

# Utveckling av ett prognosverktyg för Käppalaverkets biogasproduktion

---

Katarina Norén



## Referat

### Utveckling av ett prognosverktyg för Käppalaverkets biogasproduktion.

*Katarina Norén*

Käppalaverket är Sveriges tredje största reningsverk. År 2010 inleder de en försäljning av uppgraderad biogas (fordonsgas) till 100 SL-bussar. Biogasen produceras i verkets två rötkammare som rötar avloppsslammet från reningsprocessen.

Detta examensarbete är utfört på Käppalaverket. Syftet med arbetet har varit att undersöka möjligheterna till ett framtida prognosverktyg avseende bland annat på prediktionshorisont, nyckelparametrar och huruvida det skulle gå att styra processen för en jämnare gasproduktion. Till prognosverktyget har både fysikaliska och empiriska modeller undersökts. För att undersöka samband mellan de variabler som påverkar rötningsprocessen har multivariat analys använts.

I ett framtida prognosverktyg har hittills en empirisk modell med signalen inkommande organiskt material till rötkammarna visat sig mest lämpad. Den prediktionshorisont som är möjlig för ett framtida prognosverktyg, med den typ av modeller som har undersökts, ligger runt ett till ett par dygn. Prediktionshorisonten begränsas av att inkommande avloppsvatten, som påverkar mängden organiskt material till rötkammarna, inte är känd och av att pumpningen av organiskt material styrs manuellt.

För att förbättra prognosverktyget skulle den empiriska modellen kunna skattas rekursivt med glömskefaktor. En längre prediktionshorisont skulle erhållas om signalen, organiskt material till rötkammaren, kunde skattas från inkommande vattenflöde. Ytterligare längre framförhållning till prognosverktyget kan förväntas om inkommande vattenflöde kunde förutses utifrån nivåmätningar i tunnelsystemet.

**Nyckelord:** Biogasproduktion, empirisk modellering, multivariat analys

## **Abstract**

### **Development of a tool for predictions of the biogas production at Käppala waste water treatment plant.**

*Katarina Norén*

Käppalaverket is the third largest wastewater treatment plant in Sweden. In 2010, they will start to sell upgraded biogas to 100 buses for the Stockholm public transport. The biogas is produced at Käppalaverket in two digesters that digest all sludge produced at the plant.

This thesis was written at Käppalaverket with the aim to develop and evaluate a future prediction tool for the biogas production. Issues to investigate were among others: prediction horizon, key parameters for the process and if it would be possible to control the process to make the production of biogas more stable. Both physical and empirical models have been tested for the prediction tool. To investigate correlations between the parameters affecting the digestion process, multivariate analysis has been used.

For a future prediction tool, an empirical model with incoming volatile solids as input, proved to give the best results so far. The time horizon shown to be possible for the kind of models evaluated is one to a couple of days. The time horizon is limited due to that incoming waste water, that affect the amount of volatile solids, is unknown and that the pumping of organic material to the digesters is controlled manually.

To improve the prognosis of biogas the models in the prediction tool could be expanded with a recursive part. A longer time horizon would be achieved with a model giving the amount of volatile solids to the digesters from incoming water flow. Additional time in the prediction could be achieved with a model predicting incoming water flow with the water level in the tunnel system as input.

**Keywords:** Biogas production, empirical modelling, multivariate analysis

## **Förord**

Detta är ett examensarbete i Miljö- och vattenteknik på Uppsala universitet och omfattar 30 hp. Arbetet har genomförts på Käppalaverket för Institutionen för informationsteknologi på Uppsala universitet.

### **Handledare:**

Anna Maria Sundin, Käppalaförbundet

### **Ämnesgranskare:**

Bengt Carlsson, Institutionen för Informationsteknologi, Uppsala universitet

Jag vill ge ett stort tack till min handledare, Anna Maria Sundin för all hjälp jag fått. Tack även Bengt Carlsson för ditt engagemang i den mer teoretiska delen i arbetet.

Ett sista tack till alla på Käppalaverket! Under hela den tid jag varit här har jag känt mig välkommen och fått stort stöd. Ett särskilt tack till Torsten Palmgren som hjälpt till lite extra med examensarbetet.

Copyright © Katarina Norén och Institutionen för Informationsteknologi, Uppsala universitet

UPTEC W 09 009, ISSN 1401-5765

Tryckt hos Institutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala universitet, Uppsala, 2009.

## Populärvetenskaplig sammanfattning

Käppalaverket är Sveriges tredje största reningsverk. Det tar emot avloppsvatten från elva kommuner i norra Stockholm. Vattnet renas från kväve, fosfor och organiskt material och släpps sedan ut utanför Lidingö i Halvkakssundet i Stockholms skärgård. Reningsprocessen börjar med att fasta partiklar tas bort i silgaller, sandfång och sedimenteras i försedimenteringsbassänger. Sedan leds vattnet till verkets biologiska reningssteg som är uppdelat i två linjer. I båda linjerna renas vattnet från organiskt material och kväve i en aktivslamprocess. I ena linjen sker en simultanfällning för att fälla ut löst fosfor och i andra delen renas vattnet från fosfor med biologisk fosforrening. Bakterier och annat organiskt material sedimenteras i eftersedimenteringsbassänger och en stor del av det slam som bildas, pumpas tillbaka till aktivslamprocessen för att hålla processen igång. En sista justering av fosfor sker genom att en fällningskemikalie tillsätts vattnet då de filtreras genom sandfilter.

Det slam som bildas i för- och eftersedimenteringen pumpas till röt-kammare där det rötas. Rötning innebär att organiskt material bryts ned med hjälp av en mängd olika sorters bakterier till koldioxid och metangas. Detta sker i en miljö som är syrefri. På Käppala finns två röt-kammare där detta sker. Dessa är kopplade i serie och den första röt-kammaren tar emot primärslam från försedimenteringen. Det rötade slammet pumpas sedan till den andra röt-kammaren som även tar emot det slam som kommer från eftersedimenteringen.

Gasen som bildas i verket förbränns för tillfället i fyra gaspannor. En del av värmen som produceras värmer verket. Resten säljs som fjärrvärme. År 2010 kommer Käppalaverket att inleda en försäljning av uppgraderad biogas till 100 SL-bussar. Med anledning av detta skapades ett intresse att bättre kunna förutse biogasproduktionen vilket resulterade i detta examensarbete. Syftet med arbetet är att undersöka modeller till ett prognosverktyg för Käppalaverkets biogasproduktion. Huvudaspekter som undersöktes var prediktionshorisont för prognosverktyget, nyckelparametrar för röttningsprocessen och om det skulle gå att styra processen för en jämnare gasproduktion. I utvärderandet av modeller användes multivariat analys på data från processen. Det verktyg som användes var PCA (principalkomponentanalys).

De modeller som utvärderades var både empiriska och fysikaliska. De empiriska modeller som utvärderades var linjära parametriska modeller. Av de modeller som undersökts var en empirisk modell med insignalen inkommande organiskt material till röt-kammarna mest lämpad att använda i ett prognosverktyg. Det gjordes försök att använda ytterligare insignaler, såsom temperatur, pH och uppehållstid, men ingen variabel visade sig ge bättre resultat än modellen med enbart organiskt material. Modellerna som undersökts fokuserar på snabba variationer och kan inte på ett tillfredställande sätt simulera variationer över längre perioder såsom veckor.

Den fysikaliska modellen grundades på sambandet mellan inkommande organiskt material och biogasproduktion. Ett mått som används för att beskriva detta samband är den specifika gasproduktionen som beskriver hur mycket gas som en viss mängd organiskt material producerar utifrån dess uppehållstid i röt-kammarna. Den specifika gasproduktionen hade beräknats i tidigare försök på Käppala och den informationen användes i modellen. Vid simulering av biogasproduktionen med den fysikaliska modellen visades det att den simulerade biogasproduktionen varierade mer än den uppmätta. Detta berodde på att för stor

vikt lades på inkommande organiskt material och för lite på de rådande förhållandena i rötammarna.

Den prediktionshorisont som visats mest givande att använda i ett framtida prognosverktyg på Käppalaverket var ett till ett antal dygn. Med den framförhållningen skulle det vara möjligt att utveckla ett samband mellan inkommande vatten och mängd organiskt material till rötammarna. Detta skulle användas för att skatta insignalen, organiskt material, till modellerna. Om en längre tidshorisont skulle användas blir osäkerheterna i inkommande organiskt material för stora och prediktionerna inte tillförlitliga. Med statistik från tidigare år och kunskap om hur processen gått blir uppskattningar av gasproduktionen för längre perioder framåt tillräckliga. En kortare tidshorisont än ett dygn är inte nödvändig för Käppalaverket.

Inkommande organiskt material till rötammarna var en nyckelparameter för både de empiriska och de fysikaliska modellerna. Det organiska materialet kommer till största delen som primärslam från försedimenteringen efter den mekaniska reningen i verket. Om primärslammets mängd och kvalitet kunde skattas skulle bättre prediktioner kunna göras.

De variabler som främst påverkar primärslammet är inkommande vattenflöden och dess innehåll av organiskt material samt i vilken form det organiska materialet finns. En faktor som delvis påverkar detta är storleken på vattenflödena och den nivå som hålls i tunnelsystemet till reningsverket. Ökade flöden i tunneln leder till att mindre material sedimenterar till botten och följer med till verket istället. Vid jämna flöden sedimenterar material i de kommunala avloppsnäten och i tunneln. Dessa följer med vattnet om flödena ökar, vilket det gör vid exempelvis regnskurar. Då kommer mycket rens och slam initialt med det inkommande vattnet. Kommer ytterligare en skur som ökar flödena bidrar inte denna till en ökning av primärslam då den tidigare flödestoppen ”rensar” systemen.

En fortsättning på utvecklandet av prognosverktyget är att använda en empirisk modell med insignal och att skatta den rekursivt med en glömskefaktor. Modellen blir då bättre lämpad att simulera biogasproduktionens långsamt varierande förhållanden samtidigt som den kan fokusera på de snabba variationerna. Till denna modell används de skattade värdena på insignalen organiskt material.

## Innehållsförteckning

1	INLEDNING	2
1.1	BAKGRUND OCH SYFTE FÖR EXAMENSARBETET	2
2	BAKGRUND	4
2.1	RÖTNING	4
2.1.1	Mikroorganismerna	4
2.1.2	Processer för rötning	7
2.2	KÄPPALAVERKET	7
2.2.1	Käppalaverkets rötningsprocess	10
2.2.2	Substraten till rötningen	11
2.3	MODELLERING	11
2.4	AVGRÄNSNINGAR	12
3	METODER OCH TEORI	12
3.1	BEARBETNING AV DATA	13
3.1.1	Filtrering av data	13
3.1.2	Normalisering av data	14
3.2	KONTROLL AV INDATA	14
3.2.1	Gasflöde	14
3.2.2	TS-halt i inkommande primärslam	15
3.3	MULTIVARIABEL ANALYS	15
3.3.1	Principalkomponentanalys, PCA	15
3.4	EMPIRISK MODELLERING	17
3.4.1	Kalibrering av modellen	17
3.4.2	Använda modellstrukturer	17
3.4.3	Förutsättning för empirisk modellering	18
3.5	FYSIKALISK MODELLERING	18
3.5.1	Utveckling av den fysikaliska modellen	20
3.6	PREDIKTION	20
3.6.1	Prediktion av AR- och ARMA-modeller	20
3.6.2	Prediktion av övriga modeller	20
3.7	SAMBAND MELLAN INKOMMANDE FLÖDE OCH PRIMÄRSLAMFLÖDE	20
3.8	VALIDERING AV MODELL	21
4	RESULTAT	23
4.1	BIOGASPRODUKTIONEN – STATISTIK	23
4.2	UNDERSÖKNING AV RÖTNINGSPROCESSEN MED PCA	24
4.2.1	Variationer i rötningsprocessen över tiden	24
4.2.2	Påverkan av val av samplingsintervall	26
4.2.3	Korrelation mellan variabler från rötningsprocessen	26
4.3	MODELLERING OCH PREDIKTION MED EMPIRISKA MODELLER	28
4.3.1	Val av kalibreringsperiod	28
4.3.2	AR- och ARMA-modeller	30
4.3.3	ARX-modeller	32
4.3.4	Övrig analys av de empiriska modellerna	33
4.3.5	Jämförelse modeller	35
4.4	MODELLERING MED FYSIKALISK MODELL	36
4.5	SAMBAND MELLAN INKOMMANDE FLÖDEN, NIVÅ I SVALLSCHAKT OCH PRIMÄRSLAMPRODUKTION	37
5	DISKUSSION	42
5.1	PREDIKTIONSHORISONT	42



5.2	MULTIVARIABEL ANALYS .....	42
5.3	EMPIRISK MODELLERING .....	43
5.3.1	Filtrering av data .....	43
5.3.2	Antal parametrar .....	43
5.3.3	Variation av statistik för biogasproduktionen .....	44
5.4	FYSIKALISK MODELLERING .....	44
5.5	OSÄKERHETER I MODELLERINGEN .....	44
5.5.1	Inkommande organiskt material, VS .....	44
5.6	UTVECKLING AV PROGNOSEVERKTYGET .....	45
5.6.1	Samband mellan inkommande flöden, nivå i svallschakt och primärslamproduktion .....	45
5.6.2	Rekursiv skattning med glömskefaktor .....	45
6	REFERENSER .....	46
	APPENDIX A - Prediktion av AR-modeller .....	48
	APPENDIX B - Utveckling av fysikalisk modell med PCA .....	49

## ORDLISTA

**Alkalinitet** – buffertkapacitet, beräknas som mängd  $\text{CaCO}_3$  / mängd vätska

**Belastning** – den mängd som förs in i rötkammaren per tidsenhet, kan mätas i exempelvis hydraulisk eller organisk belastning.

**Empirisk** – baserad på mätdata.

**GR, glödrest** – det som återstår då slammet förbränts i  $600^\circ\text{C}$  i minst en timme. Anges som %-andel av TS.

**Hydrolys** – den process som sker när mikroorganismer bryter ned organiskt material med hjälp av enzymer.

**Nedbrytningsgraden, sönderdelningsgrad, utrötningsgrad** eller **stabiliseringsgrad** – hur stor andel av mängden infört organiskt material som brutits ned i röttningsprocessen.

**Normalkubikmeter** – standardenhet som beskriver den volym som en gas skulle ha vid atmosfärstryck och  $0^\circ\text{C}$ .

**PCA, principal component analysis, principalkomponentanalys** – en projiceringsmetod som används för att minska datamängdens dimension samt hitta samband mellan variabler.

**Primärslam** – det slam som kommer från försedimenteringen.

**Projicering** – avbildning av data från ett system till ett annat (i denna rapport).

**q** – förskjutningsoperator. T ex:  $q y(t) = y(t+1)$ ,  $y(t) q^{-1} = y(t-1)$ ,  $y(t) q^{-7} = y(t-7)$

**Rens** – de större partiklar som finns i avloppsvattnet och som silas bort i den mekaniska reningen.

**Rötning** – nedbrytning av organiskt material i syrefri miljö.

**SGP, Specifik gasproduktion** – den mängd gas som produceras per viktenhet organiskt material som pumpas in i rötkammaren.

**TS, Torrsubstans** – den andel av slammet som är kvar efter torkning av slammet i  $105^\circ\text{C}$  under 24 h.

**Uppehållstid** – den tid som slammet befinner sig i rötkammaren.

**VS, Volatile solids** – mått på slammets innehåll av organiskt material. VS beräknas genom att subtrahera glödresten från TS.

**Överskottsslam** – kallas även bioslam. Överskottsslam är det slam som sedimenterar i eftersedimenteringen efter den biologiska reningen i reningsverket där aktivslamprocessen sker.

# 1 INLEDNING

Sedan mer än femtio år tillbaka har vi kunnat använda oss av lättillgänglig energi i form av olja. Dagens samhälle har byggts upp efter de förutsättningar som getts och idag finns ett tydligt beroende av produkter som, direkt eller indirekt, härstammar från oljan.

Förbränning av olja och andra fossila bränslen leder till utsläpp av bland annat koldioxid som är en växthusgas. Idag är det bekräftat av en stor majoritet forskare världen över att dessa utsläpp bidrar till en förhöjd växthuseffekt och att detta leder till klimatförändringar på jorden (IPCC, 2001). Då oljan även räknas som en ändlig naturresurs är det högaktuellt att hitta alternativ som kan ersätta den.

Biogas är en energirik gas som i vissa användningsområden kan fungera som alternativ till oljan. Biogas består till största delen av metan och koldioxid och skapas vid nedbrytning av organiskt material i syrefria miljöer. Detta kallas rötning. Vid förbränning av biogas kan bland annat värme och el produceras. Om andelen metan i gasen höjs kan biogas dessutom användas som drivmedel för fordon.

Kunskapen om att rötning ger biogas har funnits under lång tid. Redan under tidigt 1800-tal byggdes stora biogasanläggningar i Indien för att utveckla storskaliga röttningsprocesser och produktion av biogas. I Kina har tekniken också används länge men i mindre skala och idag finns det miljontals små biogasanläggningar som ger värme och belysning för ca 25 miljoner personer (Thyselius, 1982).

År 2007 fanns det 226 biogasanläggningar i Sverige som totalt producerade 204 miljoner normalkubikmeter (Nm<sup>3</sup>) biogas (Svenska Gasföreningen och Svenska Biogasföreningen, 2008). Detta motsvarar ungefär samma mängd energi som i 135 miljoner liter bensin. Mest biogas produceras från anläggningar anslutna till reningsverk (Tabell 1).

**Tabell 1 Biogasproduktion från olika typer av anläggningar samt dess relativa biogasproduktion.**

	Biogasproduktion (miljoner Nm <sup>3</sup> )	Andel av total biogasproduktion (%)
Industriella avlopp	13,4	6,6
Lantbruk	2,2	1,0
Samrötning avfall	26,8	13,2
Deponier	69,4	34,0
Avloppsreningsverk	92,1	45,2

## 1.1 BAKGRUND OCH SYFTE FÖR EXAMENSARBETET

Käppalaverket är ett av Stockholms tre stora avloppsreningsverk. Det ligger på Lidingö, nordost om Stockholm. Verket renar avloppsvattnet med mekanisk, biologisk och kemisk rening samt genom sandfilter. Verket har även en anläggning där det producerade avloppsslammet rötas för att sedan användas i jordbruk som gödsel och jordförbättringsmedel. I röttningsprocessen produceras biogas som förbränns och den värme som bildas värmer verket samt säljs till Fortum som fjärrvärme.

I juni 2010 kommer Käppalaverket börja leverera fordonsgas, biogas med högre metanhalt, till SL för att driva 100 biogasbussar. För att kunna hålla sina avtal är det av intresse för Käppalaverket att kunna göra prognoser över biogasproduktionen.

Detta examensarbete syftar till att undersöka möjligheterna att ta fram en modell som kan användas som prognosverktyg för producerad mängd biogas.

Frågeställningar som kommer att utredas:

- Kan man göra prognoser över gasproduktionen och i vilken utsträckning?
- Hur långt fram i tiden går det att göra rimliga prognoser?
- Vilka är mätbara nyckelparametrar i prognosverktyget?
- Går det att styra nyckelparametrarna så att det blir en jämnare gasproduktion än idag?

## 2 BAKGRUND

För att skapa modeller krävs en grundförståelse över det system som ska modelleras. Detta gäller oavsett om de modeller som skapas är empiriska<sup>1</sup> eller fysikaliska. I detta examensarbete gjordes en grundlig litteraturstudie för att förstå rötningsprocessen och verkets olika aktiva delar.

### 2.1 RÖTNING

Rötning kallas den spontana process som sker när mikroorganismer bryter ned organiskt material i syrefri miljö (Jarvis, 2004). Ur processen erhålls en rötrest och energirik biogas. Gasen innehåller som nämnts metan och koldioxid men även små mängder av svavelväte, ammoniak och kvävgas.

I Sverige sker rötning främst storskaligt i röttnings- eller biogasanläggningar. I sådana anläggningar rötas det organiska materialet i röt-kammare. Det organiska materialet kallas även substrat och kan vara matavfall, stallgödsel, avfall från slakterier, avfall från livsmedelsindustrin, energigrödor, avloppsslam mm (Svenska Gasföreningen och Svenska Biogasföreningen, 2008).

Det finns många fördelar med rötning av slam och annat avfall utöver att biogas produceras. Nedan följer några exempel (VAV, 1981; Bruce, 1984; Inger, 1997):

- Slammängderna reduceras.
- Antalet eventuella patogener från människor och djur som finns i slammet reduceras.
- Näringsämnen i rötresten blir mer homogent fördelade och mer lättillgängliga för växter.
- Slammet stabiliseras och blir mer lätthanterligt för spridning.
- Rötresten innehåller en hög halt av organiskt material (humus) som förbättrar odlingsjordens mullhalt.
- Utsläpp av metan från gödsel minskar om det rötas innan det läggs på åkern.

Hanteringen av slam är klassat som miljöfarlig verksamhet och regleras enligt miljöbalken. I Sverige bygger de flesta regler på EG Direktiv (Naturvårdsverket, 2007). Förutom lagar och förordningar finns ett kvalitetssäkringssystem, Revaq, som administreras av Svenskt Vatten. De arbetar för att både sätta upp kvalitetskriterier och förbättra kvalitén för avloppsslam (Revaq, 2008). Käppalaverkets slam är certifierat enligt Revaq-systemet sedan 2008.

#### 2.1.1 Mikroorganismerna

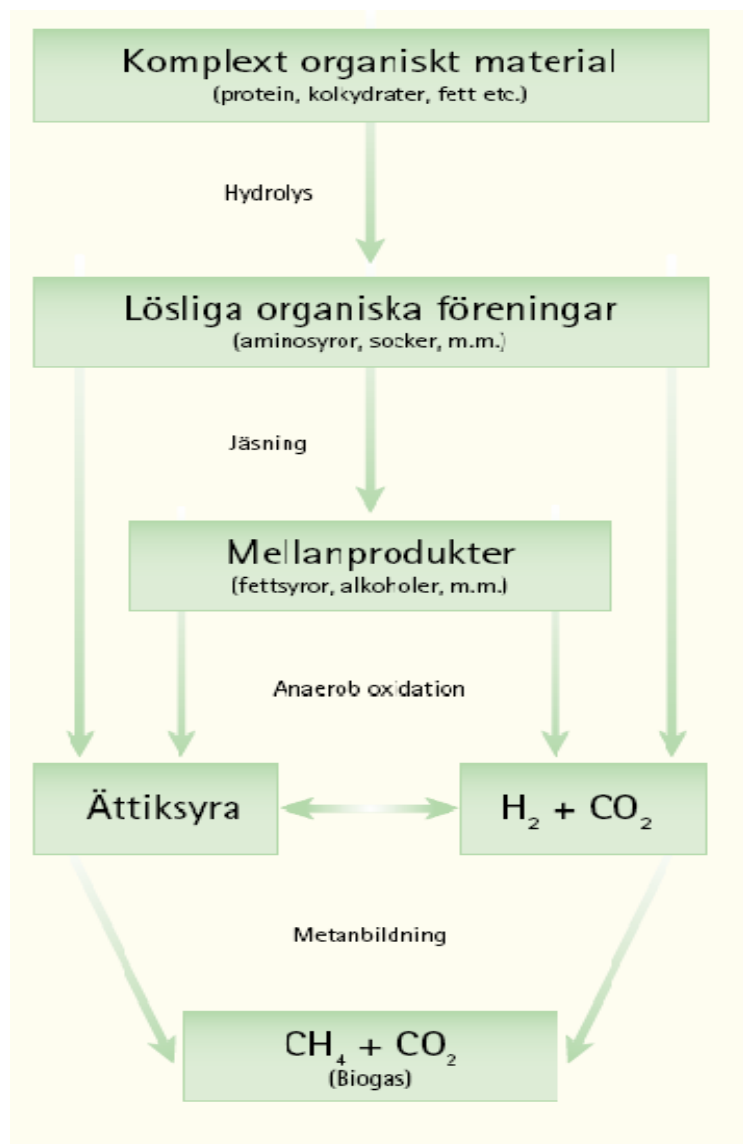
Rötningsprocessen sköts av olika grupper av mikroorganismer. De är vanligt förekommande i naturen och följer med substratet in till röttningsanläggningen (Jarvis, 2004). Förloppet är komplicerat och hänger samman i flera olika steg där varje steg är beroende av de andra. En illustrativ beskrivning av rötningsprocessen visas i Figur 1.

