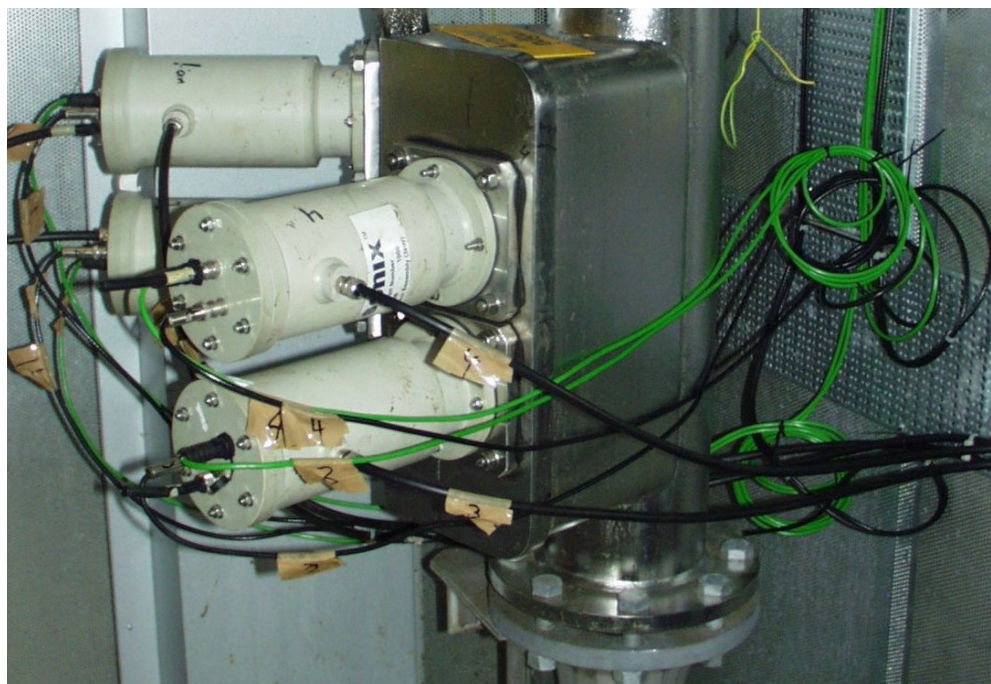


# Metoder för slamhydrolys

*Åsa Davidsson  
Karin Jönsson  
Jes la Cour Jansen  
Erik Särner*





# Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten Utveckling (SV-Utveckling) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna, vilket är unikt på så sätt att statliga medel tidigare alltid använts för denna typ av verksamhet.

SV-Utveckling (fd VA-Forsk) initierades gemensamt av Svenska Kommunförbundet och Svenskt Vatten. Verksamheten påbörjades år 1990. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten  
Ledningsnät  
Avloppsvatten  
Ekonomi och organisation  
Utbildning och information

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

|                           |                                 |
|---------------------------|---------------------------------|
| Anders Lago, ordförande   | Södertälje                      |
| Olof Bergstedt            | Göteborg Vatten                 |
| Roger Bergström           | Svenskt Vatten AB               |
| Per Fåhraeus              | Varberg                         |
| Carina Färm               | Mälarenergi                     |
| Daniel Hellström          | Stockholm Vatten AB             |
| Mikael Medelberg          | Roslagsvatten AB                |
| Marie Nordkvist Persson   | Sydvatten                       |
| Bo Rutberg                | Sveriges Kommuner och Landsting |
| Ulf Thysell               | VA-verket i Malmö               |
| Susann Wennmalm           | Käppalaförbundet                |
| Einar Melheim, adjungerad | NORVAR, Norge                   |
| Peter Balmér, sekreterare | Svenskt Vatten AB               |

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

Svenskt Vatten Utveckling  
Svenskt Vatten AB  
Box 47607  
117 94 Stockholm  
Tfn 08-506 002 00  
Fax 08-506 002 10  
svensktvatten@svensktvatten.se  
www.svensktvatten.se

*Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.*

|                                                        |                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Rapportens titel:</b>                               | Metoder för slamhydrolys                                                                                                                                                                                               |
| <b>Title of the report:</b>                            | Methods for sludge hydrolysis                                                                                                                                                                                          |
| <b>Rapportens beteckning<br/>Nr i serien:</b>          | 2008-09                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Författare:</b>                                     | Åsa Davidsson, Karin Jönsson, Jes la Cour Jansen och Erik Särner, VA teknik, Institutionen för Kemiteknik, Lunds Tekniska Högskola                                                                                     |
| <b>Projektnr:</b>                                      | 23-122                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Projektets namn:</b>                                | Metoder för slamhydrolys                                                                                                                                                                                               |
| <b>Projektets finansiering:</b>                        | Svenskt Vatten Utveckling (f.d. VA-Forsk)                                                                                                                                                                              |
| <b>Rapportens omfattning<br/>Sidantal:<br/>Format:</b> | 39<br>A4                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Sökord:</b>                                         | Slam, hydrolys, avloppsvatten, rötning, kolkälla                                                                                                                                                                       |
| <b>Keywords:</b>                                       | Sludge, hydrolysis, waste water, anaerobic digestion, carbon source                                                                                                                                                    |
| <b>Sammandrag:</b>                                     | Det finns många metoder för hydrolys av slam. Projektets syfte har varit att studera olika metoders tekniska status och användningsområden. En kartläggning av vilka metoder som används i fullskala har också gjorts. |
| <b>Abstract:</b>                                       | Many methods for sludge hydrolysis can be found. The purpose of this project was to study technical status and use of different methods. A survey of methods that are used in full-scale was also compiled.            |
| <b>Målgrupper:</b>                                     | VA-verk, VA-konsulter, forskare                                                                                                                                                                                        |
| <b>Omslagsbild:</b>                                    | Ultraljudsanläggning på reningsverket i Kävlinge. Fotograf: Åsa Davidsson                                                                                                                                              |
| <b>Rapporten beställs från:</b>                        | Finns att hämta hem som pdf-fil från Svenskt Vattens hemsida <a href="http://www.svensktvatten.se">www.svensktvatten.se</a>                                                                                            |
| <b>Utgivningsår:</b>                                   | 2008                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Utgivare:</b>                                       | Svenskt Vatten AB<br>© Svenskt Vatten AB                                                                                                                                                                               |

# Förord

Många svenska kommunala avloppsvatten har en kvalitet som försvårar användning av biologiska processer för avskiljning av näringsämnen. Detta har lett till ett ökat intresse för hydrolys av slam för produktion av lättnedbrytbara organiska föreningar, vilka kan användas vid biologiska processer för kväve- och/eller fosforavskiljning. Slamhydrolys kan också användas för att minska volymbehovet vid rötning och till att minska slammängderna.

Det finns många metoder för hydrolys av slam. Projektets syfte har varit att kartlägga de olika metodernas tekniska status samt i vilket syfte metoderna används. En kartläggning av vilka metoder som används i full skala har också gjorts. Avsikten med projektet är att kunskaperna om hydrolysmetoder samt möjligheterna att använda dessa för att effektivisera driften skall öka vid de kommunala avloppsreningsverken.

Arbetet har i huvudsak genomförts som en litteraturstudie. Besök vid några anläggningar har emellertid också genomförts. Ett stort tack till personalen på reningsverken i Kävlinge och Nästved som ställt upp med studiebesök och svarat på frågor.

Studien har finansierats genom bidrag av Svenskt Vatten Utveckling och har genomförts vid VA-teknik, Institutionen för Kemiteknik, Lunds Tekniska Högskola.

