

# **Skumningsproblem vid rötning**

**En undersökning om orsaker, problem och åtgärder  
samt praktiska försök**

Andreas Willfors

Examensarbete för ingenjörsexamen (YH)

Utbildningsprogrammet för miljöteknik

Vasa 2013



## EXAMENSARBETE

Författare: Andreas Willfors

Utbildningsprogram och ort: Miljöteknik, Vasa

Handledare: Nina Åkerback/Thomas Andersson

Titel: *Skumningsproblem vid rötning – En undersökning om orsaker, problem och åtgärder samt praktiska försök*

---

Datum: 10.3.2013

Sidantal: 103

---

### Abstrakt

Skumning utgör ett av de vanligaste och allvarligaste problemen vid rötning. Trots att rötning är en noga studerad metod, som kan användas både för att återvinna avfall som energi och minska på användningen av fossila bränslen, saknas fortfarande någon tydlig orsak till och lösning på skumningsproblemet. Det här examensarbetet utförs som en del av Botnia Atlantica-projektet "Från bioavfall till bionäring-hållbara kretslopp med rötning och gödsling". Det baserar sig på en litteraturstudie samt intervjuer och tar upp alla potentiella orsaker och lösningar gällande skumning, samt påträffade följder av problemet. Det visar sig att det råder oenighet på flera områden både då det gäller rötning och skumningsproblemet, vilket pekar på behovet av att studera fenomenet ytterligare. Problemen gäller inte bara skilda åsikter i litteraturen, utan också brister i studier på området, vilka oftast är specifika för anläggningen de utförts på. Det finns dock flera potentiella lösningar, som dessutom ofta skulle innebära förbättringar i produktionen för en biogasanläggning. Praktiska försök har också utförts och redovisas examensarbetet. Två genomskinliga rötreaktorer i laboratorieskala konstruerades och testades. De blandningar av substrat som tidigare har gett upphov till problem i projektet har rötats i de genomskinliga rötreaktorerna för att se om skumning har förekommit. I allmänhet saknar man möjlighet att se in i rötreaktorer under processen. Skumning förekom inte i försöken, men slamtäcke bildades, vilket är kopplat till skumning.

---

Språk: svenska

Nyckelord: rötning, biogas, skum, slam, rötreaktor, mikroorganism

---

## **BACHELOR'S THESIS**

Author: Andreas Willfors

Degree Programme: Environmental Engineering

Supervisors: Nina Åkerback/Thomas Andersson

Title: *Foaming during anaerobic digestion – A study of reasons, problems, measures and experiments*

---

Date: 10.3.2013

Number of pages: 103

---

### **Summary**

Foaming is one of the most common and harmful problems that may occur during anaerobic digestion. Even though anaerobic digestion is a well-known method that can be used to both recycle waste as energy and reduce the use of fossil fuels, it is still not known what the cause of foaming is. This Bachelor's thesis is carried out in the Botnia Atlantica project "From biowaste into organic nutrition-sustainable cycles with anaerobic digestion and fertilization". It is based on a literature study and interviews, and deals with the reasons, solutions and consequences connected to foaming during anaerobic digestion. It has become clear that there is a lot of difference of opinions of both anaerobic digestion and foaming. Another problem is that many of the studies that have been carried out in the field are specific to the studied biogas plant. This thesis pays attention to these shortcomings and they indicate the need for further studies. Several potential solutions to foaming have been found, which may improve the production and profitability of the biogas plant as well. To study foaming two transparent anaerobic digesters have been constructed and tested. Such compositions of substrates that have caused problems in previous experiments in the project have been tested in the transparent digesters, to see if foaming has occurred. The results are presented in this work. No foaming was detected, but scum, which is connected to foam, formed in the digesters.

---

Language: Swedish

Key words: anaerobic digestion, biogas, foaming, digester, microorganism, scum

---

# Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
2	Mål och omfattning .....	3
3	Metoder.....	4
4	Röttningsprocessen.....	5
4.1	Processteg .....	5
4.1.1	Hydrolys .....	6
4.1.2	Fermentation.....	7
4.1.3	Metanbildning.....	7
4.2	Substrat .....	8
4.2.1	Näringsammansättning.....	8
4.2.2	Torrsubstanshalt (TS), glödförlust (VS) och kemisk syreförbrukning (COD).....	9
4.2.3	Förbehandling.....	10
4.3	Viktiga parametrar .....	10
4.3.1	Temperatur.....	11
4.3.2	pH.....	12
4.3.3	Konduktivitet .....	13
4.3.4	Hydraulic retention time (HRT) och solids retention time (SRT).....	14
4.3.5	Omblandning .....	15
4.4	Biogas .....	15
4.4.1	Egenskaper.....	15
4.4.2	Beståndsdelar.....	16
4.4.3	Användningsområden.....	17
4.5	Rötrest.....	18
4.5.1	Användningsområden.....	18
4.5.2	Gödselegenskaper.....	19
4.5.3	Begränsningar .....	20
4.6	Olika typer av rötreaktorer.....	21
4.6.1	Satsvis rötning .....	21
4.6.2	Kontinuerlig rötning .....	21
4.6.3	Rötning i flera steg .....	22
4.7	Hämmande faktorer .....	22
4.7.1	Skum.....	22
4.7.2	Toxiska ämnen.....	23
4.7.3	Ammoniumackumulering.....	23
5	Skumning.....	24
5.1	Definition.....	24

5.2	Beskrivning av skum.....	26
5.2.1	Ytspänning.....	28
5.2.2	Dränering.....	29
5.2.3	Elasticitet.....	31
5.3	Orsaker.....	31
5.3.1	Mikroorganismer.....	31
5.3.2	Ytaktiva ämnen.....	35
5.3.3	Drift och inmatning.....	37
5.3.4	Temperatur.....	41
5.3.5	Omblandning.....	42
5.3.6	Alkalinitet.....	44
5.3.7	Polymerer.....	44
5.3.8	Kväve.....	45
5.3.9	Viskositetshöjande ämnen.....	46
5.4	Följder.....	46
5.4.1	Ekonomi.....	47
5.4.2	Underhåll.....	48
5.4.3	Kvalitet på biogas och rötrest.....	48
5.4.4	Processstyrning.....	49
5.4.5	Miljö.....	50
5.4.6	Minskad aktiv volym och översvämning.....	51
5.4.7	Skiktbildning.....	52
5.4.8	Arbets- och hälsorisker.....	52
6	Möjliga åtgärder.....	53
6.1	Förebyggande åtgärder.....	53
6.1.1	Processplanering.....	54
6.1.2	Design på röt-kammare.....	54
6.1.3	Matematiska modeller.....	56
6.1.4	Mekanisk förbehandling.....	59
6.1.5	Termisk förbehandling.....	60
6.1.6	Kemisk hydrolys.....	64
6.1.7	Ultraljudsförbehandling.....	65
6.2	Behandlande åtgärder.....	68
6.2.1	Toppomrörare.....	68
6.2.2	Skumavskiljare.....	69
6.2.3	Trycksänkande anordningar.....	70
6.2.4	Skumdämpare.....	71
6.2.5	Dusch.....	73
6.2.6	Byta riktning på flöden.....	74

6.2.7	Vibration.....	74
6.2.8	Ljudavskummare .....	74
6.2.9	Elektrisk behandling.....	75
7	Diskussion .....	76
8	Genomskinliga rötreaktorer.....	78
8.1	Inledande planering.....	78
8.2	Komponenter.....	80
8.2.1	Material.....	80
8.2.2	Omrörning .....	81
8.2.3	Uppvärmning .....	83
8.2.4	Gasuppsamling .....	84
8.2.5	Tätning.....	85
8.3	Konstruktion .....	86
8.3.1	Testreaktor 1 .....	86
8.3.2	Testreaktor 2.....	88
8.4	Försök .....	89
8.4.1	Uppföljningsmetoder .....	89
8.4.2	Substrat .....	90
8.4.3	Resultat .....	94
8.5	Slutsats .....	95
	Källförteckning.....	98



EUROPEISKA UNIONEN  
Europeiska regionala utvecklingsfonden

## 1 Inledning

Den här rapporten och arbetet bakom utförs inom Botnia-Atlantica-projektet "Från bioavfall till bionäring – Hållbara kretslopp med rötning och gödsling" ("BioBio"). Projektet är ett samarbete mellan Yrkeshögskolan Novia i Vasa, Finland, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU) i Umeå, Sverige och Finlands skogscentral. De som finansierar projektet i Finland är EU, Österbottens Förbund och Yrkeshögskolan Novia. I Sverige finansieras det av EU, Länsstyrelsen i Västerbotten, Skellefteå kommun, UMEVA, MittSverige Vatten, Svenskt Vatten Utveckling och SLU. Projekttiden är 15.01.2009–31.3.2013. Min del av arbetet utfördes för Forskning och utveckling vid Yrkeshögskolan Novia i Vasa. Min heltidsanställning började 2.5.2012 och varade till 31.8.2012, då timanställning tog vid fram till 31.12.2012 (Projektplan för Från bioavfall till bionäring).

Målet med projektet är att skapa praktiskt tillämpbara och miljöriktiga system, som ska möjliggöra att en stor del av rötresten från rötningsanläggningar ska återanvändas som bionäring. Man vill genom det uppnå en ökad produktion av förnyelsebar skogsråvara, samt ersätta industriellt producerad mineralnäring. Projektets syften är därför:

- att förbättra gödslingsegenskaperna hos rötresten genom att styra rötningsprocessen i experimentell skala
- testa gödslingsegenskaperna hos olika organiska restprodukter i laboratorium
- introducera och testa system för gödsling i praktisk skala
- skapa eller vidmakthålla en unik och internationellt hög kompetens i Botnia-Atlantica området inom rötningsprocesser och återanvändning av restprodukter som växtnäring.

Det här görs bl.a. genom att röta olika organiska restprodukter i olika blandningsförhållanden i laboratorieskala vid forskningslaboratoriet i Vasa. Rötning är en komplex biologisk process, där mikroorganismer i anaerob (syrefri) miljö bryter ner

organiskt material till biogas. Gasen förekommer naturligt bl.a. i sumpmarker, men kan också åstadkommas med s.k. rötreaktorer (se kapitel 4 där rötningsprocessen förklaras). Det framkom i ”BioBio” att vissa blandningar av de undersökta organiska restprodukterna ger upphov till problem under rötningen, eller i alla fall en låg biogasproduktion. Man kunde inte avgöra orsaken till det här, men misstänkte att skumning under rötningen kan vara en del av problemet. På grund av det, samt den bristfälliga kunskapen som verkade råda på området, fanns det ett behov av att undersöka skumningsproblematiken noggrannare (Projektplan för Från bioavfall till bionäring).

Min uppgift blev därför att utföra en litteraturstudie på skumning vid rötning och sammanställa en rapport över ämnet. Dessutom skulle en eller flera genomskinliga rötreaktorer konstrueras, med syftet att kunna undersöka om skumning (eller något annat) var orsaken till att de tidigare utförda rötningarna misslyckats. Man saknar möjlighet att se in de rötreaktorer som tidigare använts. Resultatet av det arbetet är den här rapporten och två stycken genomskinliga rötreaktorer (se kapitel 8). Någon klar orsak till eller lösning på skumningsproblemet har inte kunnat hittas, utan snarare har det tydliggjorts hur pass komplext problemet är och att oenighet råder på området. De genomskinliga testreaktorerna fungerade, men någon skumning uppstod inte. Däremot bildades ett tidvis kraftigt slamtäckte. Resultaten redovisas i avsnitt 8.4.3 och diskuteras i avsnitt 8.5.

Under det här arbetet har ingen sammanställning av skumningsfenomenets orsaker, följder och åtgärder kunnat hittas som är lika omfattande som den här rapporten. Samtliga andra undersökningar går på djupet i ett eller flera områden, men lämnar bort eller nämner övrig fakta endast i korthet. Därför erbjuder den här rapporten en bra översikt och tar fram det viktigaste som framkommit i andra undersökningar. Den framhäver också konflikter som finns på området på ett tydligt sätt, vilket har saknats, i alla fall i den här omfattningen och vad som kunnat påträffas i litteraturen. Det förekommer oenighet kring flera saker då det gäller skumning, och att peka på de här erbjuder förhoppningsvis vettiga förslag på vad som behöver klargöras i framtida forskning och rapporter. Det tydliggör också behovet av ytterligare forskning, samtidigt som rapporten förhoppningsvis förklarar varför det är viktigt att satsa på forskning inom skumning vid rötning. Skumningsproblemet kopplas i den här rapporten tydligare till miljön (se avsnitt 5.4.5) än det tidigare gjorts, vilket innebär att arbetet med att motverka skumning är en del av hållbar utveckling.



## 2 Mål och omfattning

Arbetet som har utförts och presenteras i den här rapporten har strävat mot två olika mål. Målen definierades i början av anställningen sommaren 2012. Det första målet var att utföra en litteraturstudie på skumning och framställa en rapport över kunskap och teorier på området. Det gällde skumningsproblemets orsaker, följder och möjliga åtgärder. Skumningen skulle vara kopplad till rötning, vilket är av betydelse eftersom skumningsproblem förekommer i andra branscher. Vissa av åtgärderna, som tas upp i kapitel 6, används dock också i andra branscher. Avsnitt 6.2.7–6.2.9 har inte tillämpats i rötningssammanhang, men utgör förslag på vad som borde vara möjligt att tillämpa. Alla metoder som tas upp är inte tillämpningsbara på varje skumningsproblem, utan vad som lämpar sig varierar från fall till fall. Det är anledningen till att rubriken heter möjliga åtgärder, eftersom man dels måste bedöma varje fall enskilt och dels är inte alla metoder bevisade eller beprövade. Det framkommer i rapporten att orsakerna till skumningen inte heller är helt klara, utan målet här har varit att peka på att oenighet råder på området.

Det andra målet var att planera och bygga en eller flera genomskinliga rötreaktorer i laboratorieskala, samt att utföra rötningar i dessa. De rötningar som skulle utföras var sådana där man misstänkte att skumning har inträffat, då man tidigare utfört dem i projektet ”BioBio”. Man har inte kunnat se in i de rötreaktorer som man använt i projektet och avgöra om det skummar. De testreaktorer som presenteras i kapitel 8 ger möjlighet att studera hur det ser ut inne i rötreaktorerna under själva rötningen, utan att behöva öppna dem. Det som begränsat planeringen och konstruktionen är att de ska vara genomskinliga, gå att utföra och sedan använda i forskningslaboratoriet i Vasa, samt vara förmånliga. Någon exakt ekonomisk gräns sattes inte, utan avgjordes enligt vad projektledare ansåg vara rimligt och möjligt utgående från projektets budget. De analyser och kontroller som utfördes har främst varit relaterade till skumning och inte produktionsfaktorer.

Arbetet har begränsats tidsmässigt enligt att arbetstiden har varit heltid 2.5.2012–31.8.2012, samt därefter maximalt 200 h fram till 31.12.2012. Projektiden går ut 31.3.2013. Under heltidsanställningen utfördes även andra uppgifter, som att sköta rötningssprocesser och utföra laboratoriearbete. Arbetets mål har inte varit att skapa någon ekonomisk vinning eller direkt praktisk tillämpning, utan fungerar som en sammanställning över vilka möjligheter det finns och inom vad det behövs ytterligare forskning. Rapporten riktar sig åt projektets parter, finansiärer och delfinansiärer, samt de som är intresserade och arbetar i branschen.

### 3 Metoder

Den här rapporten och konstruktionen som beskrivs i kapitel 8 grundar sig på kunskap som inhämtats på olika sätt. Merparten av rapporten baserar sig på resultatet av litteraturstudier, som dels har bestått av allmän rötteknik, men den största delen har bestått av litteratur som behandlat skumning. Eftersom det här projektet och min arbetsuppgift handlar om rötning, är det skumning vid rötning som har studerats. Det framkom dock att skumning som förekommer vid vattenrening med aktivslam har flera gemensamma drag med skumning vid rötning (framkommer bl.a. i avsnitt 5.3.1). Ofta föregås också skumning vid rötning av att slammet som rötas har skummat vid vattenrening. Skillnaden, förutom det rent tekniska, är att skumning vid vattenrening verkar vara bättre undersökt. Därför har viss litteratur på det området också studerats.

Litteraturen som har studerats har inte begränsats av språk eller världsdel, utan rapporter och böcker på svenska, finska och engelska (från England, Tyskland och USA) har använts. En förutsättning har dock varit att kunskapen ska vara tillämpbar här, vilket betyder att t.ex. sådana mikroorganismer som inte lever i våra klimat inte tagits med i den här rapporten, utan fokus har lagts på nordiska förhållanden. Rapporten har främst använt sig av rapporter och böcker, men kunskap har också hämtats från artiklar på Internet och i tidningar, samt lagtexter (Finland och EU) och internetsidor. En förteckning över källor finns i slutet av den här rapporten.

Praktisk kunskap har spelat en stor roll för den här uppgiften och rapporten. Det finns kunskap i projektet "BioBio" om rötteknik, eftersom projektet inleddes 2009 och föregicks av andra projekt om rötning och metoder i anknytning till det. En del råd och instruktioner om möjligheter gällande analyser i laboratorier och konstruktion i plast har fåtts av laboratorieingenjörer som arbetar i byggnads-, miljö- och maskinlaboratorierna i Technobothnia i Vasa. En betydande del för den här rapporten är den kunskap som fåtts från experter inom branschen och sådana som har erfarenhet av skumning. En värdefull upplevelse var resan till Syvab, Himmerfjärdsverket i Grödinge, utanför Stockholm, Sverige den 18.6.2013. Där fick man bekanta sig dels med rötteknik, men också rötning i laboratorieskala och hur de förebygger skumningsproblem. Dessutom fick man via intervjuer av processingenjör Elin Åfeldt vetskap om var ytterligare praktisk kunskap om skumning fanns att hämta. Därför gjordes intervjuer via telefon och e-post med Christer Laurell, processingenjör vid Henriksdals reningsverk och Andreas Thunberg, processchef vid Käppala reningsverk. Båda är svenska vattenreningsverk med biogasanläggningar som

har haft eller har skumningsproblem. Telefonintervjuer gjordes också med Nisse Lithén vid Stormossen, Vasa, och personal vid Viikinmäki, Helsingfors. Alla intervjuer bestod av vissa ledfrågor från vilka intervjun utgick och den intervjuade talade fritt om sina erfarenheter på området.

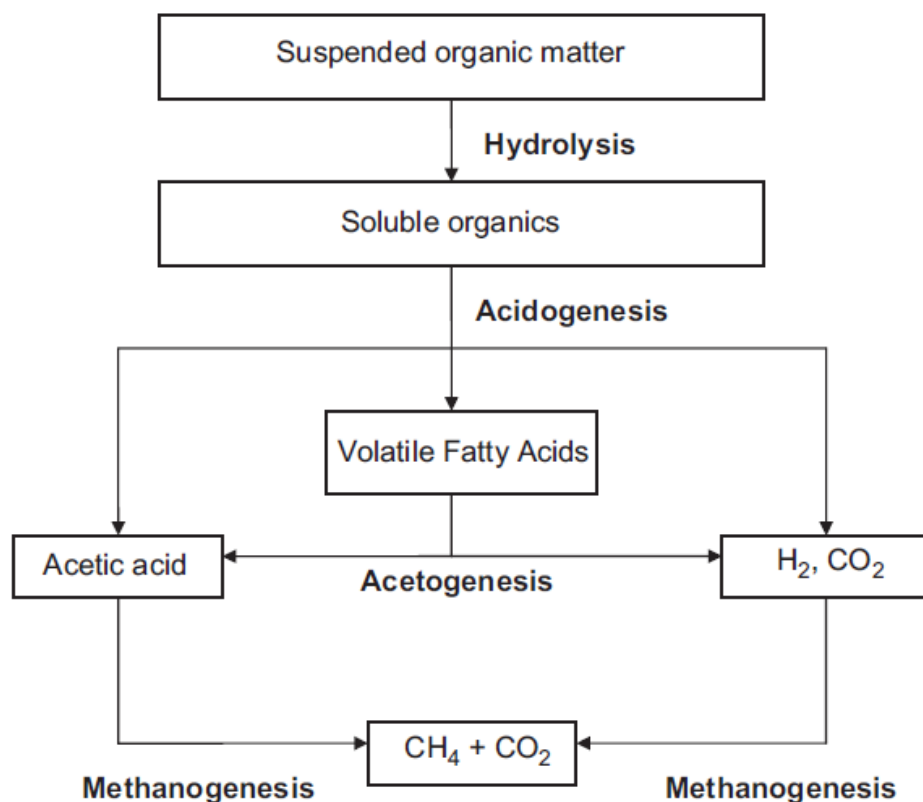
Kunskapen om hur man utför rötningar och laboratorieanalyser har införskaffats delvis från praktik i samma projekt under tidigare somrar, dels från kurser i kemi på utbildningsprogrammet för miljöteknik. Dessutom följdes skrivna instruktioner för utrustning och muntliga instruktioner från personal i laboratoriet. Vilka analyser och kontroller som utförts specificeras i avsnitt 8.4.1. Erfarenheter av att konstruera i plast redovisas i kapitel 8.1–8.3.

## **4 Röttningsprocessen**

Rötning är en komplex biologisk process, där mikroorganismer i anaerob miljö bryter ner organiskt material till bl.a. metan ( $\text{CH}_4$ ) och koldioxid ( $\text{CO}_2$ ), vilket utgör den huvudsakliga delen av den så kallade biogasen. Rötning kan ske naturligt i olika miljöer, t.ex. sumpmarker. I biogasreaktorer strävar man till att göra förhållanden så gynnsamma som möjligt för röttningsprocessen, så att man kan utvinna biogas och omvandla olika organiska restprodukter till näringsrik rötrest (Biogasportalen).

### **4.1 Processteg**

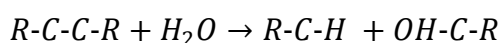
Röttningsprocessen kan delas in i olika steg utgående från vilka mikroorganismer som är aktiva, samt vilka delar som ingår i reaktionerna och vilka nedbrytningsprodukterna är. Alla processer kan ske samtidigt, men är beroende av varandras produkter. Ett beroendeförhållande finns speciellt mellan första och andra, samt mellan tredje och fjärde steget (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 93). Figur 1 visar en schematisk bild av processen, som sedan går stegvis igenom i respektive stycke.



Figur 1. Schematisk bild av stegen i rötprocessen (Appels, Baeyen, Degréve & Dewil, 2008, s. 758).

#### 4.1.1 Hydrolysis

Vid hydrolysen spjälkas stora, olösta föreningar som cellulosa, proteiner och fetter ner till vattenlösliga monomerer, som aminosyror och fettsyror. Från ekvation 1 ses en generell hydrolysis av polymer till två monomerer. En del av mikroorganismerna som är aktiva i det här skedet är fakultativt anaeroba, vilket betyder att de kan konsumera eventuellt syre som ännu finns närvarande. Det här sänker redoxpotentialen och gör miljön gynnsammare för de mikroorganismer som är aktiva i efterföljande steg. Tidsåtgången för hydrolysen beror på hur stora och lättnedbrytbara polymererna i substratet är. Hydrolysis för kolhydrater tar några timmar och för proteiner några dagar (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 94).



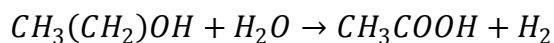
Ekvation 1. Spjälkning av polymer med vatten (Efter Deublin & Steinhauser, 2008, s. 94).

Eftersom hydrolysen oftast är det steg som främst avgör tiden för hela rötningen enligt hur lätt hydrolyserat substratet är, strävar man till att förkorta steget genom förbehandling (Appels m.fl. 2008, s. 755). Vissa av de här olika metoderna går igenom i avsnitt 6.1.

### 4.1.2 Fermentation

Fermentationen, eller jäsningen, kan delas in i två steg, de s.k. acidogenesis och acetogenesis. I det första skedet kortas produkterna från hydrolysen av till kortare föreningar, som korta organiska syror, alkoholer, vätgas och koldioxid. Det här steget är direkt beroende av det första steget, men inte av de två efterföljande. Det möjliggör att man kan ha två skilda reaktorer eller behållare, en för hydrolys och första jäsningssteget, samt en annan för metanbildning (Deublin & Steinhauser 2008, s. 94).

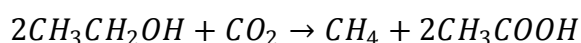
I den andra delen av jäsningen, acetogenesis eller den anaerobiska oxidationen, fortsätter nedbrytningen av produkterna från föregående steg av andra typer av bakterier, som producerar bl.a. vätgas. Se ekvation 2 för ett exempel på acetogenesisk nedbrytning av etanol. För att reaktionen i det här steget ska kunna ske, behöver partialtrycket hos vätgasen vara tillräckligt lågt. Det innebär att bakterierna i följande steg, metanbildningen, ständigt måste konsumera den bildade vätgasen för att hålla partialtrycket på en lämplig nivå. (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 96–97).



*Ekvation 2. Etanol bryts ner under jäsningen till ättiksyra och vätgas (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 96).*

### 4.1.3 Metanbildning

Metanbildningen (methanogenesis) är det sista och känsligaste steget i processen. Metanbakterierna är indelade i olika arter, som använder de olika kvarvarande ämnena från substratet för att bryta ned dem till metan och koldioxid. Till exempel kan endast en art bryta ned föreningar i den s.k. metylgruppen, som visas som exempel i ekvation 3 nedan. En del andra föreningar kan brytas ned av alla arter av metanbakterier.



*Ekvation 3. Etanol och koldioxid bryts ner till metan och ättiksyra av metanbakterier (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 98).*

Som tidigare nämndes är metanbildningen beroende av den anaerobiska oxidationen. Om metanbildningen störs, kommer ett överskott av syra från andra processer att uppstå. Metanbakterierna kan konkurrera med andra arter av bakterier som kan vara närvarande i olika typer av substrat, t.ex. avloppsvatten där det kan finnas bakterier som reducerar sulfat

till vätesulfid. Detta leder till brist på föda för metanbakterierna som då producerar mindre metan (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 98–99).

## 4.2 Substrat

Det organiska materialet som rötas kallas substrat och utgör födan för mikroorganismerna i processen. Substratet kan ha mycket varierande egenskaper och kommer från många olika källor. De vanligaste är slam från avloppsreningsverk, hushåll, livsmedelsindustri, samt biomassor från lantbruk (Biogasportalen).

### 4.2.1 Näringsammansättning

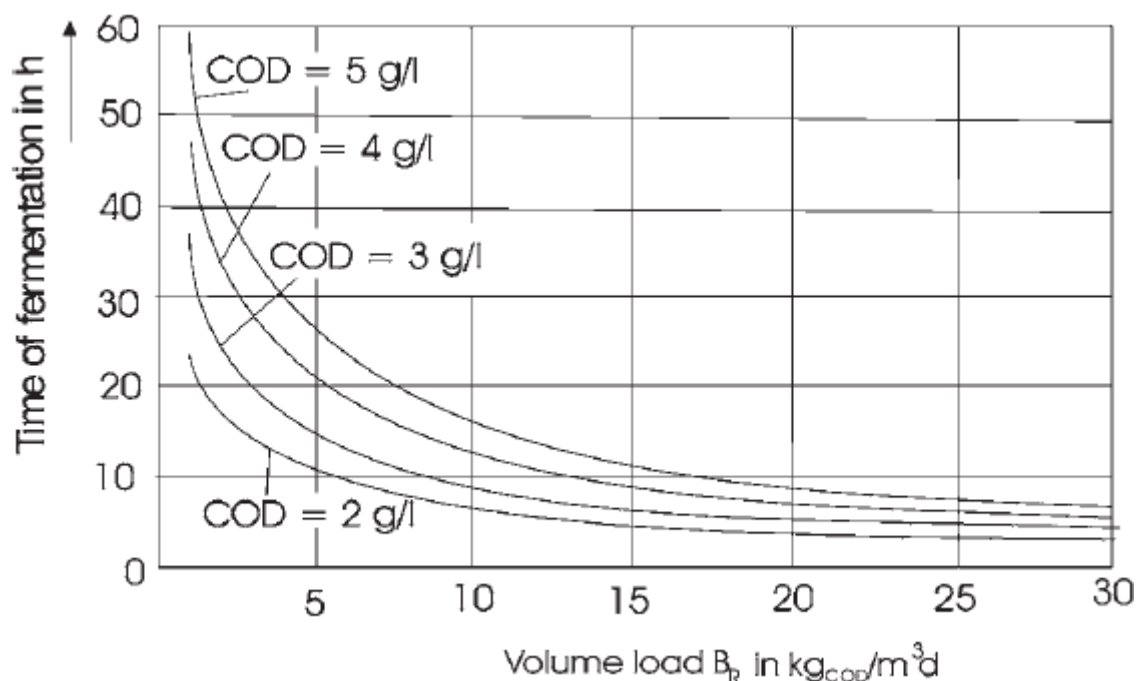
Förhållandet mellan massorna kol och kväve i ett substrat, den s.k. C/N-kvoten, spelar en central roll för rötningen. Det optimala förhållandet varierar mellan olika substrat. Den här variationen kan bero på att det finns en skillnad mellan tillgängligt och närvarande kol. Till exempel lignin är svårnedbrytbart och mikroorganismerna kan inte ta tillvara allt kol i det. Enligt House (2006, s. 36) är det mest gynnsamma C/N-förhållandet 25–30, men för substrat som innehåller svårnedbrytbara komponenter som t.ex. papper med lignin, behöver C/N-kvoten vara högre. C/N-kvoten varierar kraftigt mellan olika substrat. Proteinrika substrat som slaktavfall har ca 5,1 medan näringsrikare material som gödsel från häst har 25,0 (House 2006, s. 35–37). Det här innebär att det kan finnas behov av att blanda substrat för att få ett bättre förhållande, eftersom det annars finns risk för s.k. ammoniakhämmning, som går närmare in på i avsnitt 4.7.3. Enligt Carlsson och Uldal (2009, s. 9) går den nedre gränsen vid en kvot 10–15, medan processen börjar avta vid högre kvot än 30. Den gränsen är nära vad House, ansåg vara gynnsamt, men kan bero på att man där beaktar tillgängligt kol. Det sägs dock inte exakt, Carlsson och Uldal avser endast kol som kommer att brytas ned, vilket betyder att de anger väldigt annorlunda C/N-förhållande än House,

Dock är C/N-kvoten enligt House (2006, s. 44) inte den mest avgörande parametern, eftersom toleransen är ganska stor och kvoten regleras under processen. Följderna kan inverka negativt på produktionen av biogas. Till exempel leder ett överskott av kväve till att ammoniak produceras, så att kvoten stiger ytterligare, vilket kan leda till att bakterierna tar skada. Om C/N-kvoten är för hög, bildas mer koldioxid, vilket sänker andelen metan i biogasen, vilket betyder att den får ett lägre värmevärde. Processen drabbas då också av ett lägre pH.

#### 4.2.2 Torrsubstanshalt (TS), glödförlust (VS) och kemisk syreförbrukning (COD)

TS, eller torrsubstanshalten, är det som finns kvar av substratet efter att vatteninnehållet har indunstats vid 105 °C. För att pumpning och omblandning ska fungera, får inte TS-halten generellt vara för hög, eftersom fast material orsakar svårigheter. Undantag finns, t.ex. ren glycerol har en TS-halt på 100 % men går bra att pumpa. TS-halten säger i sig inte mycket om substratets potential för biogas, men behövs för att räkna ut andra parametrar så som hur mycket av kolet som är tillgängligt för nedbrytning.

VS-halt, eller glödförlusten, är substratets innehåll av substans som brinner vid 550 °C. VS-halten är användbart för att beräkna substratets organiska innehåll, alltså vad som kan rötas och därmed bli till biogas. I allmänhet betyder en hög VS-halt ett högt utnyttjande av reaktorvolymen (Carlsson & Uldal, 2009, s. 7). En del av det som ingår i VS-halten är dock inte tillgängligt för biologisk nedbrytning, främst lignin. På samma sätt kan en del av det som blir kvar i askan vid bestämning av VS-halt vara tillgängligt för nedbrytning. VS-halten utgör ändå ett viktigt verktyg för beräkningar i rötningsammanhang (House 2006, s. 25). Mätningen av COD-halten används också, eftersom den anger mängden syre som krävs för att bryta ner en viss mängd organiskt material (kemisk syreförbrukning, chemical oxygen demand). På samma sätt som med VS-halten betyder en hög COD-halt också en hög transporteffektivitet (Carlsson & Uldal, 2009, s. 8). COD-halten ges oftast i gram per liter. Som tidigare nämndes stiger transporteffektiviteten med högre COD-halt, men rötningen tar längre tid. Figur 2 visar ett diagram över hur lång tid rötningen tar vid olika COD-belastningar, t.ex. innebär ett COD-värde på 3 g/l ca 25 h, medan 4 g/l innebär ca 35 h. Bland annat pumpningen försvåras vid högre halter och vid >12 % substans i substratet sjunker gasproduktionen. Det orsakas främst av att vattenhalten blir för låg för att mikroorganismerna ska fungera optimalt (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 112).



Figur 2. Tidsåtgång för rötning i timmar som funktion av COD-halt i kilogram i inkommande volym substrat per dygn. Kurvan stiger brant vid högre belastning (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 111).