---

<sup>1</sup> Beskrivs i ordlista

I första steget sker en *hydrolys* av stora molekyler med hjälp av extracellulära enzymer från hydrolytiska bakterier (Jarvis, 2004). Substratet blir då mer lättillgängligt och används av fermenterande bakterier som skapar flyktiga fettsyror genom *jäsning*. I detta steg skapas bland annat ättiksyra, koldioxid och vätgas som kan omvandlas till metan. De övriga fettsyrorna bryts ner till ovan nämnda produkter i så kallad *anaerob oxidation*.

Metanbildningen sker med hjälp av *metanbildande bakterier* som omvandlar ättiksyra, koldioxid och vätgas till metan (Jarvis, 2004).



Figur 1 Schematisk bild över de olika stegen i rötningsprocessen (Jarvis, 2004)<sup>2</sup>

Då mikroorganismerna är rötningsens motor är det viktigt att de fungerar som de ska. Nedan listas några viktiga parametrar som påverkar mikroorganismerna:

- *Substratet*  
Vilket substrat som rötas påverkar resultatet vad gäller nedbrytningsgrad (se nedan) och gasens sammansättning. De grundkomponenter i substratet som kan brytas ned av

<sup>2</sup> Med tillstånd från Svenska biogasföreningen

mikroorganismerna är kolhydrater, fetter och protein. Andra ämnen såsom cellulosa och lignin är svårnedbrytbara och ger litet tillskott till gasproduktionen.

Kolhydrater, fett och protein ger olika tillskott till gasproduktionen. Fett och protein ger exempelvis högre andel metan i gasen och fett ger mest biogas per viktenhet (VAV, 1981).

Tre mått som används för att beskriva substratet är *torrsubstans*, TS, *glödrest*, GR och *lättflyktiga syror*, VS (volatile solids).

- TS är den mängd som finns kvar i ett prov efter att all vätska torkats bort. På Käppala beräknas det enligt svensk standard SS 02 81 13 vilket innebär att provet torkas 20 timmar i 105 °C (Karat, 2009, Pers. kom.).

- GR representerar andel oorganiskt material. Liksom TS beräknas det på Käppala enligt SS 02 81 13 dvs det som återstår av slammet efter 2h i 550 °C (Karat, 2009, pers. kom.).

- VS mäter mängd organiskt material i slammet och räknas ut genom att subtrahera mängden oorganiskt material, GR, från TS-mängden (VAV, 1981).

- *Uppehållstid*

Den tid som slammet befinner sig i röt-kammaren kallas uppehållstid och beräknas enligt ekvation (3.1). Ju längre tid slammet rötas, ju längre tillåts processen gå vilket leder till högre utrottningsgrad av slammet.

$$T_u = \frac{V}{Q} \quad (3.1)$$

där  $T_u$  är uppehållstid,  $V$  är röt-kammarens volym och  $Q$  är inkommande flöde.

- *Belastning*

Belastning är starkt kopplad till uppehållstid och beskriver den mängd slam som förs in i röt-kammaren per tidsenhet. Beroende på fokus kan man räkna på exempelvis hydraulisk belastning eller organisk belastning.

För att få en hög utrotning behövs en lång uppehållstid och alltså låg hydraulisk belastning. Däremot är det onödigt att låta uppehållstiden bli för lång eftersom rötningen går snabbast just när slammet pumpats in. Något som bör undvikas är att ha en alltför hög belastning. Då finns en risk att mikroorganismerna inte hinner växa till och i värsta fall slussas de ut ur processen. De metanproducerade bakterierna är de med lägst tillväxthastighet. En överbelastning ses ofta genom att mängden flyktiga syror ökar eftersom bakterierna som producerar metan konsumerar dessa.

- *Temperatur*

Temperatur är en faktor som påverkar mikroorganismernas metabolism. Enligt Thyselius (1982) blir processen snabbare men mer ostabil ju varmare det är. Det är omdiskuterat vilken temperatur som är optimal för processen men viktigt är att den inte varierar för mycket (VAV, 1981).

Det finns tre olika temperaturintervall för röttningsprocessen; *psykrofil* (4-20°C), *mesofil* (20-40°C) och *termofil* (50-60°C). Mesofil och termofil rötning är vanligast för biogasanläggningar i Sverige (Thyselius, 1982). På Käppala drivs processen mesofilt.

- *pH-värde och alkalinitet*  
Mikroorganismerna är känsliga för förändringar i pH samt för låga pH-värden (VAV, 1981). Om pH sjunker under 6,2 kan det skada processen (Thyselius, 1982).

Alkaliniteten fungerar som buffert och stabiliserar pH. Den beror av innehållet i substratet, nedbrytningen av proteiner och den producerade gasens koldioxidhalt (Bruce, 1984). Bikarbonatalkaliniteten beror av totalalkaliniteten och mängd flyktiga fettsyror (VAV, 1981).

- *Syre*  
Rötningsprocessen är anaerob och hämmas av syre. Det är därför viktigt att hålla nere syrehalten för att processen ska fungera.
- *Giftiga ämnen*  
Starkt oxiderande ämnen, såsom nitrat, antibiotikapreparat samt tungmetaller i hög halt är giftiga för mikroorganismerna och hämmar processen (Thyselius, 1982).

Följande parametrar är användbara vid kontroll av rötningsprocessen:

- *Specifik gasproduktion*  
Den specifika gasproduktionen, SGP, står för hur stor mängd gas som produceras per viktenhet organiskt material som pumpas in i röt-kammaren (VAV, 1981).
- *Nedbrytningsgraden*  
Nedbrytningsgraden kallas även sönderdelningsgrad, utrötningsgrad eller stabiliseringsgrad. Den beskriver hur stor andel av tillfört organiskt material som brutits ned (VAV, 1981).

### 2.1.2 Processer för rötning

Beroende på substratet och vilket syfte man har med rötningen utformas processen olika (Inger, 1997):

- Satsvis process – Tillförseln av substrat sker satsvis och varje sats behandlas separat under processen
- Kontinuerlig process – Substratet tillförs kontinuerligt. Denna process är vanlig på avloppsreningsverk då substratet (slammet) är pumpbart.

Ett annat sätt att dela in processen i är enstegs- och tvåstegsprocess. I enstegsprocessen rötas substratet i ett steg. I tvåstegsprocessen däremot delas den upp i två eller flera steg. Hydrolysen och bildandet av flyktiga fettsyror sker i det första steget och övriga processer i det andra. (Bungay och Abdelwahab, 2008)

## 2.2 KÄPPALAVERKET

År 1969 invigdes Käppalaverket på Lidingö. Det byggdes på initiativ av ett antal kommuner i norra Stockholm som tillsammans bildade Käppalaförbundet. Antal medlemskommuner är idag 11 st, se Figur 2. Under 90-talet genomfördes en utbyggnad av verket för att möta kravet på kväverening och den ökande belastningen samt övriga aspekter som bland annat arbetsmiljön. Under 2009 kommer medlemskommunen Värmdö att ansluta sitt avloppsvatten



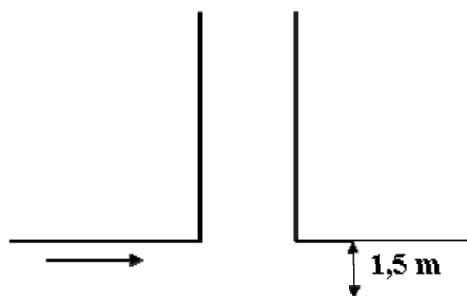
till Käppala. När anslutningen till Värmdö kommun är invigd förväntas den totala belastningen motsvara cirka 540 000 personekvivalenter, pe (Palmgren, 2009, Pers. kom.).

Avloppsvattnet samlas upp från kommunerna i den 65 kilometer långa huvudtunneln (Figur 2). Tunneln har en genomsnittlig lutning på en promille och förutom tre pumpstationer rinner vattnet med självfall hela vägen. Från Arlanda, som ligger längst bort, tar det cirka 20 timmar för vattnet att nå reningsverket (Palmgren, 2008, Pers. kom.). På Lidingö används tunneln som buffertsystem vid höga flöden.

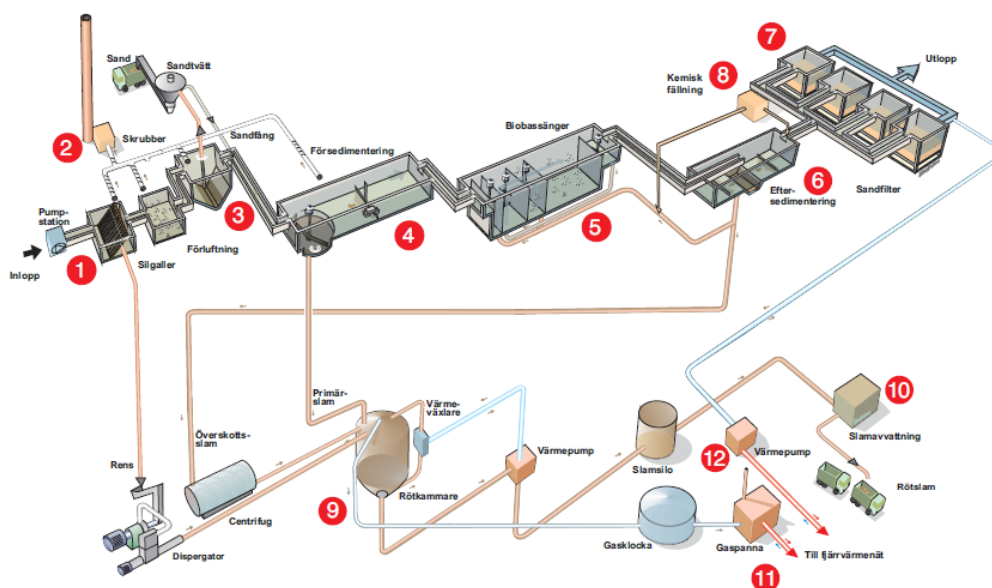


**Figur 2** Källaförbundets medlemskommuner. De röda strecken visar huvudledningen till Käppala.

När vattnet kommer till Käppala ligger det på mer än 18 meters djup. Inkommande vatten från alla kommuner förutom Värmdö och Nacka går via ett svallschakt (se Figur 3). Svallschaktet fungerar som ett kommunicerande kärl mot tunneln och visar hur högt vattnet står i tunneln. Det används även för att ta emot tryckstötter i inkommande vatten. Vattnet pumpas sedan upp till verket. Figur 4 visar en översiktsbild över verket som ligger insprängt i berget.



**Figur 3** Svallschaktet innan inloppspumparna.



Figur 4 Reningsförloppet på Käppalaverket. I Tabell 2 finns betydelsen för siffrornas i bilden beskrivna.

Tabell 2 Beskrivning till Figur 4

1	Silhäll
2	Skrubber (rening av ventilationsluft)
3	Sandfång
4	Försedimentering
5	Biobassänger
6	Eftersedimentering
7	Sandfilter
8	Kemisk fällning
9	Slambehandling
10	Slamavvattning (Kemikondprocess)
11	Värmecentral
12	Värmepump

Det första steget i reningen är den mekaniska reningen som består av silgaller där större partiklar, så kallat rens tas bort. Renset mals och förs till rötningssteget. Vattnet leds sedan till fyra sandfång där tyngre partiklar såsom sand och kaffesump sjunker till botten. Efter sandfånget leds en tredjedel av vattnet till den gamla delen av verket och två tredjedelar till den nya delen för den första sedimenteringen i försedimenteringsbassänger. Där sedimenteras grövre partiklar i vattnet. Det sedimenterade slammet pumpas till rötningssteget som primärslam.

I det följande biologiska steget renas vattnet från kväve, fosfor och organiskt material i en aktivslamprocess. I omväxlande luftade och oluftade zoner omvandlas kväveföreningar via nitrifikation och denitrifikation till kvävgas. I processen oxideras organiskt material av mikroorganismer. Vid detta steg renas vattnet även från fosfor via biologisk fosforrening i den gamla delen av verket och via tillsatts av tvåvärt järnsulfat i den nya delen av verket. Mikroorganismerna, organiskt material och den fosfor som fällts ut sedimenteras i eftersedimenteringsbassänger. För att det ska vara tillräckligt med mikroorganismer i

aktivslamprocessen, pumpas den största delen av det sedimenterade slammet tillbaka till det biologiska steget. Resten pumpas till rötningssteget som överskottsslam.

I det sista steget rinner vattnet genom sandfilter för att de partiklar som finns kvar ska fångas upp. Här sker också en tillsats av fällningskemikalien, järnsulfat, för att fälla ut den sista mängden löst fosfor. Slutligen leds det renade avloppsvattnet ut i Halvkakssundet på 45 meters djup 100 meter ut från land. Det har då passerat verkets reningsprocesser på mellan ett och två dygn (Johansson, 2007).

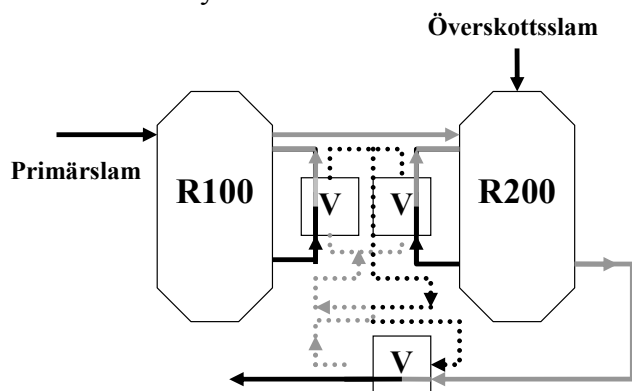
Allt slam som kommer från för- och eftersedimenteringen samt rensat från silgallren pumpas till rötningssteget för att rötas. Rötningssteget beskrivs mer i avsnitt 2.2.1. Det rötade slammet leds till cisterner som används som buffertvolym innan det pumpas till en slambehandlingsprocess med syfte att underlätta slamavvattningen. På Käppala används en Kemicondprocess. Avvattningen av slammet görs i tre silbandspressar samt en hydraulisk press. Det avvattnade slammet transporteras bort och används i jordbruket.

Gasen som produceras leds via en gasklocka till fyra gaspannor där den förbränns. År 2008 producerades cirka 30 GWh varav 25 GWh såldes till Fortum som fjärrvärme (Palmgren, 2009, Pers. kom.).

### 2.2.1 Käppalaverkets rötningsprocess

Käppalaverket har rötat sitt slam sedan det togs i drift 1969. Det ansågs då vara den bästa lösningen för att hantera slammet eftersom slammängderna minskar samtidigt som biogas produceras. Då liksom idag brände man gasen i gaspannor och värmen användes till att värma upp slammet i rötammaren samt Käppalaverkets lokaler. När det produceras mer gas än det finns kapacitet att bränna i gaspannorna, facklas gasen.

Rötningen sker i två cylindriska rötammare (Figur 5) som är nedsprängda i berget. De är 30 meter djupa och 28 meter i diameter. Båda rötammarna är konformade upptill och i botten. Vardera har volymen 9000 m<sup>3</sup>.



Figur 5 Principskiss över Käppalaverkets rötningssteget där recirkulationsströmmar och värmeväxlare är inkluderade. Heldragna linjer visar slammets väg och prickade linjer vattnets. Ljus färg symboliserar varmt flöde och svart kallt flöde.

Under åren har olika utredningar gjorts för att se hur rötningsprocessen kan utnyttjas mer effektivt. De senaste projekten drevs under perioden 2004 – 2005 då rötningkapaciteten i anläggningen utvärderades och under perioden 2006 – 2007 utvärderades behovet av en tredje rötammare. Resultaten från projekten har lett till det driftfall som används idag.

Käppala kör rötningen i rötkammarna i s.k. parallell seriedrift. Primärslam och rens pumpas till R100. Från den pumpas slammet till den andra rötkammaren, R200. Hit pumpas även överskottsslam som centrifugerats. Från R200 leds slammet till avvattning.

Den totala uppehållstiden i rötkammarna varierar mellan 20 och 35 dygn (Borglund, 2005). Uppehållstiden är kortare i andra rötkammaren eftersom den hydrauliska belastningen är högre där då R200 även tar emot slam från det biologiska reningssteget utöver slammet som pumpas från första rötkammaren. Slammet hålls på en nivå av cirka 25 meter som ger en buffertvolym om det skulle uppstå skumning. Detta minskar den använda volymen.

Processen för rötningen är kontinuerlig och det är viktigt att slammet hela tiden är väl blandat. Vardera rötkammare har en omrörare samt en recirkulationsström. Spårämnesförsök har genomförts och resultatet från dessa visade att inkommande slam snabbt, inom ett par timmar, totalblandas med slammet i rötkammaren (Bergman, 2008, Pers. kom).

Rötningen sker mesofilt i temperaturintervallet 34-37 °C (Borglund, 2005). Temperaturen hålls jämn och på rätt nivå med hjälp av värmeväxlare (se Figur 5). Det finns tre värmeväxlare, en som tar vara på energin i utgående slam och två som värmer upp slammet i vardera rötkammarens recirkulationsströmmar.

### **2.2.2 Substraten till rötningen**

I dagsläget tar rötkammarna emot tre olika typer av substrat; primärslam, överskottsslam från aktivslamprocessen och rens från det mekaniska reningssteget.

Primärslammet är det som ger mest biogas. Det kommer direkt från försedimenteringen och har inte gått igenom aktivslamprocessen. Lättillgängliga näringsämnen finns därför kvar att använda för mikroorganismerna i röttningssteget (Leksell, 2005). Primärslammet pumpas kontinuerligt från den nya delen och intermittent<sup>3</sup> från den gamla delen av verket. Regleringen av pumpningen sker både automatiskt och manuellt. Den manuella styrningen görs veckovis baserade på kontroller av slamnivåerna i försedimenteringsbassängerna (Söderberg, 2009, Pers. kom.).

Renset pumpas med primärslammet och står för ca 1 % av inkommande TS till R100. Det bidrar marginellt till gasproduktionen och försummas i beräkningarna.

Överskottsslammet kommer från eftersedimenteringen från det biologiska reningssteget. Det står för cirka 20 % av den biogas som produceras. Hur mycket överskottsslam som pumpas till röttningssteget styrs av slamproduktionen i det biologiska reningssteget och om slamhalten där behöver förändras. Detta varierar med årstid och regleras manuellt.

## **2.3 MODELLERING**

Röttningsprocessen är, som beskrivet ovan, en komplicerad process. Den beror av samspelet mellan många processer och olika mikroorganismer, vilket substrat som används samt de fysikaliska förhållandena i rötkammaren. Det finns olika tillvägagångssätt för att skapa modeller över detta system; empirisk modellering som enbart bygger på dataobservationer, fysikalisk modellering som beskriver systemet utifrån kända samband och lagar samt så kallad ”grey-box” modeller som är en kombination av de två ovan nämnda modelltyperna.

---

<sup>3</sup> Beskrivs i ordlista

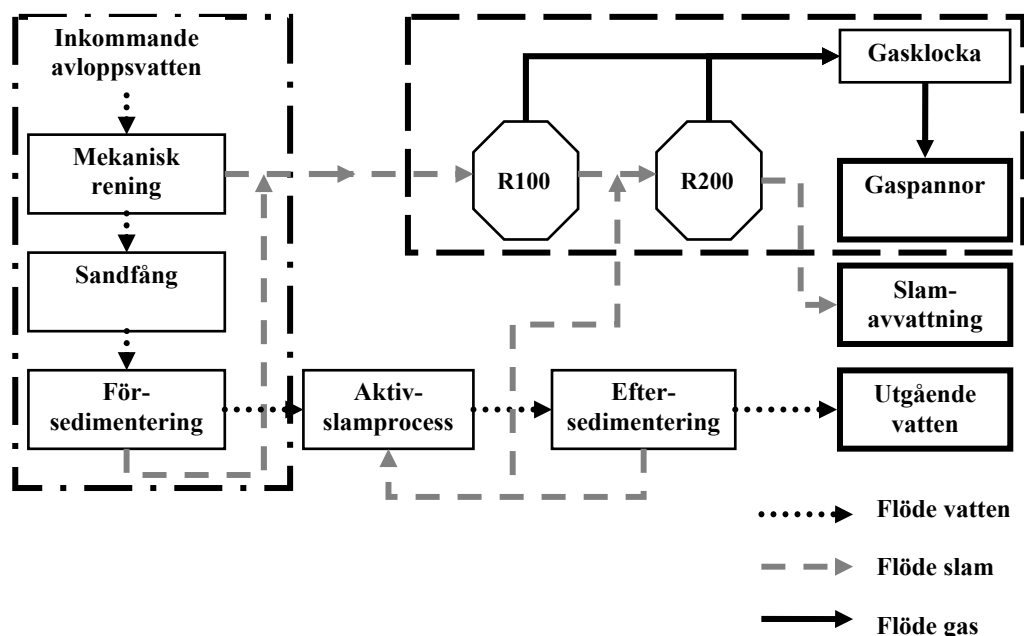
För rötningsprocessen existerar det ett antal fysikaliska modeller. En av de mer djupgående och omtalade är Anaerobic Digestion Model, ADM, (Batstone m.fl., 2002) som med hög detaljeringsgrad beskriver de fysikaliskt kemiska och biokemiska processerna i rötningen. Det finns andra fysikaliska modeller, mindre detaljerade än ADM-modellen, som istället fokuserar på de delprocesser som antas vara tidsbegränsande för systemet (Costello m.fl., 1991 och Bernard m.fl. 2006).

Rent empiriska modeller över olika rötningsprocesser är som nämnts ett alternativt sätt att simulera gasproduktionen. De används på olika biogasanläggningar, exempelvis vid ett reningsverk på potatisfabrik (Barampouti m.fl., 2005) och rötning av avfall från en hönsindustri (Yetilmezsoy och Sakar, 2007). De empiriska modellerna blir mindre komplexa och skräddarsydda för den process som modellen skapats för.

Utvecklandet av den modell som skulle ligga till grund för prognosverktyget för Käppalaverkets rötningsprocess skedde genom att leta efter både empiriska och fysikaliska samband. I detta examensarbete lades fokus på att hitta ett lätthanterligt prognosverktyg byggt på empiriska modeller. ADM-modeller ansågs kräva för stora resurser vad gäller data och kalibrering och vara för komplicerade för att fungera som ett dagligt verktyg för ordinarie driftenhet.

## 2.4 AVGRÄNSNINGAR

Ett naturligt upplägg för examensarbetet blev att börja utvärdera de mest grundläggande sambanden i biogasproduktionen, d.v.s. hur mycket slam som pumpas till röttkammarna och vilken gasproduktion det resulterar i (streckad linje i Figur 6). För att få längre framförhållning i prognosverktyget fortsatte arbetet med att modellera hur slamproduktionen påverkades uppströms i verket (streckad och prickad linje i Figur 6).



Figur 6. Schematisk bild över Käppalaverkets renings- och rötningsprocess. Inom den streckade linjen visas de processer som undersöktes primärt till prognosverktyget. Streckad och prickad linje visar det som undersöktes sekundärt.

För att undersöka förutsättningarna för det framtida prognosverktyget på Käppalaverket användes två huvudmetoder iterativt:

1. Bivariat och multivariabel analys av data
2. Utvärdering av olika modeller

Analysen av data gjordes till stor del med empiriska analysverktyg. Däremot diskuterades samband mellan variabler samt möjliga infallsvinklar till modeller även med anställda på Käppalaverket.