Lund i oktober 2007

Åsa Davidsson  
Karin Jönsson  
Jes la Cour Jansen  
Erik Särner



# Innehåll

|                                                                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Förord</b> .....                                                                     | <b>3</b>  |
| <b>Sammanfattning</b> .....                                                             | <b>7</b>  |
| <b>Summary</b> .....                                                                    | <b>8</b>  |
| <b>1 Inledning</b> .....                                                                | <b>9</b>  |
| 1.1 Bakgrund .....                                                                      | 9         |
| 1.2 Projektets mål .....                                                                | 9         |
| <b>2 Nedbrytning av organiska partiklar</b> .....                                       | <b>11</b> |
| 2.1 Biologisk hydrolys av organiska partiklar .....                                     | 12        |
| <b>3 Litteraturgenomgång av metoder</b> .....                                           | <b>14</b> |
| 3.1 Förbehandlingsmetoder för nedbrytning av stora organiska<br>föreningar i slam ..... | 14        |
| 3.2 Mekaniska metoder.....                                                              | 14        |
| 3.3 Termisk och kemisk hydrolys .....                                                   | 18        |
| 3.4 Biologisk hydrolys .....                                                            | 21        |
| 3.5 Kombinerad behandling .....                                                         | 25        |
| <b>4 Erfarenheter från anläggningar i fullskala</b> .....                               | <b>26</b> |
| 4.1 Studiebesök på Kävlinge avloppsreningsverk, Sverige .....                           | 27        |
| 4.2 Studiebesök på Centralrenseanlægget i Næstved, Danmark ...                          | 28        |
| <b>5 Utvärdering av hydrolysmetoder</b> .....                                           | <b>30</b> |
| <b>6 Diskussion</b> .....                                                               | <b>32</b> |
| <b>Referenser</b> .....                                                                 | <b>34</b> |





# Sammanfattning

Ökade reningskrav vid avloppsvattenbehandling har resulterat i ökade behov av kolkälla till denitrifikation och biologisk fosforavskiljning. De ökade kraven har också gett större slammängder samtidigt som sluthantering av slammet är ett stort problem. Gemensamt för de två problemställningarna är att s.k. slamhydrolys, där organiska partiklar bryts ned till löst, lättomsättbart material, kan bidra till att reducera eller lösa problemen. Genom att förbehandla med slamhydrolys innan rötning kan en ökad nedbrytningsgrad fås. Andra positiva effekter som kan fås är ökad biogasproduktion, förbättrade avvattningsegenskaper, mindre skumbildning i rötammaren, kortare uppehållstid och patogenreduktion. Slamhydrolys kan även användas för att internt producera kolkälla som behövs vid biologisk rening av kväve och fosfor.

Det finns många metoder för hydrolys av slam. Metoderna är baserade på mekaniska, kemiska, termiska och biologiska principer och har utvecklats i laboratorium, pilot- och fullskala. Projektets syfte har varit att studera olika metoders tekniska status och användningsområden. I första hand har litteraturuppgifter använts även om besök har skett vid ett fåtal anläggningar. Uppgifter om kostnader och energiförbrukning presenteras i litteraturen på flera olika sätt och är dessutom knapphändiga och oftast ofullständiga. Någon utvärdering av kostnaderna för metoderna har därför inte varit möjlig att göra.

Många slambehandlingsmetoder med syfte att förbättra rötningen och minska slammängden har testats i laboratorieförsök. Fullskaleerfarenheterna är begränsade till några anläggningar och det är framförallt några få metoder som är representerade. I Norden finns främst Cambiprocessen (termisk hydrolys) och ultraljudsanläggningar att finna i fullskala.

Det finns en hel del fullskaleerfarenheter från slamhydrolys för att producera kolkälla. Bara i Sverige finns det ett tiotal reningsverk som använder hydrolys för att generera kolkälla till intern användning. De flesta använder kolkällan för att avskilja kväve, men ett par reningsverk producerar kolkälla för biologisk fosforavskiljning.

Slamhydrolys på reningsverk har god potential att förbättra reningen och samtidigt reducera miljöbelastningen genom minskad kemikalieanvändning och reducerad slammängd. Det finns många metoder som är lovande. Ytterligare forskning och utveckling inom området kommer emellertid att krävas för att få effektivare metoder som t.ex. kräver mindre tillsatser av kemikalier och har lägre energibehov.

Det är svårt att utifrån de jämförelser av olika metoder som gjorts säga något generellt om vilken metod som är bäst. Olika metoder har visat sig mest effektiva i olika jämförande studier. I flera laboratoriestudier har det visat sig fördelaktigt att kombinera olika behandlingsmetoder för att få en bättre nedbrytning av slammet än vad som fås med separat behandling. Kombinationer av kemiska och mekaniska metoder samt kombinationer av termiska och kemiska metoder har gett goda resultat.

## Summary

Stricter discharge requirements for wastewater treatment plants have resulted in higher need for carbon source for denitrification and biological phosphorus removal. Stricter requirements brings about higher sludge amounts, meanwhile, final disposal of sludge is a problem. Both problems can be reduced or solved by sludge hydrolysis, where organic particles are broken down to dissolved, easy degradable material. Pre-treatment with sludge hydrolysis before digestion can increase the degradation rate. Other positive effects can be higher biogas production, improved dewatering, reduced foaming, shorter retention time and pathogen reduction. Sludge hydrolysis can also be used for internal production of carbon source that is needed for biological treatment of nitrogen and phosphorus.