#### 4.2.3 Förbehandling

Någon form av förbehandling krävs oftast vid rötning. Man vill underlätta rötningen och undvika problem med hanteringen av substratet och rötresten. Det innefattar både behandling av substratet, som t.ex. finfördelning, men också avlägsnandet av material som inte går att röta, som metaller eller tyg (Carlsson & Uldal, 2009, s. 9). Hämmande faktorer går närmare in på i avsnitt 4.7. Förbehandling spelar en central roll i att motverka skum, vilket går närmare in på i avsnitt 6.1. Där framkommer också att förbehandlingen inte bara underlättar rötning och hantering, utan också kan förbättra gasproduktionen.

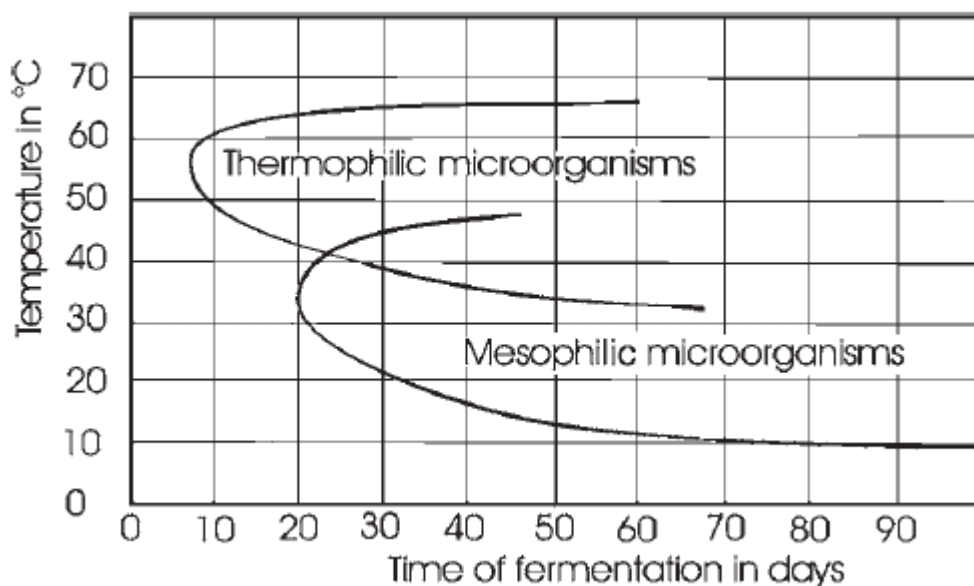
#### 4.3 Viktiga parametrar

Eftersom rötningen utförs av levande och känsliga organismer, samt för att processen ska vara effektiv, är det viktigt att förhållandena är de rätta (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 93). För att garantera att förhållandena är de rätta, behöver en del saker kontrolleras och upprätthållas. De viktigaste parametrarna, samt varför de är viktiga, tas upp här.



### 4.3.1 Temperatur

Mikroorganismerna som är aktiva i rötningsprocessen kan delas in i två olika grupper, enligt i vilket temperaturområde de har sitt optimum. De flesta arter av metanbakterierna är mesofila, med ett temperaturintervall på 32–42 °C. Ett mindre antal arter är termofila, vilka föredrar 48–55 °C. De termofila bakterierna är känsligare än de mesofila, vid större temperaturvariationer än  $\pm 2$  °C börjar gasproduktionen avta avsevärt. Eftersom temperaturen är högre är också termofil rötning mer energikrävande än mesofil. Däremot är termofil rötning snabbare, med upp till 50 % snabbare nedbrytning, vilket figur 3 visar. På grund av den högre temperaturen inträffar en viss hygienisering och syre löser sig sämre, vilket gör det lättare att uppnå anaeroba förhållanden i reaktorn (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 112). Det finns dock rapporter om problem vid termofil rötning då processen blir instabil. Det här antas bero på brist på spårämnen, speciellt järn, som behövs i större grad vid termofil metanbildning (Marneri, Antoniou & Mamais, 2009, s. A-869).



Figur 3. Inverkan av temperatur på tiden för rötning i det mesofila och termofila området (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 112).

Vissa användningsändamål kräver en ren biogas, vilket gör att termofil rötning inte lämpar sig eftersom den producerar mer vätesulfid i biogasen. I praktiken är det mängden substrat, krav på uppehållstid och tekniska förutsättningar som avgör den lämpligaste temperaturen. Med en kortare uppehållstid behöver man en mindre reaktor, vilket kan ekonomiskt motivera den högre energiförbrukningen (House, 2006, s. 32–33). Någon form av uppvärmning är nödvändig för att komma i de rätta temperaturerna, vilket kan ordnas på olika sätt. De är: cirkulation av rötslam till extern värmeväxlare, värmeväxlare på

tillförselrör för inkommande slam, injicering av ånga, doppvärmare och varmvattenrör inne i röttkammaren. De två förstnämnda är de vanligaste metoderna (Starberg, Karlsson, Larsson, Moraeus & Linderg, 2005, s. 22).

### 4.3.2 pH

pH är ett logaritmiskt mått på vätejoner ( $H^+$ ) i en vätska och anger surheten. Under rötningen kan pH variera med i vilket skede processen befinner sig i. Dock är kraftiga variationer och för höga eller för låga värden skadliga för mikroorganismerna. Ett högt eller lågt värde är oftast ett tecken på att en störning finns. De känsligaste bakterierna är de metanbildande, vilket gör att om en störning inträffar kommer som regel deras funktion att stanna av först. Om de andra stegen fortsätter, kommer olika syror att ackumuleras, eftersom produkterna från föregående steg inte bryts ned till biogas, med resultatet att pH sjunker ytterligare. Det är anledningen till att pH sjunker i början av en röttningsprocess, då de metanbildande bakterierna ännu inte har hunnit stabilisera sig. pH får dock inte sjunka för lågt i början, eftersom metanbakterierna inte kommer att börja fungera i för sur miljö (House, 2006, s. 26).

Om pH sjunker under 6,7 börjar bakteriernas metabolism avta. Vid 6,5 kommer produktionen av organiska syror att leda till att pH sjunker ytterligare och rötningen kan avstanna. För högt pH är oftast inte ett problem, på grund av rötningens naturligt reglerande mekanismer, men pH under 7,5 är optimalt (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 114). Enligt House (2006, s. 27) är däremot det optimala området 6,8–8,5. Eftersom pH-skalan är logaritmisk innebär det att 8,5 är tio gånger mer basiskt än 7,5. Skillnaden mellan vad de båda källorna anger som optimalt är med andra ord stor.

Vid rötning finns flera reglerande och buffrande effekter för pH, men vid en nystartad rötning har inte den buffrande förmågan hunnit byggas upp. Koldioxid tas bort från rötningen med biogasen, men vid sjunkande pH kommer koldioxid att lösa sig i substratet som oladdade molekyler. Om koldioxid tas bort ur reaktorn kommer pH att sjunka (House, 2006, s. 26–27). Vid ett stigande pH kommer den lösta koldioxiden att bilda kolsyra, som på så sätt sänker pH igen. Det andra buffertsystemet bygger på att vid lågt pH kommer ammonium-joner ( $NH_4^+$ ) att bildas från ammoniak vilket frigör hydroxyl-joner ( $OH^-$ ), som höjer pH. Vid stigande pH kommer ammoniak att återbildas och binda hydroxylgruppen, som sänker pH (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 114–115).

Om koldioxidhalten ökar i biogasen och pH sjunker är det ett tydligt tecken på att det finns störningar i processen. Möjliga åtgärder är t.ex. att höja pH genom att blanda i en stark bas som natriumhydroxid (NaOH) eller att stänga av inmatningen av substrat (om processen är kontinuerlig) så att metanbakterierna hinner bryta ner syrorna (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 115).

### 4.3.3 Konduktivitet

Konduktiviteten, tillsammans med pH (se avsnitt 4.3.2), ger en första bild av hur rötningsprocessen framskrider, då det ger en snabb bild av salthalten i en vätska. Konduktiviteten kan räknas fram utgående från de enskilda jonernas bidrag till den elektriska ledningsförmågan. Olika joner bidrar olika mycket till konduktiviteten. Dessutom är vissa joners bidrag beroende av pH. Konduktiviteten kan mätas genom att en ström sänds mellan två elektroder nedsänkta i vätskan och då mäta spänningen som uppstår. Lösningen fungerar som en elektrisk ledare för katjoner (positivt laddade joner) på väg till den negativa elektroden och för anjoner (negativt laddade joner) till den positiva. Resistansens beräknas utgående från ström och uppmätt spänning. Konduktansen fås som den inverterade resistansen, som sedan multipliceras med cellkonstanten, som är förhållandet mellan elektrodavstånd och elektrodernas area. Det ger sedan konduktiviteten, vars enhet blir Siemens/meter (S/m). I vattenreningssammanhang rör det sig om värden i storleken mS/m (Levlin & Hultman, 2008, s. 9–11).

Konduktiviteten är enkel att mäta och är vanlig i vattenreningssammanhang. En för hög konduktivitet leder främst till korrosion som skadar utrustning. Man kan t.ex. avgöra behovet av fällningskemikalier i reningsprocessen genom att mäta konduktiviteten (Levlin & Hultman, 2008, s. 13). Konduktivitetmätning är också vanligt vid rötning. Konduktiviteten kommer att variera med tillståndet i rötreaktorn och vilka processer som sker. Det är vanligt att konduktiviteten ökar vid rötning eftersom joner löses ut ur slammet och reaktioner vid nedbrytning av organiskt material ger upphov till bl.a. ammonium och vätekarbonat. Det här innebär ett ökat joninnehåll och därmed en ökad konduktivitet (Levlin & Hultman, 2008, s. 19, s. 32). Ökningen vid rötning av slam från aktivslamprocessen kan vara en mångdubbling av ursprungligt värde (Levlin & Hultman, 2008, s. 33). Eftersom förändringarna i konduktiviteten under rötningsprocessen är relativt stora, är konduktivitetmätningar ett bra sätt att kontrollera hur den fortskrider (Levlin & Hultman, 2008, s. 37).

#### 4.3.4 Hydraulic retention time (HRT) och solids retention time (SRT)

Det är i många sammanhang viktigt att veta hur lång tid som substrat rötas. HRT är medeltalet för hur länge (antalet dagar) en viss volym av slammet stannar i reaktorn, medan SRT är medeltalet för hur länge det fasta materialet stannar i reaktorn. Ju kortare uppehållstiden är, desto mer av substratet kommer att vara kvar i rötresten, beroende på typ av substrat. HRT- och SRT-bestämningar spelar främst roll vid kontinuerlig rötning (se avsnitt 4.6), eftersom man måste avgöra hur mycket slam som ska tas bort och hur mycket substrat som ska pumpas in. När man tar bort substrat ur reaktorn kommer man också att ta bort en del av bakteriekulturen, vilket måste beaktas så att det blir kvar tillräckligt mycket för fortsatt funktion och stabilitet. Om uppehållstiden är högre måste reaktorn vara större och beroende på substrat och temperatur kommer gasproduktionskurvan att plana ut (Appels m.fl. 2008, s. 759).

Hur mycket man matar in i reaktorn är tätt förknippat med HRT och SRT. Inmatningen ges oftast i hur många kilogram VS per volym reaktor man matar in per dag. I avsnitt 5.3.3 tas vikten av inmatningen upp mera detaljerat. Vid kontinuerlig rötning handlar det oftast om att få ut så mycket biogas som möjligt på kort tid, vilket kan betyda att nedbrytningsgraden är låg på kvarvarande substratet då det tas ut. Tabell 1 visar exempel på nedbrytningsgrader vid olika uppehållstid vid mesofil rötning. Fördubblad tid i reaktorn ökar graden av nedbruten VS med endast 9,5 %, enligt tabellen. Speciellt vid större reaktorer där kostnader för uppvärmning och omrörning ökar snabbt vid ökad volym, kan skillnader i uppehållstiden spela stor roll för lönsamheten (House, 2006, s. 50).

*Tabell 1. Inverkan av uppehållstid vid mesofil rötning på graden av VS som bryts ner.*

Tid i reaktorn (d)	Nedbruten VS (%)
15	56,0
20	60,0
30	65,5

*Källa: Appels m.fl. 2008, s. 761*

### 4.3.5 Omblandning

Någon slags omblandning är nödvändig vid rötning av flera orsakar. Det är viktigt att skapa så god kontakt mellan materialet som ska rötas och bakterierna, så att hela bakteriekulturen får näring och att allt substrat når samma grad av nedbrytning. Det är också viktigt att det inte uppstår döda zoner i röt-kammaren, så att man utnyttjar hela röt-kammarens volym optimalt (Ganidi, 2008, s. 38). Främst den ekonomiska aspekten försämras om en del av volymen är inaktiv. Man vill också genom omblandningen skapa en så homogen miljö som möjligt, så att också rötning-processen är stabil. Nytt substrat som pumpas in i röt-kammaren ska också på så kort tid som möjligt blandas med resten av innehållet. Omblandningen ska också hålla slammet i suspension. Om omblandningen inte lyckas kan det bl.a. uppstå överbelastning eller döda zoner i delar av reaktorn, samt skumning som resultat (se avsnitt 5.3.5) (Starberg m.fl. 2005, s. 19).

Omblandningen kan ordnas på flera olika sätt. I huvudsak rör det sig om variationer och kombinationer av fyra olika metoder. De är mekanisk omrörning (oftast med motordriven propeller), gasomblandning (då man pumpar in biogas tillbaka i botten av röt-kammaren), strålomblandning (då man sprutar in cirkulerat eller nytt slam underifrån) och dragrör (då man använder rör för att skapa strömmar i röt-kammaren). De har alla sina för- och nackdelar, varav vissa tas upp närmare i avsnitt 5.3.5, vilket behandlar skumning i samband med omblandningen (Starberg m.fl. 2005, s. 19–20).

## 4.4 Biogas

Biogas består huvudsakligen av metan ( $\text{CH}_4$ ) och koldioxid ( $\text{CO}_2$ ) i något varierande proportioner. Dessutom innehåller den orenade biogasen mindre andelar andra föreningar, så som svavelväte (även kallat vätesulfid,  $\text{H}_2\text{S}$ ).  $\text{CH}_4$  är den brännbara komponenten i biogas och den som i huvudsak beaktas i bestämningen av biogasens egenskaper. Vid en metanhalt på 45 % är biogasen brännbar (Deublin & Steinhäuser, 2008, s. 49)

### 4.4.1 Egenskaper

Biogasens egenskaper liknar naturgas, som också innehåller till största delen metan. Biogas går att trycksätta, så att den som naturgas går bättre att lagra och använda till olika ändamål. Vilka exakta egenskaper biogasen har beror på hur ren den är. En biogassammansättning på 55–70 %  $\text{CH}_4$ , 30–45 %  $\text{CO}_2$  och spår av andra gaser har ett

värmevärde på 6,0–6,5 kWh/m<sup>3</sup> och en densitet (NTP) på 1,2 kg/m<sup>3</sup> (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 49–50).

Vid hantering av biogas finns en viss explosionsrisk. Gränsen för explosion för ovanstående sammansättning går vid 6–12 % i luften (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 50). Därför är det nödvändigt att undvika gnistor och explosiva blandningar. Den största risken finns i att syre läcker in i reaktorn eller lagringsbehållare, vilket undviks genom att se till att trycket är högre inne i behållaren än på utsidan (House, 2006, s. 176–177). Metan är en kraftig växthusgas, med 21 gånger högre GWP (global warming potential) än koldioxid. Det gör det viktigt att ta tillvara biogasen och bränna den om inget användningsområde finns, varvid den bildar mindre skadligt koldioxid. Det höga GWP hos metan utgör ett problem vid deponier där biogas bildas naturligt (Arnold m.fl. 2007, s. 107).

#### **4.4.2 Beståndsdelar**

Vid förbränning av biogas beaktas gasen ofta som ren metan. Biogas består till största delen av metan och är den del som innehåller den betydelsefulla energin. Den enda relevanta energiinnehållande komponenten förutom CH<sub>4</sub> är H<sub>2</sub>, men förbränningen av de båda är direkt jämförbara och behöver därför inte beaktas skilt (House, 2006, s. 85).

Vilka komponenterna är och hur stor andel de utgör av biogasen beror på en mängd faktorer, främst substratet och anläggningens egenskaper. I tabell 2 listas en del av de möjliga komponenterna förutom CH<sub>4</sub> och deras typiska andelar, samt några effekter de ger upphov till vid användning. (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 52). I avsnitt 4.7.3 tas ammoniak (NH<sub>3</sub>) upp ytterligare och i avsnitt 4.7.4 tas andra toxiska ämnen upp kort.

Tabell 2. Andelar, effekter och orsaker för vanliga föroreningar i orenad biogas.

Komponent	Andel	Effekt	Orsaker
CO <sub>2</sub>	25–50 Vol%	Sänker värmevärde, korrosion, skadar alkaliska bränsleceller	Högt C/N, lågt pH, O <sub>2</sub> i reaktorn, störningar i processen, ökar i början av rötningsprocessen
H <sub>2</sub> S	0–0,5 Vol%	Korrosion, SO <sub>2</sub> -utsläpp, sliter på katalysatorer	Lågt pH, störningar, protein, sulfat i substratet, temperaturökning, röttid
NH <sub>3</sub>	0–0,05 Vol%	NO <sub>x</sub> -utsläpp, korrosion	Lågt C/N, termofil rötning
Vattenånga	1–5 Vol%	Kondensation, risk för att utrustning fryser, korrosion	Halten ökar med ökad temperatur i reaktorn
Siloxan	0–50 mg/m <sup>3</sup>	Verkar som ett slipmedel och skadar motor	Siloxaner i substratet

Källa: Deublin & Steinhauser, 2008, s. 52 och House, 2006, s. 86–87.

Vad som orsakar att en viss förorening förekommer och lämplig åtgärd är inte helt känt i varje fall. Speciellt mängden CO<sub>2</sub> kan bero på många olika faktorer, men är ofta ett tecken på att nedbrytningen inte är fullständig och brister finns i processen. Mängden H<sub>2</sub>S beror oftast på typen av substrat. Siloxaner förekommer i små mängder, men skadorna kan bli stora på motorer, vilket gör det till en viktig faktor. Siloxaner förekommer i kosmetika, rengöringsmedel och byggmaterial, vilket gör att främst biogas från samhällsavfall och avloppsvatten kan innehålla siloxan (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 53–56). Siloxaner är polymerer som innehåller ett skelett av kisel och syre med två metylgrupper på kiselatomen och varierar i storlek. Siloxaner används mycket till framställning av olika produkter eftersom de är relativt billiga, men är ändå bl.a. termiskt stabila, inerta, motstår väta, ozon, UV och gammastrålning (Kemikalieinspektionen: Siloxaner).

#### 4.4.3 Användningsområden

Biogasen har många olika användningsområden. Det vanligaste är uppvärmning av bostadsområden och drift av anläggningen. Då behovet på sådana platser är lägre, som sommartid, facklas överskottet bort. Vanligtvis uppgraderas gasen, främst genom torkning

då vattenånga tas bort. Man kan också producera kraftvärme med biogas. Eftersom biogas brinner relativt rent vilket ger en ren arbetsmiljö och inte orsakar slitage på utrustning används den också inom industrin. Industrier kan använda metan som råvara i andra produkter, som färger, polymerer, möbler, djurfoder och smörjoljor.

Det snabbast ökande användningsområdet för biogas i många europeiska länder är fordonsgas. För att duga som fordonbränsle måste gasen renas till ca 97 % metan. Personbilar som drivs av fordonsgas (naturgas och biogas) har ofta två tankar, en för fordonsgas och en för bensin. Tyngre fordon, som bussar och lastbilar, kan på vissa orter vara byggda för enbart fordonsgas (Biogasportalen, användning). Enligt Börjesson, Tufvesson och Lantz (2010, s. 21–24) har biogas en bättre effekt på utsläppet av växthusgaser än andra biodrivmedel, såsom etanol och RME (rapsmetylester).

## 4.5 Rötrest

Efter rötningen lämnar en rötrest kvar av substratet. Den innehåller samma näringsämnen som substratet, men i en mer koncentrerad form. Exakt vad rötrestens egenskaper är beror på substratet. Eftersom substratet brutits ner till en del finns näringsämnena i en form som är lättare för växter att ta tillvara. (Baky, Nordberg, Palm, Rodhe & Salomon, 2006, s. 3).

### 4.5.1 Användningsområden

Rötresten kan användas som gödsel inom lantbruk, vilket medför att restprodukten efter rötning kan bli en ekonomisk tillgång. Resten från rötning av t.ex. slakteriavfall, stallgödsel och källsorterat livsmedelsavfall är tillräckligt ren för att användas som gödsel inom livsmedelsproduktionen (Baky m.fl. 2006, s. 3). Enligt Baky m.fl. (2006, s. 11) skulle den våta rötrestens nettovärde (intäkter minus kostnader omräknat till penningvärde år 2006) kunna vara upp till 18 SEK/ton. Men beroende på olika faktorer som spridningstidpunkt och näringsinnehåll kan det också bli en kostnad på 4 SEK/ton. Enligt samma rapport skulle rötresten i fast form ha ett nettovärde på 42 SEK/ton.

Det är också möjligt att gödsla skog med rötrest som har pelleterats. Det sker ännu bara i forskningssyfte, men som med användningen av rötresten i lantbruk finns flera fördelar. Istället för fossila mineralgödsel är rötresten förnybar, samtidigt som en ökad tillväxt av skog tar bort koldioxid ur luften eftersom den utgör en kolsänka. Man skulle också ha möjlighet att producera rötrest som gödsel lokalt och inte behöva de långa transportsträckorna som krävs för det sinande fosforgödslet (Jungell, 2011, s. 23).



#### 4.5.2 Gödselegenskaper

Som gödselmedel varierar rötresten med substratet, som tidigare nämnts. En fördel överlag hos rötresten är att en stor del av kvävet i den är i form av ammoniumkväve ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ). För att växter ska kunna ta upp kväve och tillgodogöra sig det, behöver det först brytas ned av markens mikroorganismer till just ammoniumkväve. Det medför att gödsling med rötrest ger växterna lättillgängligare näring. Det finns dock en risk att kvävet åker ut med rejektvatten från rötreaktorn, eftersom en del av ammoniumkvävet kommer att lösa sig i vatten (Jarvis & Schnürer, 2009, s. 79). Om rötresten avvattnas minskar kväveinnehållet, speciellt vid termofil rötning löser sig en större del kvävet i vattnet (House, 2006, s. 32). Kväveinnehållet i rötresten är liknande det i svingödsel (Baky m.fl. 2006, s. 5).

Förutom ammoniumkväve innehåller rötresten många andra viktiga näringsämnen för växterna, som organiskt kväve, fosfor (P), kalium (K), magnesium (M) och spårämnen, se tabell 3. Den visar innehållet i sju certifierade biogasanläggningar i Sverige år 2005. I tabellen kan man också se att den innehåller skadliga ämnen som kvicksilver och bly, samt en jämförelse med andra typer av gödsel. Certifieringssystemet har byggts upp av Avfall Sverige och kontrolleras av egenkontroller och certifieringsorgan, som SP–Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.

Tabell 3. Växtnärings- och spårämnen i biogödsel från sju svenska anläggningar, samt jämförelse med nöt- och svingödsel.

Innehåll per ton våtvara	Rötrest, flytande			<sup>1)</sup> Nötflytgödsel	<sup>1)</sup> Svinflytgödsel
	Min	Max	Medel	Medel	Medel
Torrsubstanshalt, procent av våtvara	1,0	5,2	3,8	9,8	8,8
Växtnäringsämnen, kg per ton					
Totalkväve	1,6	6,1	4,5	3,9	5,1
Ammoniumkväve	1,1	4,4	3,2	1,8	3,3
Fosfor	0,1	0,6	0,4	0,8	1,9
Kalium	0,5	1,9	1,2	4,0	3,0
Metaller, g per ton					
Zink	2,3	32,5	15,7	18,0	55,0
Koppar	0,6	10,3	4,6	2,9	14,4
Metaller, mg per ton					
Nickel	85	972	390	318	245
Krom	96	988	369	231	353
Bly	61	265	146	90	81
Kadmium	5,4	13,6	10,6	12,0	15,0
Kvicksilver	0,5	4,1	2,4	Ej analyserat	Ej analyserat

Källa: Baky m.fl. 2006, s. 5.

Man ser att rötresten innehöll, i alla fall i medeltal, större mängder av metaller. Baky m.fl. uppger inte vilken typ av substrat de sju anläggningarna rötar, men eftersom de är certifierade borde rötresten leva upp till ställda (svenska) miljökrav och vara av godkänt substrat (Baky m.fl. 2006, s. 6).

#### 4.5.3 Begränsningar

Att använda rötrest som gödsel är inte helt utan problem. Området är relativt nytt och nya bestämmelser och forskning på området förändrar läget. Någon certifiering finns inte ännu i Finland, vilket det finns i Sverige (se föregående stycke 4.5.2), utan regleras endast i lag. Rötresten klassas som jordförbättringsmedel och till gruppen gödselprodukt. Halten av tungmetaller som den får innehålla specificeras i Jord- och skogsbruksministeriets förordning om gödselprodukt (12/07). Dessutom gäller de bestämmelser som annars reglerar gödsling. Ett certifieringssystem för rötrest borde utvecklas i Finland, för att garantera kvaliteten och underlätta införande och produktion av rötrest som gödsel.

## 4.6 Olika typer av rötreaktorer

Rötreaktorer kan vara konstruerade och delas in på olika sätt. Den främsta skillnaden är mellan satsvis och kontinuerlig rötning. Det som avgör vilken typ av reaktor man använder sig av är främst nivån på tillgänglig teknik och tillgång på substrat.

### 4.6.1 Satsvis rötning

Den satsvisa rötningen, ofta kallad batch, används då man vill ha enkla konstruktioner. De är vanliga på bondgårdar, då bonden kan själv ta hand om rötningen och underhåll av reaktorn. Substratet matas in i reaktorn och tas ut när man anser att rötningen är färdig och vill avsluta processen. Det här leder till variationer i biogasproduktionen, eftersom de olika stegen producerar olika mycket biogas med lite olika sammansättning. Produktionen når sitt maximum vanligtvis efter halva uppehållstiden. När reaktorn töms sparas vanligtvis en del startkultur för att lättare få igång följande rötning. Det förekommer även en typ av batch-process där substrat flödar kontinuerligt in, men den töms satsvis. Det rör sig alltså främst om en slags lagring. Det innebär bl.a. att rötresten kommer att variera kraftigt i nedbrytningsgrad, men konstruktionen är billig (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 243, s. 245).

### 4.6.2 Kontinuerlig rötning

Den kontinuerliga processen finns i flera variationer. I stora drag går de alla ut på att rötprocessen startar en gång och hålls sedan i gång, målet är att föra in nytt material i samma takt som gammalt bryts ned och tas ut som rötrest och gas. Volymen hålls alltså konstant. Tömning och påfyllning kan ordnas på flera olika sätt, som tas upp kort i avsnitt 6.1.2. På det här sättet undviker man variationer i gasproduktionen och de ofta kritiska uppstartningarna med den tidskrävande hydrolysen. Man behöver dock ständigt ha tillgång på substrat, vilket oftast kräver mellanlager. De flesta kontinuerliga processer är mesofila, trots vissa fördelar med termofila (se avsnitt 4.3.1 Temperatur). Som med den satsvisa kan omblandningen och uppvärmningen vid kontinuerlig rötning genomföras på olika sätt. (Appels m.fl. 2008, s. 760). Genom att värma substratet före och pumpa in det underifrån kan man få till stånd en del uppvärmning och omblandning genom inmatningen. Det har dock visat sig att varken uppvärmningen eller omrörningen blir på det sättet effektiv (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 254).

### 4.6.3 Rötning i flera steg

Eftersom rötningsprocessen består av flera steg med olika krav på omgivningen kan man dela upp processen i olika reaktorer, s.k. tvåstegs- eller hybridreaktor. Då sker syrabildningen i en första, ofta uppvärmd reaktor där de mindre känsliga bakterierna utför hydrolysen. Första reaktorn är vanligtvis större, eftersom hydrolysen ofta är det mest tidskrävande steget. Fettsyror och övriga produkter från den första reaktorn flyttas till den mindre, uppvärmda reaktorn där metanbildning sker. Både satsvisa och kontinuerliga rötreaktorer kan vara indelade i två steg. Eftersom mindre uppvärmning behövs är den här modellen mindre energikrävande än de med ett steg (House, 2006, s. 142).

## 4.7 Hämmande faktorer

Det finns flera faktorer som kan försvåra, sakta ner eller till och med stoppa rötningsprocessen. Eftersom rötningen är ett samspel mellan många olika steg och mikroorganismer finns det olika möjligheter för processen att påverkas av en störning, vilket också leder till att skillnader i orsaker och åtgärder finns i litteraturen. Vissa av produkterna från något av stegen kan skada de andra stegen (se stycke 4.1). En fördel är att rötningsprocessen består av levande mikroorganismer av olika arter, vilket gör att de ofta kan anpassa sig till förändrade förhållanden (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 118).

### 4.7.1 Skum

Skum vid rötning är ett varierande problem och orsakerna till varför skumning inträffar är oklara och komplicerade. Problem med skumning finns både vid rötning och vid behandling av avloppsvatten med aktivslammetoden. Skum har beskrivits på olika sätt, bl.a. som ett visköst, mörkbrunt lager ovanpå slammet eller som en gas-vätskeblandning som innehåller mer än 95 % gas, som bildats på grund av kraftig omrörning, luftning eller närvaro av ytaktiva ämnen (Ganidi, Tyrell, & Cartmell, 2009, s. 1).

Följderna av skumning är bl.a. nedsatt gasproduktion och nedbrytning, men även skador på anläggningen. Om en anläggning drabbas av skumning kan det leda till stora ekonomiska kostnader och nedsatt produktion, t.ex. drabbades ett reningsverk i Stockholm 1996 av en skumningsincident som varade i 10 veckor. Följderna blev en förlust i produktionen av biogas på 40 % och totala kostnader på 140 000 \$. Orsakerna till skumning är som tidigare nämnt oklara, men de flesta undersökningar pekar främst på vissa typer av bakterier och oregelbunden inmatning av organiskt material (Ganidi m.fl. 2009, s. 2). Behovet av att

undersöka skumningsfenomenet är stort, eftersom det leder till en mängd negativa följder. Skumningen som fenomen och dess orsaker samt möjliga åtgärder kommer att gås in på i närmare detalj i kapitel 5 och 6. En praktisk undersökning utförs i kapitel 8.

#### **4.7.2 Toxiska ämnen**

Eftersom rötningen innefattar levande organismer är det viktigt att substratet inte innehåller ämnen som är skadliga för dem. Tungmetaller fungerar som nyttiga spårämnen för bakterierna vid låga koncentrationer, men blir giftiga för dem vid högre koncentrationer. Till exempel grisgödsel kan innehålla zink från foder, där zink används som tillsats och fungerar som antibiotika. Andra ämnen som kan skada bakterierna och kan finnas i substratet är rengöringsmedel, bekämpningsmedel och olika slags antibiotika. Höga halter av tanniner, som finns i många baljväxter, kan skada metanbakterierna (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 125). Även om bakterierna överlever kan eventuella toxiska ämnen begränsa användningen av rötresten som gödsel (BioBio: Hämmade faktorer).

Som nämndes i avsnitt 4.1 är en del av bakterierna fakultativt anaeroba, men de metanbildande bakterierna är strängt anaeroba. Deras metabolism börjar hämmas vid syrekoncentrationer på 0,1 mg/l.  $H_2S$  bildas också i stegen före metanbildningen och kan vara hämmande, eftersom sulfatbakterierna konkurrerar ut metanbakterierna, då de behöver mindre energi för sin funktion och inte lever i symbios med andra bakterier.  $H_2S$  bildas som biprodukt med nästan alla substrat, men börjar vara giftigt för bakterierna vid koncentrationer på ca 50 mg/l. Dessutom ökar giftigheten hos  $H_2S$  för bakterierna när temperaturen stiger. Det rekommenderas att följa med halten och om den blir för hög, höja pH eller minska volymen på inmatning. Det kan också vara skäl att dela upp rötningen i två steg (se avsnitt 4.6) om man misstänker problem med  $H_2S$  (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 119–121).

#### **4.7.3 Ammoniumackumulering**

Under optimala förhållanden råder jämvikt mellan ammoniak ( $NH_3$ ) och ammonium ( $NH_4^+$ ), som bildas under rötprocessen främst från proteiner. Om förhållanden ändras, som om pH och temperatur stiger, kommer jämvikten att förskjutas så att ammoniakhalten ökar och hämmar rötningen. Tillräckligt höga halter av ammoniak blir giftigt och kan orsaka avdödning (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 123). Det här är en bidragande orsak till att

proteinrika material som slakteriavfall och svingödsel ofta ses som svårrotade, men dessutom är de kopplade till skumning, se avsnitt 5.3.2 (BioBio: Hämmade faktorer). Enligt Fraser, K.D. (2010, s. 10–11) är en större del ammonium fritt under termofil rötning, till följd av ett högre  $pK_a$ -värde. Risken för hämning på grund av ammonium är alltså större vid termofil rötning.

