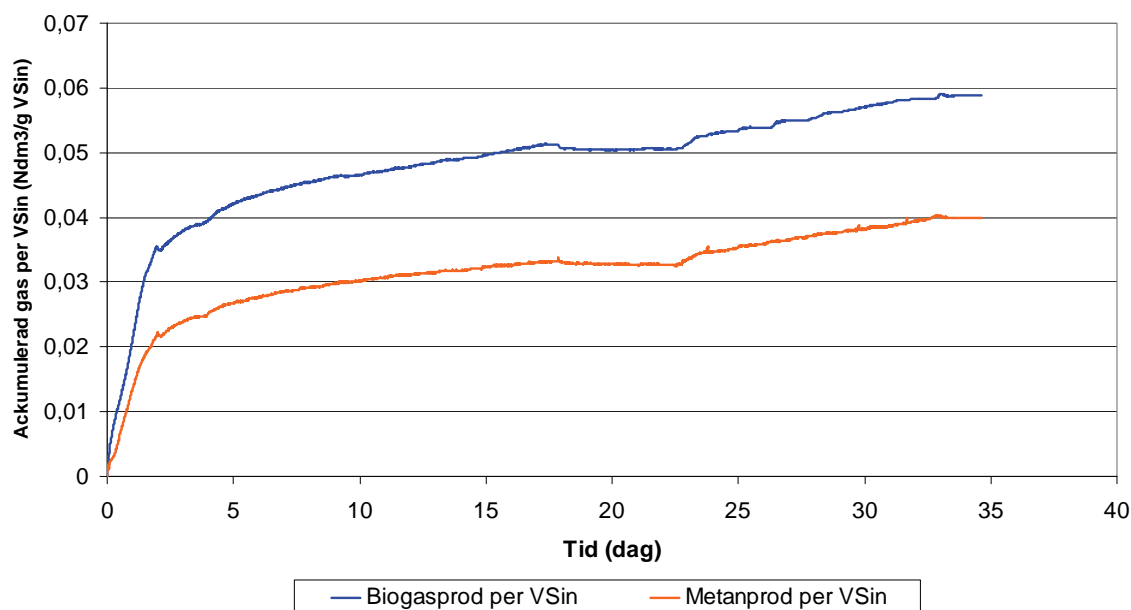
Figur B4.3: Här visas den omräknade metanhalten för försök 1. Den räknas om med hjälp av den fria volymen i flaskan, flödesmätaren och den inspelade metanhalten. För beräkningsgång se 4.2.

Försök 1: Beräknad biogas- o metanproduktion



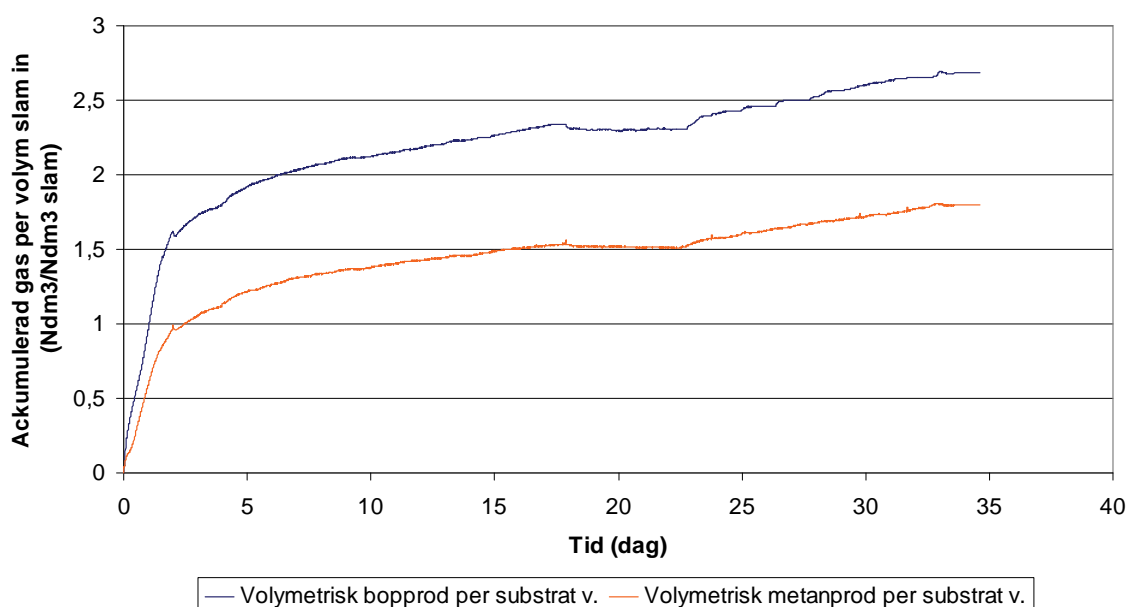
Figur B4.4: Omräknad biogas- och metanproduktion för standardförhållanden, 0°C och 1 atmosfär. Medelvärdet för de tre substratflaskorna minus ymp blev 550 NmL respektive 262 NmL CH₄.