I sökandet efter en eller flera lämpliga modeller för att prediktera biogasproduktionen hölls följande frågeställningar i åtanke:

- Vilka signaler ska användas?
- Vilken samplingstid ska användas?
- Hur långa prognoser finns det möjlighet att göra?
- Hur noggrann kan/behöver modellen bli?
- Hur ska prognosverktyget utformas så att det uppfyller sitt syfte och blir användarvänligt?

### 3.1 BEARBETNING AV DATA

Data som använts i examensarbetet hämtades från en databas där signaler från styrsystemet samt laboratorieanalyser sparas. Dessa kommer från on-linemätningar eller från prover som analyserats i laboratorium. De mätningar som loggats med givare sparas som sexminutersmedelvärden i databasen.

Importen av data från on-line provtagningarna kunde ske över fritt vald tidsperiod, dock minst sex minuter. Om en längre tidsperiod än sex minuter valdes, medelvärdesbildades data enligt:

$$\bar{x}_{a,b} = \frac{1}{b-a} \sum_{i=a}^b x_i \quad (4.1)$$

där  $x_i$  är on-linemätningar sparade i databasen som medelvärden över sex minuter,  $a$  är första värdet som tillhör intervallet för medelvärdesbildningen och  $b$  är sista värdet som tillhör intervallet för medelvärdesbildningen.

När data importerats kontrollerades dessa så att analysen av data skulle bli så korrekt som möjligt. Partier med felaktiga mätvärden eller som helt saknade data behövde justeras för att de inte skulle påverka resultatet. Data som saknades helt gavs senast uppmätta värde. I enstaka fall interpolerades värden linjärt.

Svårare var det att justera felaktiga data då det inte alltid var tydligt vad som är ett felaktigt mätvärde. De värden som var tydligt felaktiga behandlades som saknad data. I vissa fall gjordes en kontroll av givarna. Dessa beskrivs i avsnitt 4.1.1 och 4.1.2.

#### 3.1.1 Filtrering av data

Inpumpningen av primärslam till R100 sker intermittent i 20-30 minuter med intervall av en dryg timme. Gasproduktionen reagerar tydligt på detta och varierar med samma frekvens. Vid

skapandet av modeller blev detta ett problem eftersom modellerna hade svårt att beskriva både denna snabba variation och variationer med långsammare frekvenser.

För att lösa detta problem lågpasfilterades signalerna enligt:

$$\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i \quad (4.2)$$

där  $\bar{x}$  är det medelvärdesbildade värdet för signal  $x$  och  $m$  är antal värden som  $x$  medelvärdesbildats över.

### 3.1.2 Normalisering av data

Då data förekom i olika skala och varierade med olika amplitud var det i vissa fall nödvändigt att normalisera data så att den erhöll varians 1 och medelvärde 0 (Eriksson m.fl., 1999).

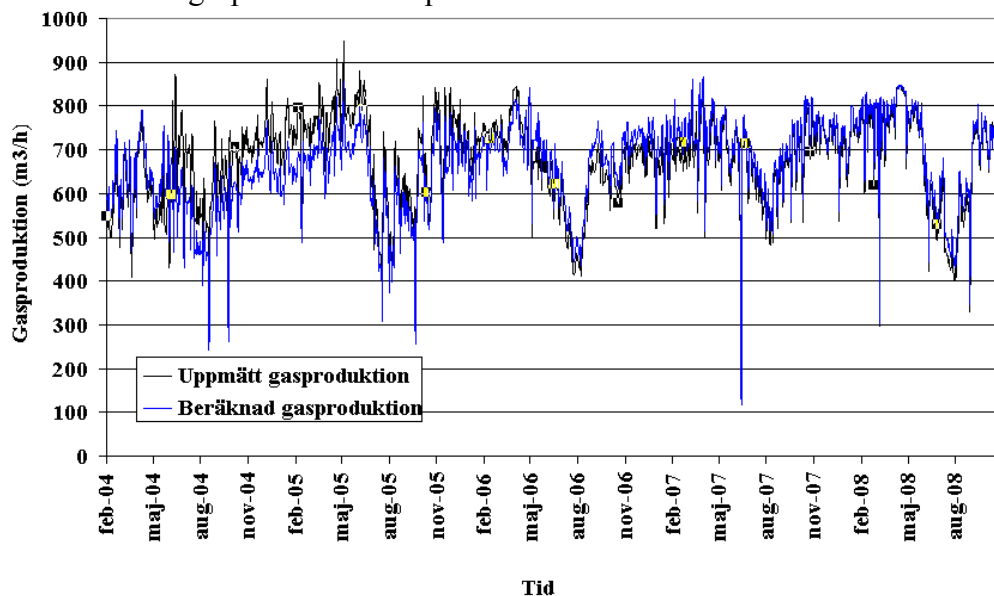
## 3.2 KONTROLL AV INDATA

Varje mätinstrument har en viss mätosäkerhet som anges i procent av mätområdet. Den information som mätarna levererar är ofta tillräckligt noggrann för sitt syfte. De data som användes till utvärdering av modeller och till PCA hade ibland en hög mätosäkerhet. De som ansågs nödvändiga att kontrollera extra beskrivs i följande avsnitt.

### 3.2.1 Gasflöde

På Käppalaverket mäts gasflödet med tre givare som inte alltid visar överensstämmande värden. Den givare som ansågs mest tillförlitlig och som användes, mätte flödet efter gasklockan innan gasen förbrändes i gaspannorna. För att kunna kontrollera att den gav ett sanningsenligt värde, jämfördes uppmätt gasproduktion med beräknad gasproduktion utifrån den effekt som gaspannorna levererat.

Energiinnehållet i 1 normalkubikmeter metangas är 9,8 kWh. I biogasen som produceras från Käppalas rötchammare är metanhalten cirka 60 %. Gaspannornas effektivitet ligger på cirka 75 %. Sammanräknat ger detta att en Nm<sup>3</sup> biogas innehåller 4,7 kWh. Figur 7 visar uppmätt och beräknad gasproduktion för perioden 2004-2007.



Figur 7 Beräknad biogasproduktion utifrån producerad effekt från gaspannorna.

Från Figur 7 syns det att uppmätt och beräknad gasproduktion följer varandra vad gäller variationen. Däremot ligger mätvärdena från mätaren stundvis för högt eller för lågt relativt beräknad gasproduktion.

### 3.2.2 TS-halt i inkommande primärslam

Resultat från analyser i laboratorium användes för att kontrollera TS-mätarnas precision. Veckovis data från analyser jämfördes med vad TS-mätarna visat för värde vid samma tidpunkt.

## 3.3 MULTIVARIABEL ANALYS

En stor mängd data undersöktes i analysen av de variabler som påverkar gasproduktionen på Käppalaverket. Det verktyg som användes för analysen var multivariat analys där samband och korrelation mellan variabler undersöktes.

Som nämnts undersöktes data med avseende på felaktiga mätvärden, saknade data samt förändringar i processen innan analysen gjordes. För att den multivariata analysen skulle ge bra resultat var det även viktigt att data uppfyllde följande kriterier (Hair m.fl., 2006):

- Varje variabel bör komma från en normalfördelning.
- Variansen för beroende variabler ska inte variera beroende på variablernas värden.
- Förhållandet mellan variablerna sinsemellan ska vara lika över tiden.
- Felen ska vara okorrelerade.

### 3.3.1 Principalkomponentanalys, PCA

Den multivariata analysmetoden som användes var PCA som är en välbeprövad och använd projiceringsmetod<sup>4</sup> (Eriksson m.fl., 1999). Den används för att minska dimensioner i stora datamängder samt för att undersöka samband mellan variabler. PCA resulterar i en PC-modell (Joliffe, 1986).

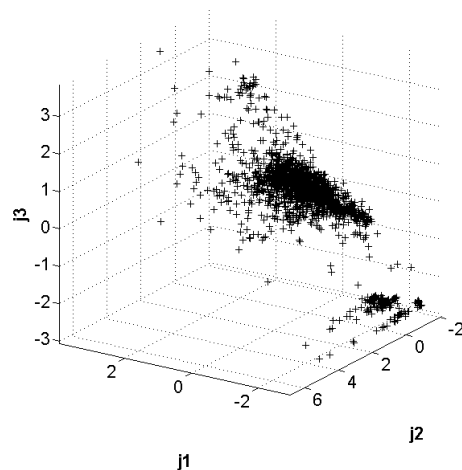
De kriterier på data som beskrivs i avsnitt 3.3 gäller även för PCA men om verktyget endast används för att få vägledning om datas inbördes korrelation är det inte ett krav att kriterierna är uppfyllda. Däremot blir analysen bäst om de är det (Joliffe, 1986). Nedan följer en kort och förenklad beskrivning för hur en PC-modell skapas och kan tolkas.

Antag en matris  $A$  med  $k$  rader och  $j$  kolumner. Varje kolumn representerar en variabel och varje rad står för en observation. Data från  $A$  bildar en punktsvärm i ett rum med  $j$  dimensioner där en punkt representeras av värden från en observation. Vi har alltså  $k$  antal punkter (Figur 8). Då syftet med PCA är att minska antalet dimensioner för  $A$  söks ett rum med färre än  $j$  dimensioner och som bäst beskriver variansen för data i  $A$ .

---

<sup>4</sup> Beskrivs i ordlista

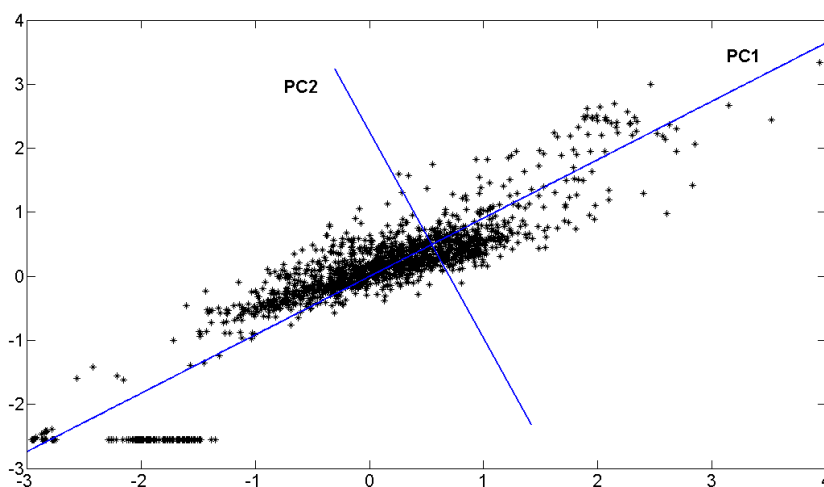




**Figur 8** En punktsvärm innehållande  $k$  punkter i ett rum med 3 dimensioner,  $j_1$ ,  $j_2$ ,  $j_3$

Med minstakvadratanpassning beräknas den första principalkomponenten, PC1. Den utgår från datasvärmens centrum och får den riktning som beskriver den största variationen i data. Den andra principalkomponenten skapas ortogonal mot PC1 och beskriver den näst största variationen i data, se Figur 9. På detta sätt fortsätter det till den sista principalkomponenten.

Den första delen av PC-modellen kallas score. Dessa är de projiceringar som görs från originaldata på principalkomponenterna (Eriksson m.fl., 1999).



**Figur 9** Principalkomponenter.

Den andra delen av PC-modellen är så kallade loadings. Dessa beskriver principalkomponentens läge relativt originaldata. Varje principalkomponent har en loadingsvektor med  $j$  värden, där varje värde är cosinus av vinkeln mellan originalvariabelns läge och principalkomponentens. Loadingsvärdet beskriver variabelns "load", tillskott, till principalkomponenten (Eriksson m.fl., 1999).

Genom att jämföra loadings från samma principalkomponent samt med andra principalkomponenter kan man se om det finns variabler som korrelerar med varandra. Dessa har då liknande loadings eftersom de påverkar modellen på liknande sätt. Likadant är det om

de har negativ korrelation, då påverkar de modellen motsatt och har liknande värden på loadings men av olika tecken.

För att PCA ska kunna utföras är det viktigt att medelvärdet är borttaget. Vanligt är också att data normaliseras så att den får varians av samma storleksordning. Då PCA påverkas av datamängdens varians kommer detta steg att påverka resultatet vilket är viktigt att ha i åtanke. Ett vanligt sätt som används för att normalisera data är att ge varje variabel standardavvikelsen 1 genom division av standardavvikelsen (Eriksson m.fl., 1999). All data som normaliserades i det här examensarbetet normaliserades enligt denna metod (avsnitt 3.1.2).

PCA användes under olika steg i utvärderingen av prognosverktyg för gasproduktionen. Till att börja med gjordes PCA på varje röttkammare för sig. Genom att undersöka score och loadings, undersöktes samband mellan olika variabler samt hur rötningsprocessen varierade med tiden. Det undersöktes även om PC-modellerna som skapades från data med olika tidsintervall blev olika.

### **3.4 EMPIRISK MODELLERING**

Det finns många sätt att empiriskt hitta modeller för data. Grunden i dessa modeller är att utsignalen, i detta fall gasproduktionen, modelleras utifrån olika insignaler. Strukturen för hur insignalerna påverkar utsignalen samt hur konstanterna som bestämmer insignalens påverkan på modellen räknas ut, varierar med modelltyp.

#### **3.4.1 Kalibrering av modellen**

Oavsett val av empirisk modelltyp är det viktigt att denna kalibreras över en period som är representativ för det område som modellen ska gälla för. Under kalibreringsperioden bör de signaler som modellen använder sig av befinna sig så nära det verkliga omfånget som möjligt. Det är även viktigt att alla systemets ”beteenden” finns med under kalibreringsperioden. Om systemet beter sig enligt tydligt olika fall kan det vara aktuellt att skapa en modell för varje beteende.

#### **3.4.2 Använda modellstrukturer**

Den första empiriska modellen som undersöktes i detta examensarbete var en AR-modell (Auto Regressiv modell) som beskrivs enligt:

$$A(q) y(t) = e(t) \tag{4.3}$$

där  $y(t)$  är utsignal,  $e(t)$  är vitt brus (se nedan) med medelvärde noll och varians  $\lambda$  och  $A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_n q^{-n}$ , där  $q^{-n}$  är en förskjutningsoperator<sup>5</sup> på  $n$  enheter.

I en AR-process antas biogasproduktionen vara en stokastisk process. Den beror enbart av variabler som är helt slumpmässiga men som har en viss tidsmässig fördelning/symmetri och det är med anledning av detta som det går att modellera utsignalen. Vid modellering av utsignalen används en viktad summa av tidigare värden på utsignalen. Till detta adderas den stokastiska processen som vitt brus. Vitt brus är en signal lika stor energi vid alla frekvenser.

---

<sup>5</sup> Beskrivs i ordlista

De AR-modeller som användes för att beskriva biogasproduktionen var utökade med en konstant enligt:

$$A(q) y(t) = K + e(t) \quad (4.4)$$

där  $K$  är en konstant.

En AR-modell som är utökad så att parametrar kan skattas till det vita bruset kallas för en ARMA-modell (Auto Regressive, Moving Average). Den beskrivs enligt:

$$A(q) y(t) = K + C(q) e(t) \quad (4.5)$$

där  $C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \dots + c_n q^{-n}$ .

Om en AR-modell utökas med en eller flera insignaler kallas denna för en ARX-modell (ekvation (4.6)). Det extra  $X$  som läggs till modellnamnet står för eXogen input, dvs de insignaler som modellen tar hänsyn till (Ljung och Glad, 2002).

$$A(q) y(t) = B(q) u(t) + e(t) \quad (4.6)$$

där  $u(t)$  är insignal och  $B(q) = b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_n q^{-n}$ .

Parametrarna till modellerna skattas med minstakvadratanpassning (Ljung och Glad, 2002).

### 3.4.3 Förutsättning för empirisk modellering

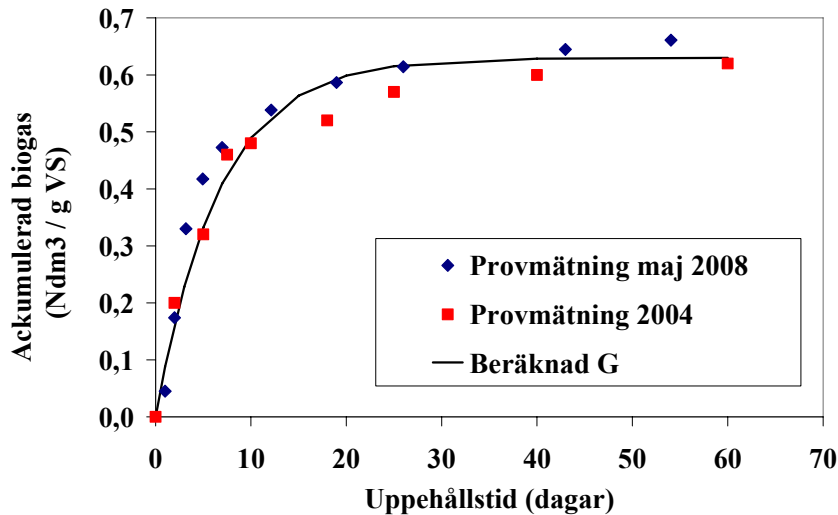
De empiriska modeller som undersöktes bygger alla på linjära antaganden om systemet. Som nämnt är rötningsprocessen ett olinjärt system. Däremot finns områden då systemet kan antas linjärt och för dessa situationer kan linjära modeller användas. Med linjära modeller behåller prognosverktyg även en användarvänlig struktur som enklare kan implementeras i drift.

AR- och ARMA-modellerna kalibrerades med biogasproduktionen som utsignal. Då fokus låg i att göra prognoser för ett till ett par dygn framåt i tiden användes främst signaler med samplingsintervallet en timme.

ARX-modeller användes för att se om det gick att förbättra prediktionen av gasproduktionen som gjorts med AR- och ARMA-modeller med insignaler såsom inkommande primärslam och överskottsslam, inkommande VS, uppehållstid, temperatur, pH m fl. Dessa variabler mäts i andra enheter och skalor, jämfört med gasproduktionen, och data normaliserades på samma sätt som i den multivariata analysen (se avsnitt 3.1.2).

## 3.5 FYSIKALISK MODELLERING

Den specifika gasproduktionen (se avsnitt 2.1.1) beskriver hur mycket gas som produceras utifrån mängd organiskt material (VAV, 1981). I ett tidigare examensarbete på Käppala och i ett projekt 2008 undersöktes hur den specifika gasproduktionen beror av uppehållstiden (Leksell, 2005 och Sundin, 2008). Resultaten från dessa försök visas i Figur 10.



Figur 10 Resultat från undersökningar av den specifika gasproduktionen för primärslammet på Käppalaverket.

Den specifika gasproduktionen kan även beskrivas enligt ekvation (4.7) (VAV, 1981)

$$G = G_e \left(1 - e^{-aT_u}\right) \quad (4.7)$$

där  $G$  är producerad biogas [ $\text{m}^3$  biogas / kg VS],  
 $G_e$  är den potentiella gasproduktionen då  $t \rightarrow \infty$  [ $\text{m}^3$  biogas / kg VS],  
 $T_u$  är uppehållstid (se ekvation (3.1)) [dygn] och  
 $a$  är en hastighetskonstant för nedbrytningen [ $\text{dygn}^{-1}$ ].

Från försök gjorda av Leksell (2005) var den maximala mängd gas,  $G_e$ , som erhöles från primärslam respektive överskottsslam 0,63 respektive 0,30  $\text{Ndm}^3$  gas per g VS.  $G_e$  för kommande beräkningar valdes till 0,63 respektive 0,3.

Hastighetskonstanten,  $a$ , varierar beroende på substrat. För slam från reningsverk har den beräknats till 0,23 men för avloppsslam med höga halter protein beräknades  $a$  till 0,17 (VAV, 1981). För slammet från Käppalaverket anpassades kurvan till resultaten från Leksell (2005) och Sundin, (2008) och värdet på  $a$  valdes till 0,15.

I den fysikaliska modellen användes den beräknade specifika gasproduktionen (se ekvation (4.7)) och beräknat inkommande VS från primärslam och överskottsslam. Grundekvationerna till den fysikaliska modellen visas i ekvation (4.8) till (4.10).

$$\hat{y}(t) = \hat{y}_1(t) + \hat{y}_2(t) \quad (4.8)$$

$$\hat{y}_1(t) = G_1 u_1(t) \quad (4.9)$$

$$\hat{y}_2(t) = G_2 u_2(t) \quad (4.10)$$

där  $\hat{y}(t)$  är simulerad total gasproduktion [ $\text{Nm}^3/\text{dygn}$ ],  
 $\hat{y}_1(t)$  är predikterad gasproduktion utifrån inkommande primärslam [ $\text{Nm}^3/\text{dygn}$ ],  
 $\hat{y}_2(t)$  är predikterad gasproduktion utifrån inkommande överskottsslam [ $\text{Nm}^3/\text{dygn}$ ],  
 $u_1(t)$  är mängd VS i inkommande primärslam [kg/dygn],  
 $u_2(t)$  är mängd VS i inkommande överskottsslam [kg/dygn],  
 $G_1$  är den specifika gasproduktionen för primärslam [ $\text{m}^3/\text{kg VS}$ ] och  
 $G_2$  är den specifika gasproduktionen för överskottsslam [ $\text{m}^3/\text{kg VS}$ ].

### 3.5.1 Utveckling av den fysikaliska modellen

En undersökning gjordes för att se om den fysikaliska modellen kunde byggas ut med fler insignaler. Detta gjordes med PCA där prediktionsfelet (se avsnitt 3.8 och ekvation (4.19)) analyserades tillsammans med olika variabler. Även förändringen av vissa variabler jämfördes tillsammans med felet för att finna eventuella korrelationer. Förändringen beräknades på 6 olika sätt:

$$Förändring1_i = x_{i-1} - x_{i+1} \quad (4.11)$$

$$|Förändring1|_i = |x_{i-1} - x_{i+1}| \quad (4.12)$$

$$Förändring2_i = x_{i-3} - x_{i+3} \quad (4.13)$$

$$|Förändring2|_i = |x_{i-3} - x_{i+3}| \quad (4.14)$$

$$Förändring3_i = x_{i-6} - x_{i+6} \quad (4.15)$$

$$|Förändring3|_i = |x_{i-6} - x_{i+6}| \quad (4.16)$$

där x är en datapunkt

## 3.6 PREDIKTION

De modeller som skapats användes för att prediktera gasproduktionen med hjälp av prediktionsmodeller.

Vid prediktion av utsignalen givet ett värde k steg bakåt i tiden,  $\hat{y}(t|t-k)$ , används tidigare värden på utsignalen  $y(t-k)$ ,  $y(t-k-1)$  osv. De värden på utsignalen som inte är tillgängliga,  $y(t-1)$ ,  $y(t-2)$  ...  $y(t-k+1)$ , skattas med den modell som skapats. Hur skattningen går till beskrivs i följande avsnitt.

### 3.6.1 Prediktion av AR- och ARMA-modeller

I tidsdiskret form beskrivs AR- och ARMA-modeller enligt ekvation (4.3), (4.4) och (4.5). Dessa används vid prediktion av framtida utsignaler enligt ekvation (4.17). Om fler värden fram i tiden ska predikteras, skattas dessa iterativt (se ekvation (4.18) och Appendix A för utökad information). Felet, som är en stokastisk process, tas inte med i prediktionsmodellerna.

$$\hat{y}(t|t-1) = \alpha_1 y(t-1) + \alpha_2 y(t-2) + \dots + \alpha_n y(t-n) \quad (4.17)$$

$$\hat{y}(t|t-k) = \alpha_1 \hat{y}(t-1|t-k) + \alpha_2 \hat{y}(t-2|t-k) + \dots + \alpha_{t-k+1} \hat{y}(t-k-1|t-k) + \alpha_{t-k} y(t-k) + \dots + \alpha_n y(t-n) \quad (4.18)$$

### 3.6.2 Prediktion av övriga modeller

Prediktionsmodeller med insignal predikterar sin utsignal med samma strategi som beskrivs i avsnittet ovan. Insignalerna däremot kan inte skattas utan måste anges. Antingen antas de hålla samma värde som tidigare eller så uppskattas de enligt lämplig metod.