There exist many methods for sludge hydrolysis. The methods are based on mechanical, chemical, thermal and biological principles and have been developed in laboratory, pilot scale and full scale. The aim of this project was to study the technical status and use of different methods. Information and data from literature was mainly used even though a few full scale plants were visited. Costs and energy demands for the methods are presented in various ways in the literature and the information is often brief and incomplete. Therefore it has not been possible to evaluate the methods economically.

Many sludge treatment methods have been tested in laboratory to improve digestion and reduce the sludge amount. The experiences from full scale installations are limited to some plants where in particular some methods are represented. In the Nordic countries are mainly found plants with the Cambi process (thermal hydrolysis) or ultra sonic installations.

There exist quite a lot of experiences from full scale sludge hydrolysis for production of carbon source. About ten Swedish wastewater treatment plants produce carbon source by internal hydrolysis. Most plants use the carbon source to remove nitrogen and a few use it for biological phosphorus removal.

Sludge hydrolysis at wastewater treatment plants has a high potential for improving the treatment and in the same time reduce the load on the environment by decreased chemical use and reduced sludge amount. Many methods are promising. However, more research and development in the field is needed to get more efficient methods with e.g. lower chemical demand and lower energy demand.

It can not be concluded which method is the best based on the comparisons of different methods found in literature. Different methods have shown out to be the most effective in different comparisons. In several laboratory studies combined treatment has been advantageous compared to separate treatment concerning increased sludge degradation. Especially combinations of chemical and mechanical methods and combinations of thermal and chemical methods have showed good results.

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Ökade reningskrav vid avloppsvattenbehandling har resulterat i kraftigt ökade slammängder. På grund av diskussioner om slammets innehåll av tungmetaller, smittämnen etc. har det blivit allt svårare att ”kvittbli” slammet och den önskade recirkulationen av näringsämnen till jordbruksmark genom användning av slammet för näringstillförsel kan mer sällan utnyttjas. Det har därför blivit av allt större intresse att minska de producerade slammängderna.

Huvuddelen av det vid kommunala avloppsreningsverk i Sverige producerade slammet behandlas i en anaerob process, en s.k. rötkammare. Ett sätt att minska slammängderna är att öka rötkammarens effektivitet, dvs. öka nedbrytningen av den organiska delen av slammet. Den delprocess som begränsar den totala nedbrytningshastigheten och därmed effektiviteten vid rötningen är den s.k. hydrolysen, dvs. nedbrytningen av stora organiska föreningar till bl.a. organiska syror.

Ökade reningskrav har också resulterat i att nya reningsprocesser utvecklats, vilka dels effektivt kan möta de nya kraven och dels göra driften billigare och mer miljöriktig. Dessa nya reningsprocesser ställer större krav på avloppsvattnets kvalitet och olika metoder används och har föreslagits för att förändra kvaliteten i önskvärd riktning. Främst gäller detta biologisk kväve- och fosforavskiljning, där tillgången på lättnedbrytbara organiska föreningar i kommunala avloppsvatten ofta är för knapp.

Ett sätt att öka nedbrytningshastigheten vid anaerob behandling (rötning) av slam är att förbehandla slammet så att en nedbrytning av svårnedbrytbara organiska föreningar till mer lättnedbrytbara sker. En sådan förbehandling kan antingen användas för att påskynda och öka nedbrytningen av slammet i den fortsatta anaeroba behandlingen eller för produktion av lättnedbrytbara organiska föreningar, vilka kan användas vid biologisk kväve- och/eller fosforavskiljning. I det senare fallet ”tvättas” slammet så att de lösta, lättnedbrytbara organiska ämnena frigörs med slamvattnet.