Försök 1: Gasproduktion per organiskt material in



Figur B4.5: Biogas- och metangasproduktion per organiskt material som reaktorn belastats med. Medelvärdet av de tre substratflaskorna minus ymp blev 0,06 Nm³/kgVS_{in} respektive 0,04 Nm³ CH₄/kg VS_{in}.

Försök 1: Volymetrisk biodas- resp metangasproduktion

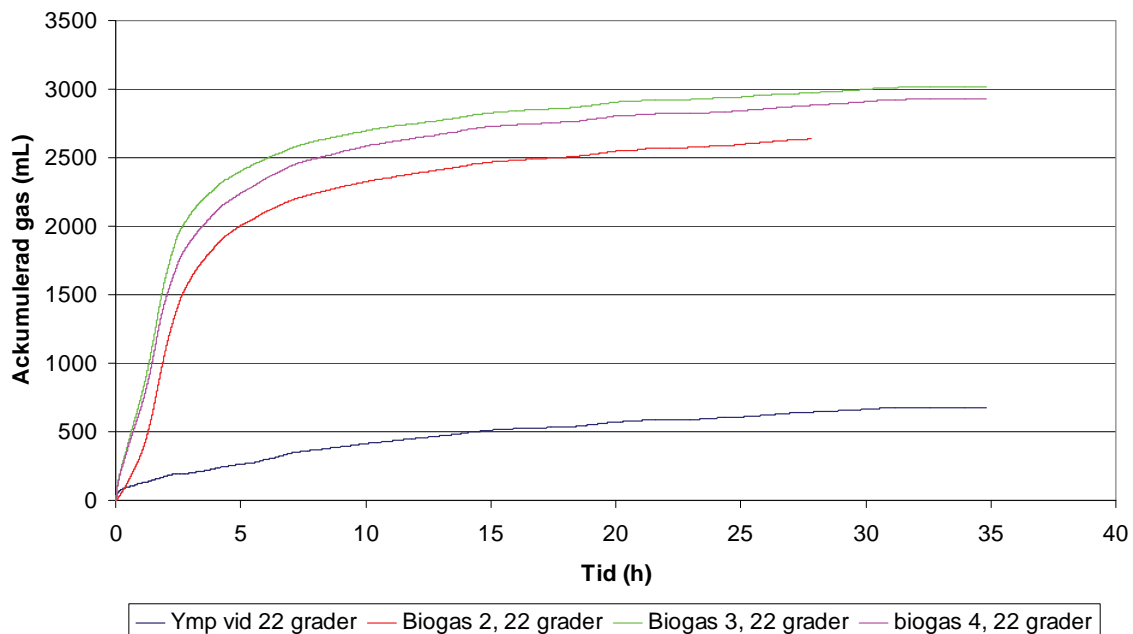


Figur B4.6: Producerad biogas och metan per volym substrat som reaktorn belastats med. Medelvärdet för de tre substratflaskorna minus ymp blev 2,75 Nm³/kgVS_{in} respektive 1,81 Nm³ CH₄/kgVS_{in}.