## 5 Skumning

Skumning är ett av de allvarligaste problemen vid rötning (Ganidi, 2008, s. 6), som vi såg i det tidigare kapitlet. Det är ett problem som kan få flera negativa konsekvenser för röttningsanläggningen, t.ex. ansåg 11 % av driftspersonal vid biogasanläggningar i hela USA i en gammal undersökning att skumning är det mest ihärdiga problemet vid rötning (Van Niekerk, Kawahigashi, Reichlin, Malea & Jenkins, 1987, s. 249). Det är inte heller ovanligt, och när väl ett skumningsfenomen inträffat ökar risken för att det ska ske igen. Trots det utbredda problemet är skumning relativt dåligt undersökt, man har inte kunnat ställa fram bevis på någon tydlig orsak eller åtgärd. Enligt Bates, Corning, Massart och Neun (2006, s. 1–2) så skummar alla rötreaktorer i viss mån, men det är den kraftiga skumningen som är problematisk. Att alla rötreaktorer skulle skumma har dock inte påträffats i någon annan källa. Dessutom menar de att skumningsproblemen verkar bli vanligare i USA. Det kan bero på att rötningen av slam av olika karaktär och ursprung har ökat, till följd av att mer avancerad biologisk vattenrening har blivit vanligare i USA. Eftersom skumning innebär svårigheter vid rötning, som är både en avfallshanteringsmetod och en framställningsmetod för förnybart bränsle (Ganidi, 2008, s. 1), betyder det att en attraktiv lösning på skumningsproblemet skulle innebära ett steg mot en mer hållbar utveckling på nämnda områden.

### 5.1 Definition

Skum är ett allmänt begrepp som beskrivs och används på olika sätt i litteraturen. Ofta används orden ”scum” och ”foam” synonymt med varandra i engelsk litteratur, men begreppen har olika betydelse. ”Scum” innebär skum vid jäsning eller hinna på stillastående vatten, medan ”foam” betyder lödder eller fradga, men också skum (Norstedts stora engelska ordbok, 2000). Det första begreppet innebär alltså att ett lager eller täcke av slam som bildas på ytan, medan det andra, löddret orsakar något som tar mer volym i anspråk. Att göra skillnad på de två är ibland svårt. De båda fenomen är beroende av

varandra (Deublin & Steinhauser, 2008, s. 127). Enligt House (2006, s. 133) är ”scum” ett allmänt begrepp för ett lager av flytande material som kan bildas överst i rötreaktorn vid våtare rötning (TS lägre än 7–10 %). Detta ”scum” kan klassas som ett slags gel av små partiklar. ”Foam” är gasbubblor med en yta av ett så pass visköst material att de inte brister, i alla fall inte omedelbart (House, 2006, s. 137). I fortsättningen kommer benämningen skum att användas där det engelska begreppet ”foam” avses, alltså ett fenomen då gasbubblor finns i vätskan, inte bara ett täcke av fast material. Med begreppen ”scum” avses att ett slamtäcke bildas.

Som tidigare nämnades så skummar alla reaktorer. Problemet uppstår då skummet blir kraftigt eller överdrivet, vilket definieras som då gasrör blockeras och/eller då rötreaktorn skummar över (Bates m.fl. 2006, s. 2). Ett sådant fall kan ses från figur 4 och figur 5, där röt-kammaren har skummat över. Andra problem uppstår dock före de här följderna inträffar, vilket tas upp i kapitel 5.4. Därför kommer inte definitionen på kraftig skumning att användas här.



*Figur 4. Kraftig skumning vid anläggning i USA. Skummet (mörkbrunt) har svämmat över upp på taket (beigt). Hela taket täcks av skum, förutom mitten, som man håller på och spolar rent med vatten (figur 5) (Bates m.fl. 2006, s. 2).*



*Figur 5. Personal på Morris Forman Wastewater Treatment Plant i Louisville, Kentucky, USA, försöker åtgärda kraftig skumning, som fått röt-kammarens innehåll att stiga upp på taket (Massart, Bates, Corning & Neun, 2006, s. 53).*

## 5.2 Beskrivning av skum

Beskrivningen av skumningsfenomenet är inte helt exakt i litteraturen, eftersom egenskaperna varierar mellan olika typer av skum, men också med substratet. Det finns i huvudsak två olika slags typer av skum i avloppsvatten, vilka skiljs främst åt av skillnaden i stabilitet (Ganidi, 2008, s. 12). I andra vätskor förekommer bubblor med andra egenskaper. Den första och relativt harmlösa typen är instabilt skum, även kallat övergående skum. Instabilt skum förorsakas oftast av endera fett eller vissa arter av trådformiga mikroorganismer. Det misstänks dock att de här fenomenen kan orsaka mera stadigt skum. Därför behandlas orsakerna till den övergående skumningen i samband med det mer genomgående. Det instabila skummet befinner sig oftast i ett jämviktsläge som varken ökar eller minskar genom att bubblorna brister efter några sekunder.

Den andra typen av skum är s.k. metastabil eller bara stabil, med bubblor vars väggar inte tunnare ut av sig själv. Bubblorna i det här skummet brister inte opåverkat som det föregående. Skummets bubblor förstörs inte heller enkelt av mekaniska metoder, utan kräver mer oregelbunden eller kraftig störning för att kollapsa. Bubblorna i det metastabila



skummet kan ha en livstid på flera dagar, till skillnad från det övergående skummets bubblor som varar i ett par sekunder. Orsakerna går igenom i detalj i följande avsnitt. Det finns ingen klart angiven gräns var skillnaden mellan den här typen av skum och den första går, utan man talar oftast om en enda typ av skum i rötreaktorerna. Men eftersom man gör skillnad på skummets stabilitet i sammanhang som är nära anknutna till rötning, t.ex. vattenrening med aktivslammetoden, är det motiverat att göra en skillnad (Ganidi, 2008, s. 12–13). I andra sammanhang talar man om, förutom de två föregående, skum som är sant (består av mest gas), vätska (består av lite gas och mest vätska), övergående och ihållande (Ghildyal, Lonsane & Karanth, 1988, s. 176). Eftersom det är stabilt skum som utgör problemet vid rötning kommer den typen att avses i fortsättningen, en bild av sådant skum finns i figur 6. Att göra en djup, heltäckande översikt av skumningens egenskaper är svårt på grund av områdets omfattning och komplexitet (Koehler, Stone, Brenner & Eggers, 1998, s. 2097).



*Figur 6. Bild av hur metastabilt skum kan se ut i en reaktor (Herbes, Moeller, Müller & Zehnsdorf, 2010, s. 204).*

Det finns dessutom andra typer av indelningar för skum, Moeller, Görsch, Müller & Zehnsdorf (2012, s. 110) använder en annorlunda indelning, som de skriver att används av driftspersonal vid tyska biogasanläggningar. Där skiljer man på storleken på bubblorna. Skumning med stora bubblor är lätt att åtgärda genom inmatning och omrörning. Små bubblor orsakar stabilare skum som ger upphov till mer problem.

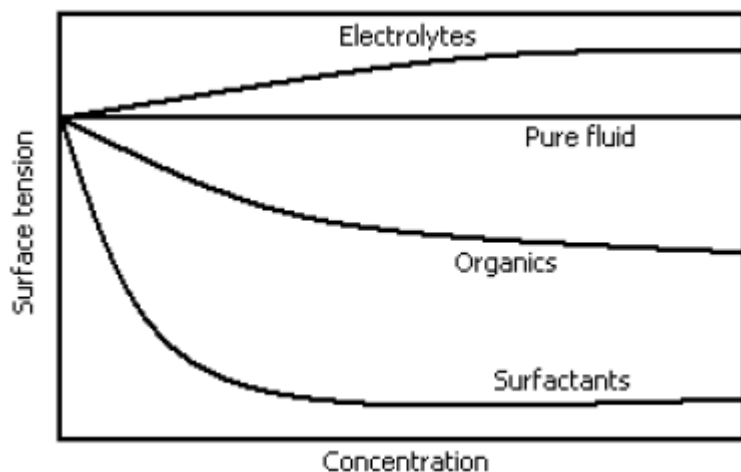
Varför bubblornas storlek inverkar är inte känt. Den föregående klassifikationen nämner inget om att stabilt skum skulle ha mindre bubblor, men en hypotes man kan ställa är att det stabila skummet består av bubblor som inte expanderar mot bristningsgränsen och därför håller bättre.

Det finns ett behov av ett detaljerat klassificeringssystem för olika typer av skum, vilket är Hugs (2006, s. 71) första förslag på framtida forskning på skumning hos aktivt slam. Det skulle bl.a. underlätta samordning av forskning och undvika förvirring. Han föreslår att indelningen skulle grunda sig på skummets utseende, plats i röt-kammare, ursprung, storlek och sammansättning på bubblor, vattenhalt, reduktionsförmåga (redox condition), flockstruktur, dominerande organismer, biologiska aktivitet, ytspänning och andra egenskaper för ytan, skumningspotential och extracellulära polymersubstanser (EPS, stora organiska molekyler från mikrobiologisk aktivitet nedbrutna celler) (Hug, 2006, s. 5).

### 5.2.1 Ytspänning

Ytspänningen tros spela en central roll för skumning. Ytspänningen beskriver summan av de obalanserade krafterna mellan molekylerna i eller nära en fas gränsyta mellan två faser, t.ex. mellan vatten och en gas som luft. Inne i en vätska växelverkar molekylerna med varandra i alla riktningar, till skillnad från molekylerna vid en gränsyta som inte verkar mot gränsytan. Det medför att de påverkas av färre molekyler, vilket också medför att de har en större energi och kallas för ytenergi (ges i SI-enhet med  $J/m^2$ ). Det här kan tolkas som kraft per längd, alltså ytspänning. Följden blir att vätskan strävar till att minimera ytan. Ämnen som samlas vid vätskans yta kallas för ytaktiva ämnen eller tensider. De sänker ytspänningen och orsakar i allmänhet skumning och gasbubblor (Ytspänning, Nationalencyklopedin). Närvaron av tensider tros ha en koppling till skumning vid rötning, vilket går närmare in på i avsnitt 5.3.2.

Rent vatten har en ytspänning vid 20 °C på ungefär 72 mN/m, eller 0,0072  $J/m^2$ . Figur 7 visar hur ytspänningen hos en ren vätska påverkas av olika föreningar. Det framgår av bilden att tillförseln av ytaktiva ämnen sänker ytspänningen kraftigt, vilket underlättar eller förorsakar bildningen av skumning med gasbubblor. Organiska ämnen ökar aktiviteten vid ytan, vilket också sänker utspänningen, men inte lika mycket. Det är inte känt vid vilka exakta koncentrationer ytspänningen sjunker, bara vilken effekten är (Ganidi, 2008, s. 16).



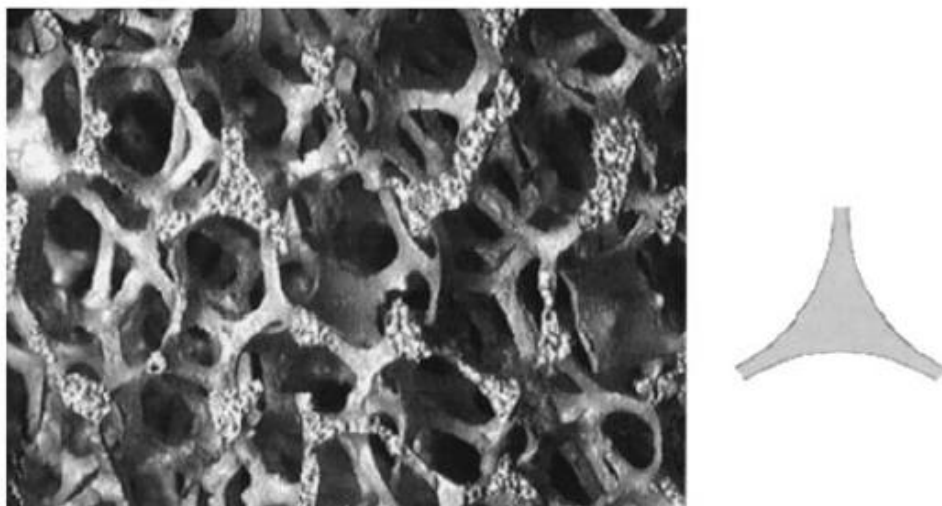
Figur 7. Inverkan av olika typer av föreningar på ytspänningen hos en ren vätska med ytspänning som funktion av föreningens koncentration (Ganidi, 2008, s. 15).

En slutsats man kan dra här är att eftersom rötningen är en organisk process, kan inverkan av höga koncentrationer organiska ämnen på ytspänningen troligen försummas. Reaktionerna utgår endast från organiskt material, vilket medför att i det här sammanhanget kommer halten organiskt material inte att kunna påverkas. Större halter organiskt material påverkar dock mikroorganismernas aktivitet, som nämndes i avsnitt 4.2.2. Därför antas endast ytaktiva ämnen spela en central roll för ytspänningen i det här sammanhanget.

Ytspänningen påverkas av många andra faktorer, som i sin tur kan påverka skumningen, som temperatur, viskositet och alkalinitet. Det här gör det svårt att avgöra exakt vilken faktor som påverkar skumningen. Slammet vid rötning har en lägre ytspänning än rent vatten, vid mesofil rötning är den ca 70 mN/m och vid termofil 66 mN/m. Där har temperaturen alltså en tydlig inverkan på ytspänningen. Vilken skillnad en sådan förändring har är dock okänt (Ganidi, 2008, s. 16).

### 5.2.2 Dränering

En central term för bubblornas livslängd är ”foam drainage”, alltså dränering eller avvattning av bubblorna. Det här sker på flera sätt, beroende på en mängd olika faktorer. Olika ekvationer och modeller har ställts fram för att beskriva hur vattnet rinner av en bubbla i skummet och därmed får den att kollapsa. Centralt för fenomenet är Plateaus lag, som beskriver vid vilken vinkel bubblor möts, vilket är  $120^\circ$  för tre bubblor och  $\cos^{-1}(-1/3) \approx 109^\circ$  för fyra bubblor (Wolfram MathWorld, Plateau's Laws). Området där bubblorna möts kallas Plateaus gräns (på engelska Plateau border). Det är längs det området som vätskan kommer att rinna av bubblan, vilket gör det viktigt för modellerna som beskriver fenomenet (Koehler m.fl. 1998, s. 2098–2099). I figur 8 finns en verklig bild av ett nätverk av Plateaus gränser till vänster och till höger en schematisk bild.



*Figur 8. Till vänster ett nätverk av Plateaus gränser uppgjort av aluminiumskum med öppna celler, till höger en schematisk bild av området där tre bubblor möts och avrinningen sker (Koehler m.fl. 1998, s. 2098).*

Vätskans hastighet vid avrinning i det här området påverkas enligt Koehler m.fl. (1998, s. 2099) av tre fysikaliska fenomen. De påverkar avrinningen genom gravitation och kapillärkraft då trycket är lägre i området än inne i bubblan enligt en konstant och viskositeten hos vätskan. Avrinningen påverkas ytterligare av vätning, som sker när torrare skum kommer i kontakt med en vätska. Vätskan sugas då upp av skummet och genom kapillärkraft kan sätta sig på skummets bubblor (Koehler m.fl. 1998, s. 2101). Enligt Koehler m.fl. (1998, s. 2105) stämmer deras, samt andras, framtagna lösningar och modeller för dynamiken bakom skumning överens med resultat från experiment och numeriska simuleringar. Någon information på att ekvationerna skulle ha tillämpats på skumning vid rötning har inte kunnat hittas. Modellerna borde dock kunna erbjuda information om sådan skumning också, speciellt livstiden för bubblorna. Bland annat hastigheten för avrinning kan räknas ut med olika ekvationer beroende på om avrinningen är fri eller påverkas av någon kraft.

Eftersom ingen ny vätska tillförs i en rötreaktor, samt att förhållandena borde vara likadana överallt i reaktorn, kan man dra slutsatsen att man borde kunna ignorera vätning av skummet vid rötning. Det här borde göra beräkning av skummet enklare.

### 5.2.3 Elasticitet

Det finns många egenskaper hos vätskan och fysikaliska fenomen som spelar in vid skumning. En sådan är elasticiteten hos bubblornas väggar, eller den s.k. filmen. Den är förmågan hos gasbubblornas väggar att motstå lokala uttunnningar då den tunnas ut överlag. Med andra ord betyder en hög sådan elasticitet att bubblans väggar kan tunnas ut jämnt i takt med att bubblan växer, utan att den kollapsar på grund av att väggen blir för tunn på en skild plats. Det är också vätskans förmåga att motverka störningar som har orsakat lokala uttunnningar, genom att den omgivande ytan sträcker ut sig över den uttunnade. Det här kallas Gibbs-Marangoni-effekten (Ganidi, 2008, s. 18). Om den här effekten är stark kommer skumningen att vara gynnad, vilket kan vara orsaken till skillnaden mellan instabilt och metastabilt skum (Ganidi, 2008, s. 19).

Elasticiteten hos bubblorna kan ses som dess förmåga att återhämta sig från störningar. Redan små förändringar i koncentrationer av ytaktiva ämnen kan ha inverkan på bubblors hållfasthet i allmänhet (Wang & Yoon, 2006, s. 103–104). Inverkan av Gibbs-Marangoni-effekten samt filmens tjocklek har inte undersökts för rötning, eftersom den stora mängden olika föreningar och reaktioner gör det svårt att skapa trovärdiga modeller (Ganidi, 2008, s. 19). För andra vätskor har det dock undersökts och visats att bubblornas livstid påverkas av elasticiteten hos väggarna och kraftförändringar på grund av ytaktiva ämnen (Wang & Yoon, 2006, s. 111).

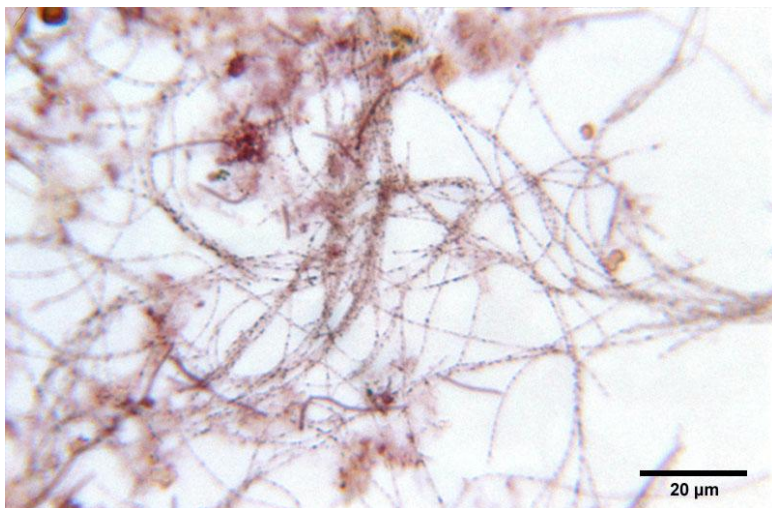
## 5.3 Orsaker

Det finns många teorier om orsakerna till skumning, men de är bristfälligt undersökta och ofta specifika för en skild plats eller anläggning. Teorierna är inte tillräckligt underbyggda med praktiska experiment (Ganidi, 2008, abstrakt). En del av källorna säger dessutom emot varandra (Van Niekerk m.fl. 1987, s. 249). Enligt Moeller m.fl. (2012, s. 110) kan man få reda på orsaken endast genom långvarig observation av biogasreaktorer.

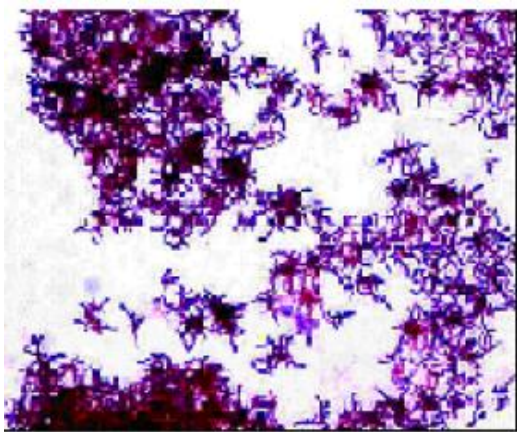
### 5.3.1 Mikroorganismer

Flera typer av mikroorganismer misstänks orsaka skumning, främst två olika arter av filamentbakterier, eller bara filament. Termen trådbakterier används också. Det rör sig om arterna *Gordonia* (*Actinomycetes*) och *Microthrix parvicella*. Se följande sida för en förstora figur 9 på *Microthrix* och figur 10 för *Gordonia* (*Actinomycetes*). Båda har studerats i vattenreningssammanhang, där de har visats orsaka skumning. Som tidigare

nämnts så finns det liknande drag mellan aktivslamrening och rötning. Därför har man undersökt om de här båda arterna också orsakar skumning vid rötning, vilket de tycks göra. Det är dock oklart om arterna är själva orsaken till skumning vid rötning, eller om de endast är närvarande och någon annan art, eller helt annat fenomen, orsakar skumningen. Filament överlag kan däremot ses som en högst antaglig orsak till skumning (Ganidi, 2008, s. 176). Det verkar inte heller vara klart om de båda arterna endast orsakar skum, eller om de också har en stabiliserande verkan. Förutom dessa två arter har det visats att höga halter av mykobakterier orsakar skumning vid vattenrening med aktivslam-metoden, som i sin tur kommer att orsaka skumning om slammet senare rötas (Frigon m.fl. 2006, s. 991). Som tidigare nämnts är det vanligt att slammet som inte återcirkuleras efter vattenreningen stabiliseras med hjälp av rötning och biogas utvinns. *Nocardia* är en annan grupp av filamentbakterier som misstänks orsaka skumning, men den trivs bättre i varmare klimat och hittas främst i USA och Australien. Den växer dessutom bara till sig i aerob miljö i vattenreningen, vilket denitrifikationssteget hindrar (Hultman & Levlin, 2003, s. 5).



Figur 9. Förstorad bild av filamenbakterien av arten *Microthrix parvicella*, som misstänks orsaka skumning (*Microthrix parvicella* på [zerberus-online](#)).



Figur 10. Fläckningsprov med *Actinomycetes* från aktivt slam (Ganidi, 2008, s. 34).

Båda tidigare nämnda arter av filament är aeroba, men verkar kunna överleva i de anaeroba förhållandena i röt-kammare. De kan flockas, men också vara lösta i vätska. Båda arterna har hydrofobiska egenskaper, vilket får dem att söka sig till ytan eller till bubblor som bildas. Det här en central egenskap för deras förmåga att orsaka skumning, eftersom de tillsammans med ytaktiva ämnen sänker ytspänningen (se avsnitt 5.2.1) och därmed ökar potentialen för skumning (Ganidi, 2008, s. 3). Enligt Ganidi (2008, s. 33) visade Hernandez och Jenkins 1994 att *Gordonia* överlevde mesofil rötning i laboratorieskala, samt dessutom att skum bildades vid koncentrationer på 0,05–0,1 gram *Gordonia* per gram TS i röt-kammaren. Koncentrationen liknade läget vid skummande, fullstora anläggningar. *Gordonia* överlevde mesofil rötning med 37 % minskning av filament efter 14 dagars rötning. Ganidi rapporterar också att *Microthrix* enligt Mamais m.fl. (1998) skulle klara av syrefria miljöer. Ganidi skriver också (2008, s. 34) att filamentbakterier kan växa i mesofila temperaturområdet utan större problem.

En hypotes man kan ställa är att de här arterna av skadliga filamentbakterier skulle klara termofil rötning sämre, eftersom det temperaturområdet är längre från deras optimala. De termofila bakterierna som finns vid rötning skulle alltså gynnas av sin optimala temperatur, medan de bakterier som orsakar skumning skulle ha sämre förutsättningar.

Marneri, Antoniou och Mamais (2009, s. A-864) undersökte vilken inverkan temperaturen har och jämförde påverkan på *Microthrix parvicella* vid mesofil och termofil rötning under olika uppehållstider i röt-kammare. Man undersökte också två olika s.k. dual-system, ett med mesofil rötning i två steg och ett med först termofil och sedan mesofil rötning. Resultatet från försöken kan ses i tabell 4, där det framgår att termofil och tvåstegs termo- och mesofil rötning lyckades bryta ner en större andel av bakterierna än den mesofila och

nedbrytningsgraden var proportionell mot uppehållstiden. Intressant är dock att fast man lyckades bryta ned en större andel, så förbättrades inte skumningsegenskaperna nämnvärt. Skumningspotentialen och stabiliteten verkar alltså vara en kombination av koncentrationen av bakterier och inverkan av olika skumstabiliserande ämnen i slammet.

*Tabell 4. Resultat från jämförelse mellan mesofil, termofil och två s.k. dual-system rötning för minskning av filament under olika uppehållstider i reaktorn.*

% Filament Reduction				
	Detention time (days)			
Digestion systems	20	16	13	10
Single stage Meso	75,62% ±2,43%	69,80% ±3,70%	55,81% ±0,91%	51,11% ±1,03%
Single stage Therm	97,10% ±2,62%	96,57% ±4,11%	92,23% ±1,16%	88,89% ±0,76%
Dual stage T/Meso	94,58% ±2,61%	94,25% ±4,07%	85,81% ±1,07%	77,78% ±0,78%
Dual stage Meso	76,91% ±2,53%	71,90% ±3,69%	59,35% ±0,90%	57,22% ±0,78%

*Källa: Marneri, 2009, s. A-868.*

Det som framgår av Marneri m.fl. (2009, s. A-869) är dels temperaturens inverkan, men också att tvåstegsrötning med termofil och sedan mesofil temperatur är det överlag effektivaste, med produktion inräknat. Det här gäller i alla fall i det här fallet då man använde sig av sådant substrat som innehöll mycket filament. För att en anläggning ska drabbas av skumning som orsakats av bakterierna, måste bakterierna finnas i substratet. Filament är vanligast i slam från vattenreningsanläggningar, vilket är ett vanligt substrat. Dock rapporterar Ganidi (2008, s. 179) om vissa tillfällen vid brittiska anläggningar då bakterier inte funnits i inkommande slam, men hittats sedan i prov från rötreaktorn. Det kan tyda på att bakterierna har överlevt relativt länge i reaktorn och inte kommit ut med rötat material.

Även om det verkar som att de tidigare nämnda arterna och andra filament är en trolig orsak till skumning, kommer bl.a. Ganidi (2008, s. 191–192, s. 194) inte fram till att bakterierna skulle vara orsaken till skumning vid de undersökta anläggningarna. Någon stor skillnad fanns inte i bakteriekulturerna mellan de skummande och icke-skummande anläggningarna som undersöktes, bortsett från enstaka fall. Vid Käppalaförbundet i Sverige hade man tidigare problem med skumning, som orsakades av en kombination av hög gasproduktion och filament (Intervju med Andreas Thunberg 19.7.2012). Man blandade då primärslam med överskottsslam, vilket kan leda till en kraftig tillväxt av filamentbakterier. Det inträffar eftersom primärslammet är mycket näringsrikt för filamentbakterierna i överskottsslammet, vilket betyder att det är bäst att röta de båda slammen skilt, vilket man



införde vid Käppala (Starberg m.fl. 2005, s. 18). Vid Syvab, Himmerfjärdsverket i Grödinge, Sverige, som renar vatten från sydvästra Stockholmsregionen och framställer biogas, hade man tidvis höga halter filament, men upplevde ändå ingen märkbar skumning (Intervju med Elin Åfeldt 18.6.2012). Vid en undersökning om skumning vid vattenrening med aktivslammetoden kom Hug fram till att *Microthrix Parvicella* och *Nocardioform Actinomycetes* inte spelade en viktig roll för stabil skumningen (2006, s. 67), tvärtemot vad som tros. Stabil skumning misstänks ju sprida sig till den efterföljande rötningen. Sambandet mellan bakterier och skumning är alltså inte helt klart.

### 5.3.2 Ytaktiva ämnen

Till ytaktiva ämnen hör en mängd olika typer av föreningar, som ofta kan vara närvarande vid rötning. Till dem hör bl.a. oljor, flyktiga fettsyror (s.k. VFA), proteiner, tvättmedel och en del fast, oorganiskt material. Termen ”biosurfaktant” används för ytaktiva ämnen som kommer från metabolismen hos mikroorganismer, t.ex. lipoproteiner. Ytaktiva ämnen sänker ytspänningen (se avsnitt 5.2.1). Det som karaktäriserar ytaktiva ämnen är att de har en hydrofob och en hydrofil ände, vilket får dem att söka sig mot ytan med den hydrofoba änden. En viktig term i sammanhanget är kritisk micellkoncentration, eller cmc, som är koncentrationen av ytaktiva ämnen då de börjar bilda miceller i lösningen. Micellerna bildas genom att molekylernas hydrofoba svansar riktas mot varandra i mitten av en ring och de hydrofoba utåt. Vid koncentrationer lägre än cmc är molekylerna monomerer, men när cmc överskrids ökar ytaktiviteten och skum bildas om gas införs i lösningen. Som exempel är cmc i rent vatten för proteinet Bovine serum albumin (BSA) 0,03 mg/l (Ganidi m.fl. 2009, s. 8–9). Risken för skumning ökar när man matar in animaliskt protein och främst fiskrester har identifierats som problematiskt. När man har matat in slaktrester i en rötkammare som tidigare fungerat med andra substrat, har man observerat en efterföljande skumning, ibland väldigt kraftig. Skumning har gått över när processen har stabiliserat sig efter inmatningen av det nya substratet (Moeller m.fl. 2012, s. 110–111).

Ganidi m.fl. (2009, s. 10) poängterar att alla de ovannämnda ytaktiva ämnena finns närvarande vid rötning, men att de bryts ner till mindre molekyler under processen. Det skulle därför vara viktigt att känna till nedbrytningsstegen och produkterna för att kunna avgöra effekten av dem, speciellt stora molekyler som proteiner. Proteiner har identifierats enligt dem som möjliga skumbildare och cmc för olika proteiner finns tillgängligt. Dock är det inte känt vid vilka koncentrationer och av exakt vilka proteiner som skumbildning startar (Ganidi m.fl. 2009, s. 11). Proteiner kan höja skumningspotentialen på flera sätt,

inte bara genom att sänka ytspänningen. Det kan ske bland annat genom att olika proteiner samverkar elektrostatiskt eller att de samverkar med vissa typer av fetter. Båda fenomenen minskar dräneringen av bubblorna (se avsnitt 5.2.2.) och därmed ökar stabiliteten på skummet (Ganidi m.fl. 2009, s. 13).

Flyktiga fettsyror (volatile fatty acids, VFA) är en grupp ytaktiva ämnen som är vanliga att undersöka för att få en bild av hur rötningen framskrider. Speciellt kortkedjiga fettsyror följs upp. Om koncentrationen av VFA höjs är det ett tidigt tecken på att röttningsprocessen är ur balans och justerande åtgärder kan behöva vidtas. Den exakta följden av en hög koncentration VFA är inte klart fastställd, men eftersom bakterierna i slutskedet av metanbildningen använder VFA tyder det på en nedsatt aktivitet hos dem. Höga koncentrationer av VFA och en påföljande sänkning av pH gör miljön toxisk för de metanbildande bakterierna (McCarty & McKinney, 1961, s. 223). Enligt processingenjör Elin Åfeldt vid Syvab är en höjning av koncentrationen av VFA det enda tecknet på skumning de upplever vid reningsverkets biogasanläggning, men eftersom Syvab inte specifikt undersökt skumning är det inte helt klart om det finns ett samband (Intervju med Elin Åfeldt 18.6.2012). Största delen av VFA i rötning är ättiksyra, som vanligtvis utgör 85 % av totala VFA. Närvaro av ättiksyra har misstänkts vara en orsak till skumning. Det är dock oklart vid vilka koncentrationer VFA och speciellt ättiksyra börjar inhibera rötningen och möjligtvis förorsaka skumning (Ganidi m.fl. 2009, s. 13–14). Ganidi kom i sina försök (2008, s. 171) fram till att ättiksyra inte förorsakar skumning och inte är ytaktivt vid de undersökta koncentrationerna (0,5, 1,5 och 5,0 g/l), vilket inte stämmer överens med annan litteratur.

Ganidi undersökte 2008 (s. 125) hypotesen att anaerobisk nedbrytning förändrar koncentrationerna och påverkan av ytaktiva ämnen, samt att det finns kritiska koncentrationer av ytaktiva ämnen för att skumning ska inträffa. Han undersökte bland annat olika proteiners förmåga att bilda skum vid luftning. Av de undersökta bildade gelatin det enda helt stabila skummet och BSA (protein från nötkreatur) var det som orsakade mest ytaktivitet (Ganidi, 2008, s. 143). Man kom också fram till att slammet vid rötning har mindre skumningspotential vid tillsättning av ytaktiva ämnen än samma koncentration i vatten. T.ex. en koncentration på 0,1 g/l BSA i slam medför 56 gånger lägre benägenhet för skumning än samma koncentration i rent vatten vid luftning (Ganidi, 2008 s. 131). Vid undersökning av inverkan av tre olika koncentrationer av BSA på rötning visade det sig att skum som förstördes mekaniskt återbildades inom 24 timmar (Ganidi, 2008, s. 134). De undersökta koncentrationerna av BSA vid rötning, 0,1 g/l, 0,3

g/l och 1,0 g/l, orsakade alla skumning och hade en stabiliserande verkan på skummet. Den högsta koncentrationen orsakade mest producerat skum (Ganidi, 2008, s. 133). Enligt Ganidi (2008, s. 138) anses slammets rekommenderade VFA-halt efter rötning vara 50–300 mg/l. Höga koncentrationer tyder på dålig nedbrytning med bl.a. potentiell skumning som följd. Det bör dock påpekas att skillnad förekommer i vilken typ av fettsyra det rör sig om, bl.a. eftersom långa proteinkedjor bryts ner i steg till kortare fettsyror. En måttlig ökning av VFA behöver nödvändigtvis inte betyda en negativ effekt på rötningen, eftersom fettsyrorna tas tillvara av de metanproducerade mikroorganismerna, som syntes bl.a. i försök gjorda av Ganidi (2008, s. 147) där metanhalten i biogasen ökade med ökad koncentration n-pentansyra ( $C_5H_{10}O_2$ ) i slammet som rötades.