## 3.7 SAMBAND MELLAN INKOMMANDE FLÖDE OCH PRIMÄRSLAMFLÖDE

Den insignal som kom att dominera i modellerna var inkommande VS till röttkammare R100. För att kunna göra prediktioner med dessa modeller krävdes att inkommande VS kunde skattas på ett lämpligt sätt framåt i tiden.

Inkommande VS beräknades utifrån primärslamflödet från försedimenteringen samt med TS- och GR-halten. Primärslaminpumpningen till R100 regleras som nämnt manuellt och dessutom pumpas primärslammet från gamla delen av verket intermittent. Det finns således inte ett direkt, snabbt samband mellan inkommande flöden och inkommande VS. Däremot finns ett samband över en längre period mellan inkommande flöden och mängd inkommande VS eftersom en ökning av inkommande flöden leder till en ökad belastning på försedimenteringssteget och alltså en ökad pumpning av primärslam.

En förändring av organiskt material i inkommande vatten påverkar primärslammet och i vilken mängd det sedimenterar. För att undersöka hur mängden primärslam och dess egenskaper påverkades krävdes alltså insikt om samband mellan inkommande vattenflöden och mängd organiskt material i inkommande vatten. En faktor som delvis påverkar detta är vilken nivå som hålls i tunneln (se avsnitt 2.2). Allmänt kan det sägas att om flödena är höga och nivån i tunneln hålls låg så ger detta primärslam som ger mycket biogas (Rahm, 2009, pers. kom.). Ökade flöden i tunneln leder till att mindre material sedimenterar till botten.

Det är även av vikt att kunna beskriva primärslammet utifrån hur förhållandena har varit i tunnelsystemen. Vid jämna flöden sedimenterar material i de kommunala avloppsneten och i tunneln. Dessa följer med vattnet om flödena ökar då hastigheten och vattnets bärförmåga ökar. Vid en regnskur kommer således mycket rens och slam initialt med det inkommande vattnet. Kommer ytterligare en skur som ökar flödena bidrar inte denna till en ökning av primärslam då den tidigare flödestoppen ”rensat” systemen.

PCA gjordes med bland annat rötningsprocessen, inkommande VS, inkommande flöde, nivå i svallschaktet och inkommande BOD och COD som parametrar. Det gjordes även försök att skatta empiriska modeller med inkommande VS som utsignal och inkommande flöden som insignal.

### 3.8 VALIDERING AV MODELL

Hur bra en modell beskriver ett system är en relativ bedömning som bygger på modellens användningsområde och förutsättningar. Innan modellen godkänns bör dess tillförlitlighet kontrolleras, den valideras. Bäst blir valideringen om det finns tillräckligt med data så att modellen kan köras mot data som inte använts vid skapandet av modellen. Det blir då tydligt om modellen är anpassad för systemet eller enbart för den datamängd som den kalibrerats mot. Korsvalidering, när olika datamängder används för kalibrering och validering, är den valideringsstrategi som använts i examensarbetet (Ljung och Glad, 2002).

Grundhjälpmedlet vid validering är prediktionsfelet,  $\varepsilon$  (Ljung och Glad, 2002):

$$\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (4.19)$$

där  $y(t)$  är uppmätt värde och  $\hat{y}(t)$  predikerat värde.

I den mjukvara som användes, MATLAB©, används ett mått för att beskriva modellens anpassning till sina system. Det kallas modellens  $R^2$ -värde och räknas ut enligt

$$R^2 = \left( 1 - \frac{\|y(t) - \hat{y}(t)\|_2}{\|y(t) - \bar{y}\|_2} \right) \cdot 100 \quad (4.20)$$

där  $\bar{y}$  är medelvärdet för den uppmätta utsignalen och  $\|x\|_2$  innebär normen av x (The Mathworks Inc, 2007).

En bra modell har en hög anpassning, dvs om modellen predikterar utsignalen perfekt kommer anpassningen att vara 100 % (The Mathworks Inc, 2007).

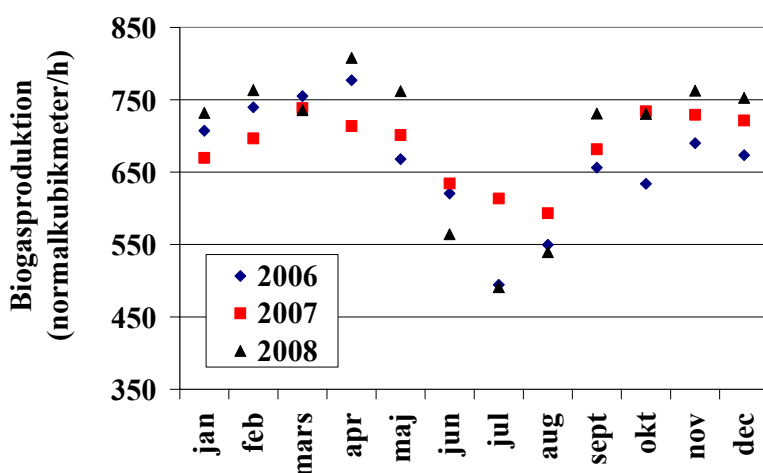
## 4 RESULTAT

PCA användes under flera steg i examensarbetet. Resultaten från de olika undersökningarna presenteras här efter i vilket syfte de genomfördes.

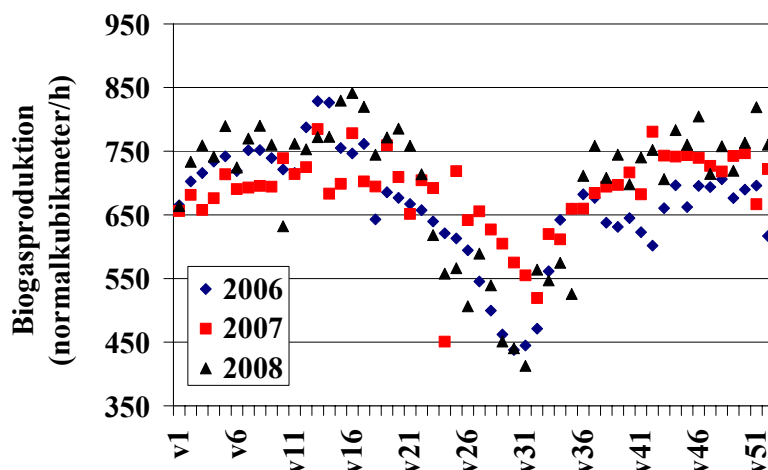
Av de modeller som undersöktes presenteras endast de modeller som ansågs bidra med en ökad förståelse för utvecklingen av prognosverktyget.

### 4.1 BIOGASPRODUKTIONEN – STATISTIK

Biogasproduktionen varierar över året. Detta syns i Figur 11 som visar månadsmedelvärden över biogasproduktionen för åren 2006, 2007 och 2008. Standardavvikelsen för data är mellan 50 och 100 enheter och om den producerade biogasen medelvärdesbildas över varje vecka istället syns det att den varierar betydligt (Figur 12).



Figur 11 Månadsmedelvärden för biogasproduktionen på Käppalaverket år 2006, 2007 och 2008.



Figur 12 Veckomedelvärden för biogasproduktionen på Käppalaverket år 2006, 2007 och 2008.



## 4.2 UNDERSÖKNING AV RÖTNINGSPROCESSEN MED PCA

De PC-modeller som skapats för att få en bild över hur data som berörde rötningsprocessen samverkar och fungerar presenteras i Figur 13 till Figur 19. Variablerna som ligger till grund för modellerna finns beskrivna i Tabell 3.

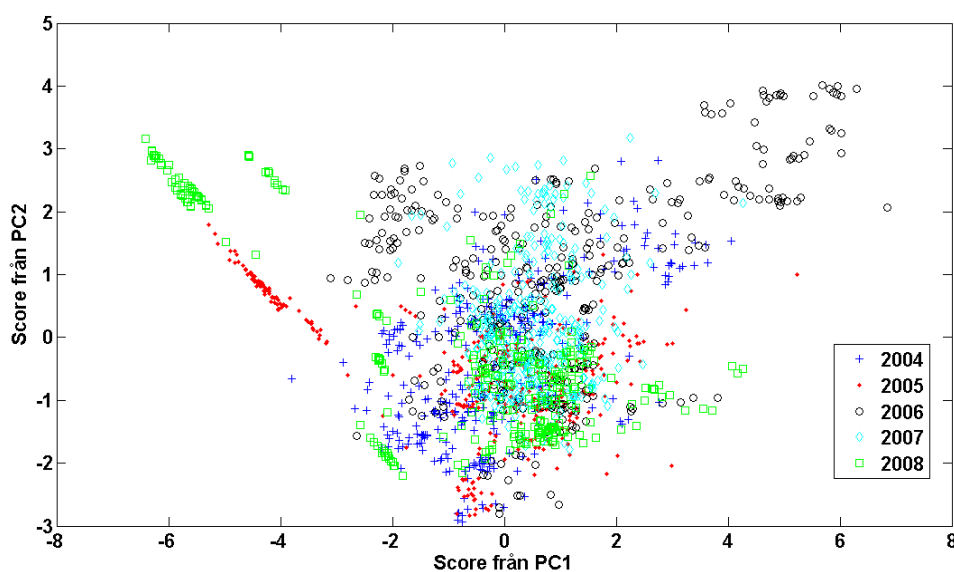
Prov av TS-halt, GR-halt, bikarbonatalkalinitet och fosfatfosfor i röt-kammaren är veckoprover från laborationsanalys. Järn i röt-kammaren mättes också i laboratoriet men mer sällan än varje vecka. De tidpunkter som inte hade mätningar gavs senaste analysresultat.

Tabell 3. Variablerna som användes för att undersöka rötningsprocessen allmänt med PCA.

Variabel	Enhet	Benämning	
		R100	R200
Uppmätt producerad biogas	Nm <sup>3</sup> /h	Gas100	Gas200
Inkommande slamflöde	l/s	PS	ÖS
VS i inkommande slam	kg/s	VSin	VSin
VS ut ur röt-kammaren	kg/s	VSut	VSut
Upphållstid i röt-kammaren	dygn	U-tid	U-tid
Temperatur i röt-kammaren	grader C	Temp	Temp
pH i röt-kammaren		pH	pH
TS i röt-kammaren	%	TS	TS
GR i röt-kammaren	%	GR	GR
Bikarbonatalkalinitet i röt-kammaren	mg CaCO <sub>3</sub> /l	Bi-alk	Bi-alk
Fosfatfosfor i röt-kammaren	mg/l	P-PO4	P-PO4
Järn i röt-kammaren	mg/l	Fe	Fe

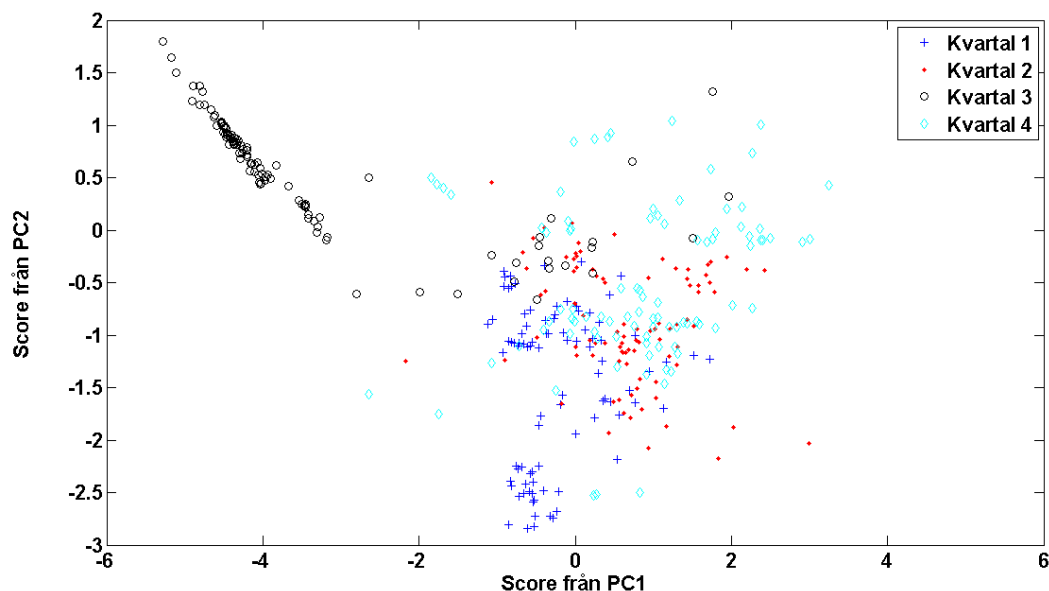
### 4.2.1 Variationer i rötningsprocessen över tiden

I den första fasen gjordes PCA med data över en lång tidsperiod för att se hur processen varierade över tiden. Data var samplat varje dygn (se avsnitt 3.1 för beskrivning om hur samplingen gick till). Principalkomponenterna som erhöles från modellen plottades mot varandra. De punkter (score), som är från data från samma år, markerades med en speciell signatur. I Figur 13 är score från de två första principalkomponenterna från en PC-modell skapad över perioden 2004-2008 plottade mot varandra.

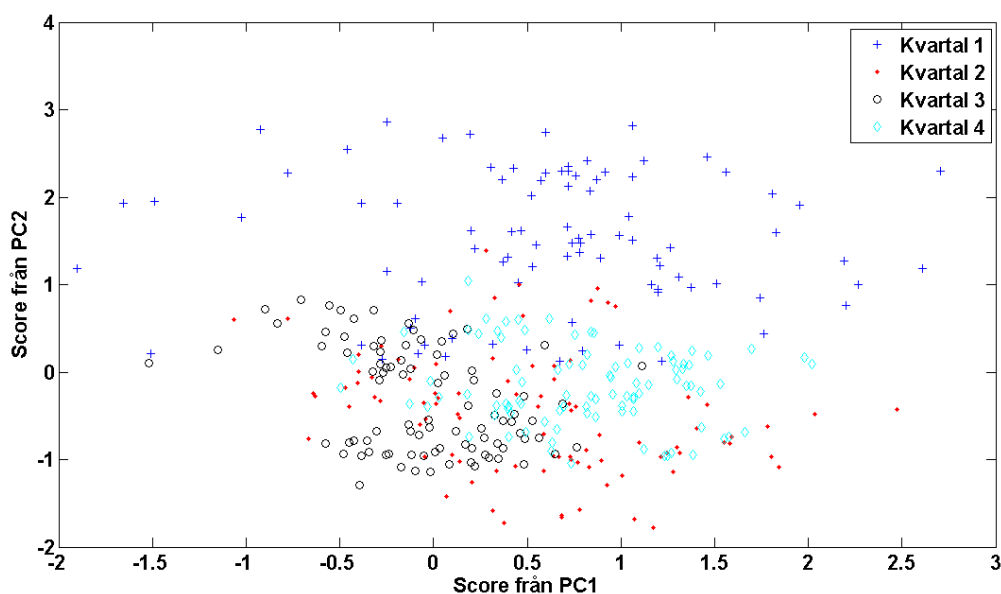


Figur 13 Score från principalkomponent 1 vs score från principalkomponent 2 från en PC-modell skapad med dygnsmedelvärden från tidsperioden 2004-2008.

Det är tydligt att det finns variationer i systemet mellan de olika åren. Resultatet antyder även att det finns stora variationer i processen över året. Även detta undersöktes med PCA. För analysen användes åren 2005 och 2007. En PC-modell skapades med data samplat varje dygn från år 2005 och en annan med data som var samplat varje dygn från år 2007. Figur 14 och Figur 15 visar score från de två första principalkomponenterna plottade mot varandra.



**Figur 14** Score från principalkomponent 1 vs score från principalkomponent 2 från en PC-modell skapad med dygnsddata från 2005.

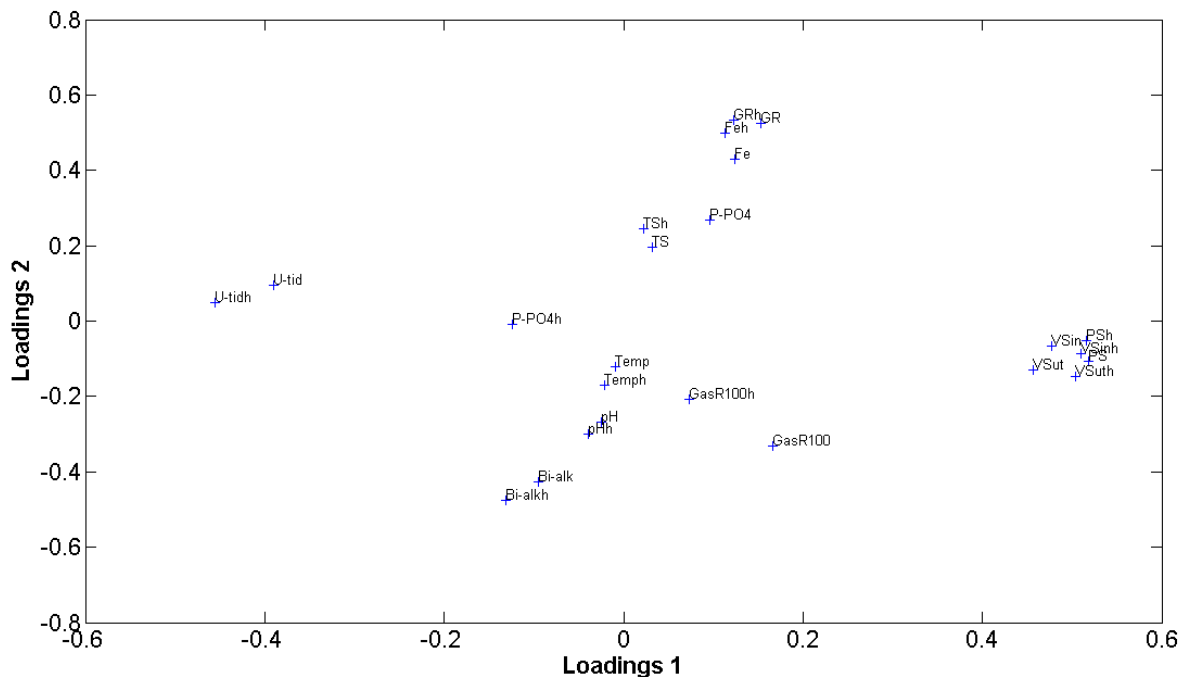


**Figur 15** Score från principalkomponent 1 vs score från principalkomponent 2 från en PC-modell skapad med data samplat varje dygn från 2007.

De PC-modeller som skapats visar på en tydlig variation av processen över året. Den verkar dock inte beskrivas på samma sätt för åren 2005 och 2007.

#### 4.2.2 Påverkan av val av samplingsintervall

För att få en uppfattning om hur mycket PC-modellerna påverkades av vilket samplingsintervall som användes, gjordes PC-modeller över samma tidsperiod men med data som importerats med olika samplingsintervall. Variablerna i Tabell 3 över tidsperioden 2007 användes. Figur 16 visar loadings för de två första principalkomponenterna från två PC-modeller skapade med samplingsintervallet ett dygn respektive en timme.



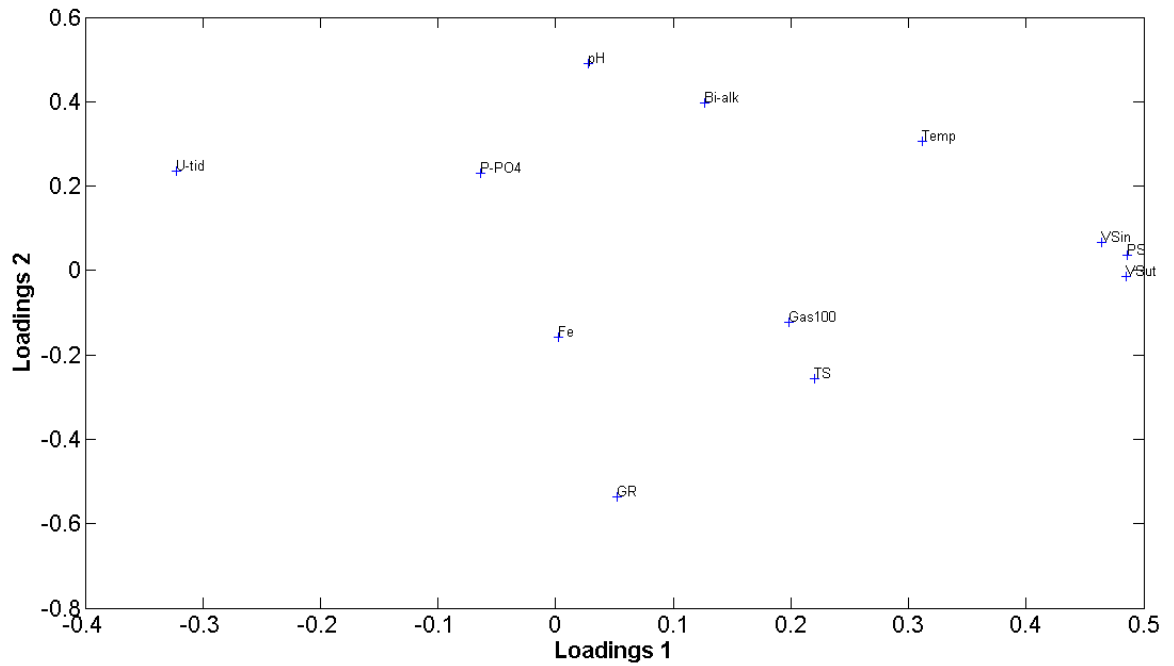
Figur 16 Loadingsvärden för de två första principalkomponenterna för två PC-modeller gjorda från samma tidsperiod men med olika samplingsintervall. Värden med samplingsintervallet en timme är markerade med ett h.

De två modellerna är mycket lika vad gäller alla variabler förutom fosfatfosfor (diskuteras i avsnitt 5.2). Liknande resultat erhöles för andra analyser med olika tidsintervall och det antogs att val av samplingsintervall inte bedöms påverka analysen signifikant.

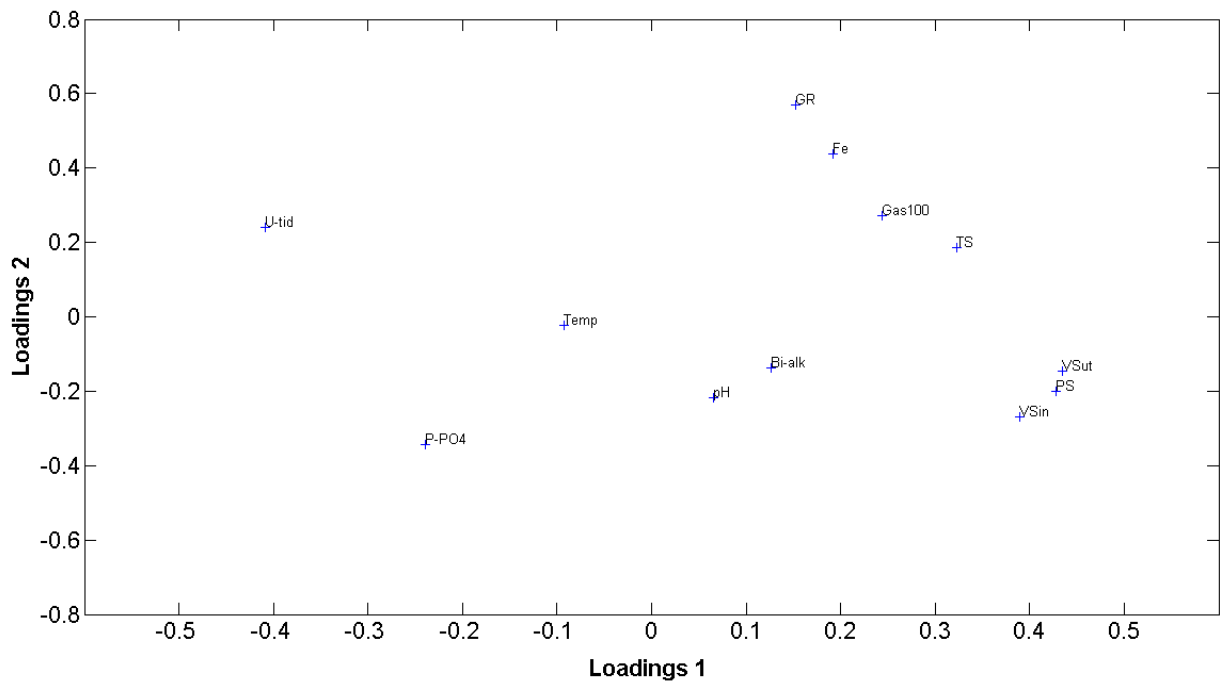
#### 4.2.3 Korrelation mellan variabler från rötningsprocessen

För att titta på hur variablerna i Tabell 3 korrelerade, skapades flera olika PC-modeller över olika tidsperioder men med samma samplingsintervall, ett dygn. Resultaten från PC-modeller gjorda över tidsperioderna 2004-2008, 2005, 2006 och 2007 kommer att redovisas här.