BILAGA 5

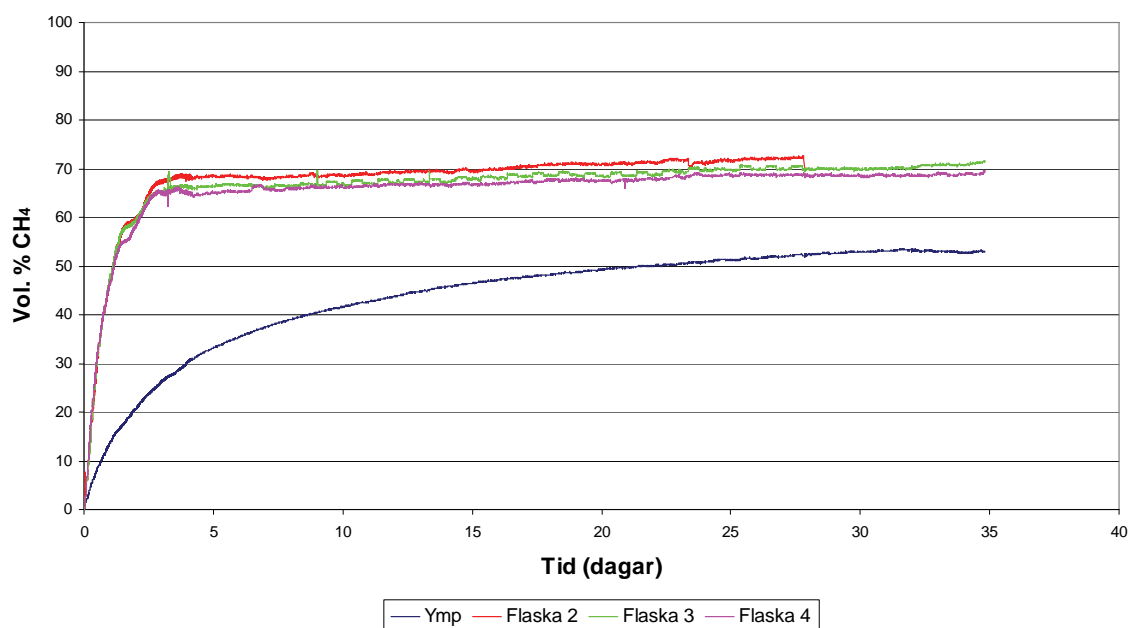
Resultat från försök 2

Försök 2: Inspelad data, biogas



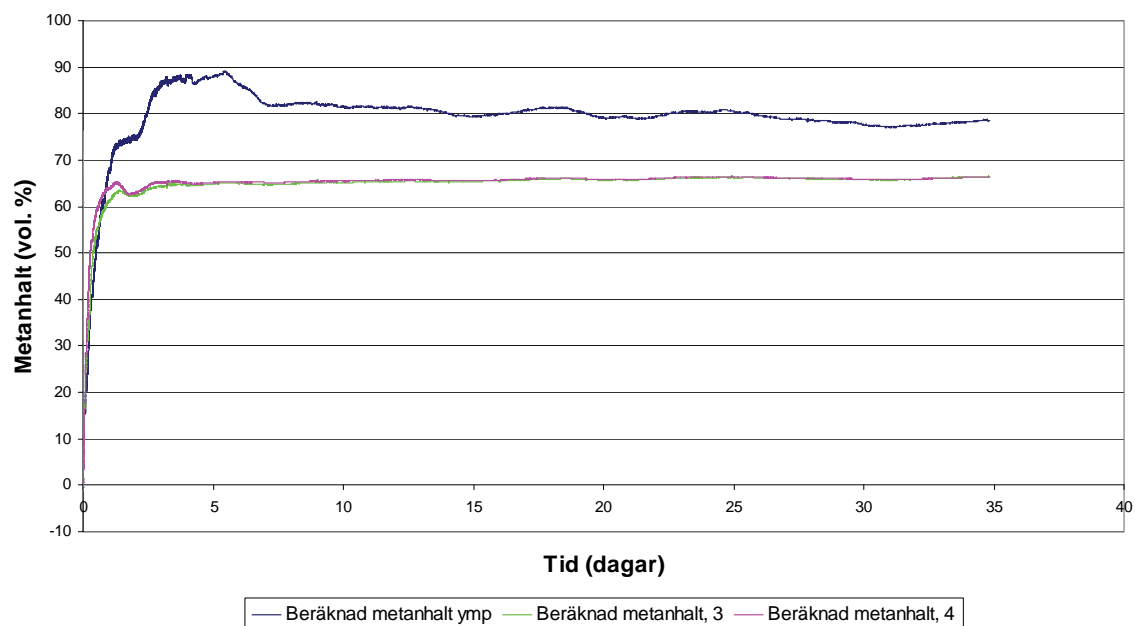
Figur B5.1: Inspelad data från flödesmätningen för alla flaskorna vid rumstemperatur, ca 22°C. I flaska 1 var 400 mL ymp samt ca 128 mL vatten och i de resterande tre flaskorna var från början 400 mL ymp och ca 99 mL primärslam samt 28 mL förtjockat överskottslam