Det är oklart om skumning orsakad av VFA är en följd av att substratet innehåller sådana ytaktiva ämnen som orsakar skumning eller om de bildas inne i rötammaren utgående från andra föreningar. Det kan röra sig om en kombination av de båda. Ganidi (2008, s. 164) fann tecken på att benägenhet för skumning vid luftning av nedbrutet slam var oberoende av det inkommande slammets benägenhet att skumma, alltså bildades de ytaktiva ämnen som orsakade benägenheten inne i rötammaren. Den tidigare nämnda pentansyran verkar orsaka skumning vid rötningförsök, men även efter att all pentansyra brutits ner fortsatte metastabil skumning i 6–7 dygn (Ganidi, 2008, s. 169). Närvaron av den typen av VFA var alltså inte nödvändigt för fortsatt skumning, utan kan bero på en ostabil process till följd av variationer eller brist i drift och inmatning. Det är enligt Herbes m.fl. (2010, s. 205) också oklart om en hög halt VFA är en orsak till skumning i rötreaktorer, eller om det är ett tecken på att något annat som orsakar obalans i processen med skumning som följd.

### 5.3.3 Drift och inmatning

Driften och den allmänna skötseln av biogasanläggningen kan ha en stor inverkan på skumningen. Enligt Bates m.fl. (2006, s. 22) är den vanligaste orsaken till skumning instabil drift. Dessutom påpekar de att det är viktigt att personalen är kunnig och kan tolka alla mätvärden och trender. Om en rötammare börjar skumma är det skäl att se över driftsförhållanden och rutiner, speciellt om någon förändring gjorts. Det är t.ex. bra att undvika långa intervall mellan inmatning av nytt substrat, så att man undviker att mata in större mängder på en gång och därmed överbelasta bakteriekulturen. Med andra ord är det bättre att mata in mindre mängder oftare, som blir mer lättnedbrytbart för mikroorganismerna. Dessutom verkar skumningsproblem vara vanligare under uppstart av

nya rötningsprocesser, men varför är inte känt. Enligt Moeller, Görsch, Müller och Zehnsdorf (2012, s. 110) skummar det främst i sådana anläggningar där man matar in olika sorters substrat i varierande mängder. De anser att främsta orsaken till skumning är användandet av för mycket opassande eller lättnedbrytbart substrat.

Lithén, anläggningschef vid Stormossens biogasanläggning, anser (Intervju 21.9.2012) att man behöver följa med substratet och tillståndet inne i röt kamrarna för att undvika skumning. Stormossen rötar bl.a. avfall från hushåll och vid stora variationer eller förekomsten av något främmande i inmatningen kan skumning inträffa. Då kan man behöva anpassa driften för att undvika skumningsproblem.

Hur mycket organiskt material som lastas in och i vilken takt misstänks vara en av de främsta orsakerna till skumning. Enligt Herbes m.fl. (2010, s. 205–206) orsakar en inmatning på 4 kg torrt organiskt material/m<sup>3</sup> kraftig överbelastning för mikroorganismerna, vilket leder till störningar som skumning. Då överbelastar man eller ger systemet en s.k. chock. Enligt Ganidis försök i laboratorium (2008, s. 100–101) ger en inmatning på 2,5 kg VS/m<sup>3</sup>d upphov till ostabilt skum, medan 5 kg VS/m<sup>3</sup>d ger upphov till metastabilt skum. Vid försöken förstördes skummet mekaniskt dagligen, men återbildades inom ett dygn. Man hittade vissa samband till skumning vid fullskaliga anläggningar, eftersom de två som matade in 3,5 kg VS/m<sup>3</sup>d respektive 5,2 kg VS/m<sup>3</sup>d upplevde skumningsproblem. På grund av att många faktorer spelar in är det dock omöjligt att dra ytterligare säkra slutsatser från undersökningarna av de fullskaliga anläggningarna. I laboratorieskala gav en belastning på 1,25 kg VS/m<sup>3</sup>d inte upphov till något skum alls (Ganidi, 2008, s. 93–96). Ganidi anser att man kan få en fullskalig röt kammare att skumma endast genom att överskrida en belastning på 2,5 kg VS/m<sup>3</sup>d (2008, s. 117). Det här antagandet får inte stöd av simuleringar gjorda av Dalmau, Comas, Rodriguez-Roda, Pagilla och Steyer (2010, s. 4–5). De utgår också från att en belastning på 2,5 kg VS/m<sup>3</sup>d kommer att medföra risk för skumning. I riskmodellen och jämförelse med verkliga försök kommer de fram till att även om risken ökar, är det först vid ännu högre belastningar som risken för skumning kommer att bli stor. De undersökte dock samtidigt sambandet med skumning vid vattenrening med aktivslammetoden samt variation i inmatningen, vilket betyder att resultaten inte är direkt jämförbara.

Rötningsprocessen ska helst styras så att den hålls på en balanserad och jämn nivå och biogasproduktionen inte skjuter i höjden på grund av inmatning av en viss typ av substrat. Vid Käppalaförbundets biogasanläggning för rötning av slam från aktivslamprocessen

orsakades skumning av att näringsrikt primärslam blandades med överskottsslam som höjde biogasproduktionen. Vid anläggningen rötades endast eget slam, som till största delen var överskottsslam. Bubblorna i skummet förstärktes sedan av *Microthrix Parvicella*, som dessutom gynnades av hur de olika slamtyperna blandades (se avsnitt 5.3.1). En hög biogasproduktion, som i vissa avseenden är gynnsamt, gav alltså upphov till en sådan kraftig skumning att rötkamrarna svämmade över (Intervju med Andreas Thunberg 19.7.2012). Van Niekerk m.fl. (1987, s. 251) utförde experiment som visade att benägenheten för att skumma ökade avsevärt då blandat primär- och överskottsslam rötades i laboratorium, till skillnad från då primärslammet rötades skilt. Det gällde dock för slam från en anläggning i Kalifornien, USA.

Vid en biogasanläggning i Louisville, Kentucky, uppstod skumning då inmatningen av organiskt material blev ojämn eller för hög, vilket inträffade då man blandade in externt material i det egna slammet. Skumning inträffade då förändringen i inmatningen av fast organiskt material var över 20 % från det normala. Förändringen inträffade då mängden organiskt material ökade märkbart genom att man pumpade in stora volymer substrat eller halten fast material i inmatningen översteg 5 %. Då inmatningen återgick till det normala stabiliserades halten av flyktiga syror och skumningen upphörde (Bates m.fl. 2006, s. 6–7).

Enligt Bates m.fl. (2006, s. 54) finns det några koncentrationer och rutiner som gäller drift och inmatning som man behöver följa för att undvika skumning, i alla fall vid biogasanläggningar vid vattenreningsverk. De är:

- kontrollera totala TS- och VS-halten samt flödet av primärslam och förtjockat aktivt slam åtminstone dagligen
- håll TS-halten vid 4,5–5,0 % genom att anpassa koncentrationen av förtjockat aktivt slam
- håll VS-halten i rötkammaren vid 45–68 kg per 28 m<sup>3</sup> (100–150 lb per 1000 ft<sup>3</sup>)
- se till att dagliga variationen i VS-halten hålls vid 5–10 % genom att blanda olika slam i en lämplig omblandningstank
- jämför minskningen i VS-halten med produktionen av biogas för att se om inmatningen är lämplig. Det produceras ungefär 0,87–1,00 m<sup>3</sup> biogas per kilogram nedbruten VS

- gör upp grafer för högsta och lägsta värden för alla parametrar i rötningen
- gör upp kalkylblad med medelvärden från olika tidsperioder med viktiga parametrar för processen, som man går igenom på vecko- och månadsvisa möten
- ta prov och gör analyser på processen i ett laboratorium som finns vid anläggningen och se till att resultaten är klara inom åtta timmar.

Råden är antagligen nyttiga att bekanta sig med, men exakta värden och vad som passar beror alltid på själva anläggningen. Att följa de här kan inte garantera att skumning inte uppstår. Det är hursomhelst viktigt att det finns rutiner för uppföljning av något slag, så att kontroller görs tillräckligt ofta.

Det har antagits att skumning är kopplat till dåligt underhåll av anläggningar. Beroende på substratets karaktär kommer avlagringar att bildas i någon mån med tiden, vilket leder till en minskning av den effektiva volymen. Avlagringar eller söndrig utrustning leder också bl.a. till sämre omblandning och uppvärmning, vilket i sin tur kan leda till skumning. Det är dock svårt att bevisa och få fram någon tydlig gräns för när avlagringar för en viss typ av reaktor och substrat kommer att leda till problem, eftersom det är många faktorer som spelar in. Ganidi (2008, s. 89–90) kunde inte visa något samband mellan underhåll och skumning vid 15 undersökta biogasanläggningar, av vilka 9 skummade och 6 inte, eftersom andra faktorer som dålig uppvärmning, olika egenskaper hos substrat och föregående processer spelade in. Om inte skydd mot kondensering finns i gasuppsamlingsrören, finns det risk för skumning vid underhåll av dem. När kondensat samlas i rören kan det blockera gasflödet med följd att trycket stiger i reaktorn. När blockeringen tas bort kommer trycket plötsligt att sjunka, vilket kan orsaka skumning. Därför behöver utrustning finnas som hindrar att t.ex. kondensat samlas i rören (Bates m.fl. 2006, s. 4).

Enligt Massart m.fl. (2006, s. 51) borde personal vid biogasanläggningar acceptera att det kommer att skumma i viss mån i röt-kammaren, i stället för att försöka få bort fenomenet helt. De borde sträva till att få bort faktorer som förvärrar den, i deras åsikt, naturliga skumningen, så att den inte blir kraftig och stiger upp i gasrören. För att åstadkomma det behöver driftspersonalen ha tid och resurser för att övervaka och sköta anläggningen. De anser att själva skumningen inte är problemet, utan de ostabila förhållandena som orsakar själva skumningen.

### 5.3.4 Temperatur

Temperaturen inverkar på flera sätt på risken för skumning. Temperaturfluktuationer i röt-kammaren borde inte förekomma, eftersom en stabil temperatur är en förutsättning för en välfungerande rötningsprocess (se avsnitt 4.3.1.). Det innebär att röt-kammaren inte bara behöver ha ett välfungerande uppvärmningssystem, utan också att den är ordentligt isolerad. Förutom att en bra isolering möjliggör en jämn temperatur, så blir värmeförlusterna mindre och därmed minskar energikostnaderna (Starberg m.fl. 2005, s. 24). Temperaturfluktuationer verkar inte enligt viss litteratur ha en direkt inverkan på skumningen (Ganidi m.fl. 2009, s. 23) utan bara på biogasproduktionen. Dock rapporterar Moeller m.fl. (2012, s. 111) om ett fall där en plötslig temperaturhöjning från 35 °C till 38 °C orsakade skumning. Andra faktorer, som inmatning, hade länge varit oförändrade utan tidigare skumning. Som nämntes i avsnitt 5.3.1. orsakar bakterier skumning vid vattenrening samt efterföljande skumning vid rötning av slammet från reningsprocessen. Det som orsakar en förhöjd halt av mykobakterier i aktivslammet tros bl.a. vara en höjning av temperaturen, eftersom skumning är vid vissa anläggningar vanligare under den varmare delen av året. Det här tros bero på att under sommarmånaderna kommer temperaturen, främst i utomhusbassänger, närmare optimumtemperaturen för sådana bakterier som orsakar skumning vid vattenrening. Skumningsfenomenet kan alltså vara säsongsbetonat vid biologisk vattenrening och sedan få konsekvenser för efterföljande rötning (Frigon m.fl. 2006, s. 991, s. 1006).

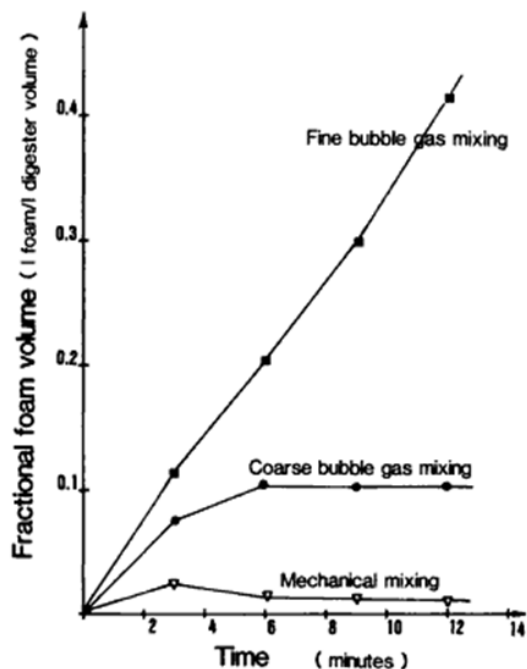
Enligt Ganidi m.fl. (2009, s. 24) har termofil rötning mindre benägenhet för att skumma än mesofil rötning, eftersom en högre temperatur medför en lägre ytspänning och viskositet, som kan betyda en ökad dränering av bubblorna i skummet. Därför anser de att termofil rötning skulle kunna lämpa sig bättre under sådana omständigheter då skum alltid är närvarande. Filament, som verkar orsaka skumning, överlever dessutom åtminstone mesofila, anaeroba förhållanden (Ganidi, 2008, s. 176). Om filament som *Microthrix Parvicella* skulle reagera negativt på en högre rötningstemperatur skriver Ganidi inte om (se avsnitt 5.3.1.). Men enligt Herbes m.fl. (2010, s. 205) har experiment visat att mera filament förstörs under termofil rötning, vilket betyder att termofil rötning har en mindre benägenhet att skumma. Däremot argumenterar Van Niekerk m.fl. (1987, s. 249) att mesofil temperatur skulle vara mindre benägen att skumma, tvärt emot vad Ganidi m.fl. anser. De hänvisar till studier från ett vattenreningsverk i Denver, USA, som visat att faktorer som ammoniakhalt, alkalinitet och VFA är avsevärt högre vid termofil rötning och skulle därmed betyda en större risk för skumning.

### 5.3.5 Omblandning

Omblandningen kan inverka på skumningen både negativt och positivt. Om omblandningen inte är tillräcklig, kommer skiktning att uppstå i rötammaren och bl.a. ett skummande lager högst upp. Det uppstår då gasbubblor fastnar i det översta lagret, som kunnat bildas då bl.a. hydrofoba molekyler samlas vid ytan då omblandningen inte varit tillräcklig. Gasbubblorna kan också fästa sig på fast material lägre ner i rötammaren och lyfta upp det till skumlagret, vilket bidrar till skumningen. En för kraftig omblandning kan ha skadlig inverkan bl.a. genom att öka mängden gasbubblor som hålls inne i vätskan, som därmed bidrar till skumning (Bates, Corning, Massart, & Neun, 2006, s. 16). I kombination med otillräcklig uppvärmning kan en olämplig omblandning leda till skumning. Det kan inträffa t.ex. om uppvärmningsutrustningen är underdimensionerad och temperaturen varierar inne i rötammaren. Skumning kan då inträffa bl.a. genom att processen störs, men också att skiktning uppstår (Herbes, Moeller, Müller, & Zehnsdorf, 2010, s. 206).

Flera källor anger gasomblandning som en orsak till skumning och rekommenderar i stället att använda mekanisk omblandning (Ganidi, 2008, s. 115, Van Niekerk m.fl. 1987, s. 249). Gasomblandning orsakar en större mängd stigande gasbubblor i rötammaren, vilket underlättar skumning om risk för skumbildning redan finns, genom att erbjuda mera bubblor för ytaktiva ämnen och filament att fästa sig på. Ganidi kunde inte bevisa det här (2008, s. 115), men i laboratorieförsök visade Van Niekerk m.fl. (1987, s. 253) att gasomblandning med små bubblor orsakar mer skumning än omblandning med större bubblor och mekanisk omblandning, se figur 11. Samma författare (1987, s. 250) rapporterar om fullskaliga anläggningar där driftspersonal rekommenderar att sluta med gasomblandning som åtgärd mot skumning, men nämner också att gasomblandning installerats i en anläggning för att åtgärda skumningsproblem. I en rapport av Starberg m.fl. (2005, s. 20–21) skriver man att erfarenheterna av gasomblandning är generellt goda och att det är rundpumpning utan strålmunstycken som kan orsaka skumning. Man tillägger dock att om man har mycket filamentbakterier i slammet kan gasomblandning orsaka skumning och då är mekanisk omrörning bättre.





Figur 11. Volym på skumbildning som funktion av tid för mekanisk omrörning och gasomblandning med små och större bubblor (Van Niekerk m.fl. 1987, s. 252).

Bates m.fl. (2006, s. 21–22) skriver att gasomblandning lämpar sig endast för sådana rötningar där det fasta materialet utgör mindre än 5 % av innehållet. Om andelen är högre minskar effektiviteten. Dessutom är det viktigt att minimera tiden som gasomblandningen är avstängd för underhåll. Om tiden utan omrörning överstiger åtta timmar kan röttningsprocessen störas och inmatningen av organiskt material bör pausas. Alla kanoner för omblandning bör helst producera en bubbla var 5–10 sek. Figur 12 visar en bild av en kompressor för gasomblandning.



Figur 12. Biogaskompressor för omblandning (Bates m.fl. 2006, s. 21).

### 5.3.6 Alkalinitet

Alkalinitet är ett mått på en vätskas förmåga att motstå tillskott av vätejoner vid tillsättning av syra. Det betyder att pH i systemet inte sänks, utan det finns en buffertförmåga mot försurande ämnen. Alkalinitet ges vanligen i mmol vätekarbonatjoner per liter (millimol  $\text{HCO}_3^-/\text{l}$ ) eller milliekvivalenter per liter (mekv/l). Om alkaliniteten förbrukas eller när den är 0 kommer pH värdet att sjunka i takt med tillsättning av försurande ämnen. En ökning av vätekarbonat-, karbonat- och hydroxidjoner höjer alkaliniteten (Alkalinitet, Nationalencyklopedin på Internet). Eftersom väte förbrukas under metanbildningen kommer alkaliniteten att öka (se avsnitt 4.1). Alkaliniteten kan motverka sänkning av pH på grund av försurande ämnen i röt-kammaren (se avsnitt 4.3.2.), men i litteraturen misstänks höjning av alkalinitet vara en orsak till skumning (Van Niekerk m.fl. 1987, s. 249, s. 253, Isik, 2006, s. 11). Några bevis på eller orsaker till varför alkalinitet är kopplat till skumning har inte kunnat hittas i litteraturen. Däremot skriver Starberg m.fl. (2005, s. 17) att en överbelastad (se avsnitt 5.3.3) och störd process, som kan ge upphov till skumning, kommer att leda till en ökad syrabildning som sänker pH och alkaliniteten. Med andra ord skulle skumning, enligt de här källorna, kunna uppstå både då alkaliniteten ökar och minskar.

Vid en undersökning av 15 brittiska biogasanläggningar, varav 9 upplevde skumning, följdes alkalinitet upp. Vissa överskred den rekommenderade alkaliniteten för rötreaktorer på 2000 till 3000 mg/l (antagligen avses mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ ). Statistiska analyser av resultaten från mätning av alkaliniteten visade att det inte fanns något samband mellan alkaliniteten och skumning hos de undersökta anläggningarna (Ganidi, 2008, s. 109). Enligt Latvala, (2009, s. 36) är dock den rekommenderade alkaliniteten vid rötning 3500–5000 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ . Endast en av de anläggningar som Ganidi undersökte överskred 5000 mg/l, vilket skulle kunna förklara varför inget samband hittades mellan skumning och alkalinitet hos just de undersökta anläggningarna.

### 5.3.7 Polymerer

Polymerer används vid vattenrening till att förtjocka slammet och därmed underlätta efterföljande behandling. De här polymererna har misstänkts förvärpa skumningseffekten genom att stabilisera bubblorna i slammet när det senare rötas, men enligt Van Niekerk m.fl. (1987, s. 249) har inga bevis hittats för det här. Polymerer förekommer sparsamt i litteraturen kring ämnet. Det kan bero på att feldosering av polymerer vid vattenreningen

leder till problem redan före rötningen. För lite polymerer orsakar bl.a. att vätskan inte förtjockas tillräckligt och att fast material spolats bort med rejektvatten. För mycket polymerer orsakar skumning, vilket kan dels förorsaka skada på utrustning och översvämning, men också att automatiserade delar av processen inte fungerar ordentligt, som t.ex. centrifugering (Filippenkov, 2010, s. 20).

### 5.3.8 Kväve

Enligt Herbes m.fl. (2010, s. 205) är kväve en orsak till skumning. Halten av kväve kan komma att stiga i reaktorn vid rötning av plantbaserade substrat då en del av det färdigrötade slammet cirkuleras och blandas med färskt substrat. Det innebär att olika kväveföreningar kommer att öka i rötammaren med påföljande skumning. Enligt delvis samma författare, Moeller m.fl. (2012, s. 111), är höns gödsel ett av de vanligaste substraten som orsakar skumning. Det beror på att kvävehalten i höns gödsel är väldigt hög. Kväve verkar inhiberande på mikroorganismerna i röttningsprocessen, så att skumning uppstår. De nämner dock att det finns anläggningar där mikroorganismerna verkar ha anpassat sig till hög ammoniumhalt.

Starberg m.fl. (2005, s. 18) skriver att vattenreningsverk med biologisk kvävereduktion har mer problem med skumning vid rötning av slammet, som då skulle ha en högre kvävehalt. Anledningen till skumning vid kvävereduktion beror dock inte på själva kvävet, utan på att halten av filamentbakterier (se avsnitt 5.3.1) ökar till följd av en längre uppehållstid (Starberg m.fl. 2005, s. 45). Man har i EU genom direktivet 91/271/EEG och dess ändring 98/15/EG fastslagit att utsläppen av kväve ska minska i hela regionen och speciellt vid känsliga områden genom en förbättrad rening av avloppsvatten. Man kan då anta att skumning kommer att bli vanligare i framtiden, som en följd av ökad kvävereduktion. Finland har fastslagit att införa långtgående rening i hela landet, bl.a. för att Östersjön är ett känsligt område. Finland har i alla fall tidigare inte ansetts uppfylla EU:s krav på främst reningen av kväve (Rapport om genomförande av rådets direktiv 91/271/EEG). Vid en undersökning av 20 svenska reningsverk, varav 13 hade kvävereduktion, upplevde 11 av dem slamsvällning och 8 hade någon gång haft problem med skumbildning i det biologiska steget (Hultman & Levlín, 2003, s. 6). Eftersom skumning i vattenreningen ofta betyder skumning i efterföljande rötning av slammet är det skäl att beakta risken för skumning där kvävereduktion används, speciellt om belastningen och flödet är lågt.

### 5.3.9 Viskositetshöjande ämnen

Viskositeten på vätskan i röt-kammaren inverkar på risken för skumning på flera sätt (se avsnitt 5.2.1 och 5.2.2). Vissa substrat och ämnen som bildas inne i röt-kammaren inverkar på viskositeten genom att höja den och göra slammet mer trögflytande. Om viskositeten höjs kommer gasbubblor att ha svårare att lämna blandningen och skumningen börjar när mer och mer bubblor fastnar i slammet. Sockerbetor har dels en hög andel lättnedbrytbart material i form av socker (sackaros), som kan leda till en överproduktion (se avsnitt 5.3.3) av mikroorganismer och därmed skumning. Dessutom innehåller sockerbetors cellväggar höga halter av ämnet pektin, som höjer viskositeten på substratet. Moeller m.fl. (2012, s. 111) rapporterar om ett fall där ett tekniskt fel i doseringsutrustningen ledde till att för mycket sockerbetor matades in. Överdoseringsen ledde till en kraftig skumning som förstörde utrustning i processen.

Stärkelse i substratet misstänks ha liknande inverkan som pektin i sockerbetor, eftersom det höjer viskositeten. Majs innehåller mycket stärkelse och rapporteras ha orsakat skumning vid en anläggning i Sachsen-Anhalt i Tyskland. En annan anläggning som använde sig av majs och flytande gödsel drabbades av skumning och var tvungen att tillsätta flera liter skumdämpare i dygnet. I det fallet kom man fram till att det var tillsättningen av rågkorn som orsakade skumningen. Som med sockerbetor bryts en del av rågen snabbt ner och orsakar en överproduktion, som sedan orsakar skumning tillsammans med den förhöjda viskositeten som stärkelsen bidragit till. Andra sädesslag som hirs och korn har liknande effekter. Om kornen är finmalda har de en mer skummande verkan än om de är större, då de erbjuder en större yta och bryts ner snabbare. Dessutom bidrar stärkelse och proteiner från nedbrytningen av råg till stabiliteten på skummet, något som är känt också från andra sammanhang, som livsmedelsbranschen (Moeller m.fl. 2012, s. 112).

## 5.4 Följder

Följderna av skumning beror främst på hur allvarlig och ihållande skumningsincidenten är, vilket Moeller m.fl. (2012, s. 112) konstaterar. Det kan röra sig om små följder eller mycket allvarliga problem för anläggningen. Problemen som orsakas av skumning är många och inverkar på många aspekter hos en biogasanläggning, t.ex. får skumningen i förlängningen en inverkan på miljöfrågor (se avsnitt 5.4.5.). I det här kapitlet ges flera motiveringar till varför det är skäl att utveckla metoder för att råda bot på skumningsproblemet och förstå det bättre.

### 5.4.1 Ekonomi

Skumningen kan få ekonomiska följder av varierande storlek, men det är ont om konkreta siffror i litteraturen. Skumning kan, som vi ska se, innebära olika slags problem och kostnader. Anläggningar måste avgöra om problemen som skumningen orsakar överväger kostnaderna för både själva investeringen och underhåll samt drift av den. Många gånger lönar det sig att istället se över rutiner och driften (se avsnitt 5.3.3) av anläggningen, som kan vara tillräckligt för att få ner skumningen (Bates m.fl. 2006, s. 1).

Herbes m.fl. (2010, s. 206) nämner också att förutom kostnaderna för extra arbetstimmar och problem med produktionen, innebär skumning att man behöver införskaffa dyr utrustning specifikt för att klara av skumningen. Utrustning som anläggningen kan behöva investera i är dels behandlade, som s.k. skumfällor eller -fångare och spridningssystem för kemikalier, men också övervakningssystem och sensorer för skumningen. Utrustning som används för att övervaka skumning är olika slags nivåmätare, som endera känner av förändringar i kapacitans eller konduktans eller anordningar med t.ex. skovlar eller flöten som stiger med skummet. Olika typer av fotosensorer kan också användas. Utrustningen kan då ge en signal till automatiserade åtgärder mot skumningen. Man måste dock ta i beaktande att underhåll krävs och att det kan stänka på sensorerna (Ghildyal m.fl. 1988, s. 193–194). I kapitel 6 tas åtgärder mot skumning upp och de flesta innebär en kostnad av något slag för biogasanläggningen. Vid Käppalaförbundets biogasanläggning i Sverige upplevde man tidigare stora problem med skumning, men lyckades utveckla effektiva lösningar på problemet. Man är ibland tvungen att tillsätta skumdämpare via en recirkulationspump i rötkammaren, vilket får skumningen att försvinna. Problemet är att skumdämparen är dyr och innebär en utgift för anläggningen, trots att den mängden som krävs är relativt liten. Ungefär 50 liter skumdämpare krävs för varje skumningsincident (Intervju med Andreas Thunberg 19.7.2012).

Moeller m.fl. (2012, s. 112) rapporterar om skillnaden i ekonomiska förluster för fullskaliga anläggningar beroende på hur allvarlig skumningen är. Enligt personal vid en biogasanläggning i Bavaria, Tyskland, som drabbades av lätt skumning som gick att kontrollera, kostade det 500–600 € för varje skumningsincident. Kostnaden utgörs av kemikalier mot skumning och extra behov av personal. Om skumningen är allvarlig och inte går att kontrollera, som hos en biogasanläggning för avfall i Sachsen, Tyskland, kan hela innehållet i rötkammaren bli till skum. I det fallet skadades främst taket på rötkammaren och driftspersonal uppskattar kostnaderna för skumningen till 500 000 €.

Kostnaderna för skumning kan snabbt bli höga om utrustning går sönder och behöver bytas. Herbes m.fl. rapporterar (2010, s. 206) att enligt Westlund m.fl. orsakade en skumningsincident som varade i 10 veckor 1996 vid ett reningsverk i Stockholm, Sverige, att produktionen av biogas sjönk med 40 %. Det här samt behovet av extra arbete och kemikalier innebar en kostnad för anläggningen på ungefär 150 000 €.

#### **5.4.2 Underhåll**

Skumningen innebär ofta att något slags underhåll måste utföras. Det kan handla om avlagringar som måste tas bort, eftersom det hindrar flöde av slam eller gas då skummet täpper till rör. Det här betyder att extra arbete måste utföras, vilket betyder extra arbetstid eller behov av mer personal, men också att reaktorn måste stannas och tömmas. Det innebär ofta en säkerhetsrisk att utföra underhåll, men dessutom stannar produktionen och den måste senare köras igång på nytt. Starten är det mest kritiska skedet då bakteriekulturerna inte har hunnit stabilisera sig, vilket betyder att ytterligare problem kan uppstå då skumning är vanligast i början av rötningsprocessen. Risken för en ny skumningsincident växer alltså vid sådana avbrott (Herbes m.fl. 2010, s. 205, s. 206).

Vid Henriksdals reningsverk har man sju röt-kammare, man stänger ner och utför underhåll på ungefär en av dem per år. Det här avbrottet tar vanligtvis tio veckor, men då är det planerat (Hellstedt m.fl. 2010, s. 12). Ett avbrott till följd av underhåll på grund av plötslig skumning skulle förmodligen ta längre tid att utföra.

#### **5.4.3 Kvalitet på biogas och rötrest**

Eftersom skumning har en negativ inverkan på rötningsprocessen överlag, kommer det att ses på kvaliteten på biogasen. Ett av de första tecknen på att störningar finns, är att halten metan i biogasen sjunker. Skumning påverkar det här på flera sätt. Det handlar främst om att skumningen leder till dålig omblandning av innehållet och skikt kommer att bildas (se avsnitt 5.4.7). Det här leder till att en del av bakterierna kommer att lida av näringsbrist, vilket betyder en sämre produktion av främst metan i biogasen, eftersom det är oftast de metanbildande bakterierna som reagerar först på störningar (Herbes m.fl.2010, s. 206). Det här gör att produktionen blir svårare att förutsäga, vilket leder till problem om man använder biogasen till en viktig funktion eller säljer den till en annan part.

Eftersom kvaliteten på biogasen kan sjunka, betyder det också att rötresten kommer att vara av sämre kvalitet. Vid skumningsincidenter är det vanligt, om möjligheten finns, att

man leder en del av substratet förbi rötningen, bland annat eftersom det på grund av den minskade aktiva volymen inte finns rum för allt substrat (se avsnitt 5.4.6). En annan anledning är att om en skumningsincident inträffar, avbryter man ofta inmatningen av nytt substrat eftersom det kan förvärra situationen och man vill ge rötningen en chans att stabilisera sig (se avsnitt 5.3.3 och 6.1.1).

#### **5.4.4 Processtyrning**

Följderna av skumning för biogasanläggningen kan vara många och problem som uppstår kan se väldigt olika ut. Anläggningen drabbas inte bara av en försämrad produktion och behov av extra arbetskraft, det kan bli svårt eller omöjligt att hålla igång en optimal drift av anläggningen. Det kan röra sig om att utrustning inte fungerar till följd av att skummet, när det avlagras och torkar, skapar en hård skorpa på utrustningen, som hindrar den från att fungera ordentligt. Det här skapar ytterligare problem för processen, vilket kan förvärra situationen. Utrustning som kan drabbas är ofta gasrör, omblandningsutrustning samt recirkulationspumpar, vilka alla är nödvändiga för processens funktion. I värre fall kan utrustning gå sönder, och i värsta fall kan anläggningen stanna helt (Herbes m.fl. 2010, s. 206).

Processtyrningen försvåras ytterligare av att sensorer som sköter övervakningen av rötkammaren kan endera bli förstörda eller ge felaktiga värden till följd av skumningen. Beroende på typ av sensorer och deras placering kan påverkan av skumningen se olika ut, men eftersom skumningen kan leda till skiktbildning (se avsnitt 5.4.7) kommer konventionella sensorer inte att ge korrekt information (Herbes m.fl. 2010, s. 206). Sensorn kommer att registrera det tillstånd som finns i dess område, men till följd av skumningen kan läget variera kraftigt inne i rötkammaren. Sensorerna kan också täckas av en skorpa till följd av skumningen, liksom resten av utrustningen. Som nämndes i avsnitt 5.4.1 finns skild utrustning för övervakning av skumning. Det här utgör en kostnad för anläggningen, men kan vara nödvändiga för att kunna styra processen och på så sätt undvika skumning.