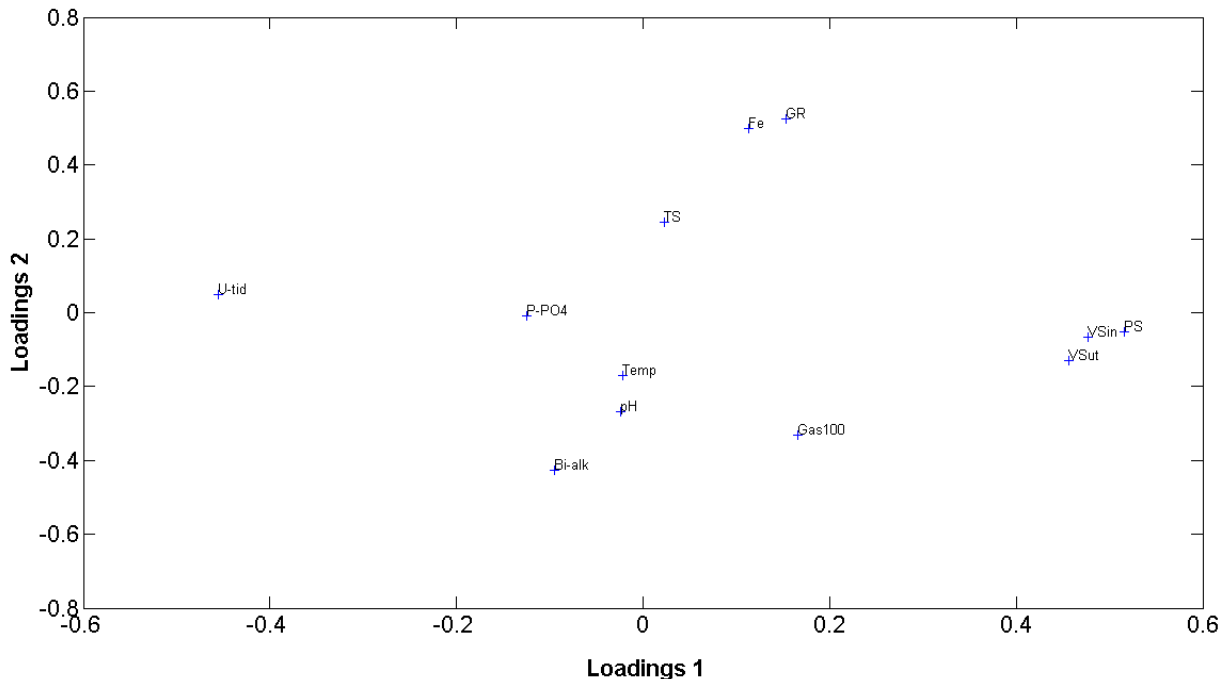
Tecken på korrelation mellan variabler visade sig i principalkomponenternas loadingsvärden. Liknande värden på loadings innebär möjlig korrelation och högt värde på loadings innebär hög inverkan på PC-modellen. Figur 17, Figur 18 och Figur 19 visar loadingsvärden för de första huvudkomponenterna från PC-modeller skapade med data över perioden 2004-2008, 2006 respektive 2007.



Figur 17 Loadingsvärden från principalkomponent 1 och 2 för en PC-modell som skapats med dygnsdata från 2004-2008.



Figur 18 Loadingsvärden från principalkomponent 1 och 2 för en PC-modell som skapats med dygnsdata från 2006.



**Figur 19** Loadingsvärden från principalkomponent 1 och 2 för en PC-modell som skapats med dygnsdata från 2007.

Följande kan noteras i figurerna ovan:

- VSin, VSut och inflöde av PS bildar en tydlig grupp i alla tre modeller.
- Uppehållstiden är negativt korrelerad med ovan nämnda grupp och mängd producerad biogas korrelerar svagt med samma grupp.
- Bikarbonatalkalinitet och pH har låga värden på loadings vilket innebär att de har låg påverkan på modellen. De följer dock varandra och kan antas samvariera till viss grad.
- Övriga variabler erhåller inga tydliga strukturer eller bestående grupperingar och inga slutsatser kan dras.

Resultat från PCA som gjordes för rötkammare R200, den rötkammare som tar emot överskottslam från bioreningen och R100, visar liknande men mindre tydliga resultat som för rötkammare R100.

### 4.3 MODELLERING OCH PREDIKTION MED EMPIRISKA MODELLER

De modeller som undersöktes som möjliga aspiranter till prognosverktyget var som nämnts AR-, ARMA- och ARX-modeller.

Prestationerna från ovan nämnda modeller beror bland annat av hur signalerna behandlats, hur kalibreringsperioderna väljs samt vilka insignaler som väljs. Modellerna kan även varieras med hur många parametrar som de kalibreras med. I fortsatt utvärdering av modeller användes 3, 4, 7 och 12 parametrar som standard (diskuteras mer i avsnitt 5.3.2). I namnet för modellen anges parameterantal inom parentes efter modellnamnet, exempelvis AR(7).

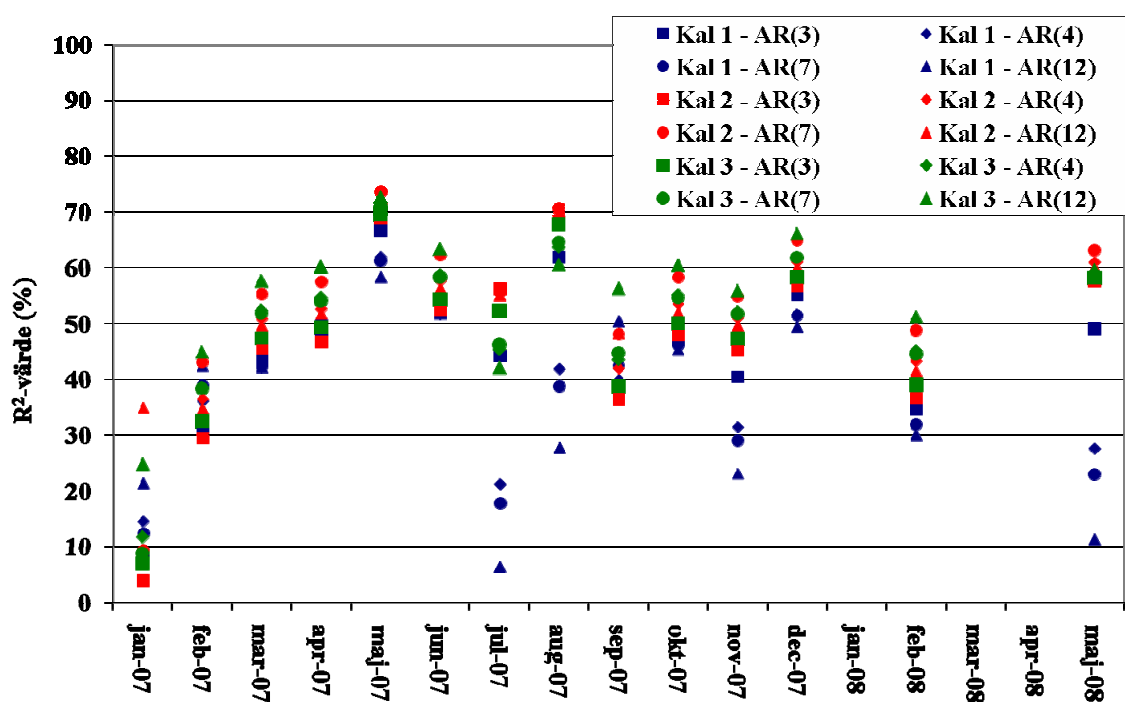
#### 4.3.1 Val av kalibreringsperiod

PCA-resultaten visade att biogasproduktionen och rötningsprocessen varierade både över åren och under året. Dessa variationer var dock inte tydliga vad gäller omfattning i tid och rum och

därför undersöktes det hur AR-modeller påverkades av val av kalibrerings- och valideringsperiod. Det fanns även intresse att se ifall det behövdes fler än en modell för att beskriva biogasproduktionen över året. Tre kalibreringsperioder valdes för undersökningen varav två kortare tidsperioder på en månad vardera, en i februari och en i maj, samt en längre period över våren. I Tabell 4 finns dessa beskrivna. Figur 20 visar  $R^2$ -värdet för AR-modellerna skapade över de olika perioderna.

Tabell 4 Kalibreringsperioder som användes undersökningar om hur valet av kalibreringsperiod påverkade de empiriska modellerna

Namn	Tid
Kal 1	1/2 – 28/2 2007
Kal 2	1/5 – 31/5 2007
Kal 3	24/2 – 31/5 2007



Figur 20  $R^2$ -värde för ett antal AR-modeller som kalibrerats över olika perioder.

En slutsats som kan dras är att val av kalibreringsperiod är mycket viktig för att modellen ska bli bra. Om kalibreringsperioden representerar det allmänna läget för systemet väl spelar det inte så stor roll om kalibreringsperioden är lång eller kort. Däremot är det störst sannolikhet att få en modell som representerar systemet bra om kalibreringsperioden täcker en lång tidsperiod.

I Figur 20 syns att den modell som kalibrerats över period 1 inte representerar systemet väl. Ett tecken på att modellen är överanpassad till sin kalibreringsperiod syns i att AR(7) och AR(12) ger sämre anpassning än AR(3) och AR(4).

Den modell som kalibrerats i maj däremot (kalibreringsperiod 2), ger lika goda resultat som modellerna kalibrerade över en längre period. Resultatet varierar dock något mer än för modellerna kalibrerade över period 3. Se variansen för resultaten i Tabell 5.

**Tabell 5 Variansen för anpassningen för de olika modellerna.**

Kalibreringsperiod 1				Kalibreringsperiod 2				Kalibreringsperiod 3			
AR(3)	AR(4)	AR(7)	AR(12)	AR(3)	AR(4)	AR(7)	AR(12)	AR(3)	AR(4)	AR(7)	AR(12)
204,5	169,0	198,7	269,0	280,6	246,7	242,0	118,1	248,5	203,6	221,6	139,9

Försöket ovan gjordes även i syfte att se huruvida modeller skapade över en kort period passade bättre för att prediktera biogasproduktionen för tidsperioder under samma del av året. Inga sådana resultat kom dock fram. Årstidsberoende modeller bedömdes inte förbättra ett prediktionsverktyg och utvärderades inte vidare.

#### 4.3.2 AR- och ARMA-modeller

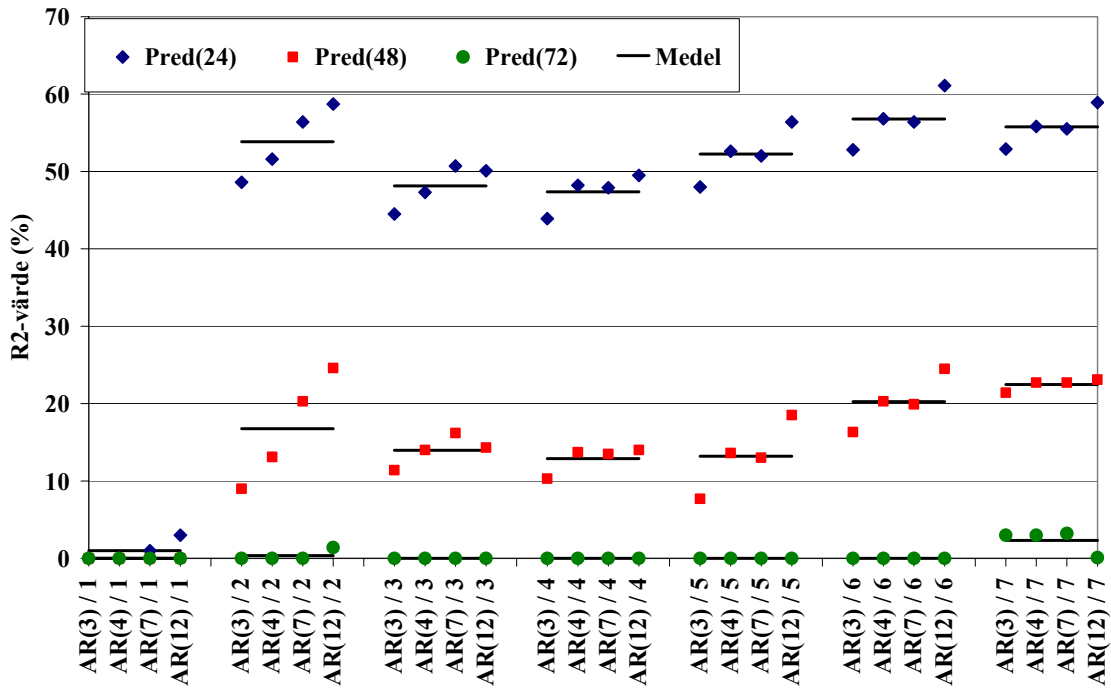
I avsnitt 3.4.2 beskrivs en variant av AR- och ARMA-modell där en konstant har lagts till i modellen. Denna variant av modell användes konsekvent i utvärderingen av modellerna till prognosverktyget då det tidigt blev tydligt att modeller som innehöll en konstant blev bättre än modeller utan.

Figur 21 visar en sammanställning över ett urval av AR-modeller. De är utvärderade efter kalibreringsperiod, antal parametrar och huruvida kalibreringsdata och/eller utsignalen lågpasfilterats (se ekvation (4.2)). Eftersom prognosen gjordes med fokus på dygnsprognoser, används prediktioner 24, 48 och 72 timmar framåt i tiden som utvärderingsexempel. Hur in- och utsignal behandlats samt val av kalibrerings och valideringsperioder beskrivs i Tabell 6.

**Tabell 6 Beskrivning av de empiriska modeller som presenteras**

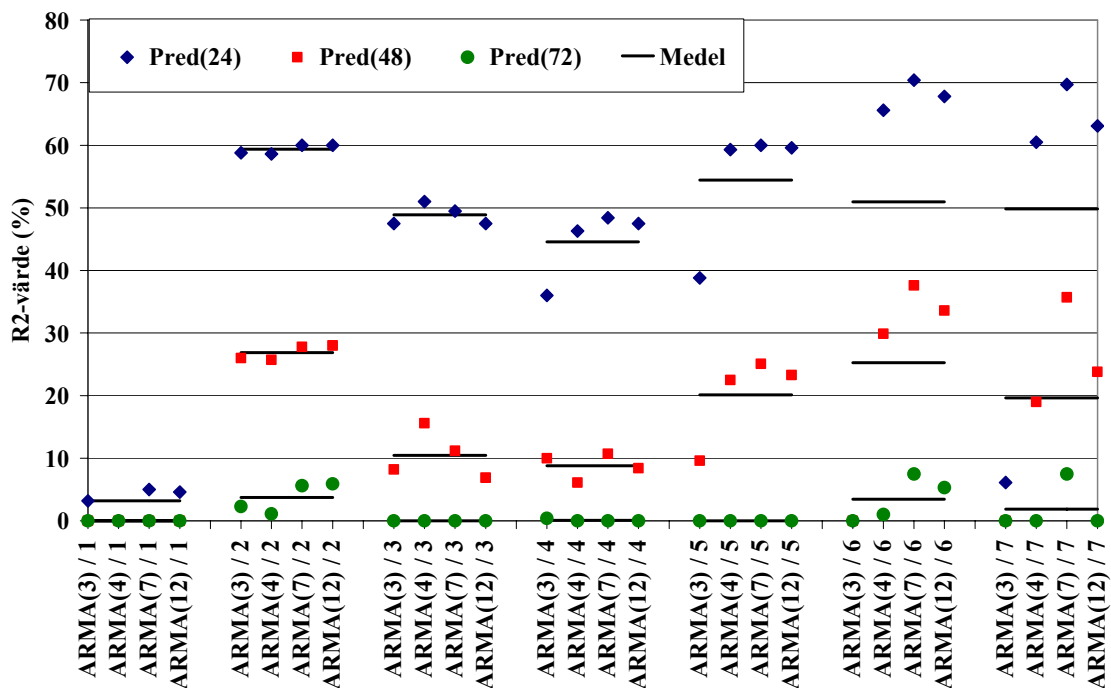
Modellnamn	Kalibreringsperiod	Valideringsperiod	LP-filtrering av data	LP-filtrering av utsignal
1	24/9 07 – 29/12 07	8/9 08 – 13/12 08	Nej	Nej
2	24/9 07 – 29/12 07	8/9 08 – 13/12 08	Ja*	Nej
3	24/9 07 – 29/12 07	21/2 08 – 27/5 08	Ja*	Nej
4	24/2 07 – 31/5 07	21/2 08 – 27/5 08	Ja*	Nej
5	24/2 07 – 31/5 07	8/9 08 – 13/12 08	Ja*	Nej
6	24/2 07 – 31/5 07	8/9 08 – 13/12 08	Ja*	Ja*
7	24/2 07 – 31/5 07	21/2 08 – 27/5 08	Ja*	Ja*

\* Lågpasfiltrering över tre dygn



Figur 21 R<sup>2</sup>-värde för ett urval av undersökta AR-modeller.

Figur 22 visar resultat från ARMA-modeller som skapats med data som behandlats på samma sätt som AR-modellerna (se Tabell 6).



Figur 22 R<sup>2</sup>-värde för ett urval av undersökta ARMA-modeller.

För AR- och ARMA-modeller kan följande gemensamma företeelser noteras:

- insignalen måste lågpasfilteras för att modellen ska fungera. Modellen blir bättre om även den predikterade utsignalen lågpasfilteras som den gjorts för modell 6 och 7.
- prediktioner med modellerna för längre tidshorisont än två dygn är inte användbara.



Vad gäller anpassningen blir den ofta högre med ARMA-modeller. Det kan även noteras att ARMA-modeller med 12 parametrar sällan presterar bättre än modeller med 7 parametrar. För AR-modeller däremot ger modellen högre anpassning till systemet ju fler parametrar de innehåller.

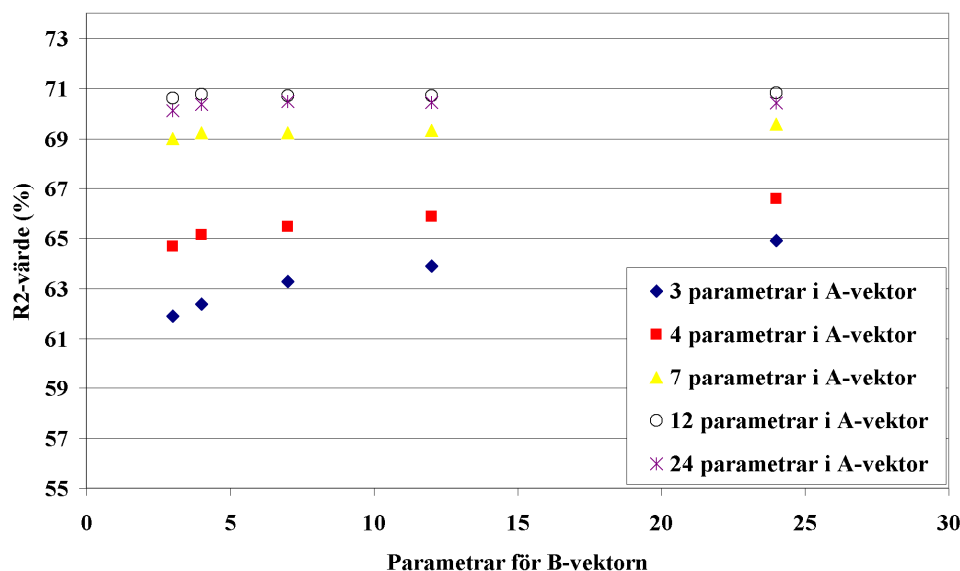
### 4.3.3 ARX-modeller

Figur 23 till Figur 25 visar  $R^2$ -värden för ett antal ARX-modeller skapade med inkommande VS till R100 som insignal och producerad biogas som utsignal. Data är lågpasfiltrerat enligt ekvation (4.2) och modellerna kalibrerades över data som normaliserats. Predikterad biogasproduktion justerades tillbaka så att den blev skalenlig och kunde jämföras med uppmätta värden på biogasproduktionen.

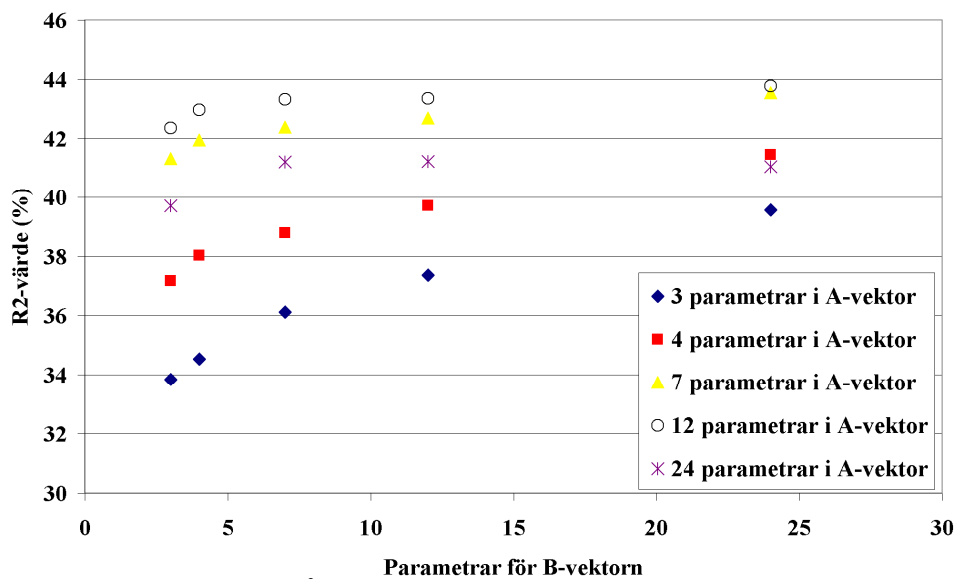
Modellerna kalibrerades över perioden 24/9 – 29/12 2007 och validerade över perioden 21/2 - 27/5 2008.

Resultaten visar att modeller som skapats med inkommande VS (viktenhet / tidsenhet) som insignal ger bättre anpassning till utsignalen än AR- och ARMA-modeller. Detta gäller särskilt för prediktioner på 48 respektive 72 timmar. I Figur 23 till Figur 25 går det att se att modellerna presterar marginellt bättre då antalet parametrar som beskriver insignalen höjs. Modellerna blir klart bättre om den vektor som beskriver biogasproduktionen byggs med upp till 7 parametrar.