Försök 2: Inspelad metanhalt i resp Flaska



Figur B5.2: Den av sensorn inspelade metanhalten för varje flaska vid varje tidsintervall.

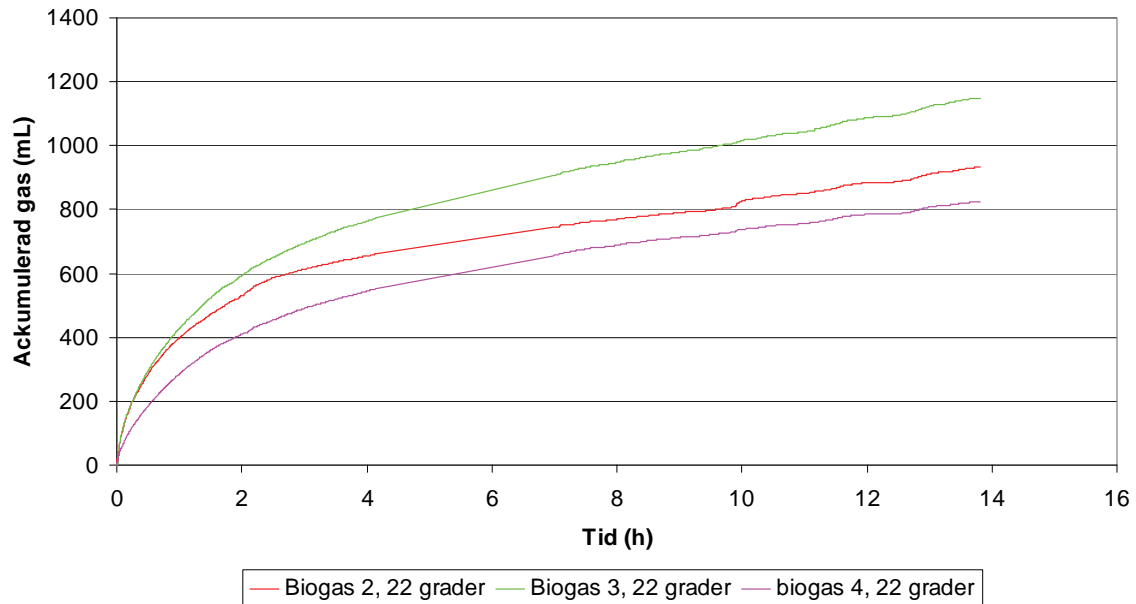
Försök 2: Beräknad metanhalt för resp. flaska



Figur B5.3: Här visas den omräknade metanhalten för försök 2. Den räknas om med hjälp av den fria volymen i flaskan, flödesmätaren och den inspelade metanhalten. För beräkningsgång se 4.2.