Också andra fördelar kan nås vid förbehandling av slam. Följande fördelar rapporteras sammanfattningsvis kunna nås:

- Ökad nedbrytning och därmed minskade slammängder vid rötning.
- Snabbare nedbrytning vid rötning resulterande i minskat volymbehov.
- Minskade problem med skumning vid rötning.
- Förbättrade avvattningsegenskaper.
- Förbättrad och billigare drift vid biologisk kväve- och/eller fosforavskiljning genom tillförsel av lättnedbrytbara organiska ämnen.
- Förbättrade sjunkegenskaper och minskad skumning i aktivslamprocessen genom tillförsel av lättnedbrytbara organiska ämnen.
- Ökad patogenreduktion

## 1.2 Projektets mål

Projektets ursprungliga mål har varit att:

- kartlägga vilka hydrolysmetoder som används praktiskt och vilket syfte användningen har
- kartlägga den tekniska statusen för de olika metoder som används
- sammanställa de driftserfarenheter som finns tillgängliga
- bedöma de ekonomiska förutsättningarna för att använda de olika metoderna

Vid projektets genomförande har i första hand litteraturuppgifter använts, även om besök har skett vid ett fåtal anläggningar. Detta innebär att den sammanställning av anläggningar i fullskala som presenteras endast omfattar anläggningar som beskrivits i litteraturen och som varit tillgängliga genom normal litteratursökning.

Uppgifter om kostnader, energiförbrukning etc. presenteras i litteraturen på flera olika sätt och är svåra att jämföra. De är dessutom knapphändiga och oftast ofullständiga. Någon fullständig bedömning av kostnaderna för de olika metoderna har därför inte varit möjlig att göra.

Hydrolys för att producera lättnedbrytbara organiska ämnen och för att minska slammängderna vid avloppsreningsverk har först under de senaste åren aktualiserats och erfarenheterna från fullskaledrift

är relativt få. Ett intensivt forsknings- och utvecklingsarbete pågår runt om i världen. Denna rapport skall därför ses som en sammanställning över de metoder som för närvarande är intressanta och som är eller kan bli aktuella för försök eller drift i full skala. Metoder som enbart handlar om att förbättra slamavvattning har ej medtagits. Någon rekommendation om vilken

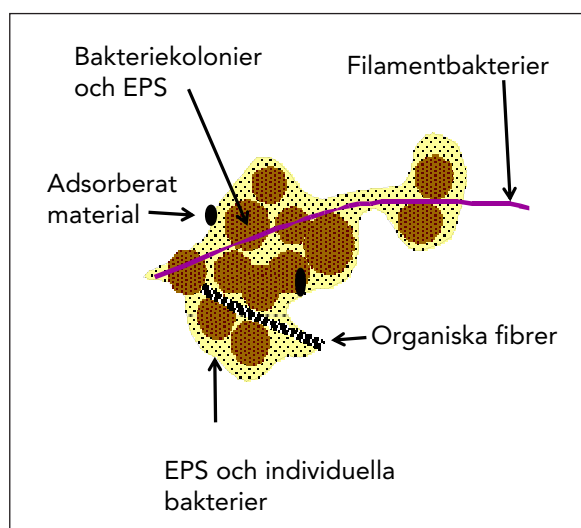
eller vilka metoder som bör användas kan inte ges. Detta beror också på att förutsättningarna varierar från plats till plats, t.ex. vad gäller tillgängliga volymer vid reningsverket, avloppsvattnets kvalitet, reningskrav, möjligheten att utnyttja producerad biogas och att få avsättning för slammet etc.

## 2 Nedbrytning av organiska partiklar

Hydrolys av slam är i första hand en fråga om att ge enzymer tillgång till organiska ämnen och att få rätt enzym att fungera. Storleken på partiklarna och vilka komponenter de består av är därför väsentlig. Stora partiklar betyder att enzymerna bara har en relativt liten yta att angripa och processen går långsamt. Fett, proteiner, socker m.m. kräver olika enzymer för nedbrytningen och bryts ner till skilda mindre komponenter. Partiklar i inkommande avloppsvatten är kompakta (kaffesump, cellulosa fibrer från toalettpapper, växtdelar, fettpartiklar, bakterier m.m.) och ger ett inhomogent primärslam. Överskottsslam är i sin tur ett mer homogent material med slamflockar av relativt jämn storlek och sammansättning, men inte så kompakta. Det är därför väsentligt att se på de två typerna av slam separat i relation till hydrolys. Inga detaljstudier av primärslams sammansättning eller partikelstorleksfördelning i det avskilda slammet har hittats; medan det finns flera detaljstudier av överskottsslam. Tabell 1-1 ger dock en sammanställning av de två slamtyperna (Weemaes och Verstraete, 1998). Det ses att halten av fett är större i primärslam och att energiinnehållet är högre.