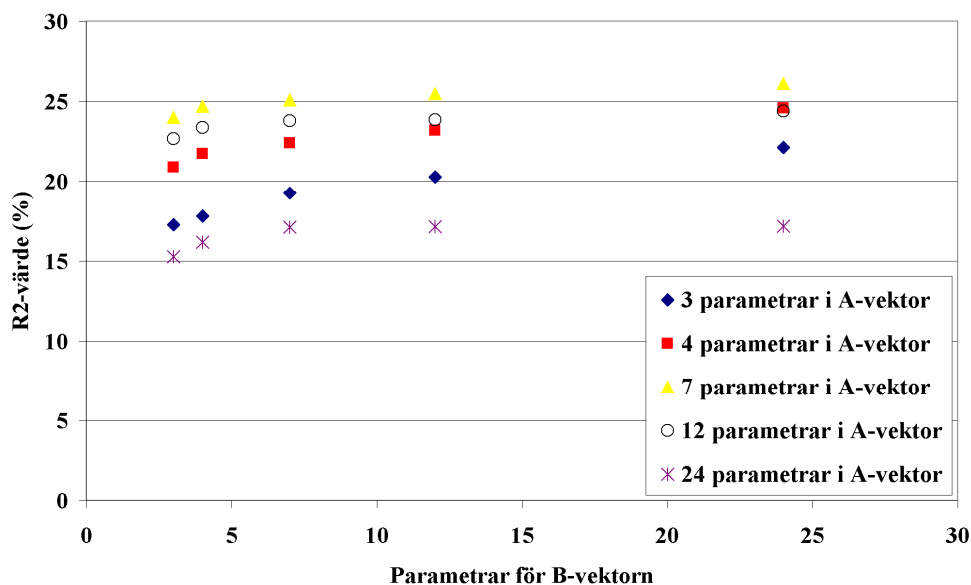
Det undersöktes om ARX-modeller som skapats med inkommande VS som insignal kunde utvecklas med fler insignaler. De variabler som undersöktes var uppehållstid i röt-kammaren, temperatur och pH. Modellerna blev dock marginellt sämre när fler variabler adderades.



Figur 23 ARX-modellers  $R^2$ -värden beroende på antal parametrar för in och utsignal. Prediktion på 24 timmar.



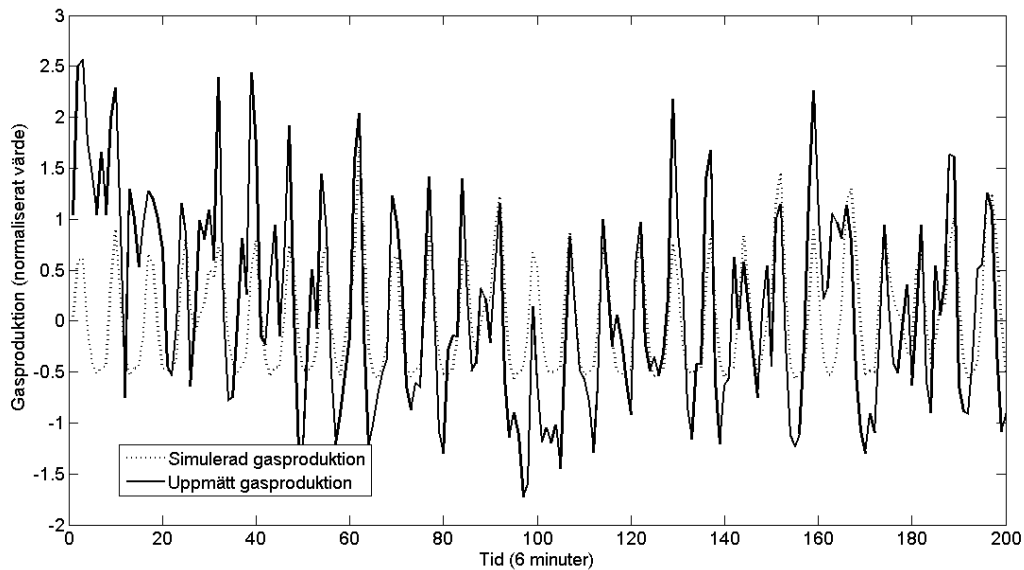
Figur 24 ARX-modellers R<sup>2</sup>-värden beroende på antal parametrar för in och utsignal. Prediktion på 48 timmar.



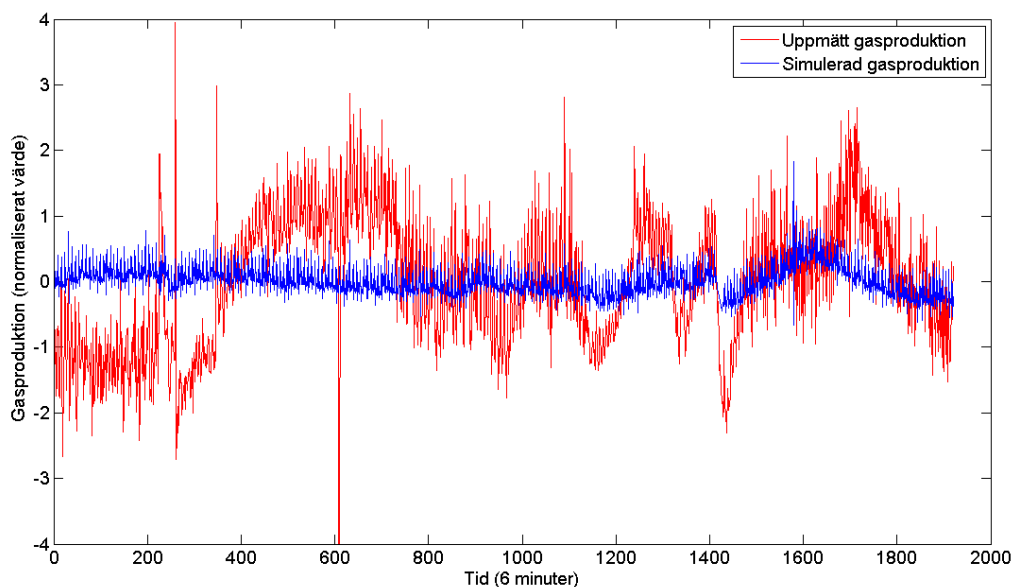
Figur 25 ARX-modellers R<sup>2</sup>-värden beroende på antal parametrar för in och utsignal. Prediktion på 72 timmar.

#### 4.3.4 Övrig analys av de empiriska modellerna

Det undersöktes om en ARX-modell kunde beskriva den snabba responsen i gasproduktion från en ökning/minskning av inkommande primärslam. Då det handlade om korta tidsrymder användes data som medelvärdebildats varje sexminutersperiod vilket var det kortast möjliga tidsintervallet. Värdena som användes för att skatta modellen normaliserades. Resultatet från en simulering av biogasproduktionen (värdena är fortfarande normaliserade) visas i Figur 26 och Figur 27.



**Figur 26 Uppmätt och simulerad gasproduktion med en ARX-modell som har inkommande primärslam som insignal över en kort tidsperiod.**



**Figur 27 Uppmätt och simulerad gasproduktion med en ARX-modell som har inkommande primärslam som insignal över en längre tidsperiod.**

Som figurerna ovan visar finns en tydlig och snabb respons från gasproduktionen som beror av inkommande primärslam. Denna respons kan modelleras. Det som inte kan modelleras, med data hämtat med samplingsintervall sex minuter och som inte lågpasfilterats, är gasproduktionens nivå. Det blir tydligt i Figur 27 att den simulerade gasproduktionen ligger på en jämn nivå medan den uppmätta producerade gasproduktionen varierar.

Resultatet från denna undersökning blir intressant då den visar att ökningen av biogas, sett med ett längre tidsperspektiv, sker i nästan samma stund som primärslamflödet ökar.

### 4.3.5 Jämförelse modeller

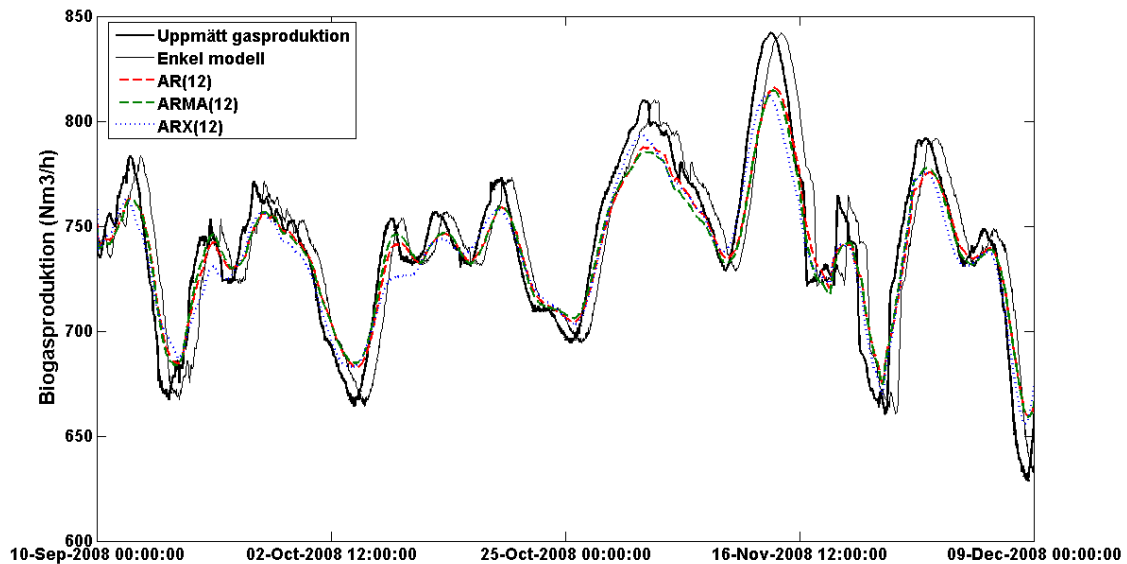
För att få en uppfattning om modellernas förmåga att beskriva biogasproduktionen, jämfördes de sinsemellan samt mot en sorts ”enklaste modell”. Denna modell antar att biogasproduktionen för en viss tid framåt är den samma som det senast tillgängliga värdet enligt

$$\hat{y}(t+k) = y(t) \quad (5.1)$$

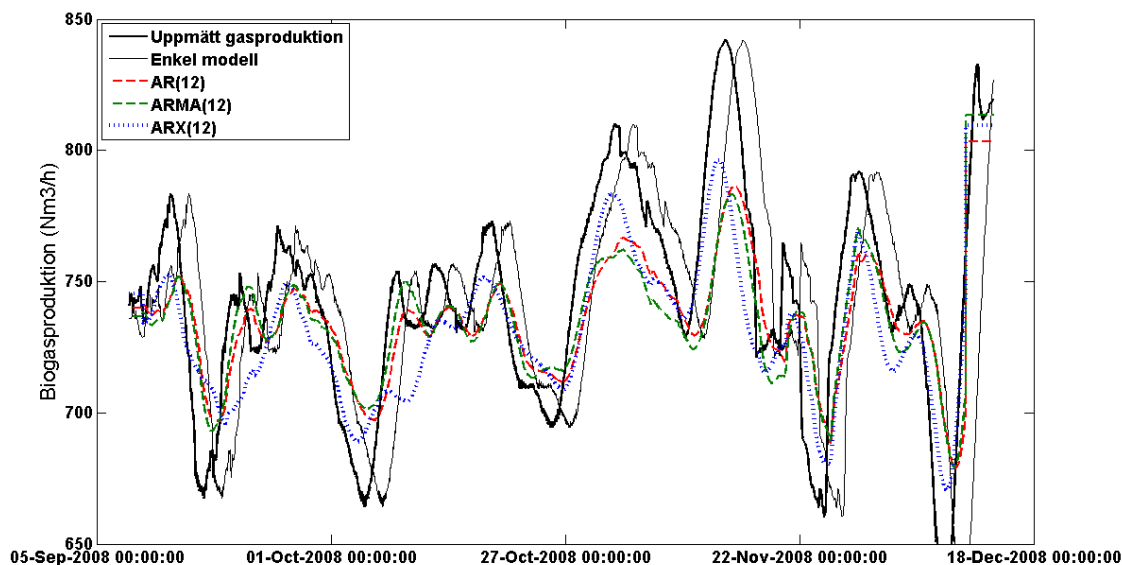
där  $\hat{y}(t+k)$  är predikterad biogasproduktion  $k$  steg fram i tiden

En AR-modell, en ARMA-modell och en ARX-modell skapades med 12 parametrar vardera. De kalibrerades över tidsperioden 24/9 2007 – 29/12 2007 och validerades över perioden 8/9 2008 – 13/12 2008.

Figur 28 visar modellernas prediktioner för 24 timmar framåt. Figur 29 visar modellernas prediktioner för 48 timmar fram i tiden.



Figur 28 Jämförelse mellan uppmätt gasproduktion och en prediktion 24 timmar framåt från empiriska modeller.

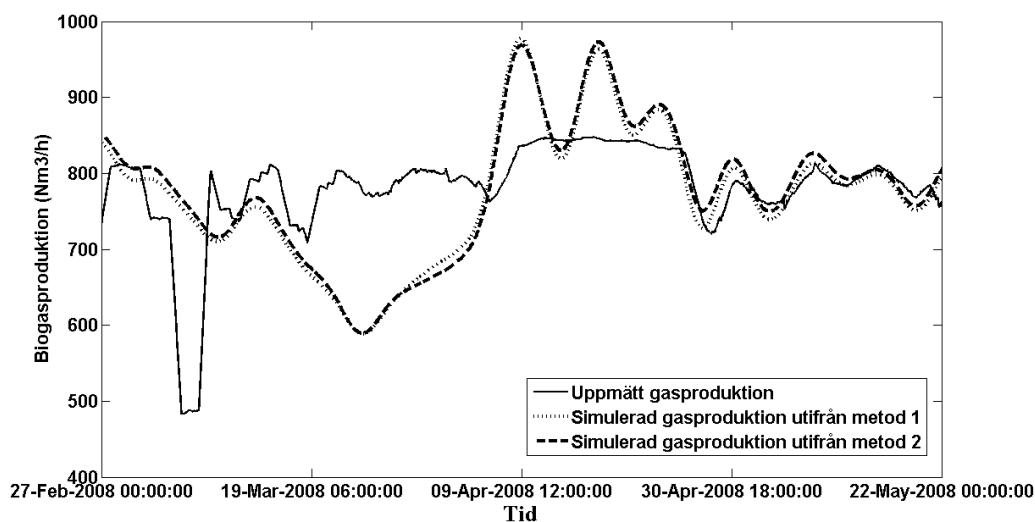


Figur 29 Jämförelse mellan uppmätt gasproduktion och en prediktion 48 timmar framåt från empiriska modeller.

Som väntat beskriver de empiriska modellerna beskriver variationerna betydligt sämre 48 timmar framåt jämfört med 24 timmar. Modellerna reagerar däremot snabbare på förändringar än den enkla modellen. Detta syns tydligast i Figur 29 för 48 timmars prediktioner. I samma figur syns det även att en ARX-modell klarar att prediktera gasproduktionen för längre tidshorisonter än AR- och ARMA-modeller.

#### 4.4 MODELLERING MED FYSIKALISK MODELL

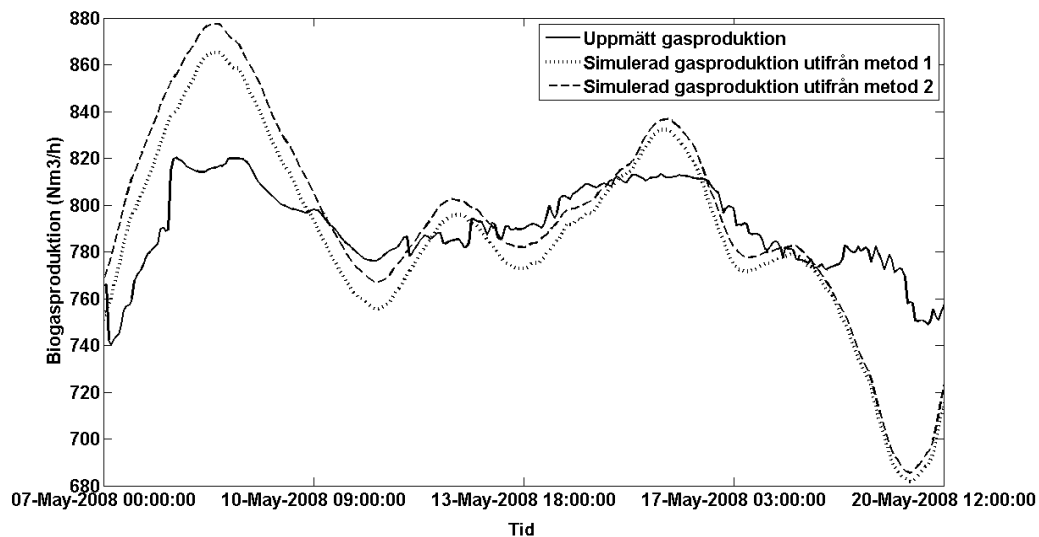
Den fysikaliska modellen som beskrivs i avsnitt 3.5 undersöktes över period 21/2 – 27/5 2008 (Figur 30). Biogasproduktionen simulerades utifrån den specifika gasproduktionen som beräknats utifrån empiriska mätningar (metod 1) och teoretiskt samband enligt ekvation 4.7 (metod 2). Utsignalen är lågpasfilterad över tre dygn enligt ekvation (4.2).



Figur 30 Uppmätt och simulerad biogasproduktion. Simuleringen gjordes med en fysikalisk modell över perioden 21/2 – 27/5 2008.

Modellen är användbar över vissa perioder då sambandet mellan uppehållstid och specifik gasproduktion kan användas på inkommande slam. Däremot finns, som syns i Figur 30, ett flertal längre perioder då sambandet inte stämmer och toppar och dalar i inkommande slam gör att modellen överskattar eller underskattar biogasproduktionen.

Det undersöktes om de tidsperioder som visat sig ge godkända resultat kunde simuleras med den fysikaliska modellen och med en mindre markant lågpasfiltrering. Figur 31 visar resultatet från en simulering över perioden 7/5 – 21/5 2008 med den fysikaliska modellen där data lågpasfiltrerats över ett dygn.



**Figur 31 Uppmätt och simulerad biogasproduktion. Simuleringen gjordes med en fysikalisk modell över perioden 7/5 – 21/5 2008.**

I Figur 31 syns att den simulerade gasproduktionen varierar mer än den uppmätta. För att se om det fanns ytterligare någon variabel som bidrog till variationen gjordes en PC-analys med utvalda variabler. Denna gav inget tydligt resultat men finns presenterad i Appendix B.

#### **4.5 SAMBAND MELLAN INKOMMANDE FLÖDEN, NIVÅ I SVALLSCHAKT OCH PRIMÄRSLAMPRODUKTION**

De grundfaktorer som påverkar primärslamproduktionen kan sammanfattas i följande punkter:

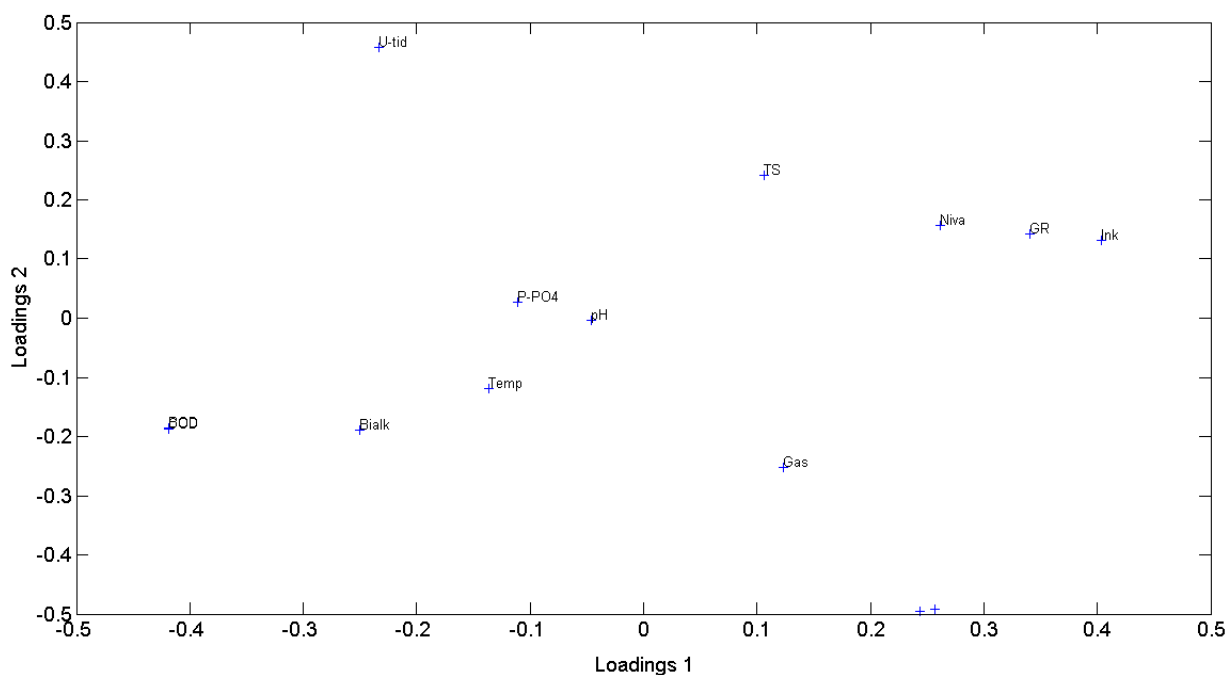
- Inkommande flöde och belastning på försedimenteringsbassängerna
- Nivå i svallschaktet
- Förändringar i inkommande vattenflöden då en ökning av flöde innebär att mycket organiskt material som fastnat i tunnelsystemet sköljs med
- Förändring i nivå i svallschaktet då en sänkning innebär att material som flyter i vattnet sköljs ut ur schaktet

För att undersöka om några av dessa faktorer kunde ses som ett samband i PCA gjordes en PC-analys med data med samplingsintervall ett dygn över de variabler som visas i Tabell 7.