### 5.4.5 Miljö

Som nämndes i det här kapitlets inledning skulle en bra lösning på skumningsproblemet vara en del av hållbar utveckling och kunna öka andelen förnybara bränslen. Det har bl.a. i avsnitt 5.4.1 och 5.4.3 kommit fram att skumning leder till en försämrad produktion av biogas. Skumning leder alltså till mindre mängd biogas, som är förnyelsebar energi som kan användas som drivmedel till olika fordon, samt att producera elektricitet och värme. Att tillverka biogas av samhällets restprodukter, och sedan bränna den, ger inget nettobidrag till växthuseffekten till skillnad från fossila bränslen som bensin och diesel. En god miljöeffekt är alltså att det är en metod att minska och ta tillvara avfall. Genom att röta gödsel tar man dessutom tillvara metanen, som vid vanlig gödselhantering släpps ut till luften. Metan är en 21 gånger kraftigare växthusgas än koldioxid, vilket betyder att det är viktigt att den tas tillvara (Biogas av gödsel ger många miljöfördelar, Biogas Syd).

Skumning orsakar bl.a. en försämrad kvalitet på biogasen (se avsnitt 5.4.3), vilket blir ett problem speciellt då man ska använda biogasen till fordonsgas, då kraven på renhet är höga. Det beror inte enbart på förbränningsteknik, utan också för att både biogas och naturgas används som fordonsgas. De båda metangaserna måste alltså gå att blanda i en bränsletank utan problem. Naturgas är dock ett fossilt bränsle och bidrar till växthuseffekten (Biogas, miljöfordon). Det är alltså bra om så stor del som möjligt av fordonsgasen utgörs av metan från biogas.

Enligt Viholainens lärdomsprov för ingenjörsexamen (2010, s. 8) så har tillvaratagandet av biogas som fordonbränsle mycket goda effekter på växthuseffekten. Om man beaktar utsläppen ur ett livscykelperspektiv, det vill säga bl.a. framställning och påverkan i fall biomassan inte används till bränsle, har ett fordon som drivs med biogas utsläpp på 12 g CO<sub>2</sub>/km medan ett fordon med fossilt bränsle har utsläpp på 100–200 g CO<sub>2</sub>/km. Effekten av att använda biogas som bränsle kan i vissa fall t.o.m. påverka växthusgasutsläppen negativt, dvs. minska dem. Den här effekten uppnås eftersom man räknar att utsläppen är större om biomassan inte tas tillvara. Vid ofullständig förbränning bildas dock kolmonoxid (CO) och lätta organiska föreningar, så det är viktigt att förbränningen är optimal.

I Syvab:s miljörapport från 2008 skriver man (s. 27) att man har haft skumning och bräddning som följd i en rötchammare, vilket har lett till höjda halter av fosfor (P) i utgående vatten. Fosfor är ett viktigt näringsämne, men tillsammans med kväve bidrar det till övergödningen. Speciellt Östersjön är utsatt av alltför höga utsläpp av kväve och fosfor, där en källa är bl.a. avloppsvatten. Den största källan är jordbruket. Övergödningen, eller



eutrofiering som det också kallas, får en mängd följder, där syrebrist och döda havsbottnar är de allvarligaste problemen (miljo.fi: Skärgårdshavet och eutrofieringen). Skumningen, som kan orsaka en sämre avloppsvattenhantering, kan alltså orsaka övergödning.

Om biogasen produceras av gödsel leder det till ett bättre kväveutnyttjande och kväveförlusterna minskar (Biogas av gödsel ger många miljöfördelar, Biogas Syd). Rötrestens egenskaper tas upp i avsnitt 4.5. Man kan anta att skumningsproblem kan leda till en minskad biogasproduktion av gödsel, vilket skulle leda till ett sämre kväveutnyttjande. Skumning kan alltså orsaka övergödning via höjda utsläpp av både fosfor och kväve.

#### **5.4.6 Minskad aktiv volym och översvämning**

Till följd av skiktbildning och att skummet växer när gas fastnar, kommer den aktiva volymen att minska. Det uppstår också döda zoner, där ingen mikrobiologisk nedbrytning sker. Den andel av volymen som är död kommer inte att bidra till nedbrytningen av organiskt material och produktionen av biogas. Den minskade aktiva volymen sänker alltså effektiviteten på anläggningen. Om inmatning och tömning då fortsätter som vanligt, kommer det att leda till att substratet inte bryts ner så mycket som planerat. Det har därmed en större volym och är dessutom inte lika stabiliserat som planerat (Ganidi, 2008, s. 6).

Vid allvarliga fall av kraftig skumning kan den snabba tillväxten av skum och minskad aktiv volym leda till översvämning, där röt-kammarens innehåll kommer ut över väggarna, som på figur 13. Problemet var återkommande och inträffade vid ett vattenreningsverk med biogasanläggning i South Carolina, USA. Dessutom uppstod andra problem, som t.ex. störningar i omrörnings- och gasuppsamlingsutrustning (Bates m.fl. 2006, s. 9).



*Figur 13. Översvämning av röt-kammare vid vattenreningsanläggning i South Carolina, USA, där slam rinner ut på marken. Kraftig skumning med bl.a. översvämning som följd inträffade flera gånger (Bates m.fl. 2006, s. 10).*

#### **5.4.7 Skikt-bildning**

Allvarlig skumning har en negativ effekt på omblandningen. I föregående avsnitt togs minskad volym upp som en av följderna av skumning, men det kan också ge upphov till en minskad volym genom skikt-bildning som innebär samma sak som dålig omblandning (se avsnitt 5.3.5). Det sker genom att skumningen kan innebära en inverterad profil för fasta material, med mera fast material vid ytan i skummet. På grund av försämrad kontakt med substratet lider mikroorganismerna i skumfasen dessutom av brist på näringsämnen, vilket betyder en nedsatt produktion av biogas och en längre tid för nedbrytning (Herbes m.fl. 2010, s. 206).

#### **5.4.8 Arbets- och hälsorisker**

Skumning kan innebära väsentliga konsekvenser, och i värsta fall olycksrisker, för anläggningens personal och bosättning i närheten av den. I fall en allvarlig skumningsincident inträffar och någon åtgärd behöver vidtas, så kan den utgöra en risk för arbetare. Det gäller dels att utföra själva arbetet, vilket är en avvikelse från normal drift, men också användning av kemikalier som t.ex. natriumhydroxid och framställning av ozon ( $O_3$ ) (Hultman & Levlin, 2003, s. 2). Skumningen kan orsaka översvämning, vilket får slam att läcka ut på gångar och bli en halkrisk för personalen, som antagligen rör sig där

mer än vanligt då underhåll måste utföras. Allvarlig skumning kan blockera gasrör, vilket kan orsaka risker i och med att trycket höjs inne i reaktorn och rör. Aerosoler kan sprida patogena bakterier, som misstänks ackumuleras i skummet. Hur långt de skulle spridas är inte känt. Dessutom kan skumningen med eventuell översvämning skapa luktproblem, då speciellt på sommaren (Hug, 2006, s. 4).

Risken för personalen ökas ytterligare av att de måste vistas mer än normalt i närheten av röt-kammaren. Eftersom man måste underhålla och eventuellt övervaka röt-kammaren noggrannare, leder det till att mer personal spenderar mer tid i den eventuellt skadliga miljön. Dessutom borde skumningen vara ett undantagsläge, vilket antagligen ökar risken för olyckor till följd av att man inte följer rutiner.

## **6 Möjliga åtgärder**

Det finns många tänkbara åtgärder mot skumning. De flesta är dock osäkra och dåligt undersökta i full skala. Man är inte heller alltid säker på varför eller i vilka sammanhang en viss metod fungerar. I bästa fall går skumning över av sig själv, även om den är allvarlig. Så skedde 1974 vid Käppalaverket då röt-kammaren skum steg upp i gasledningarna, men gick över efter någon månad (Johnsson, 2007, s. 37). Åtgärderna går att dela in i de som är förebyggande och de som behandlar problemet när det väl har uppstått.

### **6.1 Förebyggande åtgärder**

De förebyggande åtgärderna är i de flesta fall att föredra framför att försöka få bort skummet när det har uppstått, främst eftersom det är enklare. Dessutom såg vi i föregående kapitel att skum kan återbildas snabbt, även om det förstörs. Har anläggningen en gång börjat skumma, är det lättare att den fortsätter att skumma, fast åtgärder vidtas. Dessutom kan produktionen höjas eller förenklas med en förbehandling, vilket tas upp i avsnitten 6.1.4–6.1.7. Både förändringar i själva skötseln och installation av förbehandlingsmetoder tas upp här. Eftersom förbehandlingsmetoderna oftast innebär stora kostnader, är det nödvändigt att skummande anläggningar först utvärderar om det är möjligt att motverka skumningen genom ändrad drift före man beslutar för att införa ytterligare steg till rötningsprocessen (Bates m.fl. 2006, s. 2).

### 6.1.1 Processplanering

När en ny biogasanläggning byggs behöver processen planeras på ett sådant sätt att risk för skumning minimeras och ifall skumning inträffar så att man har möjlighet att ta till lämpliga åtgärder. Olika tekniska åtgärder vid konstruktionen kan vara tillräckligt för att inte skumning ska inträffa, vilket gäller främst själva designen på röt-kammaren som tas upp i nästa stycke. Hela flödesschemat i anläggningen behöver beaktas, inte bara rötningen som ensamt steg (Herbes m.fl. 2010, s. 206). Det här kan t.ex. betyda att det finns lagringsutrymme före rötningen för slam som kommer från vattenrening, så att man kan mata in det i en jämn takt som anpassas efter röttningsprocessens behov. Vid Käppalaförbundet planerar man att göra en förundersökning om möjligheten att kunna avskilja flytslam vid aktivslamreningen, så att man på så vis inte får in sådant slam i rötreaktorn som man vet att orsakar skumning. Man skulle då inte behöva behandla symptomen på ett problem som man antagligen kunde bli av med (Intervju med Andreas Thunberg 19.7.2012). Också vid Henriksdals reningsverk orsakar filamentbakterier flytslam i luftnings- och eftersedimenteringssteget, vilket senare orsakar skumning vid rötningen (Intervju med Christer Laurell 16.8.2012). En processförändring skulle alltså vara motiverad. Hug kommer i sin doktorsavhandling (2006, s. 70) fram till att den mest effektiva metoden att kontrollera skumning vid vattenrening med aktivslam är att samla ihop och ta bort flytslammet vartefter det bildas.

Processen ska vara utformad på ett sådant sätt att man har möjlighet till en försiktig start, eftersom det är det mest kritiska steget, speciellt då det kommer till skumning. Om skumning inträffar eller håller på att börja, ska personalen kunna avgöra vad problemet är och ha möjlighet att anpassa faktorer som inmatningen, utan att problem med driften av anläggningen uppstår (Herbes m.fl. 2010, s. 206). Till hjälp med det kan man använda sig av statistik och olika modeller, som tas upp i avsnitt 6.1.3.

### 6.1.2 Design på röt-kammare

Det är skäl att vid designen av en ny rötreaktor att beakta risken för skumning, speciellt om man ska blanda flera olika substrat eller använda substrat som man känner till att kan orsaka skumning. Det som gäller alla röt-kammare är att utformningen ska garantera en så god röttningsprocess som möjligt genom en tillräcklig och jämn omblandning av inkommande substrat samt inne i röt-kammaren, lämplig storlek på röt-kammare, rätt flöde på inmatning samt tömning, välfungerande uppvärmning och utrustning som klarar bättre

av eventuell skumning, som sluttande gasuppsamlingsrör, som har slam- och skumfällor. Det är också bra att överväga utrustning för skumavskiljning och borttagning av avlagringar, kondensat och grus. Tömning ska helst ske genom bräddavlopp istället för att öppna en ventil. På så sätt hålls volymen hela tiden konstant och risken för skumning minskar (Bates m.fl. 2006, s. 3). Lithén påpekar (Intervju 21.9.2012) att bräddavlopp också är bättre om skumning väl inträffar, eftersom risken för att skummet ska tränga in i gasrören minskar då rötchammaren töms vart efter volymen ökar. Dock kommer substratet att inte vara färdigt rötat och behöver åtgärdas.

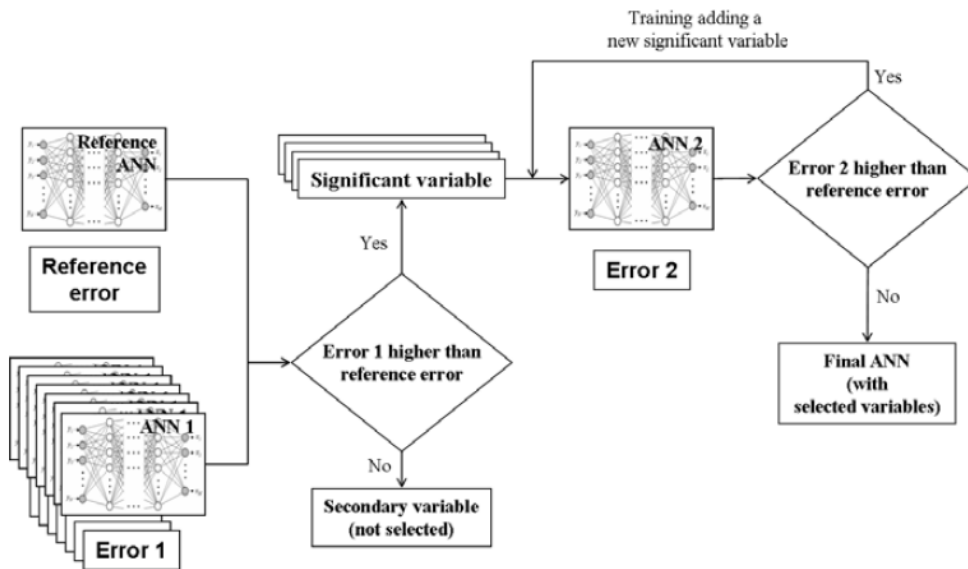
Enligt Hug (2006, s.71, s. V) borde alla troligtvis lära sig att leva med och klara av skumning vid rötning, bl.a. för att skumning verkar förekomma mer vid sådan vattenrening där man tar bort näringsämnen (främst kväve, se avsnitt 5.3.8), vilket blir vanligare hela tiden till följd av högre krav på reningen. Därför borde fokus för utvecklingen ligga på att öka förmågan att klara av skumning vid olika reningsverk (med biogasanläggningar). Det kan göras genom t.ex. lättare åtkomst för rengörning, fritt flöde för översvämning mellan rötchammare, möjlighet att ta bort överskottsslam från ytan, extra utrymme i rötchammare och installerade vattenduschar och kemikaliedoserare. Även om det antagligen är motiverat att förbereda sig på skumning, speciellt om man kan misstänka att substratet kommer att orsaka skumning, kan man genom t.ex. förbehandlinger bli av med skumningsproblemet (se avsnitt 6.1.4–6.1.7). Det borde med andra ord inte vara helt ofrånkomligt med skumning, vilket Hug anser här.

Enligt Currie, (2004, s. 1) skulle en äggformad rötchammare ha en rad fördelar, bl.a. minskad risk för skumning. Han skriver dock inte på vilket sätt, förutom att formen är optimal för att ha kontroll över processen. Ganidi (2008, s. 39) skriver att en äggformad rötchammare har mindre utrymme ovanför slammet för gas att samlas, vilket minskar möjligheten för skumning. Dessutom skulle den minskade ytan på en äggformad rötchammare erbjuda mindre utrymme för skum att samlas på. Den bildade biogasen som stiger upp passerar också en mindre yta, vilket betyder att gasbubblorna orsakar större omrörning vid ytan. Det här kan vara orsaken till att man inte har märkbara problem med skumning vid SYVAB i Sverige, där de cylinderformade rötchammarna är ganska höga men har liten yta (Besök vid SYVAB 18.6.2012). Enligt Ganidi verkar det som att äggformade rötchammare har mindre problem med omrörning och döda zoner, men cylinderformade reaktorer är vanligare på grund av kostnadsfaktorer. Det finns ingen klar information på att äggformade reaktorer skulle förhindra skumning. Dalmau, Comas, Rodriguez-Roda, Pagilla och Steyer skriver (2010, s. 2) att Metcalf och Eddy kom 2003 fram till att det inte

skulle finnas något samband mellan formen och skumning. Enligt dem förekommer skumning i båda typer av röt-kammare.

### 6.1.3 Matematiska modeller

Som vi såg i kapitel 5.3 beror skumningen på en mängd faktorer, som olika författare inte är överens om. Det gör skumningsincidenter svåra att förutsäga och att veta vad som är den exakta orsaken. Matematiska modeller och statistik kan underlätta både arbetet vid själva anläggningarna och forskning i vad som är orsaken till skumning. Enligt Dalmau, Comas, Rodriguez-Roda, Latrille och Steyer (2009, s. 322) är skumning ett av de svåraste problemen vid rötning. Eftersom man ännu inte förstår skumning helt är det inte heller med i standardmodeller för rötning, vilket gör det intressant att försöka utveckla en modell av något slag för fenomenet. Eftersom det råder osäkerhet och oenighet på området lämpar sig s.k. suddig eller oskarp logik (engelska fuzzy logic, logik där något kan vara delvis sant eller delvis falskt med värden mellan 0 och 1) baserad på kunskap från skumningsincidenter för att utveckla modeller. En utmaning är att välja relevanta variabler från mätdata, vilket i det här fallet gjordes med hjälp av s.k. hill climbing algoritmer och ANN-modeller i MATLAB. ANN, eller ”artificial neural network” testar resultatet av de olika variablerna ett antal gånger och jämför deras fel (med fel avses Root Square Mean Error, som är ett mått på spridningen av avvikelserna) med tidigare referensfel och byter sedan ut en variabel och jämför med tidigare fel. Varje gång en relevant variabel tas bort ur beräkningarna kommer felets värde att öka. Den här iterativa processen fortsätter med en ny ANN, där de relevanta variablerna testas. Den fortsätter tills felet på den andra ANN är lägre än medeltalet för det första referensfelet (Dalmau m.fl. 2009, s. 324–325). Den här metodiken illustreras på figur 14.



Figur 14. Metodiken för att välja relevanta variabler för skumning med neural networks (Dalmau m.fl. 2009, s. 325).

Som indata användes inflödes hastighet, pH på inflöde och inne i reaktorn, koncentrationen av flyktiga fettsyror, totalt organiskt kol och procent metan och koldioxid i gasfasen. Som utdata användes skumningsindex för testreaktorn i försöket, som de påpekar att inte stämmer helt överens med fullskaliga anläggningar. De variabler som var relevanta för skumningen var totalt organiskt kol i rötammaren, andelen metan i gasfasen, inflödes hastighet och pH på inflöde (Dalmau m.fl. 2009, s. 326). Man hade dock inte filamentbakterier som en variabel, vilket många anser vara en orsak till skumning (se avsnitt 5.3.1). Man uppger inte heller vilka mängder och variationer som påverkade skumningen. Resultaten man fick stämde överens med resultaten från försöksreaktorn, med någon liten avvikelse. Man anser att modellen går att använda för att förutse skumning vid rötning, men mer validering behövs (Dalmau m.fl. 2009, s. 330). Det är alltså möjligt att skapa modeller som skulle förutsäga skumning.

Delvis samma författare som till den tidigare nämnda modellen, Dalmau m.fl. har senare utvecklat en annan typ av modell för att förutsäga skumning utgående från olika slags data på organisk belastning, variation på organisk belastning och närvaron av filamentbakterier. Mätdata som används är online-mätningar, analysresultat samt observationer och erfarenheter av driftspersonal vid olika anläggningar (Dalmau m.fl. 2010, s. 1). Filamentbakterier beaktades inte i den föregående modellen. Tidigare togs det upp (se avsnitt 5.3.1) att bakterierna misstänks ha en stark koppling till skumning vid rötning. I det här fallet använder man sig av kunskapsbaserade system (Knowledge-based systems,

KSB). Det är ett verktyg som använder sig av kunskap baserad på heuristiska metoder och mänskliga erfarenheter för att ta reda på hur problem kan påverka ett system. Man kan koppla ihop numeriska modeller och kunskapsbaserade system för att beskriva invecklade fenomen, t.ex. driften av en biogasreaktor, som påverkas av en mängd olika faktorer. Det finns modeller som förutsäger rötprocessen med t.ex. förutspådda produktionstoppar och fel på instrument. På ett liknande vis som den föregående modellen förutsäger man risken för skumning med de olika orsakerna med hjälp av det tidigare nämnda suddig logik i MATLAB. Man delar in processen i olika steg där man bildar funktioner för samband, sätter gränser samt anpassar och tolkar modellen. Resultatet är en modell som förutsäger skumning utgående från mätdata (Dalmau m.fl. 2010, s. 4). Det visade sig bl.a. att risken för skumning vid rötning följer risken för skumning i aktivslamprocessen, som sker innan rötningen. Risken för skumning stiger också med ökad organisk belastning och variation i den, upp till vissa gränser (Dalmau m.fl. 2010, s. 6). Risken för skumning graderas från 0–1, där 0,8 är gränsen för allvarlig risk för skumning. Det påpekas dock dels att validering av modellen är problematisk, samt att den är ett komplement i övrig övervakningen. Modeller som den här kan ge en tidig varning att anläggningen är på väg att kunna börja skumma (Dalmau m.fl. 2010, s. 8).

Hug rapporterar (2006, s. 50) om att han utvecklade en matematisk modell som förutspår tillväxt och överskott av *Microthrix Parvicella* (se avsnitt 5.3.1) vid vattenrening med aktivslamprocessen till följd av säsongsvariationer. Modellen är intressant eftersom förekomsten av den typen av filamentbakterie vid vattenrening ofta medför att den senare återfinns vid rötningen av slammet, där den då misstänks orsaka skumning. Modellen baserar sig på ett verktyg för simulering av vattenreningsprocessen, kallat ASM3. Anaeroba processer ingår inte i det. Tillväxten av filamentbakterien modellerades som heterotrof. Även om resultatet blev gott, bortsett från sommaren 2003, är modellen ännu inte tillgänglig för allmänt bruk för att förutsäga skumning. Den behöver testas ytterligare och används för att testa hypoteser och jämföra observationer med teori (Hug, 2006, s. 55–56).

För att kunna följa med röttningsprocessen, skapa statistik och kunna förutsäga problem är det dels viktigt att rätt övervakningsutrustning finns, men också att kunnig personal tar tillräckligt med prov och gör analyser regelbundet. För det krävs det noggranna protokoll, som faktiskt följs, samt att kommunikationen fungerar på hela anläggningen (Bates m.fl. 2006, s. 3). Det har visat sig att noggrannare uppföljning och kontroll har varit en bidragande orsakad till att bli kvitt skumning vid flera tillfällen. Med hjälp av det har man



kunnat bygga upp modeller och statistik för att kunna förutsäga skumningsincidenter och samtidigt få jämnare belastning genom inmatningen (Bates m.fl. 2006, s. 6, s. 11–12 och s. 14–15).

#### **6.1.4 Mekanisk förbehandling**

Att förbehandla slammet före man rötar det kan vara ett effektivt sätt att bli av med skumningsproblem. I Syvab:s årsredovisning från 2008 rapporterar man att den förbehandling man har börjat med, förtjockning och ozonbehandling, har gett så gott resultat att man har kunnat börja röta primär- och bioslam (överskottsslam) tillsammans efter en paus på 15 år (s. 5). Att röta de här båda fraktionerna tillsammans anses vara en risk för skumning och var orsaken till skumning hos Käppalaverket tidigare (se avsnitt 5.3.3). Mekanisk behandling strävar till att söndra cellväggar och få materialet att bli löst i vätskan. Bakterier som misstänks orsaka problem som skumning, t.ex. av typen filament (se avsnitt 5.3.1), slås sönder av en effektiv mekanisk behandling. Därför kan skumningsproblem minska, samtidigt som gasproduktionen ökar.

En metod för att förbehandla mekaniskt är att skära sönder slammet med roterande knivar, eller mala det i en slags kvarn, även kallad dispergeringsmaskin, vilken syns på figur 15. Fast avfall kommer in i mitten av kvarnen och pressas utåt mot malningsskivor och skärs sönder, vilket upprepas tills partikelstorleken är <1 mm. En annan mekanisk metod är en högtryckshomogenisator, där den sönderdelande effekten fungerar enligt kavitationsprincipen, som också används vid ultraljudsbehandling (se avsnitt 6.1.6). Utrustningen består av en pump som höjer trycket på vätskan till hundratals bar. Den passerar sedan en ventil där trycket sänks hastigt. Gasbubblor som bildats i slammet på grund av det höga trycket kommer att kollapsa kraftigt så att en slags kokningseffekt uppstår, där den höga temperaturen och starka krafterna kommer att slita sönder fast material i slammet (Hellstedt m.fl. 2010, s. 27).



*Figur 15. Dispergeringsmaskin vid Jönköpings biogasanläggning. Till vänster hela utrustningen, till höger har malningsutrustningen öppnats så att mittengången med malningsskivor ut med väggarna syns (Hellstedt m.fl. 2010, s. 27).*

Det har inte bevisats att skumningsproblemet skulle minska med mekanisk behandling, men det är ett antagande. En rad fördelar finns dock, som snabbare nedbrytning och mindre uppvärmningskostnader. Gasproduktionen kan också förbättras i vissa fall. Högtryckshomogenisator ska i teorin vara den mest energieffektiva metoden, men i praktiken används den inte mycket. Käppalaverket har testat och undersökt metoden men haft problem med den. Det kan också vara skäl att inte förbehandla alla fraktioner, t.ex. kan man höja gasproduktionen från överskottsslam genom högtryckshomogenisering. Behandlingen är inte lika effektiv på primärslam, som obehandlat ger upphov till mer biogas än överskottsslam (Hellstedt m.fl. 2010, s. 27–28). Pumpning av slammet till förtjockaren utgör ofta det största problemet, speciellt om slammet har hög viskositet (Hellstedt m.fl. 2010, s. 34).

### **6.1.5 Termisk förbehandling**

Den termiska behandlingen kan ses som en trovärdig åtgärd mot skumningsproblem, samtidigt som man kan förbättra gasproduktionen. Hug rapporterar (2006, s. 71) att enligt både Westlund m.fl. (1998) och Barjenbruch och Kopplow (2003) är termisk behandling den enda förbehandlingsmetod som framgångsrikt lyckats minska skumningspotentialen hos överskottsslam vid rötning. Enligt Hellstedt m.fl. (2010, s. 28) uppnås den positiva effekten på skumning eftersom hydrofoba ämnen bryts ner vid ca 70 °C och protein samt andra organiska föreningar bryts ner till organiska syror vid temperaturer på 160–180 °C. Cellerna i slammet spricker av den höga temperaturen, vilket frigör mer organiskt material

för nedbrytning. Det här kan höja biogasproduktionen och underlättar avvattningen av rötresten. Dessutom uppnås en viss hygienisering, om tiden för processen är tillräckligt lång.

Det finns i huvudsak två olika metoder för att förbehandla termiskt. Den ena är pastörisering, som sker vid temperaturer på upp till 100 °C, och den andra är termisk hydrolys, med temperaturer på upp till 200 °C. Pastöriseringen görs oftast på 70 °C i 1 h för att döda sjukdomsalstrande mikroorganismer. Vid pastöriseringen som används vid rötning används tre stycken tankar, som på figur 16 från Uppsala biogasanläggning. Inkommande slam lagras i den första, hygieniseras i den mellersta och den tredje töms för rötning kontinuerligt. Pastöriseringen sker före rötningen eftersom det hygieniserade slammet är relativt tomt på mikroorganismer och kan bli en bra grogrund för nya skadliga mikroorganismer, eftersom konkurrensen från andra bakteriekulturer inte finns. Rötningen har då en stabiliserande verkan på slammet. Några säkra siffror på effekten på produktionen finns inte, men rapporter varierar mellan 10–20 % ökning. (Hellstedt m.fl. 2010, s. 28–29). Dock är 70 °C inte tillräckligt för att bryta ner bl.a. proteiner.

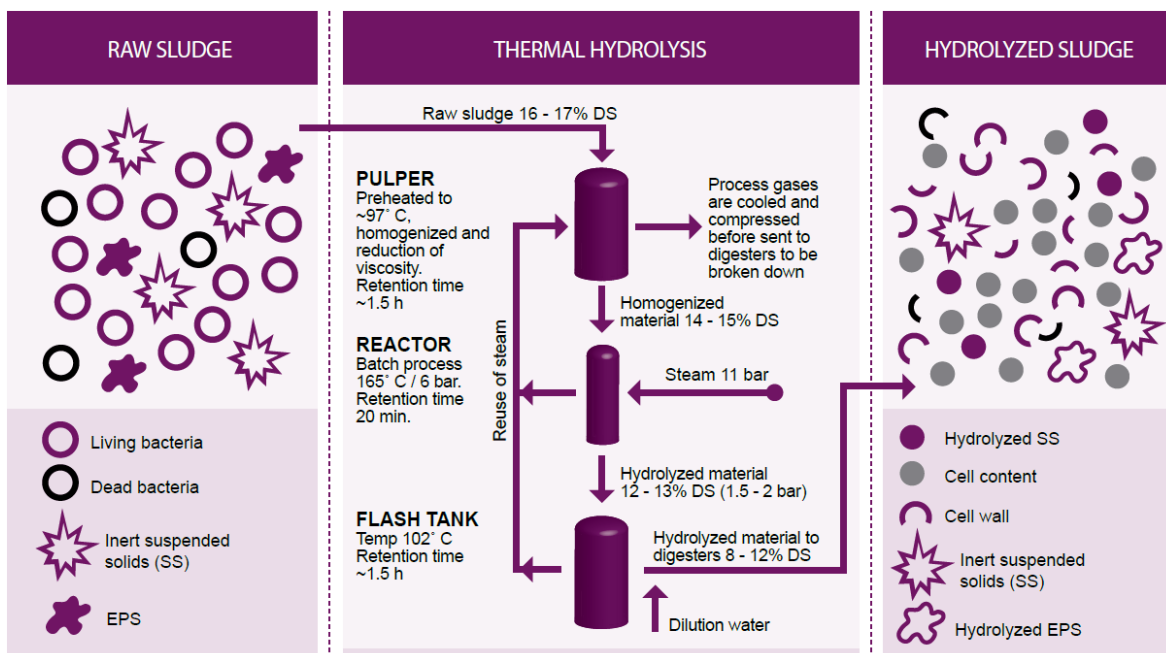


*Figur 16. Tre stycken tankar som används för pastörisering vid Uppsala biogasanläggning (Hellstedt m.fl. 2010, s. 29).*

Termisk hydrolys kan utföras på olika sätt. Syftet är att med tryck och temperatur åstadkomma en snabb hydrolys, istället för den tidskrävande biologiska hydrolysen. (Fraser, 2010, s. 12). Den vanligaste metoden är den s.k. CAMBI-metoden som sker både under hög temperatur, 160–170 °C, och högt tryck. Ett schema över processen finns på

nästa sida i figur 17. Processen tar ungefär 30 minuter och utförs i flera tankar, där trycket på ångan stiger gradvis. Sista steget är att pumpa slammet till en s.k. flash-tank, där trycket sjunker plötsligt. Ångan som släpps ut efter det sista och varmaste steget tas tillvara för att förvärma slam. Efter processen får slammet svalna, varefter det pumpas till rötning. Eftersom slammet redan har blivit hydrolyserat förkortas rötningstiden avsevärt, vilket höjer effektiviteten. Slammet blir också mer lätthanterligt och skumningsproblemen anses försvinna, som tidigare nämndes. Enligt broschyren för CAMBI-processen skulle slammet efter behandling vara sterilt och uppfylla EU-krav för steriliserat material i 1774/2002/EC, förordningen om hälsobestämmelser för animaliska biprodukter (s. 5). Dessutom skulle filamentbakterier förstöras och bufferkapaciteten ökas. Det verkar dock närmast otroligt med påståendet om att man vid en konventionell anläggning skulle kunna fördubbla inmatningen efter att ha installerat CAMBI-processen, eftersom man bl.a. kan höja andelen fast material (s. 8). Någon undersökning som visar det har inte kunnat hittas.

Gasproduktionen vid en konventionell anläggning väntas öka med ca 30 % med termisk hydrolys, jämfört med utan förbehandling. Dock kräver den höga temperaturen vid termisk förbehandling skild utrustning, eftersom temperaturen på fjärrvärme är max 95 °C. Dessutom kommer mera kväve att finnas i rejektivattnet, vilket troligen skulle kräva förbättrad kväverening. Det i sin tur kan medföra att man blir tvungen att tillsätta metanol som kolkälla för att inte få problem vid denitrifikationen (Hellstedt m.fl. 2010, s. 30–31). Den ökade halten av ammoniumkväve kommer troligen att utgöra ett hinder för biogasanläggningar att ta till sig metoden, eftersom reningen av kväve idag är ett problem för flera anläggningar, samt kan orsaka problem vid rötningen, se avsnitt 4.7.3 och 5.3.8.



Figur 17. Schema över CAMBI-processen, där organiskt material bryts ned innan rötningen för att bl.a. förbättra gasproduktionen och underlätta hanteringen (Broschyr för CAMBI-processen).