Kunskapen om överskottsslam är mer omfattande. Den största delen av bioslam utgörs av slamflockar som är motståndskraftiga mot nedbrytning. En betydande

del av det organiska materialet består av cellväggar som hindrar åtkomsten av det intracellulära materialet. Konceptuellt kan slamflockar beskrivas som visat i Figur 2-1. Slamflockarna består av partiklar (bakterier, organiskt material från inkommande avloppsvatten och oorganiska partiklar) sammanbundna av extracellulära polymerer. Fördelningen av det organiska materialet beror naturligtvis i hög grad på det aktuella verkets avloppsvatten och process; men i den organiska delen av slammet utgör de extracellulära polymererna >50 %, levande bakterier 10-20 % och annat organiskt material 10-30 %.



Figur 2-1. Beskrivning av den typiska slamflockens struktur. (Utarbetad och översatt från figur av Per Halkier Nielsen.)

Tabell 1-1. Sammanställning av karakterisering av primärslam och överskottsslam. (Utarbetad och översatt från Tchobanoglous och Burton, 1991).

| Parameter                               | Primärslam | Aktivt slam |
|-----------------------------------------|------------|-------------|
| Torrsubstans (TS), %                    | 2,0–8,0    | 0,83–1,16   |
| Glödförlust (VS), % av TS               | 60–80      | 59–88       |
| Fett, % av TS                           | 13–65      | 5–12        |
| Protein, % av TS                        | 20–30      | 32–41       |
| Kväve, % av TS                          | 1,5–4      | 2,4–5,0     |
| Fosfor, % av TS                         | 0,17–0,6   | 0,6–2,3     |
| Kalium, % av TS                         | 0–0,41     | 0,2–0,29    |
| Cellulosa, % av TS                      | 8–15       | –           |
| pH                                      | 5–8        | 6,5–8,0     |
| Alkalinitet, mg/l som CaCO <sub>3</sub> | 500–1500   | 580–1100    |
| Organiska syror, mg/l som HAc           | 200–2000   | 1100–1700   |
| Energiinnehåll (MJ/kg TS)               | 23,2–29    | 18,6–23,2   |

Hydrolys kan betraktas som en fråga om reduktion av partikelstorlek följt av enzymatisk utlösning av organiska ämnen. Hydrolys beskrivs därför ofta med mätning av löst organisk substans, vanligtvis COD eller TOC; men även som nedbrytning av protein (vanligast), kolhydrat och fett. Ibland används även partikelstorleksförändring eller avledda effekter t.ex. reduktion, biogasproduktion, nedbrytningsgrad, avvattningsegenskaper eller slutlig TS-halt.

Naturligtvis går även andra substanser i lösning när partiklarna reduceras i storlek och de organiska molekylerna bryts ner till lösta ämnen. Vanligtvis är endast utlösningen av kväve i form av ammonium av betydelse.

## **2.1 Biologisk hydrolys av organiska partiklar**

Hydrolys av slam innebär alltid en biologisk process då enzymer bryter ner partiklar till lösliga föreningar. Processen sker under aeroba, anoxa och anaeroba förhållanden; men i det aktuella sambandet är den anaeroba hydrolysen mest intressant eftersom de bildade hydrolysisprodukterna är användbara i en lång rad sammanhang. Hydrolys under anoxa förhållanden skapar hydrolysisprodukter som är direkt användbara till denitrifikation och de hydrolysisprodukter som bildas vid aerob hydrolys bryts ned under syreförbrukning.

### **Aerob hydrolys**

Aerob hydrolys är en integrerad del av aerob behandling av avloppsvatten; men då hydrolysisprodukterna snabbt oxideras kan de inte användas till andra ändamål. Processen ger dock ett väsentligt bidrag till slamreduktion. I vissa processer utnyttjas den bildade processvärmen som förvärmning i ett försteg till en egentlig anaerob behandling.