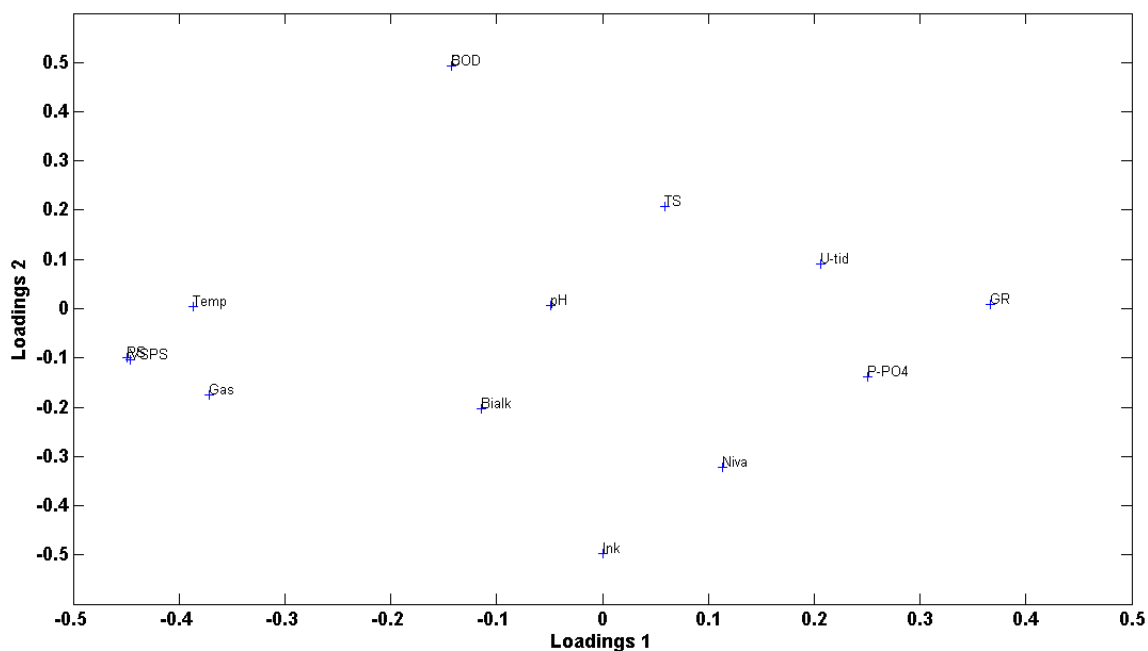
**Tabell 7. Variablerna som användes i analys av samband för inkommande vatten**

<i>Variabel</i>	<i>Enhet</i>	<i>Benämning</i>
Uppmätt producerad biogas	Nm <sup>3</sup> /h	Gas
Inkommande slamflöde	l/s	PS
VS i inkommande primärslam	kg/s	VSin
Uppehållstid i R100	dygn	U-tid
Temperatur i R100	grader C	Temp
pH i R100		pH
TS i R100	%	TS
GR i R100	%	GR
Bikarbonatalkalinitet i R100	mg CaCO <sub>3</sub> /l	Bi-alk
Fosfatfosfor i R100	mg/l	P-PO4
Inkommande flöde	l/s	Ink
Nivå i svallschakt	m	Niva
BOD i inkommande vatten	mg/l	BOD
COD i inkommande vatten	mg/l	COD

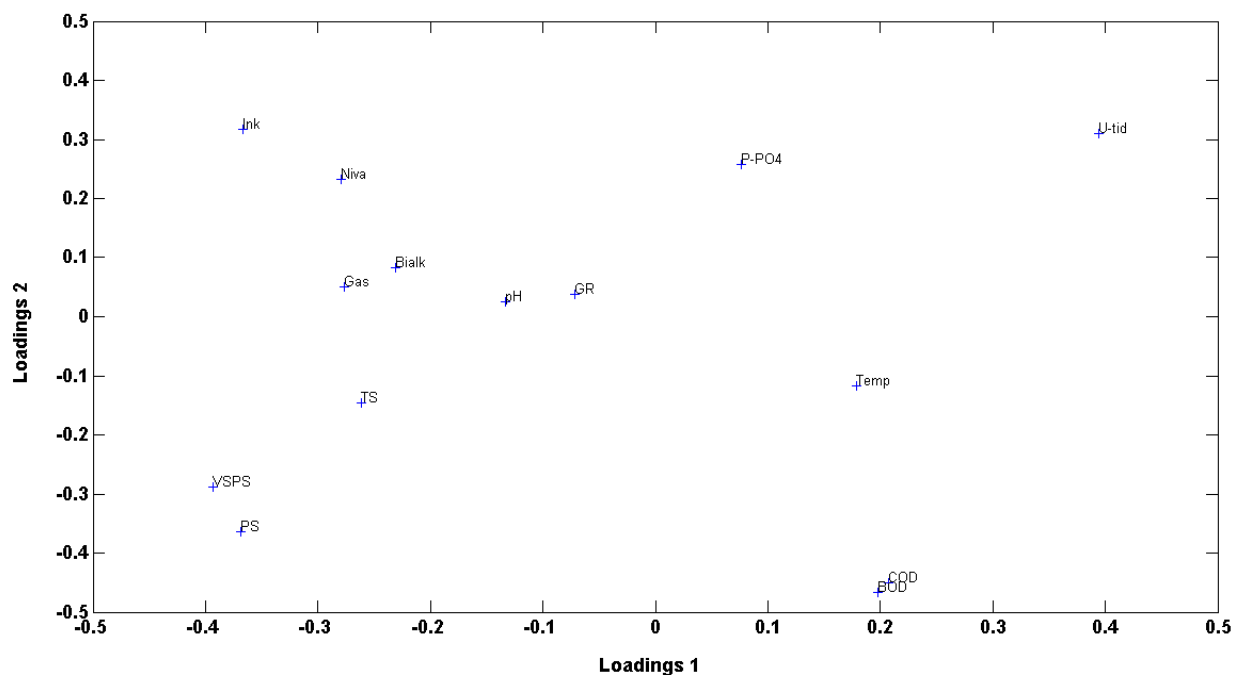
Figur 32 till Figur 34 visar loadingvärden från några av de modeller som gjordes över parametrarna i tabellen ovan.



**Figur 32 Loadings 1 och 2 från en PC-modell med data med samplingsintervall ett dygn från 2007.**



Figur 33 Loadings 1 och 2 från en PC-modell med data med samplingsintervall ett dygn från 2005.



Figur 34 Loadings 1 och 2 från en PC-modell med data med samplingsintervall ett dygn från 2006

Inkommande flöde och nivå i svallschaktet bildar inte alltid en tydlig grupp även om de följer varandra.

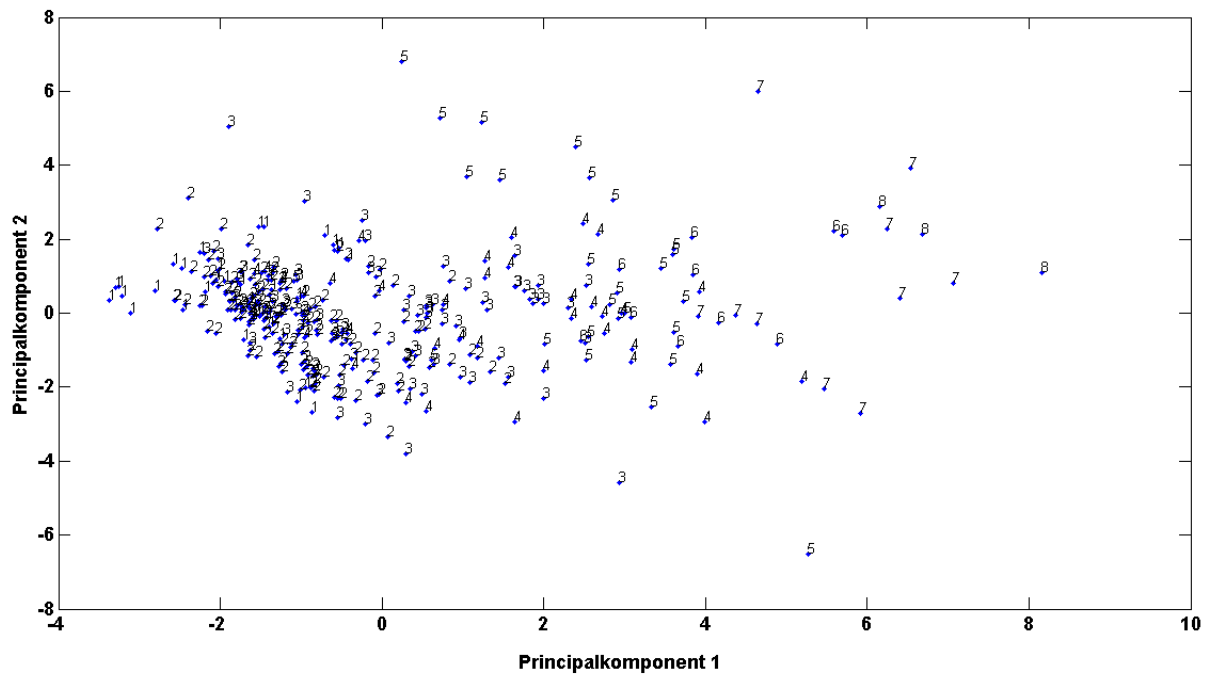
Det undersöktes hur processen varierade vid olika flöden och då olika nivåer hölls i svallschaktet. Detta gjordes genom att markera data utifrån olika egenskaper på plottar för de första principalkomponenterna från PC-modeller. För parametrarna inkommande flöde och nivå i svallschaktet angavs intervall på signalen som markerades med en siffra (Tabell 8).



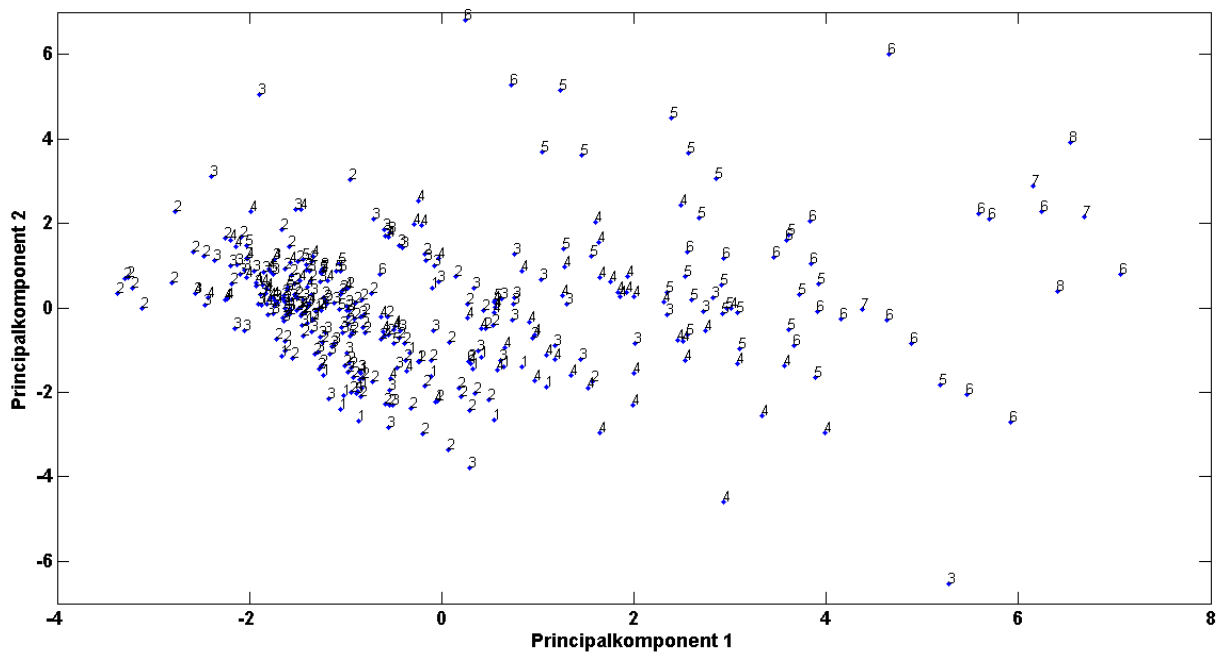
Denna siffra fick markera principalkomponenternas score. I Figur 35 och Figur 36 visas resultaten från en PC-modell som är gjord med data från 2007.

**Tabell 8** Beskrivning över hur olika nivåer av inkommande flöde samt nivå i svallschaktet benämndes.

Benämning	Inkommande flöde l/s	Nivå i svallschakt m
0	<1	<1
1	1-1,25	1-1,2
2	1,25-1,5	1,2-1,3
3	1,5-1,75	1,3-1,4
4	1,75-2	1,4-1,5
5	2-2,5	1,5-1,7
6	2,5-3	1,7-2
7	3-4	2-4
8	>4	>4



**Figur 35** Principalkomponent 1 och 2 från en PC-modell med data med samplingsintervall ett dygn från 2007. Punkterna är numrerade utifrån inkommande vattenflöde



**Figur 36 Principalkomponent 1 och 2 från en PC-modell med data med samplingsintervall ett dygn från 2007. Punkterna är numrerade utifrån nivå i svallschaktet**

I figurerna kan man se att processen varierar liknande vid höga flöden och höga nivåer i svallschaktet. Detta styrks av loadings-värdena som visas i Figur 32 till Figur 34. Hur resultatet ska implementeras återstår att utreda.

## 5 DISKUSSION

I detta arbete har flera erfarenheter gjorts vad gäller modellering och hantering av data. En av de viktigaste aspekterna har varit vikten av att hantera data på passande sätt för att erhålla resultat av kvalitet. Data måste förbehandlas så att prognosverktyget kan ge det som den syftar till att leverera.

Det bör också noteras att det system som ska beskrivas drivs av mikroorganismer. Som nämnts i avsnitt 2.3 går det att beskriva dem matematiskt. Det bör ändå hållas i åtanke att mikroorganismer är levande och kan anpassa sig till sin miljö. En matematisk beskrivning av dem bör alltså kontrolleras och uppdateras.

### 5.1 PREDIKTIONSHORISONT

Den prediktionshorisont som visats mest givande att använda i ett framtida prognosverktyg är ett till ett par dygn. Då finns det tillgång till information som kan användas för att uppskatta mängden slam som pumpas till rötkammarna. Om prognoser ska göras över gasproduktionen för längre perioder framåt i tiden, får statistik från tidigare år och kunskap om hur processen gått, anses tillräckliga.

### 5.2 MULTIVARIABEL ANALYS

Analysen med multivariata metoder användes främst för att finna samband och samvariationer mellan variabler. Resultaten bidrog inte direkt till någon ny kunskap. De samband som tydligt kunde utläsas och som dominerade de flesta PC-modeller var redan kända och tydliga. Mindre tydliga samband som hade varit givande att hitta, var dock svåra att urskilja eftersom de PC-modeller som skapades över olika perioden blev olika och var svåra att jämföra.

I ett fall, där det undersöks hur PC-modellerna påverkas av hur samplingsintervallet valts, kunde resultatet jämföras enkelt (avsnitt 4.2.2). PC-modellerna skapades med samma variabler över samma tidsperiod men med olika samplingsintervall. Modellerna blir nära på identiska förutom för variabeln ”fosfatfosfor i R100” som inte får ett konsekvent värde i modellen. Det är ett tecken på att fosfatfosfor har mycket låg korrelation med övriga variabler. PC-modellerna kan inte variera särskilt mycket då de baseras på samma information men med olika upplösning.

Svårare var det att jämföra resultatet från PC-modeller som byggdes med samma data men över olika tidsperioder. Det var nödvändigt att använda olika tidsperioder för att få en förståelse för om de samband som syntes var bestående eller varierade. Om en variabel flyttade runt i modellen kunde det bero på att variabeln inte korrelerade med någon annan, som nämnts i avsnittet ovan, eller att korrelationen var tillfällig och enbart gällde för den tidsperiod som valts. Tyvärr kunde endast de variabler som beräknats utifrån inkommande primärsлам tolkas från resultatet som bestående grupperingar. Ingen annan variabel kunde bekräftas korrelera med någon annan enligt analysen.

En osäkerhet i hur mycket som kunde uttolkas från resultatet kom från att normaliseringen av data påverkade analysen. För PCA krävs att data normaliserades då variansen används för att beräkna korrelation. All data normaliserades på samma sätt (se avsnitt 3.1.2) för att få konsekvens i analysen även om detta kan ha påverkat resultatet.

I avsnitt 4.2.2 visas att samplingsintervallet för data inte påverkar PCA nämnvärt. Däremot kvarstår en viss osäkerhet i hur mycket de olika tidsskalorna påverkade resultatet. De variabler som gav resultat visade ett snabbt, tydligt samband. Andra variabler som påverkar processen över en längre period kan ha undgått upptäckt trots lågpasfiltrering av data.

PCA var en tillgång när det gällde att undersöka en förändring i processen vad gäller tid, höga flöden eller andra variabler. Genom att plotta modellens scores, projiceringen på principalkomponenterna, mot varandra och märka ut modellens punkter utifrån egenskap blev det tydligt om mönster fanns i systemets variation. Även om resultaten från denna sorts undersökning inte lätt kunde användas direkt, erhöles information om systemet.

## **5.3 EMPIRISK MODELLERING**

Den typ av modeller som visat sig fungera bäst för ett framtida prognosverktyg var empirisk modellering. Det var dock viktigt att tydliga samband modellerades med rätt tidsperspektiv och med data som behandlats på rätt sätt avseende bland annat på variation och skala.

### **5.3.1 Filtrering av data**

Signalen för biogasproduktionen påverkades av variabler med olika frekvenser. Den snabba reaktionen på gasproduktionen som kom från inkommande slam gav en hög frekvens på signalen samtidigt som förändringar i substrat och de fysikaliska förhållandena i rötammarna gav lägre frekvenser på signalen.

Till prognosverktyget söktes en modell som kunde beskriva utgående biogasproduktion efter hur mycket som pumpats in samtidigt som den mer långsiktiga variationen inkluderades.

I ett försök att lösa detta lågpasfiltrerades data innan kalibrering. Det visade sig att bäst resultat erhöles om data med samplingsintervall en timme, lågpasfiltrerats över tre dygn. Risken med en så grov filtrering är att signaler filtreras bort. Försök med en mindre filtrering gjordes men de visade sig att de empiriska modellerna fortfarande fokuserade på de högfrekventa signalerna. Att ta i beaktande är att uppehållstiden i rötammarna varierar mellan 15 och 20 dagar för R100 och 10 till 15 för R200. En filtrering med medelvärden över tre dygn skulle kunna bidra till att de mer långsiktiga variationerna lyfts fram. Inkommande flöden blir dock delvis bortfiltrerat.

Ett alternativ att både få med de långsiktiga variationerna och inkommande primärslam är att göra en modell som skattas rekursivt (se avsnitt 5.6.2).

### **5.3.2 Antal parametrar**

Det kan diskuteras hur stort antal parametrar som är nödvändigt för en modell. Om för många parametrar används finns en risk att modellen överanpassas till kalibreringsperioden och sedan inte är validerbar för andra perioder. I detta fall kalibreras modellerna över en så stor datamängd att detta inte utgjorde någon risk. Däremot undersöktes modellerna med så lågpasfiltrerad data att betydelsen av antal parametrar kom att spela en mindre roll. För AR-modeller blir resultatet marginellt men ändå konsekvent bättre om fler parametrar användes för att skatta den vektor som beskriver utsignalen, biogasproduktionen. Det blir sedan en avvägning huruvida det är nödvändigt att använda ett dubbelt antal parametrar för att få en marginellt bättre modell.

Vad gäller ARX-modellerna blev dessa inte bättre av att ordningstalet på B-vektorn ökades. I Figur 26 (avsnitt 4.3.4) syns det tydligt hur biogasproduktionen snabbt reagerar på en ökning av inkommande VS. Inkommande organiskt material påverkar systemet både kortsiktigt och långsiktigt. Däremot blir inte de hittills undersökta ARX-modellerna bättre om hänsyn tas till långt föregående värden av inkommande VS.

### **5.3.3 Variation av statistik för biogasproduktionen**

Empiriska modeller byggs upp utifrån de signaler som mäts från systemet. För att modellerna ska kunna beskriva systemet bra krävs det att signalernas statistik inte varierar för mycket. Vad gäller biogasproduktionen så varierar dess statistik (medelvärde och varians) troligtvis över året.

Enskilda modeller för perioder med olika statistik har inte skapats då inga tydliga perioder kunnat identifieras. Däremot verkar det inte helt korrekt att använda samma statistik till att skapa modeller som ska beskriva biogasproduktionen.

Genom att se till att modellen kontinuerligt uppdaterar sina parametrar utifrån den senaste biogasproduktionen skulle bättre prediktioner kunna göras (avsnitt 5.6.2).

## **5.4 FYSIKALISK MODELLERING**

Modellering med fysikaliska samband visade sig inte ge tillräckligt noggranna resultat för att kunna simulera biogasproduktionen. Alltför stor vikt lades vid hur mycket slam som fördes in i röt-kammaren. Då röt-kammarens uppehållstid är 10-20 dygn kommer det innehåll som redan finns i röt-kammaren att påverka biogasproduktionen men modellen tog enbart hänsyn till inkommande slam.

En förbättring av modellen skulle kunna göras om hänsyn togs till nuvarande gasproduktion men då de empiriska modellerna visat bättre resultat för sådan modellering, användes dessa.

## **5.5 OSÄKERHETER I MODELLERINGEN**

I detta arbete har fokus legat på att undersöka modellernas förmåga att användas i ett prognosverktyg och inte på att optimera en viss modell. I det senare scenariot kommer det krävas en mer noggrann undersökning och eventuellt justering av data från osäkra givare.

### **5.5.1 Inkommande organiskt material, VS**

Inkommande VS används som insignal till flera modeller och kommer att vara viktig i prognosverktyget. Den osäkerhet som finns i modellen utifrån mätningar kommer med all säkerhet behövas ses över vad gäller TS-mätningar (avsnitt 3.2.2) och mätningar av glödresten som är veckovisa analysvärden från laboratorium.

För övrigt är VS är en relativt grov benämning av organiskt material då den inte säger någonting om dess sammansättning. Vad gäller fraktioneringen av organiskt material till Käppalaverket anses den inte variera betydande (Sundin, 2008, pers. kom.). Något som talar för detta är att andel metan som mäts i den producerade biogasen inte varierar mer än några procent. Hade inkommande organiskt material varierat i sammansättning vad gäller kolhydrater, fett, protein, mineraler etc, så hade detta avspeglats i metanhalt (VAV, 1981). En framtida fråga är om variationen som finns i fraktioneringen av det

organiska materialet trots allt påverkar rötningsprocessen så att detta behövs behandlas i prognosverktyget.

## **5.6 UTVECKLING AV PROGNOSEVERKTYGET**

För ett fullt fungerande prognosverktyg krävs att modellerna förbättras. Skattningar på insignalen, inkommande VS, utifrån bland annat inkommande vatten är troligtvis nödvändiga för att prognosverktyget ska bli så exakt att det kan användas.

En längre prediktionshorisont erhålls om inkommande vatten kan predikteras utifrån nivå i tunnelsystemet.

### **5.6.1 Samband mellan inkommande flöden, nivå i svallschakt och primärslamproduktion**

De samband som noterats mellan inkommande flöde och primärslamproduktion har inte implementerats i prognosverktyget än. Fortfarande kvarstår att lösa hur nivån i tunnelsystemet och inkommande flöden samt inkommande flödestoppar påverkar slamproduktionen.

Att hålla i åtanke är att det inte finns ett direkt samband mellan inkommande flöde och primärslammängder då uttaget styrs manuellt med flera dygns intervall. En koppling kan därför inte göras för tidsperspektivet kortare än några dygn.

### **5.6.2 Rekursiv skattning med glömskefaktor**

De empiriska modellerna har kalibrerats över en lång period för att kunna vara representativa för rötningsprocessen över året. Som visats i PCA varierar systemet i tiden och modellerna blir så allmänna att många detaljer inte uppmärksammas.

För att göra tillräckliga modeller som kan modellera systemet i tiden kommer det troligtvis krävas att de byggs ut med en rekursiv del. Det innebär att parametrarna i modellen uppdateras efterhand. Mer högfrekvent data kan användas vilket leder till att mer vikt i modellerna läggs på inkommande organiskt material. Samtidigt är parametrarna kalibrerade för de långsiktiga variationerna som har längre variation.