Enligt Bochmann (2011, s. 9) kan temperaturerna bli så höga som 230 °C vid termisk behandling. En sådan hög temperatur är dels energikrävande, men kan också vara svår att motivera, eftersom det enligt Hellstedt m.fl. är tillräckligt med lägre temperaturer för att bryta ned proteiner. Hydrofoba ämnen och speciellt filamentbakterier (se avsnitt 5.3.1) bryts ned vid ännu lägre temperaturer. Bochmann nämner (2011, s. 12–13) också att s.k. bakteriostatiska komponenter kan bildas, som hindrar tillväxten av bakterier utan att skada dem. Exakt vilka nämns inte. En annan nackdel med metoden är att den är energikrävande, uppvärmningen är redan en av de mest resurskrävande faktorerna vid rötning (se avsnitt 4.3.1). Det är dock möjligt att kombinera termisk förbehandling med andra typer av metoder för en möjligtvis effektivare process. Det rör sig bl.a. om ångexplosion, där explosionen och värmen bryter ner cellstruktur, samt extrudering, där kompressionsenergi omvandlas till värmeenergi. Det finns lite information om båda processerna, som båda är energikrävande. Termisk behandling skulle lämpa sig speciellt för proteinrika substrat, som slaktavfall (Bochmann, 2011, s. 10). Bland annat i avsnitt 5.3.2 togs problemen med proteinrika substrat upp.

Vid all rötning finns det ett behov av att hygienisera rötresten, som görs genom uppvärmning för att ta död på skadliga mikroorganismer. Det betyder att det finns ett behov av utrustning för uppvärmning, som eventuellt skulle gå att använda också för förbehandling. Det borde i alla fall vara möjligt att kombinera uppvärmningen av

förbehandlingen och hygieniseringen, vilket antagligen skulle leda till en högre energieffektivitet samt en rad fördelar i processen.

### 6.1.6 Kemisk hydrolysis

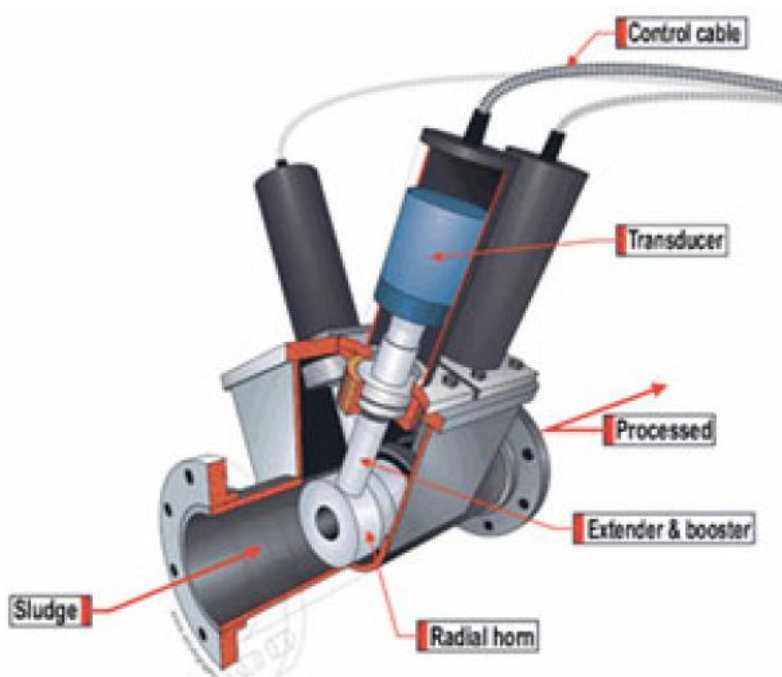
Liknande effekter som fås med termisk förbehandling (se föregående avsnitt) kan uppnås genom tillsats av olika kemikalier, s.k. kemisk hydrolysis (Hellstedt m.fl. 2010, s. 35). Metoden nämns dock inte i skumningssammanhang i litteraturen, men eftersom effekten är den samma som med termisk förbehandling borde den gå att tillämpa. Genom tillsättning av kemikalier, som t.ex. natriumhydroxid, magnesiumhydroxid ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), kaliumhydroxid (KOH), väteperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) eller ozon, vill man åstadkomma en nedbrytning av cellväggarna. Det här borde få samma effekt som de tidigare nämnda förbehandlingsmetoderna.

Det har visat sig att tillsatsen av olika slags baser påverkar halten av COD som löses ut. Monohydroxider är effektivare på det här området än dihydroxider. Det kan dock vara nödvändigt att neutralisera om man tillsätter monohydroxider som natriumhydroxid. Dessutom har det visat sig i försök att avvattningsegenskaperna försämras för slammet efter rötning. Andra nackdelar med metoden är att den skulle medföra höga kemikaliekostnader, dels för själva basen, och dels för tillsatsen av syra som är nödvändigt för att upprätthålla optimalt pH. Det är möjligt att kombinera metoden med uppvärmning till 60–100 °C för att underlätta nedbrytning. Metoden kallas då termisk hydrolysis (Hellstedt m.fl. 2010, s. 40–41).

Metoden har dock som sagt inte använts i skumningssammanhang, men en hypotes är att den skulle gå att tillämpa eftersom effekten är liknande som de föregående förbehandlingsmetoderna. Det är inte känt om kemikaliedoseringen har en negativ effekt på bakteriekulturen. pH tas upp i avsnitt 4.3.2, där det kommer fram att man kan justera pH uppåt med t.ex. natriumhydroxid. Metoden innebär alltså att pH måste övervakas extra noga. Nackdelen är främst den höga kostnaden för dosering av kemikalier, men å andra sidan borde metoden inte medföra några höga investeringskostnader i form av ombyggnad eller utrustning.

### 6.1.7 Ultraljudsförbehandling

Behandling med ultraljud är en förbehandlingsmetod som bland annat verkar kunna motverka skumning. Metoden medför dock både höga installationskostnader samt resurser för drift och underhåll (Bates m.fl. 2006, s. 2). Det verkar finnas flera erfarenheter av att installation av ultraljudsförbehandling endera minskar eller helt eliminerar skumningsproblem. Samtidigt uppnår man en högre nedbrytningsgrad och högre biogasproduktion, vilket kan motivera investeringen. En lägre energiförbrukning för biogasanläggningen kan också uppnås i vissa fall, då det finns rapporter om att avvattningen av rötresten underlättas. På figur 18 visas en genomskärning av ultraljudsförbehandlingen Sonix ultrasound system, där inkommande slam i ett rör utsätts för ultraljud från ett horn och fortsätter in till rötning (Bates m.fl. 2006, s. 2).



Figur 18. Enhet för ultraljudsförbehandling, Sonix ultrasound system, där inkommande substrat utsätts för ultraljud och fortsätter in till rötkammare (Bates m.fl. 2006, s. 2).

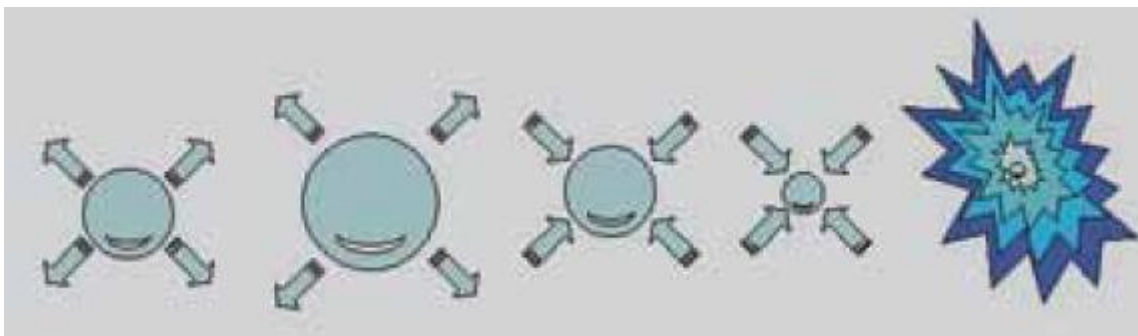
En annan modell för ultraljudsbehandling är EMICO Sonolyzer i figur 19, som enligt tillverkaren Ovivo är enkel att installera och betalar sig snabbt tillbaka. Dess funktion ska också vara enkel och lätt att underhålla. Den är konstruerad i rostfritt stål och fungerar med 1–2 kW med ställbar amplitud (Ovivos broschyr för Sonolyzer, s. 2–3).



*Figur 19. Installerad Sonolyzer-enhet (t.v.) och fristående Sonolyzer-enhet (t.h.). Substratet kommer in via det övre röret, de fem Sonotrode-enheterna på sidorna utsätter det för ultraljud, varefter det fortsätter vidare via det undre röret (Ovivos broschyr för Sonolyzer).*

Funktionen för ultraljudsförbehandling grundar sig på kavitation. Den höga frekvensen som enheten utsätter substratet för orsakar en periodisk förtunning i mediet. Som följd av det här växer små gasbubblor till i mediet för att omedelbart efteråt kollapsa, eller implodera. De här hålrummen som gasbubblorna skapar, kaviteter, ger upphov till starka skjuvkrafter, som sliter sönder cellerna runt bubblan. Den kollapsade bubblan ger upphov till väldigt höga tryck och en temperatur på ca 5000 K. (Dåverhög & Balmér, 2008, s. 10). Cellerna som sönderdelas till följd av det här kraftiga fenomenet löser sig i mediet bättre och är mer lättillgängliga för nedbrytning. Det förstör också flockbildningar, vilket tar bort ytorna som skumningen skulle ske på (Ovivos broschyr för Sonolyzer, s. 3). Det här förloppet illustreras på figur 20.





*Figur 20. Schematisk bild av kavitation i vatten, förloppet går från vänster till höger. Längst till vänster får mönstret på ljudvågorna kavitationsbubblan att växa då trycket utanför bubblan är negativt, för att i nästa steg nå sin maximala storlek. Bubblan kollapsar sedan under kompression i de två följande stegen, för att slutligen implodera (Ovivos broschyr för Sonolyzer).*

De bästa resultaten med ultraljudsförbehandling vid vattenrening tycks fås främst genom att använda sig av låga frekvenser på ca 20 kHz, relativt hög ultraljudstäthet på 0,4–4 W/ml och intensiteter mellan 250–900 J/ml, eller 10 000–30 000 kJ/kg torrs substans (Pérez-Elvira, Fdz-Polanco, Plaza, Garralón, & Fdz-Polanco, 2009, s. 2).

Erfarenheterna av förbehandling med ultraljud verkar enligt litteraturen finnas främst i Tyskland. Där har flera biogasanläggningar för behandling av slam från vattenreningsverk testat och utvärderat förbehandlingsmetoden under olika långa tidsperioder. Fem stycken reningsverk har utfört endera fullskaliga installationer eller fullskaliga studier, med resultat 15–30 % ökning av biogasproduktionen och en minskning av volymen rötat slam. T.ex. ett reningsverk i Meldorf, Tyskland, installerade december 2004 ultraljudsförbehandling till sin fullskaliga rötning, med resultatet att biogasproduktionen ökade med 25 % och nedbrytningen av VS med 25 %. Det intressantaste i det här sammanhanget är att anläggningen efter installationen inte har haft skumning eller närvaro av filamentbakterier. Hur skumningen såg ut, och om den ens fanns, innan installationen är inte känt. Dock finns det närmast otroliga resultat, t.ex. vid en pilotstudie utförd 1997–1999 av Technical University of Hamburg-Harburg vid Bad Bramstedts reningsverk rapporterar man om ultraljudsförbehandling med resultatet att volymen rötrest minskade med 25 %, uppehållstiden minskade från 20 till 4 dagar samt en ökning av biogasproduktionen med en faktor 4 (Zafar, 2012, *Ultrasound and anaerobic digestion of sewage*). En sådan förbättring kan man högst antagligen inte vänta sig vid fullskaliga anläggningar. Antagligen har förhållandena som man jämför med varit olämpliga för optimal rötning för att man ska komma till ett sådant resultat.

Två anläggningar i Sverige, Gässlösa reningsverk och Ernemars reningsverk, har installerat fullskalig ultraljudsbehandling av olika modeller och undersökt deras funktion. Man har haft svårt att komma fram till vad som är de direkta effekterna, bl.a. på grund av att det har visat sig att utrustningen inte har fungerat korrekt, ofta har inte förbehandlingen fungerat optimalt. Den energi som krävs till driften visade sig vara ungefär samma som man fick ut i form av ökad biogasproduktion. Energin som används till driften är i en mer högvärdig form än biogasen, och därför är resultatet inte så positivt som önskat. Driftsproblematiken ses som det största problemet. En tredje anläggning med ultraljudsbehandling finns i Sverige, Kävlinge reningsverk i Skåne. Där har utrustningen fungerat bra, till skillnad från de två tidigare. Vid Kävlinge reningsverk är effekten på skumningsproblemet så pass bra, att när skumning uppstår i röt-kammaren är det ett tecken på att ett av hornen i ultraljudsenheten behöver bytas (Dåverhög & Balmér, 2008, s. 26–28).

## **6.2 Behandlande åtgärder**

Åtgärder som tas till först när skumningen har uppstått verkar vara de vanligast förekommande. Om man vid konstruktionen av anläggningen inte räknat med skum, så är det enklare och oftare billigare att ta till behandlande åtgärder än att införa förebyggande i den redan existerande processen. De behandlande åtgärderna använder man endast om ett problem finns, vilket kan ge en viss ekonomisk fördel. De används endast vid behov, till skillnad från de förebyggande som är i ständig användning.

### **6.2.1 Toppomrörare**

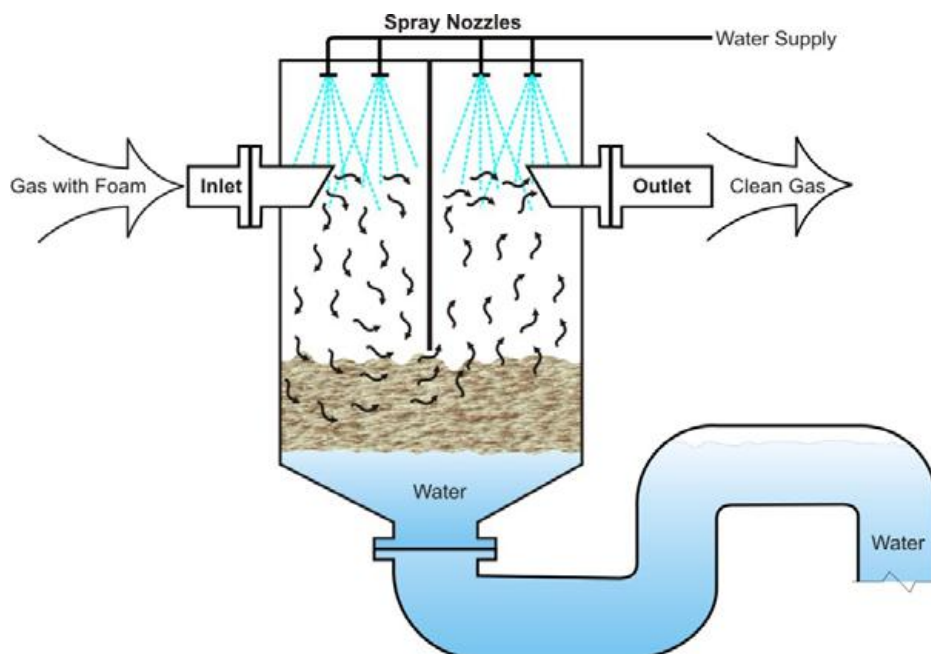
Om det visar sig att det skummar ihållande i rötreaktorn, kan en möjlig åtgärd vara en toppomrörare, speciellt om mekanisk omblandning redan finns installerad så att man kan kombinera de båda. Det lämpar sig bäst vid sådana fall där skumningen utgör ett problem, men inte heller där skumningen är närmast explosionsartad och närmast hela innehållet blir till skum. Man kan anta att i väldigt allvarliga fall skulle inte den här metoden vara tillräcklig. Toppomrörare är en slags propeller som går kontinuerligt i gasfasen i röt-kammaren, inte nere i slammet, så vida det inte är ihopkopplat med mekanisk omblandning. Om innehållet börjar skumma och nivån stiger slås det ner av propellerna. Skummet kommer alltså inte högre upp än propeller, vilket gör det viktigt att nivån i röt-kammaren inte varierar. Vid Henriksdals reningsverk i Nacka, Sverige har man goda erfarenheter av toppomrörare, som man har installerat i alla sina sju röt-kammare. Filamentbakterier orsakar skumning i dem, men så länge propellerna går uppstår det inga

problem. Under en period var toppomrörarna avstängda, med följden att skumningen i en av rötkamrarna täppte igen gasröret. När propellern sattes igång igen slogs skummet ner och hindrades från att stiga på nytt (Intervju med Christer Laurell 16.8.2012). Fem av rötkamrarna är utrustade med två propellrar, de två största har tre stycken. De går med 174 rpm och drar 26,5 kW, i jämförelse med den vanliga omrörningen som går med 9,4 rpm och drar 30,1 kW (Hellstedt m.fl. 2010, s. 12). Energiåtgången är med andra ord i storlek med den vanliga omrörningen.

Toppomrörare kan ha andra utseenden än propellrar. Olika slags skivor, pumphjul och omrörare kan vara monterade i toppen på reaktorn. De kan fungera enligt att de är delvis nedsänkta i skumfasen. När de sätts igång ändrar trycket i gasfasen och får bubblorna att kollapsa (Ganidi, 2008, s. 56). De slås med andra ord inte sönder av omrörarens delar, vilket har fördelen att allt skum inte behöver vara i direkt kontakt med omröraren. Det kan hursomhelst antas att toppomrörning lämpar sig bättre för reaktorer med en volym som utgörs av en mindre yta och högre höjd, eftersom det då skulle vara lättare att kontrollera hela ytan. En större yta skulle bli mer energikrävande och kräva större installationer, och därmed också mer underhåll.

### **6.2.2 Skumavskiljare**

Om en biogasreaktor skummar, är det möjligt att skilja skummet från gas- och vätskefasen. Oftast går det inte att få bort skummet där man tar ut rötat slam, eftersom det flyter ovanpå slammet och hålls där. Man vill inte heller att skummet följer med biogasen eller slammet, som eventuellt behöver rötas ytterligare. Biogas som är förorenat med slam måste renas före användning. En skumavskiljare tar bort skummet ur reaktorn och skiljer det från det andra mediet. Figur 21 visar en schematisk bild av en modell av skumavskiljare. Den suger in skum blandat med gas från ytan av innehållet i rötkammaren och duschar det med vatten via en rad munstycken. Skummet följer med vattnet som förs till ett vattenreningsverk, som oftast finns i närheten till biogasanläggningen, medan biogasen fortsätter ut och tas tillvara (Bates m.fl. 2006, s. 5).



Figur 21. Schematisk bild av en modell av skumavskiljare där gasen skiljs från skummet (Bates m.fl. 2006, s. 5).

Skum kan skiljas från slammet genom att använda sig av cykloner eller centrifuger. Skum, möjligtvis tillsammans med en del slam, pumpas genom en anordning där det träffar väggarna och av trycket som uppstår frigörs gas ur bubblorna och tas ut ur anordningen. Det sönderslagna skummet förs tillbaka till rötammaren för ytterligare rötning (Ganidi, 2008, s. 41). Ett system som liknar cykloner används vid Syvab i Sverige, där man har konstruerat s.k. skumraketer i anslutning till rötammarna. Rötat slam tas ut ur rötammaren och pumpas upp i skumraketen, där väggarna böjer sig som en slags cyklon. Skummet och slammet pumpas med hög hastighet genom anordningen, där skummet kommer att skiljas från vätskan, som fortsätter ut ur cyklonen. Skummet faller ner i mitten av anordningen. Man anser att systemet fungerar bra, effektivt och på grund av att rörliga delar saknas är underhållet enkelt att sköta (Besök vid Syvab 18.6.2012). Man upplever dock inte skumning som ett problem vid anläggningen, så det är oklart om systemet skulle fungera vid allvarigare fall.

### 6.2.3 Trycksänkande anordningar

Olika anordningar kan användas för att sänka trycket, vilket påminner om det som nämndes i föregående avsnitt. Med hjälp av injektorer, ejektorer, håligheter eller anordningar som skapar ett vakuum kan den plötsliga tryckförändringen få bubblor att

spricka (Ganidi, 2008, s. 41). Det här beror på att sambandet mellan trycket inne och utanför bubblan ser ut som följande (ekvation 5):

$$P_i - P_o = \frac{4T}{r}$$

*Ekvation 5. Ekvation för en bubbla med två ytor och tryck, vilket utnyttjas vid metoder mot skumning genom trycksänkning, där  $P_i$  är trycket inne i bubblan,  $P_o$  är trycket utanför bubblan,  $T$  är ytspänningen och  $r$  är bubblans radie (Surface Tension and Bubbles, Hyperphysics).*

En slutsats man kan dra här om metoden är att den alltså medför att då trycket ändras plötsligt, kommer bubblans radie också att ändras, vilket får den att kollapsa. Eftersom trycket utanför bubblan sjunker kommer bubblorna att expandera snabbt och gå sönder.

Det finns dock en risk med trycksänkande anordningar och skapande av vakuum inne i reaktorn. Som nämndes i avsnitt 4.4.1 skriver House (2006, s. 176) att det är viktigt att trycket inne i reaktorn är högre än det på utsidan, så att luft inte läcker in. Det är inte bara skadligt för de anaeroba bakterierna, utan också på grund av explosionsrisken. Biogas behöver blandas med en del luft för att brinna, vilket i normala fall inte sker i reaktorer.

#### 6.2.4 Skumdämpare

Även om en biogasanläggning har investerat i utrustning för att bekämpa skumningsproblemet, kan det visa sig att det finns behov av kemiska metoder, så som användning av skumdämpare. Det ska då ske helst med låga koncentrationer, om halten är för hög eller för låg kan medlet istället bidra till eller förstärka skumningen (Herbes m.fl. 2010, s. 206–207). Det finns många olika skumdämpare, men deras funktion är endera att de hindrar skum från att uppstå eller får befintligt skum att försvinna. Enligt Herbes m.fl. (2010, s. 206) är kemiska metoder mycket effektiva, men typen av kemikalier måste väljas noggrant, eftersom vissa skumningsmedel stör den biologiska processen. Den måste också vara fri från silikon, som är ett vanligt i skumdämpare överlag. Det är nödvändigt så att siloxaner (se avsnitt 4.2.2 för egenskaper hos siloxan) inte bildas i biogasen. Man måste också ta i beaktande att skumdämparen kan påverka efterföljande processteg.

Enligt Herbes m.fl. (2010, s. 207) rapporterar Westlund m.fl. om att kemikalien PAX-21 har använts framgångsrikt mot skum orsakat av *Microthrix Parvicella* i Stockholm, Sverige. De skriver att andra ämnen som använts med positivt resultat är naturoljor och

andra organiska ämnen bestående av triglycerider och fria fettsyror. Fördelen med de här ämnena är att de är relativt lätta att få tag på och kan brytas ner och bidra till biogasproduktionen. Däremot rapporterar Van Niekerk m.fl. (1987, s. 249) att erfarenheterna från användningen av olika medel mot skumning inte har varit goda. Det är hursomhelst viktigt att beakta den ekonomiska aspekten, eftersom vissa kemikalier kan vara dyra. Vid Käppalaverket användes kemikalier mot skumning med mycket god effekt. Skummet gick då ner genast, men medlet är dyrt. Medlet tillsattes genom en recirkulationspump i röt-kamrarna. Ungefär 50 liter var en tillräcklig dosering för en skumningsincident (Intervju med Andreas Thunberg 19.7.2012).

Olika typer av skumdämpare kan ha olika effekter och är anpassade för olika användningsområden. Alla passar som tidigare nämndes inte för rötning, kostsamma problem kan uppstå om fel kemikalier eller dosering används. Därför är det viktigt att testa skumdämparen i laboratorium innan användning. Vad som får skummet att kollapsa är en kombination av flera effekter, vilket inte går igenom i detalj här. Skumdämpare överlag, inte bara i rötningssammanhang, har en eller flera av följande effekter på skummet:

- minskning av ytans elasticitet
- förändring av fysiska egenskaper hos skummet
- ersättning av stabiliserande ytaktiva ämnen som förstärkt skummet med ett annat ämne som inte verkar stabiliserande
- lokala minskningar i ytspänningen
- bildandet av en blandad film
- förorsaka oregelbunden ytspänning
- underlättande av avrinning
- sänkning av viskositet
- skingrande av repulsionskrafter för dubbla filmlager
- ökning av ytspänning
- höjning av den elektriska konduktansen i filmen (Ghildyal m.fl. 1988, s. 186–187).

Det handlar alltså främst om att förändra någon av egenskaperna som gör det möjligt för bubblor att bildas, som togs upp i avsnitt 5.2. En viktig egenskap för skumdämpare är förmågan att motverka att nytt skum bildas under en tid. Oavsett verkningstid kommer skumdämpare att sköljas bort enligt uppehållstiden för vätskan i reaktorn eller att brytas ner. Priset på skumdämpare varierar, så det är skäl att beakta effektiviteten hos en viss produkt. Eftersom det kan röra sig om stora mängder som behövs, kan det löna sig att använda sig av en dyrare men effektivare skumdämpare, som inte kräver lika hög dosering och därmed blir förmånligare i längden (Ghildyal m.fl. 1988, s. 188). Polyelektrolyter, som ofta används för att förbättra sedimenteringen vid vattenrening, kan användas för att effektivt minska skumningspotentialen hos aktivt slam. Kemikalierna är dyra, men kan visa sig vara värdefulla nödlösningar vid akuta skumningsincidenter (Hug, 2006, s. 71).

Lithén anser (Intervju 21.9.2012) att dels är det viktigt att välja rätt skumdämpare, som nämndes tidigare, men också att i riktigt allvarliga fall kommer en skumningsdämpare inte att hjälpa. Han påpekar också att användningen av skumningsdämpare inte löser själva problemet, utan är bara en nödlösning. Att undvika förhållanden då skumning kan uppstå är bättre än att försöka leva med skumningen och dosera kemikalier.

### **6.2.5 Dusch**

Skumning kan åtgärdas genom att spruta vätska på skummet med munstycken som monteras i taket på röt-kammaren. Vätskan kommer att få bubblorna att explodera genom att ändra på sammansättningen av bubblan (se avsnitt 5.2). Problemet med metoden är att välja rätt typ av vätska. Vattendusch har använts för att åtgärda skumning vid rötning, men den stora mängden vatten som krävs kommer att ändra på uppehållstiden i reaktorn, som togs upp i avsnitt 4.3.4. Det här innebär en sänkt effektivitet för anläggningen. Det är möjligt att istället duscha med rötat slam, men det är tekniskt svårt att genomföra på grund av risken för att munstycken ska blockeras av slammet (Ganidi, 2008, s. 42–43).

Ghildyal m.fl. rapporterar (1988, s. 209) om en metod mot skumning i jäsningssammanhang, där man sprutar den skummande vätskan under högt tryck genom munstycken som sliter isär bubblorna.

Metoden verkar inte användas i rötningssammanhang. Det skulle eventuellt vara möjligt att kombinera metoden med en dusch, för att få ett bättre resultat samt en effektivare process. Man får mera kraft i strålen från duschen, vilket borde ha en bättre effekt på att förstöra skummet, samtidigt som skummet som sprutas genom duschen slits sönder. Man kan dock

anta att metoden skulle vara energikrävande och att det finns risk för något fastnar i munstycket. Det utgör dock en intressant hypotes.

### **6.2.6 Byta riktning på flöden**

I Syvabs miljörapport från 2005 (s. 7) uppger man att man i den ena rötkammaren har haft skumning. Genom att ändra riktning på cirkulationspumpen i rötkammaren fick man bort skummet och den producerade biogasen var inte längre kontaminerad med skum. Exakt vilken effekt åtgärden hade och varför skummet försvann nämns inte. Liknande fall har inte kunnat hittas. Effekten är antagligen specifik för anläggningen.

### **6.2.7 Vibration**

Skum i rötkammaren borde gå att bekämpa med hjälp av rätt sorts vibration. Metoden är vanlig inom bland annat byggnads- och konfektionsbranschen, då man vibrerar viskösa vätskor och mjukt, fast material för att öka deras förmåga att rinna ut. Man vet dock inte vilka mekanismer som ligger bakom vibreringens effekt på viskösa vätskor. Experiment har visat att vibration med rätt amplitud och frekvens får skummet i icke-newtonska vätskor att kollapsa, medan det inte fungerar för newtonska vätskor. En definition för icke-newtonska vätskor är sådana vätskor som när de utsätts för skjuvspänning, är skjuvningen inte proportionell mot skjuvspänningen. Förtjockat slam räknas till en sådan vätska, medan vatten inte är det (Ganidi, 2008, s. 41–42). Det är tveksamt om vibration skulle gå att tillämpa i så pass stor skala som skulle krävas vid rötning. Men eftersom man har mycket erfarenhet i andra branscher, borde det vara en intressant möjlighet.

### **6.2.8 Ljudavskummare**

I avsnitt 6.1.7 togs ultraljud upp som en förbehandlingsmetod, som verkar lovande för att bli av med skumningsproblem vid rötningen. Det verkar som att ljudvågor också kan användas som en behandlande metod, men har inte testats i rötningssammanhang. Metoden har använts vid jäsning och olika typer av bioreaktorer, se figur 22 för en bild på en möjlig uppställning. Hela kärlet är en reaktor, punkt 1 är en resonanskammare med munstycke. Ljudvågor på 6–11 kHz har rapporterats kunna kontrollera skum. Ljudvågorna har flera effekter på skum. Det rör sig om akustiskt tryck, skapande av resonans i bubblan, höjning av trycket inne i bubblan, strålningstryck, skapandet av vakuum och turbulens som man tror att får skummet att förstöras. Vid ljudvågor med höga frekvenser och hög intensitet är det främst strålningstryck och vid låga frekvenser och intensitet är det akustiskt tryck och



resonans som främst spelar roll. Ljudbehandlingen har rapporterats stimulera tillväxt av jäst och alkoholproduktion. Den har dock en negativ inverkan på vissa typer av bakterier, vilket kan vara skadligt för rötningens bakteriekultur. Dessutom kan problem med akustik och oljud uppstå (Ghildyal, m.fl. 1988, s. 197–198).

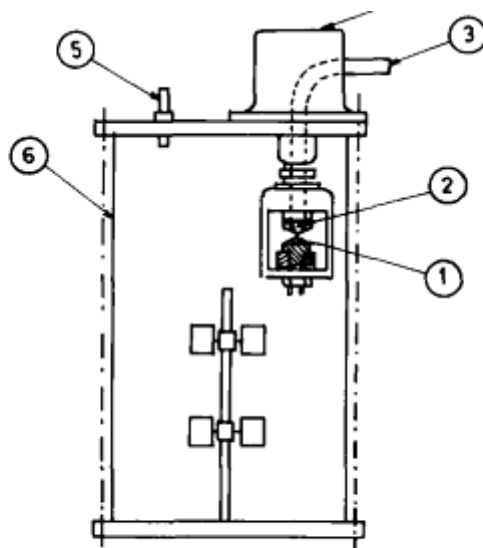


FIG. 4. Line diagram of a ultrasonic defoamer. 1, Primary resonance chamber; 2, nozzle; 3, air inlet port; 4, top body of defoamer; 5, air outlet; and 6, fermentor.

Figur 22. Anordning för att åtgärda skumning i ett jäskärl med ultraljud (Ghildyal m.fl. 1988, s. 198).

Det finns dock andra problem än misstanken om att behandlingen skulle skada bakterierna vid rötning. Uppställningen på figur 22 kräver tryckluft för att fungera, vilket inte skulle gå vid rötning eftersom miljön måste vara anaerobisk (se kapitel 4). Det är möjligt att den skulle fungera utan luft, men någon gas behövs för att skapa effekten. Metoden skulle dock vara driftsäker (inga rörliga delar), lätt att installera och klarar av kraftigt skum.

### 6.2.9 Elektrisk behandling

Genom att sätta elektrisk ström genom den skummande delen av innehållet i en reaktor kan man få skummet att kollapsa, i alla fall i jäsningssammanhang, där både växel- och likström har använts. Det är dock inte känt exakt vad som orsakar att skummet förstörs, men antagligen rör det sig om förändringar i vätskans och gasens egenskaper som får bubblorna att brista (Ghildyal m.fl. 1988, s. 199) Metoden verkar vara ovanlig och det är inte känt vilken effekt metoden skulle ha på mikroorganismerna, speciellt de känsliga metanbakterierna.

## 7 Diskussion

Den ursprungliga tanken var att när alla orsaker och åtgärder var fastställda skulle en beslutskarta göras upp för att man skulle kunna fatta beslut om hur skumning skulle åtgärdas. Det är dock klart efter att ha gått igenom alla möjliga orsaker och åtgärder, att skumningsproblemet är för komplext och att det råder stor oenighet på området. Variablerna som inverkar på beslutsfattande blir för många för att enkelt kunna säga om den ena eller den andra lösningen är den bästa. För det här ändamålet skulle mer avancerade och förbättrade modeller i stil med de som presenteras i avsnitt 6.1.3 behöva tas fram. Det förutsätter att man kan göra nödvändiga mätningar och undersökningar.