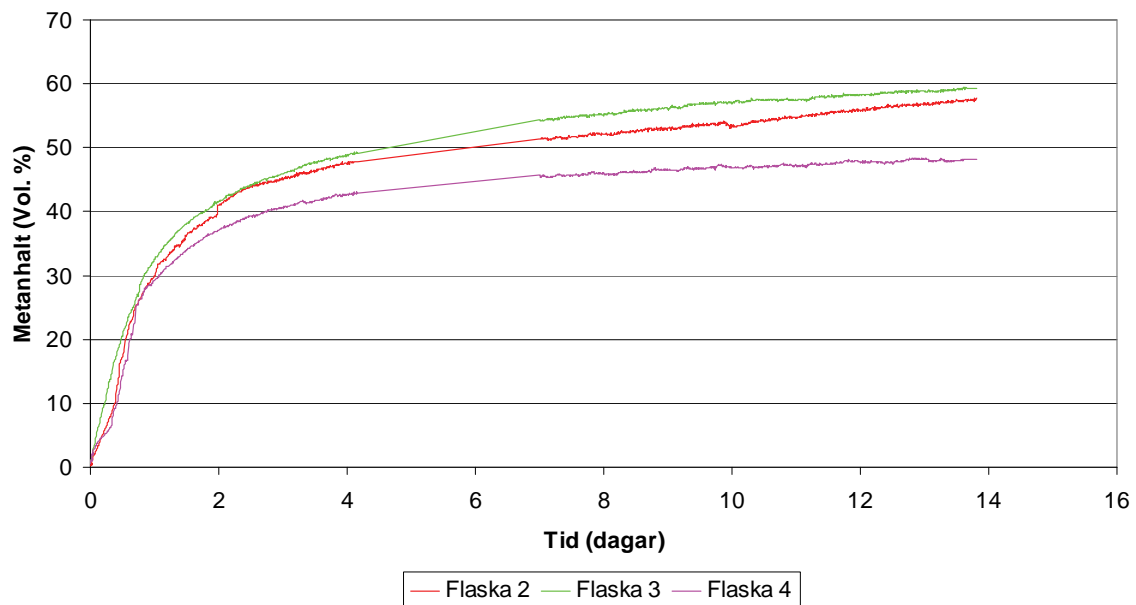
BILAGA 6

Försök 3: Inspelad data, biogas



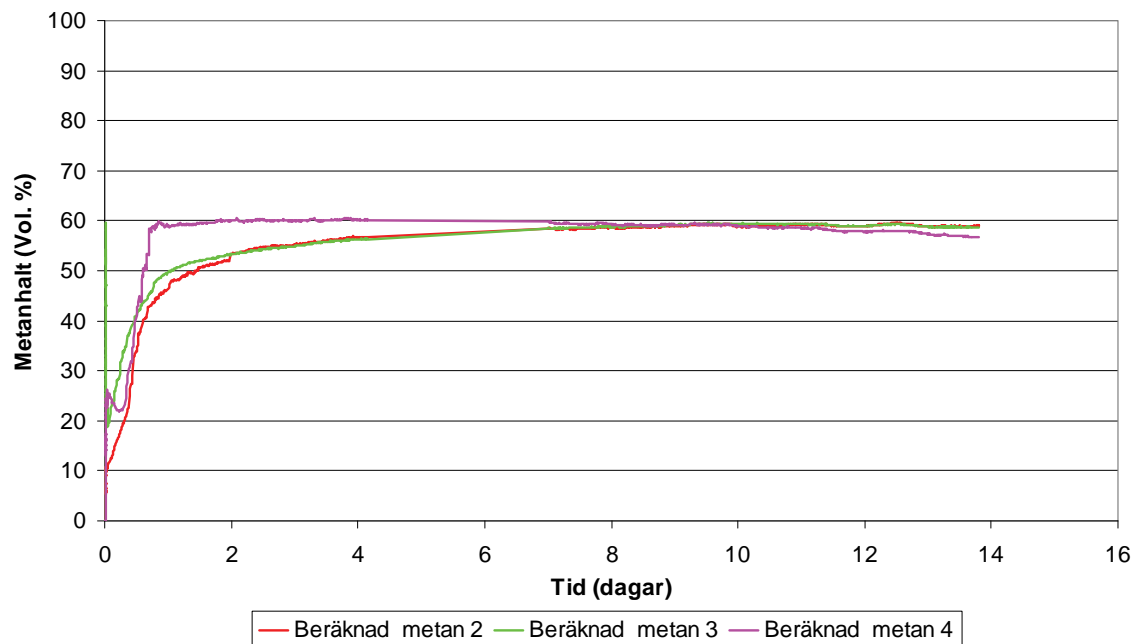
Figur B6.1: Den av flödesmätaren inspelade produktionen av biogas för varje flaska vid rumstemperatur, ca 22°C. Alla tre flaskorna belastades med 600 mL rötslam från rötchammare 2 i Bromma.