## 6 REFERENSER

Barampouti E. M. P., Mai, S. T., Vlyssides, A. G., (2005), "Dynamic modelling of biogas production in an UASB reactor for potato processing wastewater treatment", *Chemical engineering Journal*, Vol 106, pp 53-58

Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H., Vavilin, V.A., (2002), *In Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1)*, IWA Publishing, Bedfordshire

Bernard, O., Chachuat, B., Hélias, A., Rodriguez, J., (2006), "Can we assess the model complexity for a bioprocess: theory and example of the anaerobic digestion process", *Water Science and Technology*, Vol 53 (1), pp 85-92

Borglund, A. M., (2005), *Kartläggning av Käppalaverkets röt-kammardrift*, Käppalaverket, Delrapport version 051130, Stockholm

Bruce, A. M., (1984), *Sewage Sludge Stabilisation and Disinfection*, Water Research Centre / Ellis Horwood Limited, West Sussex, England

Bungay, S., Abdelwahab, M., (2008), "Monsal Enzymic Hydrolysis – New developments and lessons learnt", 13<sup>th</sup> European Biosolids & Organic Resources Conference & Workshop

Costello, D. J., Greenfield, P. F., Lee, P. L., (1991), "Dynamic modelling of a single-stage high-rate anaerobic reactor I", *Water Research*, Vol. 25 (7), pp 847-858

Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold N., Wold, S., (1999), *Introduction to Multi- and Megavariate Data Analysis using Projection Methods (PCA & PLS)*, Umetrics AB, Umeå

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., Tatham, R. L., (2006), *Multivariate Data Analysis*, Pearson Education Inc., New Jersey, 6<sup>th</sup> edition, ISBN 0-13-032929-0

Inger, M., Norin, E., Mathiesen, B., (1997), *Hygienisering av Biologiskt avfall*, Jordbrukstekniska Institutet, JTI rapport Nr 10, Uppsala

IPCC, (2001), *Climate change 2001: Synthesis report*, IPCC Plenary XVIII, Wembley, United Kingdom

Jarvis, Å., (2004), *Biogas -förnybar energi från organiskt avfall*, Svenska Biogasföreningen, Malmö

Johansson, B., (2007), *Käppalaförbundet 50 år – för renare sjöar och skärgård*, Alfaprint, Stockholm

Joliffe, I. T., (1986), *Principal Component analysis*, Springer-Verlag, New York Inc, New York, ISBN 3-540-96269-7

Leksell, N., (2005), *Käppalaverkets nuvarande och framtida rötningskapacitet – en studie i labbskala*, Examensarbete 30 hp, Institutionen för mikrobiologi, Sveriges Lantbruksuniversitet, W 05 038

Ljung, L., Glad, T., (2002), *Modellbygge och simulering*, Studentlitteratur, Lund

Naturvårdsverket, (2007), *Regler för avloppsslam*, Naturvårdsverket.se, <http://www.naturvardsverket.se/sv/Verksamheter-med-miljopaverkan/Avlopp/Avloppsslam/Regler-for-avloppsslam/>

Revaq, (2008), *Om Revaq*, [www.revaq.se](http://www.revaq.se)

Sundin, A. M., (2008), “Disintegration of sludge – a way of optimizing anaerobic digestion”, 13<sup>th</sup> European Biosolids & Organic Resources Conference & Workshop

Svenska Gasföreningen och Svenska Biogasföreningen, (2008), *Produktion och användning av biogas år 2006*, Statens energimyndighet, ER 2008:2

Thyselius, L., (1982), *Biogas från gödsel och avfall*, Jordbrukstekniska Institutet, Meddelande Nr 391, Uppsala

VAV, (1981), *Rötning av kommunalt slam*, Svenska vatten- och avloppsföreningen, Publikation VAV P42, Stockholm

Yetilmezsoy K., Sakar S., (2007), ”Development of empirical models for performance evaluation of UASB reactors treating poultry manure wastewater under different conditions”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 153, pp 532-543,

### **Programvara**

The Mathworks Inc, (2007), ”MATLAB – The Language of Technical Computing”, ©1984 - 2007

### **Personlig kommunikation**

Leif Bergman, (2008), Miljösamordnare, Käppalaförbundet

Dervisa Karat, (2009), Kvalitets och tekniskt ansvarig kemist på Käppalaverkets laboratorieverksamhet, Käppalaförbundet

Torsten Palmgren, (2009), Teknisk chef, Käppalaförbundet

John Rahm, (2009), Drifttekniker, Käppalaförbundet

Anna Maria Sundin, (2008), Utvecklingsingenjör, Käppalaförbundet

Tommy Söderberg, (2009), Drifttekniker, Käppalaförbundet



## APPENDIX A - Prediktion av AR-modeller

AR-modeller beskrivs enligt:

$$y(t) = \alpha_1 y(t-1) + \alpha_2 y(t-2) + \dots + \alpha_n y(t-n) + e(t) \quad (1)$$

där  $y(t)$  är insignal och  $e(t)$  vitt brus. För prediktion av  $y(t)$ , stryks  $e(t)$  då detta är en stokastisk process som per definition inte kan predikteras.

$$\hat{y}(t) = \alpha_1 y(t-1) + \alpha_2 y(t-2) + \dots + \alpha_n y(t-n) \quad (2)$$

där  $\hat{y}(t)$  är en skattning av  $y(t)$ . Prediktionen av  $\hat{y}(t+k|t)$  sker enligt:

$$\hat{y}(t+k|t) = \alpha_1 \hat{y}(t+k-1|t) + \alpha_2 \hat{y}(t+k-2|t) + \dots + \alpha_{t+k-1} \hat{y}(t+1|t) + \alpha_{t+k} y(t) + \dots + \alpha_n y(t-n+k) \quad (3)$$

där alla framtida värden på insignalen skattas i en iterativ process. I (4) och (5) beskrivs hur  $\hat{y}(t+2|t)$  skattas.

$$\hat{y}(t|t-1) = \alpha_1 y(t-1) + \alpha_2 y(t-2) + \dots + \alpha_n y(t-n) \quad \Leftrightarrow$$

$$\hat{y}(t+1|t) = \alpha_1 y(t) + \alpha_2 y(t-1) + \dots + \alpha_n y(t-n+1) \quad (4)$$

I (5) används skattningen för  $\hat{y}(t+1)$  från (4) enligt

$$\begin{aligned} \hat{y}(t+2|t) &= \alpha_1 \hat{y}(t+1) + \alpha_2 y(t) + \dots + \alpha_n y(t-n+2) = \\ &\alpha_1 (\alpha_1 y(t) + \alpha_2 y(t-1) + \dots + \alpha_n y(t-n+1)) + \alpha_2 y(t) + \dots + \alpha_n y(t-n+2) = \\ &(\alpha_1^2 + \alpha_2) y(t) + (\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_3) y(t-1) + \dots + \alpha_n y(t-n+2) + \alpha_1 \alpha_n y(t-n+1) \end{aligned} \quad (5)$$

## APPENDIX B - Utveckling av fysikalisk modell med PCA

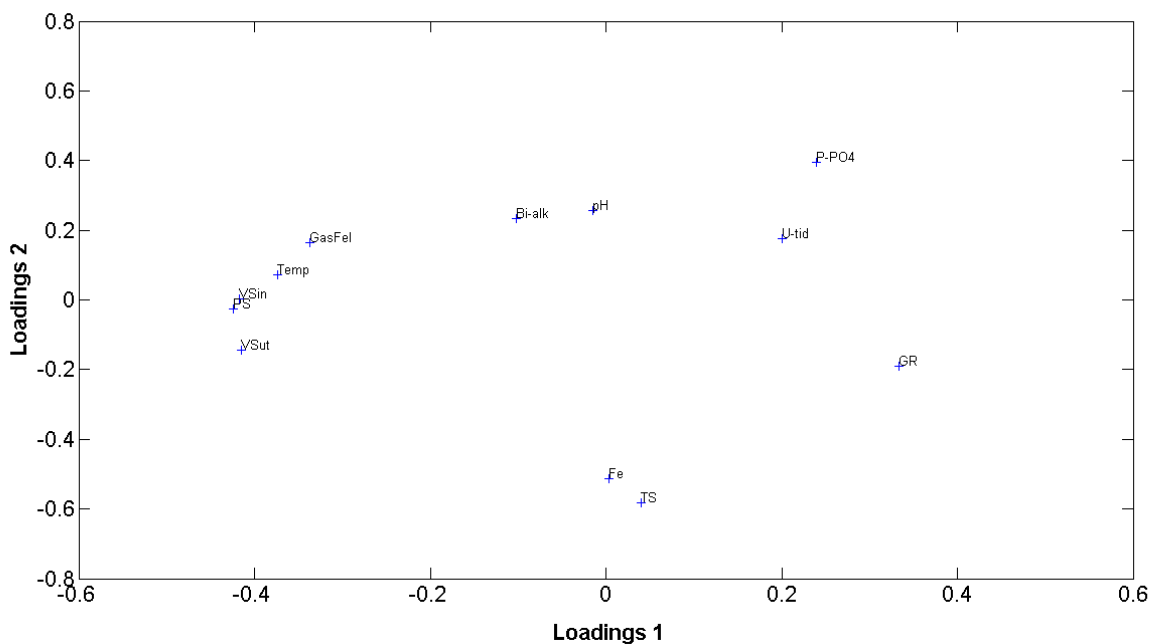
PCA användes för att utvärdera om det fanns en eller flera variabler som kunde förbättra den fysikaliska grundmodellen (se ekvation (4.8)) som beskrivs i avsnitt 3.5. Prediktionsfelet (se avsnitt 3.8) för modellen beräknades och användes som en variabel i en PCA. Tabell B 1 visar de övriga variabler som undersöktes tillsammans med prediktionsfelet.

**Tabell B 1 Variabler från R100 som analyserades mot felet från den fysikaliska modellen.**

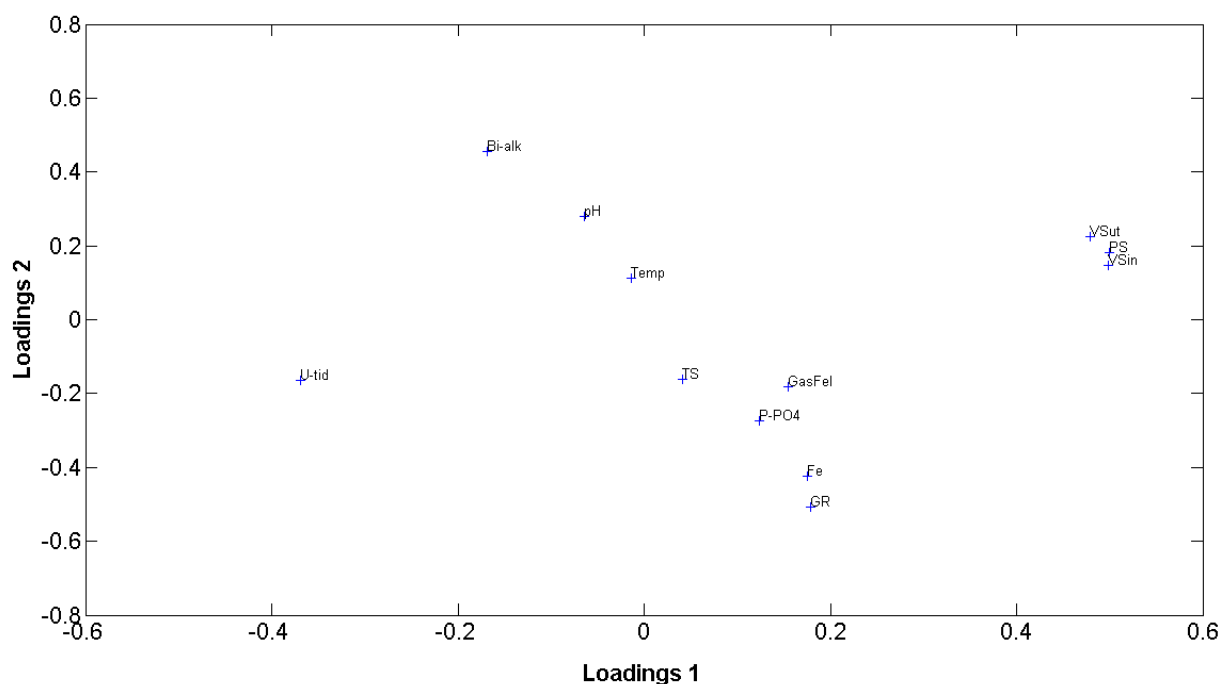
<i>Variabel</i>	<i>Enhet</i>	<i>Benämning</i>
Prediktionsfel	Nm <sup>3</sup> /h	GasFel
Inkommande slamflöde	l/s	PS
VS i inkommande slam	kg/s	VSin
VS ut ur rötammaren	kg/s	VSut
Uppehållstid i rötammaren	dygn	U-tid
Temperatur i rötammaren	grader C	Temp
pH i rötammaren		pH
TS i rötammaren	%	TS
GR i rötammaren	%	GR
Bikarbonatalkalinitet i rötammaren	mg CaCO <sub>3</sub> /l	Bi-alk
Fosfatfosfor i rötammaren	mg/l	P-PO4
Järn i rötammaren	mg/l	Fe

Anledningen till att analysen enbart gjordes med R100 är att denna står för cirka 80 % av den totala gasproduktionen och således står för den största delen av det simulerade felet. Ännu en anledning är att R200 tar emot slammet från R100. En förändring i R100 påverkar därför förhållanden i R200 och en analys mot R100 kan antas gälla delvis för R200.

Figur B 1 och Figur B 2 visar loadings för de två första principalkomponenterna från en PC-modell gjord med dygnsdata över tidsperioden 2005 (Figur B 1) och en PC-modell gjord med data med ett samplingsintervall på en timme och under perioden 2007 (Figur B 2).

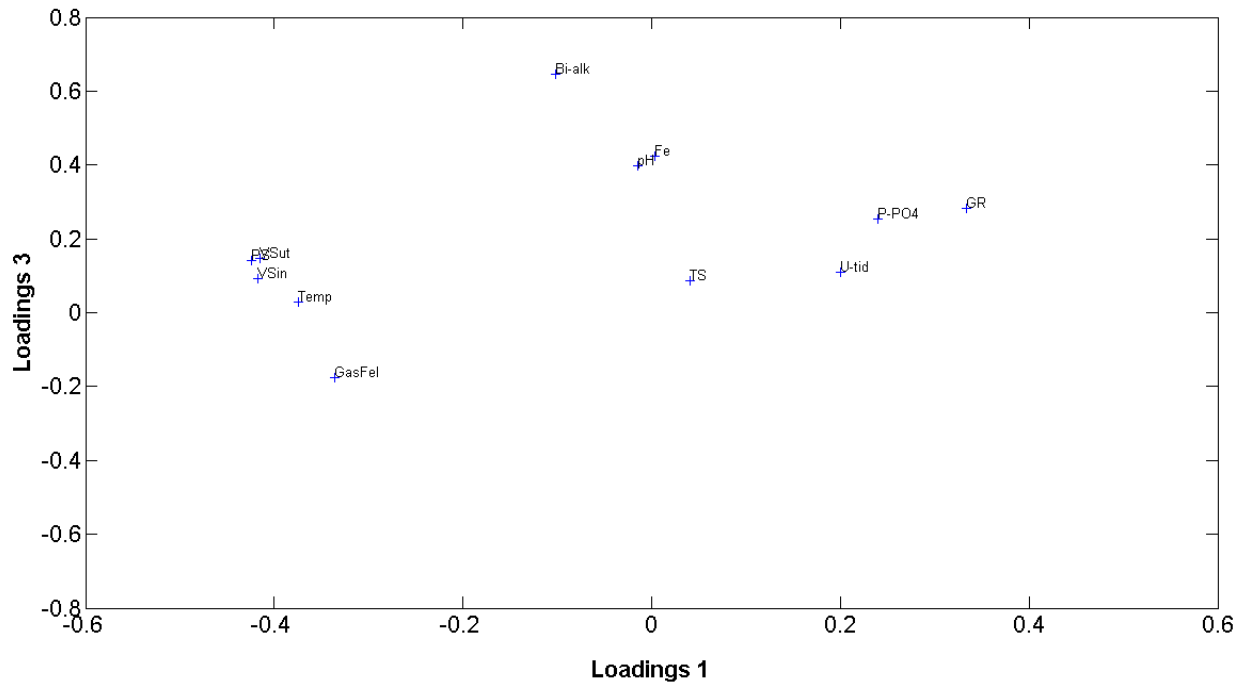


**Figur B 1** Loadingsvärden från principalkomponent 1 och 2 för en PC-modell som skapats med data från 2005 för att undersöka korrelation mellan variabler och prediktionsfelet.

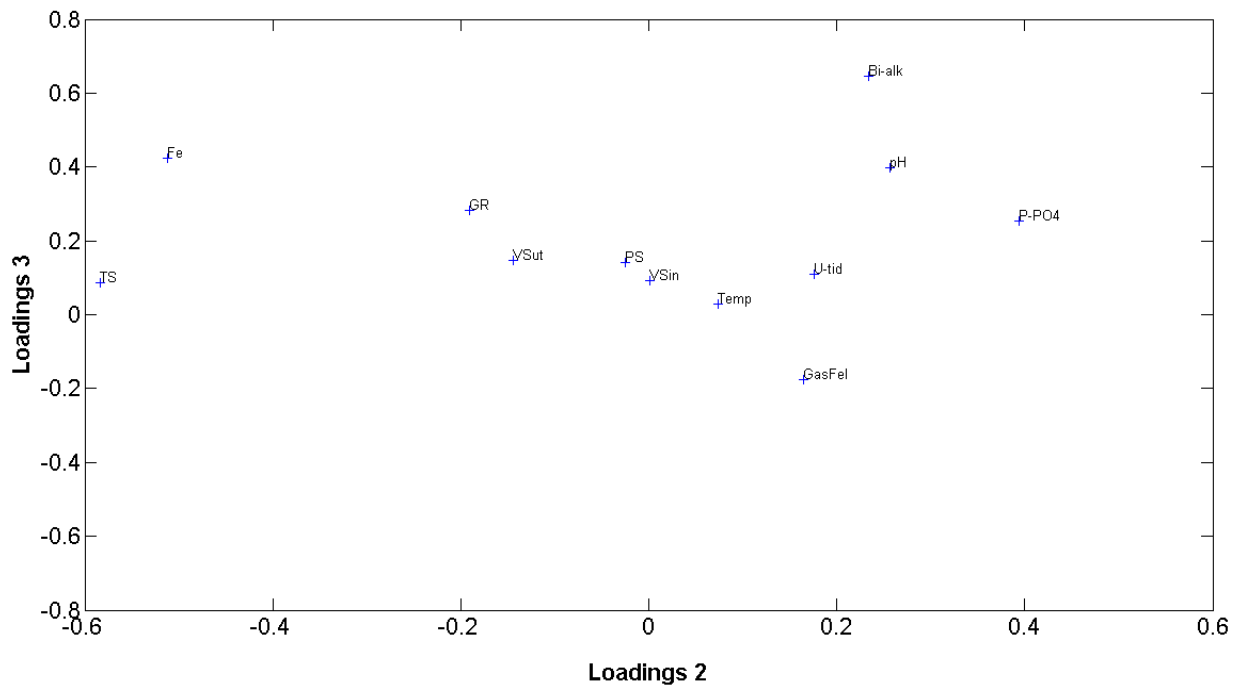


**Figur B 2.** Loadingsvärden från principalkomponent 1 och 2 för en PC-modell som skapats med data från 2007 för att undersöka korrelation mellan variabler och prediktionsfelet.

Liksom i den grundläggande undersökningen korrelerar primärslamflödet, mängd VS in i röt-kammaren och mängd VS ut ur röt-kammaren med varandra. Dessa är negativt korrelerade med uppehållstiden. Vad gäller prediktionsfelet så verkar den inte entydigt korrelera med någon av variablerna. I Figur B 1 antyds det att felet korrelerar svagt med primärslamflödet, mängd VS in i röt-kammaren och mängd VS ut ur röt-kammaren. Detta samband är dock inte genomgående för PC-modellen gjord med data från 2005, se Figur B 3 och Figur B 4.



**Figur B 3** Loadingsvärden från principalkomponent 1 och 3 för en PC-modell som skapats med data från 2005.



**Figur B 4** Loadingsvärden från principalkomponent 2 och 3 för en PC-modell som skapats med data från 2005.

Felet bildar inte en tydlig grupp med primärslamflödet, mängd VS in i röt-kammaren och mängd VS ut ur röt-kammaren. Dessutom har felet lågt loadingsvärde vilket innebär att den har låg påverkan på modellen.

Det undersöktes även om felet i den fysikaliska modellen korrelerade med förändringen av pH-värdet eller temperaturen i röt-kammare R100. Dessa två variabler ska enligt teorin ha stor

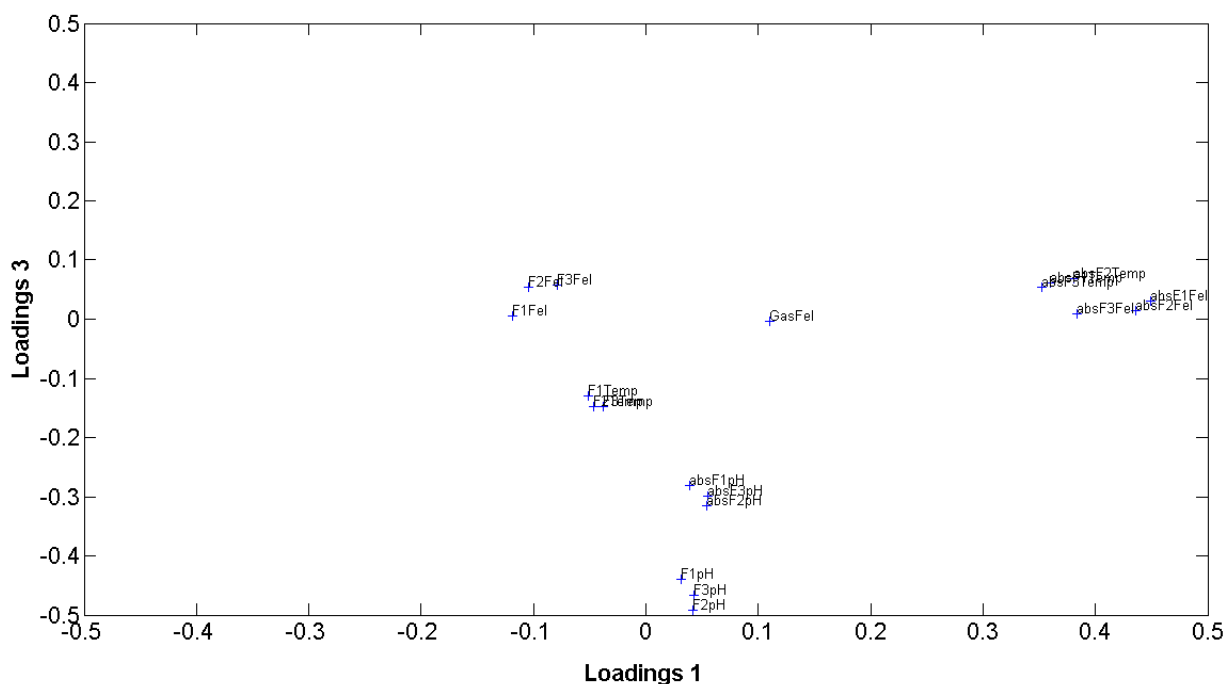
påverkan på rötningsprocessen om de förändras märkbart. Variablerna som användes visas i Tabell B 2.

**Tabell B 2 Förändringen för variabler från R100 som analyserades mot felet från den fysikaliska modellen.**

<i>Variabel</i>	<i>Benämning</i>
Prediktionsfel*	GasFel
Förändringen av prediktionsfelet enligt*	F1Fel, F2Fel, F3Fel
Absolutbeloppet av förändringen av felet*	absF1Fel, absF2Fel, absF3Fel
Förändringen av temperaturen*	F1Temp, F2Temp, F3Temp
Absolutbeloppet av förändringen av temperaturen*	absF1Temp, absF2Temp, absF3Temp
Förändringen av pH*	F1pH, F2pH, F3pH
Absolutbeloppet av förändringen av pH*	absF1pH, absF2pH, absF3pH

\* Förändringen samt absolutbeloppet av förändringen beräknades enligt (4.11) till (4.16)

Ingen tydlig korrelation hittades mellan felet och förändringarna. Figur B 5 visar exempel från en PC-modell som skapades med variablerna i Tabell B 2 Förändringen för variabler från R100 som analyserades mot felet från den fysikaliska modellen. över perioden 2007. Samplingsintervallet för data var en timme. För olika PC-modeller erhåller prediktionsfelet i modellen låga loadingsvärden. I vissa modeller kan förändringen av felet grupperas med exempelvis förändringen av temperaturen. Det var dock ingen konsekvens i sambanden och resultaten användes inte vidare.



**Figur B 5. Loadingsvärden från principalkomponent 1 och 3 för PC-modell 6 som skapats med data från 2007**