Det verkar som att de främsta orsakerna till skumning är mikroorganismer (avsnitt 5.3.1) och driften av anläggningen (5.3.3), men för vissa specifika anläggningar är det själva substratet som är problematiskt. Den bästa lösningen, för alla biogasanläggningar oavsett om skumningsproblem finns, är att se över sina rutiner och utveckla sådana som garanterar att driften och uppföljningen möjliggör en optimal rötningsprocess. I sådana fall där substratet eller mikroorganismer från vattenrening är problemet, är det bäst att åtgärda problemet innan det kommer in till rötreaktorn. Det betyder i fallet med mikroorganismer att ett samarbete mellan vattenreningsprocessen och biogasanläggningen måste finnas. Det är ändå oklart exakt vilken roll mikroorganismer som *Microthrix Parvicella* spelar när de kommer till rötningsprocessen, trots forskning på området. Då det gäller substrat som orsakar problem, som t.ex. olika ytaktiva ämnen (avsnitt 5.3.2), borde man noga överväga inmatningen. Det gäller främst sådana anläggningar som planerar att ta in externt material om kapacitet finns. Om man har för avsikt att börja röta en ny restprodukt som inte har testats i anläggningen tidigare, behöver man göra undersökningar och teströtningar som bevisar att substratet inte kommer att orsaka problem som skumning innan man ingår avtal om att börja röta restprodukten. En annan möjlighet är förbehandling av olika slag som gör att substratet blir mer lättrotat (avsnitt 6.1.4–6.1.7).

Ifall en ny biogasanläggning byggs, är det skäl att planera processen (avsnitt 6.1.1) på ett sådant sätt att övervakning och styrning kan göras på bästa sätt, inte bara ur skumningssynpunkt. Att sätta till en förbehandling kan dels hindra skumning från att uppstå, men också ge produktions fördelar som ett ökat biogasutbyte och kortare uppehållstid i röt-kammaren. Baserat på den litteratur som har gått igenom till den här rapporten, verkar det som att för tillfället är termisk behandling med t.ex. CAMBI-processen det bästa alternativet (se avsnitt 6.1.5). Den innebär investeringar och lämpar sig

bäst om den energi i form av värme som krävs kan kombineras med uppvärmning av själva rötreaktorn, vilket dock inte har föreslagits i litteraturen. I framtiden kan ultraljudsförbehandling (avsnitt 6.1.7) bli ett bättre alternativ, eftersom den verkar ta mindre utrymme och kräva mindre energi. Den metoden har dock problem med driftssäkerheten, som konstaterades i det avsnittet. Förbehandling är alltså med sina produktionsfördelar ett bra alternativ även om man inte misstänker att skumningsproblem kommer att finnas. Hursomhelst innebär alla förbehandlingsmetoder investeringar och förändringar i processen, vilket betyder att det är bäst att installera eller planera dem redan i det skede då biogasanläggningen byggs.

I sådana fall där skumningen inte är allvarlig eller ständigt ihållande, kan det räcka med att man tillsätter skumdämpare (avsnitt 6.2.4). Den innebär inga eller små förändringar för anläggningen. Det är viktigt att i så fall använda sig av rätt skumdämpare och vara säker på vad det innebär för efterföljande processteg. I bästa fall kan en billig skumdämpare eller små mängder av den vara tillräckligt. Det är ändå inte en lösning på skumningsproblemet, utan behandlar bara symptomen.

Vissa nya idéer har kommit fram i den här rapporten som inte har testats, som att duscha med högt tryck (avsnitt 6.2.5). De möjliga åtgärderna i avsnitt 6.2.7–6.2.9 har inte heller testats i rötningssammanhang, utan används i andra branscher. Den bästa lösningen, för vissa biogasanläggningar med skumningsproblem, kan kanske finnas att hämta i andra branscher. Därför vore det önskvärt om den kunskap som finns i andra branscher kunde genom samarbete tillämpas och undersökas i rötningssammanhang. På samma sätt finns det antagligen möjlighet att börja röta restprodukter från branscher vars restprodukter behandlas på annat sätt eller inte tas tillvara alls. Som det konstaterades i avsnitt 5.4.5 är rötning och tillvaratagandet av biogasen en del i arbetet mot en hållbar utveckling och bättre miljö.

Det har blivit tydligt hur pass oklart skumningsfenomenet är, trots att rötning inte är någon ny metod. Man kan dessutom förvänta sig att skumningsproblemen kommer att bli vanligare, i takt med att mer energi ska vara förnyelsebar (Biogasportalen) och högre krav ställs på vattenreningen (se avsnitt 5.3.8). Orsakerna är som tidigare nämnts många, men dessutom anger olika författare rent av motstridiga påståenden för vad som är optimalt för rötningssprocessen, t.ex. i fallet med mesofil eller termofil temperatur (avsnitt 5.3.4) och alkalinitet (avsnitt 5.3.6). Det största problemet här verkar vara att rötningssprocessen är komplex och inte helt förstådd. Många av undersökningarna är också specifika för en viss

biogasanläggning, vilket betyder att det blir problem om det ska tillämpas på någon annan anläggning. En möjlig lösning på det problemet, eller i alla fall en förbättring, skulle vara om biogasreaktorerna är konstruerade på sådant sätt så att övervakning och kontroll underlättas. Rötreaktorer som man kan se bra in i, eller rent av genomskinliga som konstrueras och testas i kapitel 8, kan vara till god hjälp för att förstå rötningen bättre.

## **8 Genomskinliga rötreaktorer**

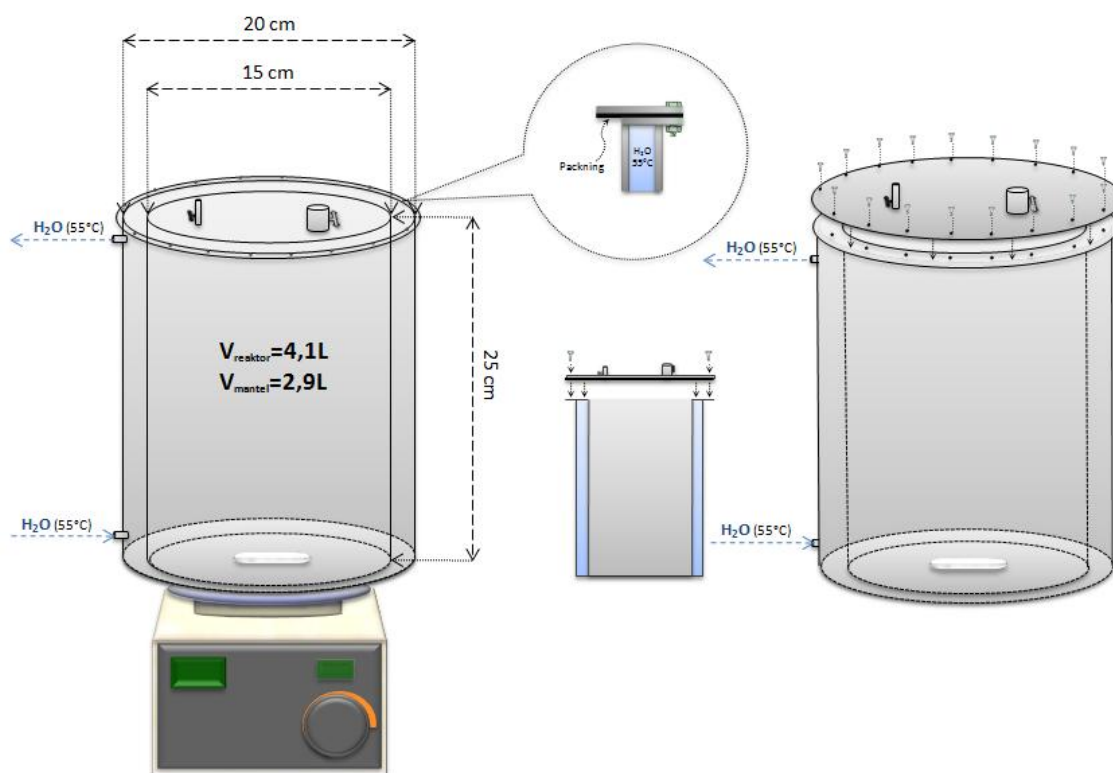
För att få en visuell bild av hur röttningsprocessen ser ut och om skum uppstår, konstruerades två biogasreaktorer i genomskinligt material. Under projektet ”Biobio” prövar man olika blandningar av substrat i två stycken testreaktorer med en volym på ca 30 liter. Vid flertalet av de här försöken har man misstänkt att det skummar inne i testreaktorerna, men man saknar möjlighet att se in i dem. Misstanken kommer av att biogasproduktionen har varit dålig. Också i många fullskaliga rötreaktorer saknar man möjlighet att se in i dem. Samtidigt får man en inblick i de många olika möjligheterna att konstruera en rötreaktor. När konstruktionen är klar testar man att röta sådana blandningar som man misstänker att ger upphov till skum. Dessutom kommer de genomskinliga rötreaktorerna att kunna erbjuda möjlighet att följa med och kontrollera röttningsprocessen på flera sätt, samt fungera bra i demonstrations- och undervisningssyfte (Projektplan för Från bioavfall till bionäring).

### **8.1 Inledande planering**

Planering av en genomskinlig rötreaktor i miniformat inleddes under sommaren 2011, då Andreas Willfors och Kim Lönnqvist var anställda inom projektet ”BioBio” som projektassistenter. Planeringen och konstruktionen var en del av arbetsuppgifterna, förutom andra uppgifter i samma och andra projekt. Uppgiften var löst definierad, den gick ut på att planera och konstruera en eller flera rötreaktorer av genomskinligt material. Övriga egenskaper som funktionsprincip, design och detaljer var inte givna. En del av komponenterna var redan beställda, som två stycken rör och en skiva av polykarbonat. Resten av komponenterna som inte fanns tillgängliga vid Yrkeshögskolan Novia skulle införskaffas efter behov. Det fanns tillgång till verktyg och utrymmen i de olika laboratorierna i Technobothnia i Vasa.

Till en början avsattes mycket tid till planeringen av flera olika rötreaktorer. En mängd olika alternativ till främst omrörning och uppvärmning gick igenom. Även egna teorier

gicks igenom, som inte har påträffats i litteraturen. Det visade sig dock att möjligheterna att utföra de flesta av designerna begränsades av tid, ekonomi, materialtillgång och kunskap om plastkonstruktion. Därför valdes olika tillämpningar och modifieringar av en av de första designerna, se figur 23. Omrörningen med den ursprungliga magneten visade sig vara otillräcklig efter att flera omrörningsförsök utförts. Omrörningen i den planerade rötreaktorn återskapades i samma volym vätska, som liknade substratet, med samma magnetomrörare. Hela vätskan blandades inte och i vissa försök kom magneten i obalans och fungerade inte alls. Därför behövdes andra magneter eller omrörningsmetoder användas, vilket tas upp i avsnitt 8.2.2.



Figur 23. Ursprungligt förslag på genomskinlig rötreaktor.

Planeringen och införskaffandet av komponenter tog längre än planerat. Mindre tid fanns att avsätta till konstruktion än det som ursprungligen var tänkt. På grund av semestrar, som gjorde att Andreas Willfors var tvungen att utföra andra arbetsuppgifter, samt att Kim Lönnqvists anställning tog slut, fanns det inte tid att slutföra konstruktionen under sommaren 2011. Då anställningen upphörde 26.8.2012 var rören, botten och lock tillsågade och de flesta komponenter införskaffade. Ett inledande försök att foga samman bitarna med silikon hade utförts, men fungerade inte. Inget mera arbete utfördes med konstruktionen förrän sommaren 2012.

## 8.2 Komponenter

Utformningen på rötreaktorerna som ska byggas är cylinderformad. De baserar sig på det tidigare nämnda, ursprungliga förslaget (figur 23). En del förändringar gjordes dock. Fokus sattes på genomskinligheten, men också en stabilitet genom en enkel och beprövad design med få rörliga delar. Hög nedbrytningsgrad eller metanutbyte prioriterades inte.

### 8.2.1 Material

Som huvudsakligt material användes polykarbonat (PC), som beställdes från företaget VINK i Jakobstad. I tabell 6 finns måtten på rören och i tabell 7 finns mått på skivan, men endast en del användes till själva bygget. Den stora mängden beror på minimigränsen för beställning, men också för att säkerställa att tillräckligt med material av samma sort finns tillhanda. Totalkostnaden för material blev 530,28 €.

Tabell 6. Tabell över mått och pris på polykarbonatrör från VINK.

Antal	Längd [mm]	Inre diameter [mm]	Yttre diameter [mm]	Pris [€/m]
1	2050	194	200	82,90
1	2050	144	150	113,40

Tabell 7. Tabell över mått och pris på polykarbonatskivan Lexan 9030-112 från VINK.

Antal	Tjocklek [mm]	Area[m <sup>2</sup> ]	Pris [€/m <sup>2</sup> ]
1	3,0	2,56	49,90

PC valdes som huvudsakligt konstruktionsmaterial av flera orsaker. PC passar för ändamålet främst för att det är helt genomskinligt, med en ljusgenomgång på 89 %. Dessutom är det slagåligt, segt och starkt. Det absorberar inte vatten och tål temperaturer upp till 120 °C, vilket är nödvändigt då uppvärmt vatten ska cirkuleras i konstruktionen (se avsnitt 8.2.3). PC tål ämnen som förväntas finnas vid rötning, som svaga syror och alkoholer. Det som är en nackdel och inte var känt vid konstruktionen är att efter långvarig kontakt med vatten med temperaturer över 60 °C, blir PC sprött och bryts ned (Edshammar, 2002, s. 127–128). Temperaturen vid försöken är inte över 60 °C, men ca

56 °C tycks ha varit tillräckligt för att sprickbildning ska uppstå. Fler och fler sprickor uppstod i den yttre manteln under försöken, men läckage uppstod inte. På det inre röret, med mindre diameter, uppstod inga sprickor.

Till den andra modellen som byggdes användes också en glasflaska med skruvkork av märket VWR Collection med volymen 2 l (produktnummer 215-1596). Enligt VWR är flaskan värmetålig och mycket kemikaliebeständig. Korken är av polypropylen (VWR:s hemsida). Flaskan användes för att den är lätt att få lufttät och är lätt att tömma och tvätta, se avsnitt 8.3.2.

### **8.2.2 Omrörning**

Som nämndes i föregående stycke utfördes omrörningsförsök där den ursprungliga magneten visade sig vara otillräcklig. Nya modeller av magneter beställdes efter sommaren 2012. Dessa testades och några av dem visade sig skapa kraftigare omrörning. Eftersom omrörningen inte kommer att ha hög effekt, behöver omrörningen vara tillräcklig även vid lägre hastigheter. Det har också visats att processen är stabilare vid omrörning på lägre hastigheter (se avsnitt 5.3.5). Magneterna beställdes från VWR. Alla magneter som beställdes har god kemikalieresistens och tål höga och låga temperaturer (-200 till +250 °C), enligt VWR. De är överdragna med PTFE (polytetrafluoreten), ska vara giftfria och har en Alnico V-magnetkärna (VWR:s hemsida). Det här är nödvändigt eftersom det kan förekomma varierande förhållanden under rötningsprocessen, t.ex. pH-variationer, vilket beskrivs närmare i 4.3.2.

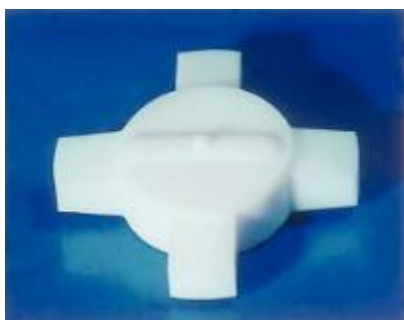
En av magneterna som beställdes var ringformad, se figur 24. Den valdes utgående från att under omrörningsförsöken hade den ursprungliga magneten kommit ur balans och börjat slå mot väggarna, vilket försämrade omrörningen kraftigt. Den största modellen av den här typen valdes, med diametern 57 mm.



*Figur 24. Ringformad magnet (produktnummer 442-050) för omrörning (VWR:s hemsida).*

Det visade sig dock att dess omrörningseffekt var ganska låg. Någon större turbulens skapades inte i försökskärlet, men magneten höll balansen. På grund av omrörningen inte var tillräcklig användes inte den ringformade magneten i försöken.

Den andra magneten som valdes var plusformad, se figur 25. Den valdes för att den är lämpad för omrörning i glaskärl, tack vare en upphöjning i mitten, samt förmåga att skapa god omrörning även vid låga hastigheter (VWR:s hemsida). Den största storleken av modellen valdes med en längd på 70 mm och en diameter på 37 mm. Den här magneten används i försöken eftersom den skapade tillräcklig omrörning och höll balansen vid omrörningsförsök.



*Figur 25. Plusformad magnet (produktnummer 442-0492) för omrörning (VWR:s hemsida).*

Den tredje magneten som valdes är en triangelformad magnet, se figur 26. Enligt VWR ska magneten vara särskilt effektiv för upplösning av fasta ämnen, vilket lämpar sig väl för rötningsprocessen. Magneterna är 110 mm långa och diametern är 36 mm.





*Figur 26. Triangelformad magnet (produktnummer 442-0392) för omrörning (VWR:s hemsida).*

Den triangelformade magneten skapar den högsta turbulensen av magneterna och antogs vara den som skulle lämpa sig bäst. Det visade sig dock att magneten var för stor och formen olämplig för att kunna användas vid försöken. Magnetomrörarna som används vid försöket klarade inte av att skapa en lämplig omrörning med den här magneten, med följderna att den fastnade. Därför användes den plusformade magneten till den större genomskinliga reaktorn (TR1) och i den andra användes en cylinderformad magnet med ring på mitten (figur 27) med längden 70 mm och diametern 10 mm, eftersom den modellen var den enda som rymdes att sätta in i flaskan.



*Figur 27. Cylinderformad magnet med ring (produktnummer 442-4513) för omrörning (VWR:s hemsida).*

### **8.2.3 Uppvärmning**

Uppvärmningen sker med vattencirkulation. En cirkuleringspump med uppvärmning av modell Julabo MC placeras i ett kärl med vatten. Vattnet värms upp i kärlet och pumpas via en slang in till den första genomskinliga testreaktors yttre hölje för uppvärmning. Den fylls upp, varefter det vid en viss höjd rinner ut via en slang till den andra testreaktorn, som fylls upp och täcker flaskans kropp. Vattnet rinner ut ur den andra testreaktorn tillbaka till kärlet, för att värmas upp igen. För att minimera förluster av vatten till avdunstning är kärlet täckt med en tillsågad bit PC, som har hål för slangar och för de delar av pumpen som ska vara under vatten. Pumpen vilar på plattan av PC, som visas på figur 28. Genom

att pröva olika inställningar hittades den optimala inställningen för hur stort flöde ska pumpas och hur kraftig uppvärmningen ska vara (Manual för Julabo MC). Uppvärmningen var inställd på 56,0 °C för att temperaturen inne i rötreaktorerna skulle vara ca 55,0 °C.



*Figur 28. Uppställningen med vattenkäril och uppvärmningspump bakom genomskinliga rötreaktorer.*

#### **8.2.4 Gasuppsamling**

Ursprungligen var tanken att gasen skulle samlas upp och analyseras. Gasuppsamlingens främsta syfte i det här försöket skulle vara att möjliggöra bestämningen av metanutbyte från rötningen och andelen metan i den producerade biogasen. Gasen skulle inte fylla någon funktion som sådan och skulle inte användas. Det fanns dock ingen möjlighet att analysera gasens innehåll av metan på något tillförlitligt sätt vid laboratoriet i Technobothnia i Vasa. Gaskromatografen i laboratoriet saknade nödvändiga tillbehör för att analysera metan. Anordningarna som används för att mäta biogasen som produceras i de större rötreaktorerna i laboratoriet klarar inte av att mäta så små mängder gas som producerades i de genomskinliga testreaktorerna. Anordningarna skulle mäta det procentuella innehållet av metan och koldioxid. Eftersom skumning var det intressanta beslöts det att inga resurser skulle satsas på att försöka analysera biogasen från de genomskinliga testreaktorerna.

Biogasen måste ändå samlas upp eftersom annars kommer rötreaktorerna att bli för fulla och för att luft inte ska läcka in. Gasuppsamlingen sker via en ventil i toppen av reaktorerna. Gasen leds genom plastslangar till gasuppsamlingspåsar som används för gaskromatografanalyser (figur 29). Modellen är Tedlar Bags 12 l, beställd från Oy Chroma-Lab Ab. Man kan se på påsen när den fylls om gas produceras.



*Figur 29. Påse (Tedlar Bags) för gasuppsamling vid försöken, slangen leder från de genomskinliga testreaktorerna.*

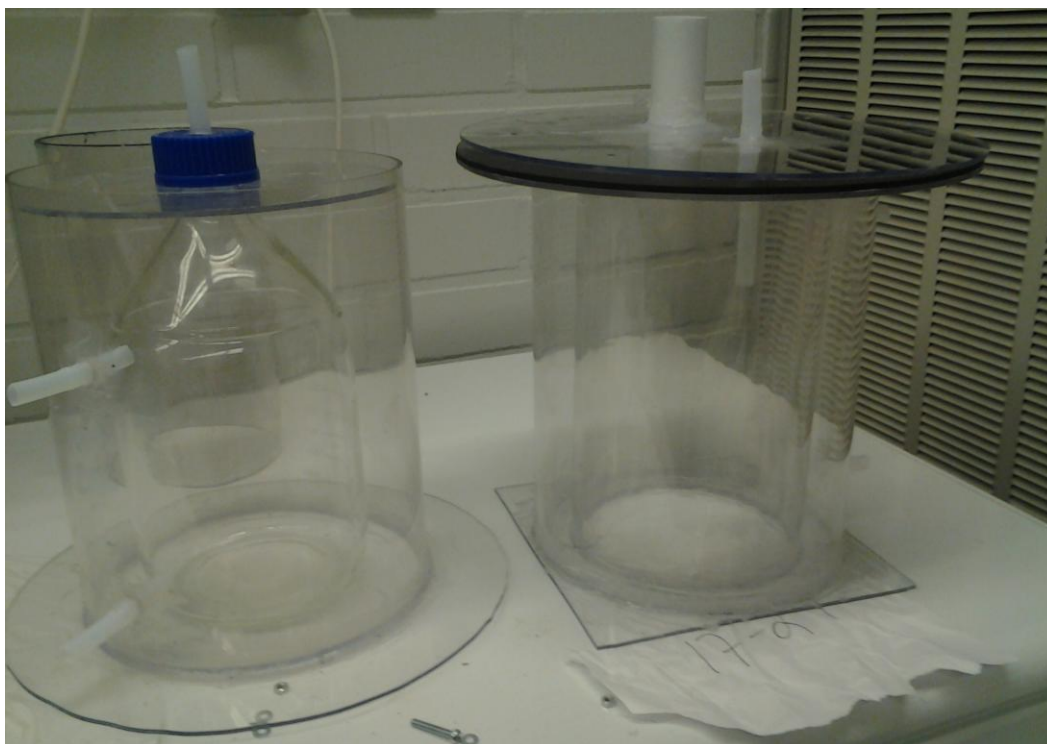
### **8.2.5 Tätning**

Vid rötning är det viktigt att rötammaren är lufttät, för att man ska kunna upprätthålla en anaerobisk miljö (se avsnitt 4.1). Det var också viktigt att vattencirkulationen skulle hålla tätt. De genomskinliga rötreaktorerna tätades med silikon, silikonlim och lim för PC (Acrifix 192). Så kallade genomföringsringar av gummi användes också till slangen för gasuppsamling. De samma genomföringsringarna användes för att få vattenslangarnas anslutning till rötreaktorerna täta. Silikontejp (Tesa 4600) användes för att ytterligare täta och ge stabilitet åt vattenslangarnas anslutning till rötreaktorerna, samt vid det sista försöket för att få den första rötreaktorn tät. För att täta mellan locket och resten av den första rötreaktorn användes en kemikaliebeständig gummimatta med en tjocklek på 3 mm,

med en uppskuren teflonslang att sätta runt vid stängning som ytterligare tätning. Det visade sig att den andra rötreaktorn var enklare att få lufttät (se avsnitt 8.3.2).

### 8.3 Konstruktion

Konstruktionen av de rötreaktorer som blev det slutgiltiga resultatet inleddes sommaren 2012. Konstruktionen utfördes sporadiskt, främst på grund av att andra uppgifter som hörde till anställningen utfördes samt att lim och silikon som användes skulle torka. Dessutom tog det tid att införskaffa vissa komponenter. Det enda arbete som utfördes av någon utomstående part var tillsågningen av PC-rören. Figur 30 visar de båda testreaktorerna under konstruktionen.



*Figur 30. De båda testreaktorerna under konstruktion 14.6.2012. På TR1 (t.h.) fästs lockets provtagningsrör med silikonlim, locket är upp och ned. På TR2 (t.v.) limmas två plaströr för vattencirkulation fast på sidan av PC-röret.*

#### 8.3.1 Testreaktor 1

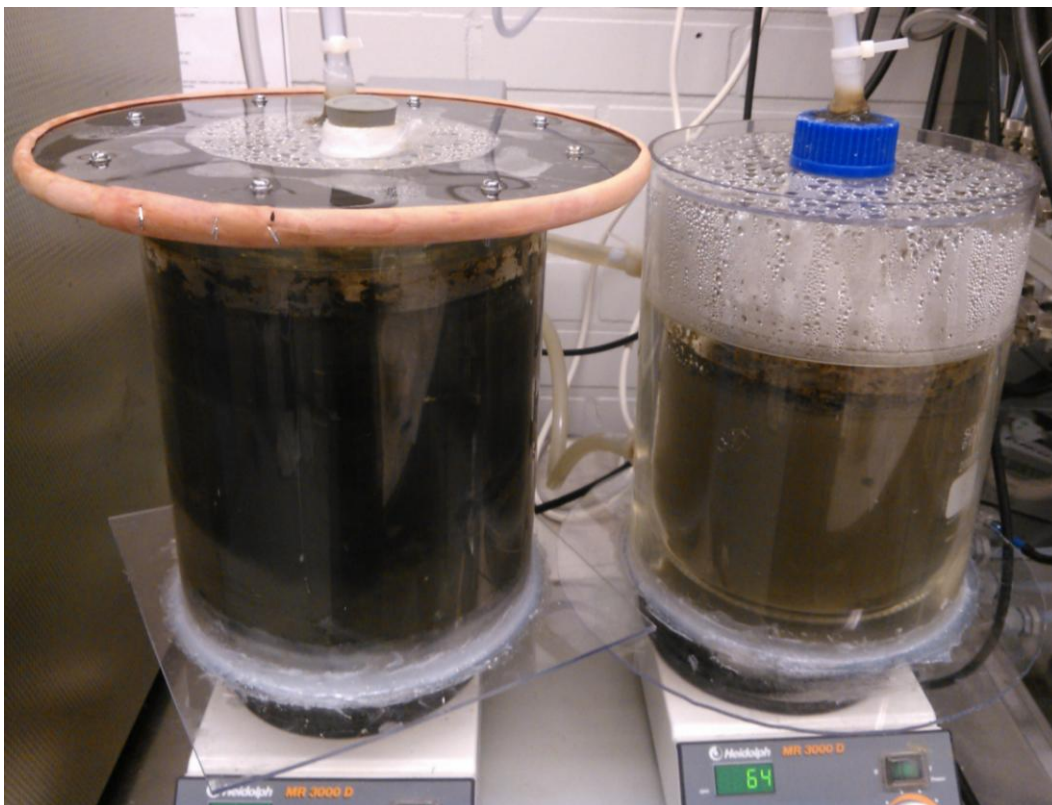
Den första av de genomskinliga rötreaktorerna, testreaktor 1 (TR1), baserar sig på den ursprungliga designförslaget (figur 23). Ur PC-plattan sågades botten, lock och lockets fästdel till och slipades runda. Ur gummimattan skars tätning till locket. Radien på gummimattan, locket och lockets fästdel är 147 mm. Öppningen i mitten på lockets fästdel

är lika stor som det mindre rörets inre diameter (se tabell 6). PC-rören sågades till sin rätta längd vid KWH Pipe i Vasa, eftersom det inte fanns möjlighet att såga till dem vid Technobothnia utan risk för att de skulle spricka. Dessutom uppnådde man en större noggrannhet med hjälp av maskinen vid KWH Pipe, som normalt används för att svarva rör till rätt längd och svetsa ihop dem. Rörbitarna är 250 mm långa och diametrarna kan ses i tabell 6. De båda rören som används måste vara av exakt samma längd för att kunna få konstruktionen lufttät.

De båda rören fästes till botten med silikon och fick torka i flera dygn. Det visade sig dock att konstruktionen inte höll tätt, eftersom silikonerna inte klarade av att hålla rören på plats när de fylldes med vatten. Läckage uppstod fast olika tätningsmedel användes. Därför frästes ett 1,5 mm spår in i skivan med en Dremel 3000, som de båda rörbitarna passade in i. I spåren sattes limmet för PC och sedan silikon längs kanterna. Det här gav mer stabilitet åt konstruktionen och botten höll tätt. Volymen på innehållet är 3,6 l, totalvolym är 4,1 l.

I röret med den större diametern borrades två 11 mm stora hål och förseddes med införningsring med diameter på 10 mm. I dem sattes en bit av polypropylenrör med yttre diameter 10 mm, som sedan limmades. Sedan sattes även silikon för ytterligare stabilitet. De här hålen används för att vatten ska cirkulera och värma substratet i det mindre röret. På polypropylenrören trädde slangarna som från vattenkärlet och till den andra rötreaktorn. De tejpadades fast med silikontejp och spändes fast med buntband. I locket borrades ett hål för biogasen och en polypropylenbit sattes till på samma sätt. I locket borrades också ett hål med diametern 32 mm för röret för provtagning. Rörstumpen, med en yttre diameter på 32 mm, är av PVC. Den fästs med lim och silikontejp. Den stängs med en gummiplugg som tryck in i den under rötning. Längden på PVC-röret under locket är så långt att det går under ytan på substratet, för att det vid provtagning ska läcka in så lite luft som möjligt.

Lockets fästdel sattes fast med lim och silikon i de båda rören. I lockets fästdel, dess tätning och locket borrades åtta hål för M6-skruvar som används för att stänga TR1. Tätningen, som har samma mått som fästdelen, limmades till fästdelen. För ytterligare tätning kring locket användes till först en ring gjord av en uppskuren slang, senare sattes silikontejp på under rötningen. Figur 31 visar TR1 och TR2 i användning.



*Figur 31. TR1 (t.v.) och TR2 (t.h.) i användning 24.7.2012.*

### **8.3.2 Testreaktor 2**

Testreaktor 2 (TR2) fanns inte med i de ursprungliga planerna, utan som nämndes i avsnitt 8.1 byggdes den eftersom det fanns överlopsbitar av PC, samt att den är lätt att få lufttät och lätt att tömma (visas i figur 32). När rörbitarna sågades till TR1 gjordes för säkerhets skull reservbitar. Överlopsbiten med större diameter sattes fast på en rektangulär PC-bit, på samma sätt som TR1. Längden är 250 mm. På samma sätt som med TR1 borrades och gjordes hål med tätningar för vattenslangar i PC-röret. Den nedre av slangarna leder vatten från TR1, som fyller upp vatten i röret som är fäst på PC-biten, tills att det når den övre av slangarna som leder tillbaka till vattenkärlet med uppvärmningspumpen.



*Figur 32. Tömning av TR2 14.8.2012. Innehållet hålls ut över ett filter, där det fasta materialet lämnar och tas tillvara, vilket fungerar som avvattningsmetod.*

En glasflaska, som beskrivs i avsnitt 8.2.1, används i stället för det inre röret i TR1. I mitten på korken borraras ett hål för plaströr för biogasen, på samma sätt som TR1 i föregående avsnitt. En slang leder från det till en gasuppsamlingspåse. Flaskan sätts ner i vattnet som fylls på i röret, med PC-biten som botten. För att inte avdunstningen av vatten ska bli för stor, så sågades och slipades en rund bit PC till med samma diameter som inre diametern på det större röret, så att det passade in i det. Ett hål borraras i mitten, så att det gick att trä på flaskans hals, under gängorna för korken. Flaskans volym är 2 l, men eftersom biogasen också ska rymmas är den effektiva volymen 1,8 l.

## **8.4 Försök**

Försöket gick ut på att återskapa rötningar som inte fungerat i rötreaktorerna som använts i projektet ”BioBio”. Rötningarna utfördes i de genomskinliga rötreaktorerna som beskrivs i avsnitt 8.1–8.3. Eftersom de är genomskinliga kunde man se om de misslyckade blandningarna av substrat gav upphov till skumning. Syftet med det är att dels försöka förstå skumning bättre, men också dra slutsatser om varför substratblandningarna inte fungerat.

### **8.4.1 Uppföljningsmetoder**

För att följa upp rötningprocessen och se till att den fungerar korrekt utfördes kontroller och analyser. Uppföljningen gjordes oftare under den första veckan, eftersom starten är

mer kritisk (nämns bl.a. i avsnitt 4.6.2). Senare gjordes uppföljningen mera sporadiskt, för att inte släppa in luft in i rötreaktorerna i onödan och därmed störa processen. Själva rötningförloppet var inte det som prioriterades, utan skumning, varför det inte gjordes regelbundna kontroller.