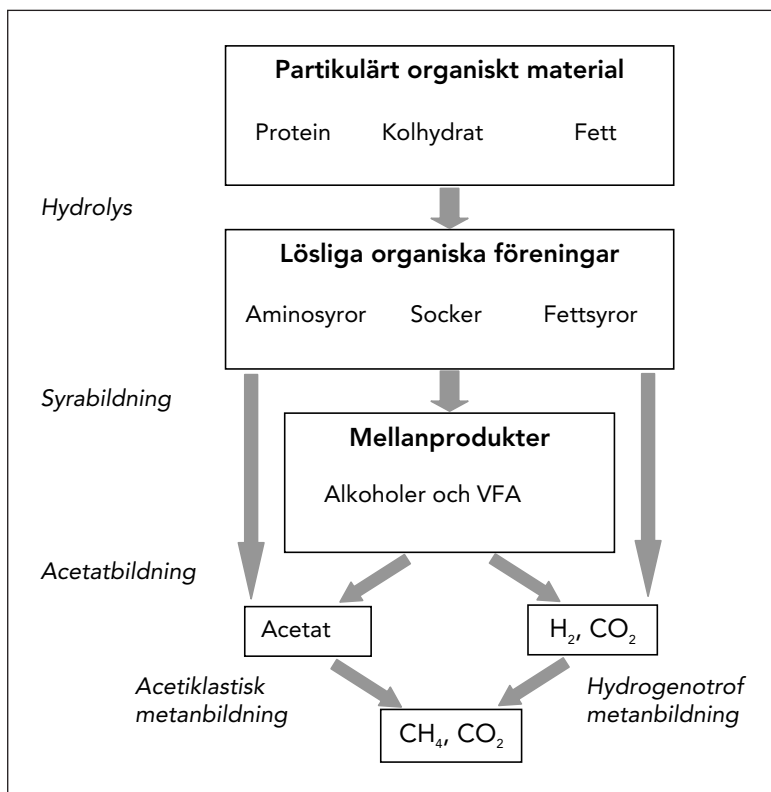
### **Anox hydrolys**

Hydrolys under anoxa förhållanden finns i anläggningar med biologisk kväveavskiljning och hydrolysisprodukterna används snabbt till denitrifikation. Denitrifikationsprocessen är normalt mycket snabbare än hydrolysisprocessen och därmed ses inte hydrolysisprodukter i form av lösta organiska ämnen, men reduktion av nitrat och produktion av ammonium kan ofta ses.

### **Anaerob hydrolys**

Anaerob nedbrytning av organiskt material sker i fyra steg vid syrefria förhållanden, hydrolys, syrabildning, acetatbildning och metanbildning (se Figur 2-2). Hydrolysen utgör det första steget och innebär att större organiska föreningar bryts ned med hjälp av extracellulära hydrolytiska enzymer till mindre, lösliga föreningar. Hydrolysissteget är ofta det hastighetsbegränsande steget då det organiska materialet i hög grad förekommer i partikulär form. Det hydrolyserade organiska materialet används i syrabildningssteget för att producera framförallt acetat, väte, koldioxid och flyktiga fettsyror med hjälp av fermenterande bakterier eller anaeroba oxiderande organismer. Vid acetatbildningen bryts fettsyror ned till acetat, väte och koldioxid. Vid metanbildningen utnyttjas tidigare producerad koldioxid, väte och acetat för att bilda metan och koldioxid.

Genom att kontrollera temperatur och uppehållstid kan den anaeroba nedbrytningen begränsas till hydrolys och syrabildningsstegen, utan att involvera metanbildarna. På detta sätt kan man ur slammet generera en lättnedbrytbar kolkälla som kan användas för närsaltsavskiljning.



Figur 2-2. Nedbrytning av organiskt material i fyra steg vid anaeroba förhållanden. (Utarbetad och översatt från García-Heras 2002; Gujer och Zender 1983).



## 3 Litteraturgenomgång av metoder

### 3.1 Förbehandlingsmetoder för nedbrytning av stora organiska föreningar i slam

Flera metoder används och har föreslagits och testats för att bryta ned större organiska föreningar till mindre och mer lättnedbrytbara. En uppdelning i mekaniska och icke-mekaniska metoder kan göras enligt nedan.