Försök 3: Inspelad metanhalt i resp Flaska



Figur B6.2: Den av sensorn inspelade metanhalten för varje flaska vid varje tidsintervall.

Försök 3: Beräknad metanhalt i producerad biogas



Figur B6.3: Här visas den omräknade metanhalten för försök 3. Den räknas om med hjälp av den fria volymen i flaskan, flödesmätaren och den inspelade metanhalten. För beräkningsgång se 4.2.

BILAGA 7

Analyser på slammet innan försöken:

Försök 1	SLAM, INNAN FÖRSÖK	Analyser: Torsgatan						Analyser: Dr. Lange			
		TS _{in} (% av slamvikt)	GR _{in} (% av TS)	TOC _{in} (mg/L)	COD _{tot} (mg/L)	pH	Kj-N (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	COD _{löst} (mg/L)	NH ₄ -N _{löst} (mg/L)	VFA _{löst} (mg/L)
Försök 1	Beskickningsslam, 2006-12-13	2,7	42,2	4100	18602 (Dr. Lange)	7,7	-	-	370	48,3	42,1
Försök 2	Ymp (RK5) 2006-12-13	2,6	42,5	3400	17193 (Dr. Lange)	7,7	-	-	323	34,4	42,8
Försök 2	Primärslam 2007-01-29	4,5	26,1	12000	54000	6,1	1700	230	3746	129	2148
Försök 2	Förtjockat överskottslam 2007-01-29	5,4	36,2	7400	50000	6,7	3100	440	1826	117	922
Försök 2	Ymp (RK 5) 2007-01-29	2,6	46,6	4300	20000	7,3	1700	900	345	37,4	68,6
Försök 3	Rötslam, Bromma (RK2) 2007-03-05	3,2	42,5	4100	27000	7,3	2000	1600	1590	90,1	49,8

BILAGA 8

Analyser på slammen efter försöken:

	SLAM, EFTER AVSLUTAT FÖRSÖK	Analyser: Torsgatan							Analyser: Dr. Lange			
		TS _{in} (% av våtvikt)	GR _{in} (% av TS)	TOC _{in} (mg/L)	COD (mg/L)	pH	Kj-N (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	COD _{löst} (mg/L)	NH ₄ -N _{löst} (mg/L)	VFA _{löst} (mg/L)	
Försök 1	Substrat + ymp 2007-01-22	2,2	51,8	4100	16000	7,6	1600	1000	-	-	-	
	Ymp 2007-01-22	1,5	51,2	3300	11000	7,5	1100	690	-	-	-	
	Substrat + ymp 2007-02-28	2,5	51,3	3100	19800	7,8	1800	1200	500	52,0	86,5	
Försök 2	Substrat + ymp 2007-03-05	2,4	51,0	3300	19000	7,7	1800	1200	1600	39,3	95,7	
	Ympen 2007-03-05	1,7	51,1	3100	15000	7,7	1800	1600	1607	29,6	93,2	
Försök 3	Rötslam, Bromma 2007-03-19	2,2	47,7	3600	19000	-	1700	1100	370	40,5	60,6	
		2,4	47,9	4200	21000	-	1800	1200	403	48,5	62,9	
		2,8	46,5	4400	24000	-	1900	1100	425	52,4	52,4	

TRITA-IM 2007:46

ISSN 1402-7615

Industriell Ekologi,
Kungliga Tekniska Högskolan
www.ima.kth.se