De kontroller som gjordes var temperatur, vattennivå i kärlet för uppvärmning, om biogas bildats och lagrats i gasuppsamlingspåsar samt om skum bildats. Det gick att kontrollera vattennivå, biogas och skumning visuellt. Temperatur togs med en digital termometer som gick att sticka ner i testreaktorerna. Prov på ca 60 ml togs med hjälp av en provtagningspump för att mäta pH och konduktivitet (se avsnitt 4.3.2 respektive 4.3.3). Ifall pH var för lågt tillsattes en mängd 10 M NaOH som anpassades efter hur mycket det behövde justeras. För att avgöra hur mycket NaOH som behövde tillsättas tittade man på hur mycket NaOH som tillsatts vid justering för liknande substratblandning i de tidigare försöken i de större rötreaktorerna (mängden skalades ner enligt volym).

Vid start och avslutning togs prov på ca 260 ml ur respektive rötreaktor. 200 ml av de här sparades och frystes. Proverna skickades senare till Ketek, Karleby för att analysera halten av VFA (se avsnitt 5.3.2) och jämföra halten mellan start och avslutning. Det görs bl.a. för att VFA misstänks vara kopplat till skumning. Prov togs inte oftare eftersom volymen på testreaktorerna är så liten att de skulle minska för mycket i volym om man tog prov oftare.

När rötningarna är avslutade hålls innehållet ut över ett filter och rötresten avvattnas (figur 30), tas tillvara och fryses. I skrivandets stund har inga analyser gjorts på rötresten från TR1 och TR2, eftersom analyser skulle ske i samband med att andra prover på rötrester analyseras. Rötrestens egenskaper är inte heller av stort intresse ur skumningsperspektiv och analysresultaten skulle inte gå att använda i den här rapporten.

#### **8.4.2 Substrat**

De första rötningarna i de genomskinliga testreaktorerna inleddes 17.7.2012 och avslutades 14.8.2012. Samma substratblandning användes i både TR1 och TR2, hälften fiskrens och hälften hushållsavfall (taget från Stormossens process i Vasa). Mängd och egenskaper visas i tabell 8 och 9. Startkulturen tas från en pågående process, nämligen Stormossens röttkammare. Den sätts till för att rötningen ska få en redan fungerande bakteriekultur och komma igång snabbare. Mängden substrat bestäms utgående från hur mycket VS (i gram) det fanns i den ursprungliga rötningen. Mängden VS skalas ner enligt volymen, vilket betyder att vid den ursprungliga rötningen på 27,00 l fanns 900 g VS. I TR1 med en volym



på 3,66 l blir det 122,13 g och i TR1 med 1,8 l blir det 60,00 g. I fallet med första rötningen, ska hälften av mängden VS komma från hushållsavfall och hälften från fiskrens. Respektive substrat sätts till, enligt deras VS, för att komma upp i den mängd som behövs. Ekvation 6 användes för att räkna ut mängden:

$$\text{Mängd substrat (g)} = \text{VS(g)}/\text{TS (\%)}/\text{VS (\%)}/\text{TS}$$

*Ekvation 6. Uträkning av mängd substrat vid rötning från VS.*

*Tabell 8. Mängd substrat och TS och VS för substraten i första rötningen i TR1.*

**TR1:**

Mängd	Enhet	Substrat	TS %	VS %/TS	g VS
846,44	g	Hushållsavfall	8,55 %	84,38 %	61,07
158,99	g	Fiskrens	43,02 %	89,28 %	61,07
0,41	liter	Startkultur			0,00
2,49	liter	H <sub>2</sub> O			0,00
		Totalt:			122,13

*Källa: Analyser gjorda i Biobio.*

*Tabell 9. Mängd substrat och TS och VS för substraten i första rötningen i TR2.*

**TR2:**

Mängd	Enhet	Substrat	TS %	VS %/TS	g VS
415,83	g	Hushållsavfall	8,55 %	84,38 %	30,00
78,11	g	Fiskrens	43,02 %	89,28 %	30,00
0,20	liter	Startkultur			0,00
1,22	liter	H <sub>2</sub> O			0,00
		Totalt:			60,00

*Källa: Analyser gjorda i BioBio.*

Samma substrat sattes i de båda testreaktorerna för att se att de fungerade korrekt. Blandningen valdes eftersom den inte lyckades då man rötade den tidigare. Den var också en av de mest intressanta ur skumningsperspektiv. Dock bildades inget skum och pH fick justeras flera gånger med NaOH i båda testreaktorerna, eftersom pH var för lågt. Ingen biogas bildades heller, i alla fall inte i någon betydande mängd.

Den andra rötningen inleddes 18.8.2012 och avslutades 14.9.2012. Vid den här rötningen valdes olika substrat till TR1 (tabell 10) och TR2 (tabell 11). Den här gången valdes sådant substrat som väntades fungera bra, utgående från försök som tidigare gjorts i BioBio. Substratblandningarna valdes inte för att se om de skummade, utan för att se hur mer

optimala rötningar fungerade i testreaktorerna. På så sätt ser man om testreaktorerna fungerar, samt får något att jämföra föregående och efterkommande rötningar med. Mängden substrat bestäms på samma sätt som vid föregående rötning, alltså utgående från ekvation 6 och den mängd substrat som använts vid tidigare rötningar i BioBio. Blandningen i TR1 (tabell 10) är hälften hushållsavfall och hälften biprodukt från alkoholframställning. Behandlingen och tillämpningen av biprodukten är under utveckling och tas därför inte upp i större detalj.

Tabell 10. Mängd substrat och TS och VS för substraten i andra rötningen i TR1.

**TR1:**

Mängd	Enhet	Substrat	TS %	VS %/TS	g VS
846,44	g	Hushållsavfall	8,55 %	84,38 %	61,07
345,33	g	Alkoholbipr.	23,60 %	74,93 %	61,07
0,41	liter	Startkultur			0,00
2,32	liter	H <sub>2</sub> O			0,00
		Totalt:			122,13

Källa: Analyser gjorda i BioBio.

Substratblandningen i TR2 (tabell 11) är endast hushållsavfall från Stormossen, med vatten och startkultur. Man väntar sig alltså att den här rötningen ska fungera utan större problem. I både TR1 och TR2 var man tvungen att justera pH. Skumning uppstod inte. En del biogas bildades i uppsamlingspåsarna, vilket tyder på att testreaktorerna fungerade. Mängden var dock mindre än väntat, speciellt i TR1. TR2 har producerat bättre.

Tabell 11. Mängd substrat och TS och VS för substraten i andra rötningen i TR2.

**TR2:**

Mängd	Enhet	Substrat	TS %	VS %/TS	g VS
831,66	kg	Hushållsavfall	8,55 %	84,38 %	60,00
0,20	liter	Startkultur			0,00
0,94	liter	H <sub>2</sub> O			0,00
		Totalt:			60,00

Källa: Analyser gjorda i BioBio.

Den tredje och i skrivandets stund sista rötningen inleddes 19.10.2012 och avslutades 30.11.2012. Rötningstiden är lång eftersom man visste att man inte skulle starta upp någon ny rötning omedelbart efter, samt att man ville se om något skulle förändras med längre uppehållstid. Målet med den här rötningen är att testa om två olika substratblandningar ger

upphov till skumning. I TR1 (tabell 12) är substratblandningen hälften fiskrens och hälften grissväm. Som tidigare har mängderna substrat bestämts utgående från att återskapa tidigare rötningar och ekvation 6.

Tabell 12. Mängd substrat och TS och VS för substraten i tredje rötningen i TR1.

**TR1:**

Mängd	Enhet	Substrat	TS %	VS %/TS	g VS
1204,76	g	Grissväm	6,40 %	79,20 %	61,07
158,99	g	Fiskrens	43,02 %	89,28 %	61,07
0,41	liter	Startkultur			0,00
2,49	liter	H <sub>2</sub> O			0,00
		Totalt:			122,13

Källa: Analyser gjorda i BioBio.

Substratblandningen i TR2 (tabell 13) är en tredjedel fiskrens och två tredjedelar grissväm. Substraten är alltså samma som i TR1, men i annat förhållande. Man kan förvänta sig att skumning eventuellt ska inträffa, men den här blandningen hade fungerat bättre än den i TR1, utgående från tidigare försök i BioBio. Mängderna har beräknats utgående från tidigare försök och ekvation 6.

Tabell 13. Mängd substrat och TS och VS för substraten i tredje rötningen i TR2.

**TR2:**

Mängd	Enhet	Substrat	TS %	VS %/TS	g VS
789,14	g	Grissväm	6,40 %	79,20 %	40,00
52,07	g	Fiskrens	43,02 %	89,28 %	20,00
0,20	liter	Startkultur			0,00
1,22	liter	H <sub>2</sub> O			0,00
		Totalt:			60,00

Källa: Analyser gjorda i BioBio.

Fiskrens är det som har varit gemensamt för de rötningar där man har velat se om skumning inträffat. Fiskrensens koppling till skumning tas upp i avsnitt 8.4.3 och 8.5. De andra substratens egenskaper, grissväm, hushållsavfall samt biprodukten från alkoholframställning, tas inte upp i det här sammanhanget eftersom man i projektet BioBio inte har misstänkt att de orsakar skumning.

### 8.4.3 Resultat

Resultatet av den här delen av arbetet är dels de genomskinliga testreaktorerna, som fungerar och lämpar sig för att vidare studera om skumning kan uppstå under rötning av vissa substrat. Uppvärmning, omrörning och provtagning har fungerat tillfredställande och som planerat. Resultatet är också sammanlagt sex olika rötningar, med tre stycken i respektive rötreaktor. Resultaten från rötningarna är dock inte helt tydliga.

Under den första rötningen i TR1 och TR2 var substratblandningen i de båda samma (tabell 8 och 9). Ingen skumning uppstod. Dock bildades ett slamtäck, speciellt i TR1 vars väggar blev helt svarta. Figur 33 visar hur provtagningsutrustningen smutsats ner vid provtagning. Slammet är svårt att få bort och bildar ett fettlager på utrustning som används.



*Figur 33. Slamtäck som uppstått i de båda testreaktorerna, främst i TR1, har smutsat ner provtagningsutrustning (foto taget 14.8.2012). Slammet är fett och svårt att få bort.*

Under den andra rötningen (innehåll för TR1 i tabell 10 och för TR2 i tabell 11) uppstod inte heller någon skumning. Det här var dock en rötning där man inte väntade sig något skum heller, till skillnad från den första och tredje rötningen. Det var rötningar som lyckats bra tidigare. Inget slam uppstod under rötningen, till skillnad från första försöket. Omblandningen fungerade bra och ingen skiktbildning uppstod. Biogas lagrades under rötningen i uppsamlingspåsar. I TR1 bildades trots den ungefär dubbelt större mängden VS endast lite biogas, medan produktionen var bättre i TR2. Det kan bero på en del faktorer. Endera biogasproduktionen, gasuppsamlingen eller tätheten i TR1 har inte fungerat som planerat, eftersom under alla försök har lite eller inget biogas alls lagrats i dess uppsamlingspåse. En metod för att kontrollera gastätheten för biogasreaktorer i laboratorium är att sätta tryckluft i rötreaktorn och senare mäta om trycket är det samma,

eller om läckage finns (Kervinen, 2010, s. 40). Ingen tryckluftsmätare behövdes, eftersom det var tydligt att en del av tryckluften läckte ut, dock inte omedelbart. Det här tyder på att biogas har kunnat läcka ut ur TR1. Dock är inte trycket vid rötning lika kraftigt, så det är oklart om biogasen skulle ha läckt ut istället för att endast stiga upp i gasuppsamlingspåsen. Det var dock inte biogasen som var av intresse under försöken, utan själva skumningen. Läckaget går också lätt att åtgärda med hjälp av att tejpa locket ordentligt med silikontejp, som tas bort vid tömning av TR1. Det är också möjligt att mikroorganismerna skadats vid det andra försöket, då biogasproduktionen borde ha varit god. pH hade då justerats med 10 M NaOH flera gånger. Då problemet antogs vara löst, visade det sig att det fortfarande hade varit för lågt (se avsnitt 4.3.2) i flera dygn efter justeringen. 28.8.2012 var pH 6,13, vilket är alltför lågt. Det är möjligt att mikroorganismerna hade skadats av det här och aldrig riktigt kommit igång med processen.

Under det tredje och sista försöket (tabell 12 för TR1 och tabell 13 för TR2) uppstod inte heller någon skumning. Det här var substratblandningar som man väntade sig att skulle fungera dåligt, speciellt TR1. Biogasproduktionen var inte märkbar. Under försökets andra dygn bildades ett slamtäcke i båda reaktorerna. Slamtäcket blev värre de kommande dygnen i TR1, medan det hade försvunnit efter fem dygn från TR2. Dock blev utrustningen fortfarande smutsig av innehållet i TR2, liknande det i figur 32. Slamtäcket försvann helt från TR1 först efter 25 dygn. Trots att rötningen höll på relativt länge (se avsnitt 4.3.1), hade ingen biogas lagrats i uppsamlingspåsen. Det som var gemensamt för alla rötningar där biogasproduktionen var dålig och slamtäcke bildades är att fiskrens var en del av blandningarna. Slutsatser som kan dras från de här resultaten tas upp i avsnitt 8.5.

## 8.5 Slutsats

Utgående från resultaten som presenterades i avsnitt 8.4.3 kan man dra några slutsatser och göra några antaganden. Att bevisa något är däremot inte möjligt, pga. det låga antalet försök som utförts. Att bevisa något i rötningssammanhang är överlag svårt, eftersom tiden för varje rötning är så lång och påverkas av många faktorer (se avsnitt 4.2 och 4.3). Det har också varit ett problem vid undersökningar som gjorts om skumning. Forskning och analyser inom området har varit dåligt upplagda och bevisar oftast ingenting, samt är specifika för anläggningen som undersökts (Ganidi, 2008, abstrakt).

Ett av de antaganden man kan göra, och som tidigare konstaterats i ”BioBio”, är att fiskrens är ett problematiskt substrat. Speciellt när det utgör hälften av en blandning börjar

problem uppstå. Någon skumning uppstod inte, däremot bildades ett slamtäcke. Deublin och Steinhauser anser att (2008, s. 127) bildandet av slamtäcke och skum är beroende av varandra. I avsnitt 5.1 beskrivs skillnaden mellan skum och slamtäcke, men som det konstateras där är det ibland svårt att avgöra skillnaden mellan de båda fenomenen. Massart m.fl. skriver (2006, s. 52) att om omrörningen är olämplig eller otillräcklig, kan den orsaka att gasbubblor fastnar i slamtäcket och blir till skum. Det gäller också om biogasproduktionen är kraftig och gasbubblorna som bildas fastnar i skummet (se avsnitt 5.3.3 och 5.3.5). Enligt Andreas Thunberg, processchef på Käppalaförbundet, (Intervju 19.8.2012) så uppstod skumning då näringsrikt primärslam matades in i rötkamrarna och blandades med sekundärslammet.

Man kan alltså anta att om biogasproduktionen skulle ha varit kraftigare, skulle skumning ha uppstått i det första och tredje försöket, då slamtäcke bildades. Biogasproduktionen var ju då låg eller ingen alls (se avsnitt 8.4.2 och 8.4.3). Omrörningen i de båda testreaktorerna lyckades bra och skapade omrörning också på ytan, så länge slamtäcket inte fanns där. Omrörningen var inte tillräckligt kraftig för att motverka slamtäcket. Slamtäcket var kraftigare i TR1, som var ungefär dubbelt större. Man kan anta att det här berodde på att omrörningen vid ytan inte var lika effektiv pga. den större volymen och därför var slamtäcket kraftigare. Det kan också bero på att i det tredje försöket var andelen fiskrens i substratblandningen högre i TR1 än i TR2.

Fiskrensens har orsakat problem i ”BioBio” och verkade orsaka bildning av slamtäcke i försöken. Skog skriver (2010, s. 35–36) i sitt lärdomsprov för ingenjörsexamen om fiskrensens innehåll. Fiskrensens kvävehalt är hög, vilket inverkar på C/N-kvoten (se avsnitt 4.2.1) och misstänks orsaka skumning (se avsnitt 5.3.8). Fiskrens innehåller också mycket proteiner och fett, vilka båda misstänks orsaka skumning eftersom de är ytaktiva ämnen (se avsnitt 5.3.2). Enligt Massart m.fl. (2006, s. 52) bildas slamtäcke då fett är orsaken till skumningen. Det här beror på att fett är hydrofob och flyter, vilket bildar skummet.

Man kan alltså anta att fiskrens kan ge upphov till skumning, vilket slamtäcket vid första och tredje försöket tyder på. Halten av fettsyror vid start och avslutning av försöken är dock inte känd, eftersom VFA-analyserna som skulle utföras av Ketek har blivit försenade. Förändringen av halterna av fettsyror skulle vara intressanta att känna till i sammanhanget. Åtminstone har fiskrensens de egenskaper som krävs för att bilda slamtäcke och skum.

Det som ytterligare framkommit i hela kapitel 8, konstruktionen och försöken, är att det är möjligt att med en relativt liten budget att enkelt bygga en egen rötreaktor. Till och med de testreaktorer som byggts här, som inte är av konventionell design i och med genomskinligheten, kan byggas av sådana som har kunskap om vad som utgör optimala rötningsförhållanden. Författare som House (2006) har skrivit en bok med syftet att uppmuntra folk till att bygga sina egna rötreaktorer. Det här gäller speciellt bönder (se avsnitt 5.4.5) som genom att röta kan åstadkomma goda effekter med tanke på miljön.

## Källförteckning

### Böcker och rapporter

Appels, L., Baeyens J., Degréve, J. & Dewil, R. (2008). *Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge*. (Progress in Energy and Combustion Science 34 (2008) 755–781) (u.o.).

Arnold, M., Ajanko-Laurikko S., Dahlbo, H., Korjonen, M-R., Mroueh, U-M., Savolainen, I. & Wihersaari, M. (2007). *Uusien jätteenkäsittelykonseptien mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä*. (VTT Research notes 2402) Esbo: VTT.

Baky A., Nordberg Å., Palm O., Rodhe L. & Salomon E. (2006). *Rötrestorer från biogasanläggningar- användning i lantbruket*. (Rapport nr 115) (u.o): JTI-Institutet för jordbruks- och miljöteknik forskar för bättre mat och miljö.

Bates, R., Corning, B., Massart, N. & Neun, G. (2006). *Design and operational considerations to avoid excessive anaerobic digestion foaming*. Kansas, USA: Water Environment Foundation.

Börjesson, P., Tufvesson, L. & Lantz, M. (2010). *Livscykelanalys av svenska Biodrivmedel*. (Rapport SGC 217) (u.o): Svenskt Gastekniskt Center AB.

Carlsson, M. & Uldal, M. (2009). *Substrathandbok för biogasproduktion*. (Rapport SGC 200) (u.o): Svenskt Gastekniskt Center AB.

Dalmau, J., Comas, J., Rodriguez-Roda, I., Latrille, E. & Steyer, J.P. (2009). *Validation of a knowledge-based risk model for biological foaming in anaerobic digestion simulation*. (u.o.): AIAI-2009 Workshops Proceedings.

Dalmau, J., Comas, J., Rodriguez-Roda, I., Pagilla, K. & Steyer, J.P. (2010). *Model development and simulation for predicting risk of foaming in anaerobic digestion systems*. (Bioresource Technology, Volume 101, 16 February 2009, 4306–4314). Publicerad på Elsevier.

Dåverhög, M. & Balmér, P. (2008). *Ultraljudsbehandling, en kostnadseffektiv metod för att gasproduktionen och minska mängden slam*. (Rapport Nr 2008-02). (u.o.): Svenskt Vatten Ab.

Edshammar, L.E. (2002). *Plasthandboken—en materialguide för industrin*. Uppsala: Liber Ab.

Filippenkov, I. (2010). *Yhdyskuntaliitteen linkouksen ja polymeroinnin optimointi Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla*. Lärdomsprov för ingenjörsexamen. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Helsingfors.

Fraser, K.D. (2010). *Increased anaerobic digestion efficiency via the use of thermal hydrolysis*. Thesis for the degree of Master of Science in Environmental Science and Engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.



Frigon, D., Guthrie, R.M., Bachman, T., Royer, J., Bailey, B. & Raskin, L. (2006). *Long-term analysis of a full-scale activated sludge wastewater treatment system exhibiting seasonal biological foaming*. (Waterresearch 40 (2006) 990–1008) (u.o): Elsevier.

Ganidi, N. (2008). *Anaerobic Digestion Foaming Causes*. Thesis for the Degree Of Doctor of Philosophy. Cranfield University, Cranfield.

Ganidi, N., Tyrell, S. & Cartmell E. (2009). *Anaerobic Digestion Foaming Causes—A review*. (Bioresource Technology, Volume 100, Issue 23, December 2009, Pages 5546-5554): Cranfield University: Centre for Water Science, School of Applied Sciences, Cranfield.

Ghildyal, N.P, Lonsane, B.K & Karanth, N.G. (1988). *Foam control in submerged fermentation: State of the art*. Advances in applied microbiology volume 33. (u.o): Academic Press, Inc. (e-bok).

Hellstedt, C., Starberg, K., Olsson, L.E., Hellström, D., Jonsson, L. & Mossakowska, A. (2009). *Ökad biogasproduktion vid Henriksdals reningsverk*. Rapport Nr 4 2009 , WSP samhällsbyggnad.

(2010). *Increased biogas production at the Henriksdal Wastewater Treatment Plant (WWTP)*. Biogasmax integrated project No 019795.

Herbes, C., Moeller, L., Müller, R.A. & Zehnsdorf, A. (2010). *Formation and removal of foam in the process of anaerobic digestion*. (u.o.): Landtechnik 65 (2010), no. 3.

House, D. (eds) (2006). *Biogas handbook*. (u.o): Alternative House Information.

Hug, T. (2006). *Characterization and controlling of foam and scum in activated sludge systems*. A dissertation submitted to the SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH for the degree of Doctor of Technical Sciences.

Hultman, B & Levlin, E. (2003). *Minskning av skumningsproblem och slammängd röt-kammare*. Projektarbete vid Mark och Vattenteknik, KTH.

Isik, F. (2006). *Applicability of ultrasound conditioning of waste activated sludge to reduce foaming potential in the anaerobic digesters* (Preview of thesis for degree of Master of science). Iowa: Iowa State University.

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

Kervinen, J. (2010). *Biokaasulaitteiston suunnittelu, rakentaminen ja validointi*. Lärdomsprov för ingenjörsexamen. Savonia-ammattikorkeakoulu, tekniikka, Kuopio.

Koehler, S.A., Stone, H.A., Brenner, M.P. & Eggers, J. (1998). *Dynamics of foam drainage*. (Physical review E Volume 58, Number 2, August 1998). (u.o.).

Latvala, M. (2009). *Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä—Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT)*. Suomen ympäristökeskus 24/2009, Helsingfors: Edita Prima Oy.

Levlin, E. & Hultman, B. (2008). *Konduktivitetmätningar som mät- och kontrollmetod vid kommunala avloppsanläggningar*. Rapport Nr 2008-04, Svenskt Vatten.

McCarty, P.L. & McKinney, R.E. (1961). *Volatile acid toxicity in anaerobic digestion*. (Journal (Water Pollution Control Federation): Vol. 33, No. 3 (Mar., 1961), pp. 223–232). (u.o.): Water Environment Federation.

Massart, N., Bates, R., Corning, B. & Neun, G. (2006). *Excessive foam is a symptom of unstable digester conditions*. (October 2006) (u.o.): Water Technology & Environment.

Marneri, M., Antoniou, K. & Mamais, D. (2009). *Microthrix Parvicella in mesophilic and thermophilic anaerobic digestion systems at different detention times*. (Proceedings of the 11<sup>th</sup> international conference on environmental science and technology. Changia, Crete, Greece 3–5 September 2009). National Technical University of Athens, Greece.

Moeller, L., Görsch, K., Müller, R.A. & Zehnsdorf, A. (2012). *Formation and suppression of foam in biogas plants—practical experiences*. (u.o.): Landtechnik 67 (2012), no. 2.

Paavola, T. *Biokaasuprosessi—raaka-aineet, tuottokyky, käsittely, prosessi. Maakunnallinen biokaasuseminaari*. Seinäjoki 27.3.2007. [online, PDF] [http://www.cropgen.soton.ac.uk/publications/8%20Other/Oth\\_35\\_Biogas%20seminar\\_Paavola.pdf](http://www.cropgen.soton.ac.uk/publications/8%20Other/Oth_35_Biogas%20seminar_Paavola.pdf) (hämtat: 26.6.2012).

Pérez -Elvira, S., Fdz-Polanco, M., Plaza, F.I., Garralón, G. & Fdz-Polanco, F. (2009). *Ultrasound pre-treatment for anaerobic digestion improvement*. Water and Science Technology 60-6. 2009. (u.o.): IWA Publishing.

(u.f) (2000). *Norstedts stora engelska ordbok - eng-sv/sv-eng*. (u.o.): Norstedts Akademiska Förlag. Läst på MOT: <http://mot.kielikone.fi/mot/novia/netmot.exe?> (hämtat: 6.6.2012).

(u.f.) (2005). *Miljörapport 2005 för Himmerfjärdsverket*. Sydvästra stockholmsregionens va verksaktiebolag—SYVAB.

(2008). *Miljörapport 2005 för Himmerfjärdsverket*. Sydvästra stockholmsregionens va verksaktiebolag—SYVAB.

(2009) *Årsredovisning 2008*. Stockholm: Printfabriken

Skog, S-S. (2010). *Projektet Fiskrens och bifångster*. Lärdomsprov för ingenjörsexamen. Yrkehögskolan Novia, Vasa.

Starberg, K., Karlsson, B., Larsson, J.-E., Moraeus, P. & Linderg, A. (2005). *Problem och lösningar vid processoptimering av röt-kammardriften vid avloppsreningsverk*. VA-Forsk rapport Nr 2005-10, Stockholm: Stockholms Vatten AB.

Söderlund, M. (2011). *Kartläggning av organiska restprodukter i Västerbotten och Österbotten*. Lärdomsprov för ingenjörsexamen. Yrkehögskolan Novia, Vasa.

Van Niekerk, A., Kawahigashi, J., Reichlin, D., Malea, A. & Jenkins, D. (1987). *Foaming in anaerobic digesters: A survey and laboratory investigation*. (Journal (Water Pollution Control Federation): Vol. 59, No. 5 (May., 1987), pp. 249–253). (u.o.): Water Environment Federation. (Hämtad via jstor.org).

Wang L., & Yoon R.-H. (2006). *Effects of Surface Forces and Film Elasticity on Froth Stability*. (u.o.): Preprint 06-07 2006 Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

Viholainen, H. (2010). *Vaihtoehtoiset polttoaineet - Biokaasun käyttö auton polttoaineena ja sen testaus bensinimootorissa*. Lärdomsprov för ingenjörsexamen. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu.

## Elektroniska källor

*Alkalinitet*. <http://www.ne.se/alkalinitet>, Nationalencyklopedin. (hämtat: 31.7.2012)

*Biogas*. Miljöfordon. <http://www.miljofordon.se/miljo/fornybara-drivmedel/biogas> (hämtat: 10.12.2012).

*Biogas av gödsel ger många miljöfördelar*. Artikel publicerad på Biogas Syd juni 2008. <http://www.biogassyd.se/download/18.64075cf012c96962a7d800017426/Biogas+av+g%C3%B6dsel+ger+m%C3%A5nga+f%C3%B6rdelar.pdf> (hämtat: 10.12.2012).

*Biogaspportalen*. <http://biogaspportalen.se>. (hämtat: 24.5.2012).

Bochmann, (2011). *Presentation om Pre-treatment technologies for biogas production, International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Wastes and Energy Crop August 28th–September 01st, 2011*. Hämtat från [http://www.iea-biogas.net/\\_download/publications/workshop/8/4-Feedstock\\_Pretreatment.pdf](http://www.iea-biogas.net/_download/publications/workshop/8/4-Feedstock_Pretreatment.pdf) (hämtat: 20.8.2012).

Broschyr för CAMBI-processen. *Turbocharge your digester–Technology for enhanced anaerobic digestion of municipal and industrial sludge*. Hämtat från: <http://www.cambi.no/photoalbum/view2/P3NpemU9b3JnJmlkPTM2NTY0MSZ0eXB1PT E> (hämtat: 19.9.2012).

Currie, J., (2004) *Advances in egg-shaped digester design enhance life cycle benefits–Sludge Treatment June 2004*. Hämtat från [http://www.cbi.com/images/uploads/technical\\_articles/WWI\\_SLUDGE\\_3.pdf](http://www.cbi.com/images/uploads/technical_articles/WWI_SLUDGE_3.pdf) (hämtat: 22.8.2012).

*Kemikalieinspektionen: Teknisk beskrivning av ämnen; siloxaner*. <http://apps.kemi.se/flodessok/floden/kemamne/siloxaner.htm>. (hämtat: 31.5.2012).

*Julabo MC, Heating circulators*. Användarmanual. <http://www.julabo-gmbh.de/manual/us/19530346.pdf> (hämtat: 19.6.2012).

*Plateau's Law, Wolfram MathWorld*. <http://mathworld.wolfram.com/PlateausLaws.html> (hämtat: 26.6.2012).

*Projektet BioBio:s hemsida*. <http://biobio.novia.fi/>. (hämtat: 31.5.2012).

*Ovivo, broschyr för Sonolyzer*.

[http://www.ovivowater.com/content/files/data/PRD500\\_5e21139a85e24ecf81eef4bca1f26427.pdf](http://www.ovivowater.com/content/files/data/PRD500_5e21139a85e24ecf81eef4bca1f26427.pdf) (hämtat: 21.11.2012).

*Microthrix parvicella* på *zerberus-online*, bild. <http://www.zerberus-online.de/Problematik/Microthrix.html> (hämtat: 26.6.2012).

*Skärgårdshavet och eutrofieringen.*

<http://www.miljo.fi/default.asp?contentid=312466&lan=SV> (hämtat:10.12.2012).

*Surface Tension and Bubbles, Hyperphysics.* <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/surten2.html> (hämtat: 16.11.2012).

*VWR:s produkturval, magneter för omrörning. Magnet med ring:*

[https://fi.vwr.com/app/catalog/Product?article\\_number=442-0501](https://fi.vwr.com/app/catalog/Product?article_number=442-0501). *Plusformad magnet:*

[https://fi.vwr.com/app/catalog/Product?article\\_number=442-0492](https://fi.vwr.com/app/catalog/Product?article_number=442-0492). *Triangelformad*

*magnet:* [https://fi.vwr.com/app/catalog/Product?article\\_number=442-0392](https://fi.vwr.com/app/catalog/Product?article_number=442-0392). (hämtat: 21.5.2012).

*Ytspänning.* <http://www.ne.se/lang/ytspänning>, Nationalencyklopedin. (hämtat: 11.6.2012).

Zafar, S. (2012). *Ultrasound and anaerobic digestion of sewage.* Hämtat från:

<http://www.cleantechloops.com/ultrasound-sonication-in-anaerobic-digestion-industrial-examples/> (hämtat: 27.10.2012).

## Författningssamlingar

Jord- och skogsbruksministeriets förordning om gödselafabrikat 13.2.2007 (12/07).

[www.finlex.fi](http://www.finlex.fi) (hämtat: 30.11.2012)

Rådets direktiv 91/271/EEG av den 21 maj 1991 om rening av avloppsvatten från tätbebyggelse. <http://eur-lex.europa.eu> (hämtat: 3.10.2012).

Rapport från kommissionen till Rådet, Europaparlamentet, Europeiska Ekonomiska och sociala kommittén och Regionkommittén - om genomförande av rådets direktiv 91/271/EEG av den 21 maj 1991 om rening av avloppsvatten från tätbebyggelse, ändrat genom kommissionens direktiv 98/15/EG av den 27 februari 1998. <http://eur-lex.europa.eu> (hämtat:3.10.2012).

## Intervjuer

Besök vid Syvab, Himmerfjärdsverket i Grödinge, Sverige och intervju med processingenjör Elin Åfeldt 18.6.2012 om anläggningens funktion och främst skumning.

Intervju via e-post 16.8.2012 med Christer Laurell, processingenjör vid Henriksdals reningsverk (Stockholms Vatten VA) i Nacka, Sverige.

Telefonintervju 19.7.2012 med Andreas Thunberg, processchef på Käppalaförbundet i Stockholm, Sverige, om skumningsproblem vid biogasanläggningen.

Telefonintervju 21.9.2012 med Nisse Lithén, anläggningschef för biologisk behandling vid Stormossens biogasanläggning i Korsholm, Finland.

## **Tidningsartiklar**

Jungell, N. Samhällets restprodukter kan gödsla skogen. *Skogsbruket* (11/2011), s. 23.

## **Interna dokument för Yrkeshögskolan Novia**

*Egenskaper för substrat som används i BioBio.* Resultat från analyser och rötningar gjorda i projektet BioBio av Thomas Andersson.

*Från bioavfall till bionäring–Hållbara kretslopp med rötning och gödsling.* Projektplan för tiden 15.01.2009 – 31.12.2011, förlängning av projekttiden till 31.3.2013. Internt dokument.