### 3.2 Mekaniska metoder

Hydrolysen/sönderdelningen av stora organiska föreningar påverkas dels av nedbrytningen av stora molekyler till mindre och dels av partiklarnas tillgänglighet för nedbrytning. Nedbrytningen av stora molekyler kan ökas genom att skapa gynnsamma förhållanden för organismer för produktion av de enzymer som bryter ned molekyler. Nedbrytningen av stora partiklar kan emellertid också ske med hjälp av fysikaliska metoder. Partiklarnas tillgänglighet för nedbrytning är bland annat beroende av vilken yta som är exponerad för enzymerna. Stora partiklar har en liten exponerad yta i förhållande till massan och ger därför en långsam nedbrytning. En sönderdelning av partiklarna till mindre delar ger därför en ökad hydrolyshastighet. Om sönderdelningen dessutom resulterar i att cellväggar förstörs kommer cellinnehållet att bli direkt tillgängligt för nedbrytning.

Mekaniska metoder kan användas för att sönderdela stora organiska partiklar till mindre, varvid den yta som blir tillgänglig för t.ex. enzymangrepp ökar. Man har vid försök visat att den biologiska nedbrytningshastigheten ökar ju mindre partiklarna är. Den totala nedbrytningen förändras emellertid inte. Vid rötning av bioslam krävs en lång uppehållstid för att nedbrytningsgraden skall bli hög. Trots detta bryts oftast endast 40 till 50 % av den organiska delen av slammet ned.

En minskning av partikelstorleken i slammet skulle kunna minska erforderlig uppehållstid vid rötning. Den normalt relativt låga nedbrytningsgraden beror dels på att en del av den organiska fraktionen är svårnedbrytbar och dels på att en del celler, främst fakultativa anaeroba organismer, inte påverkas av rötningen (Müller m.fl., 1998). För att öka nedbrytningsgraden kan mekaniska metoder användas för att bryta sönder cellerna så att cellinnehållet frigörs.

Mekanisk sönderdelning av celler används vid bioteknisk framställning av produkter, där produkterna frigörs från cellerna genom att dessa slås sönder. Metoden kan också användas för behandling av slam före rötning. Vid den mekaniska sönderdelningen av slammet uppnås två saker: partiklar sönderdelas så att den yta som blir tillgänglig för nedbrytning ökar och cellväggar slås sönder så att cellinnehållet frigörs och kan brytas ned. Målet är att öka nedbrytningshastigheten och därmed minska erforderlig uppehållstid i rörtkammaren vilket även minskar volymbehovet. Samtidigt ökar nedbrytningsgraden om celler slås sönder, vilka annars inte bryts ned vid rötningen. Detta resulterar i en minskad slammängd. (Palmowski och Müller, 2000; Hartmann m.fl., 2000)

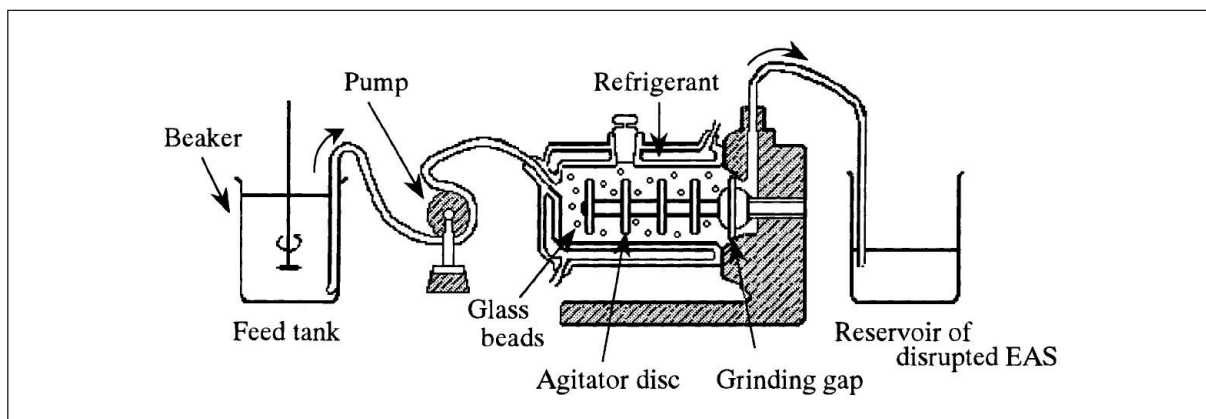
### Kvarnar

Det finns ett antal olika sätt att behandla slammet mekaniskt. Ett sätt är att behandla slammet i kvarnar eller med roterande knivar etc. Slammet utsätts därvid för höga skärspänningar, varvid stora partiklar sönderdelas och celler kan slitas sönder så att cellinnehållet frigörs.

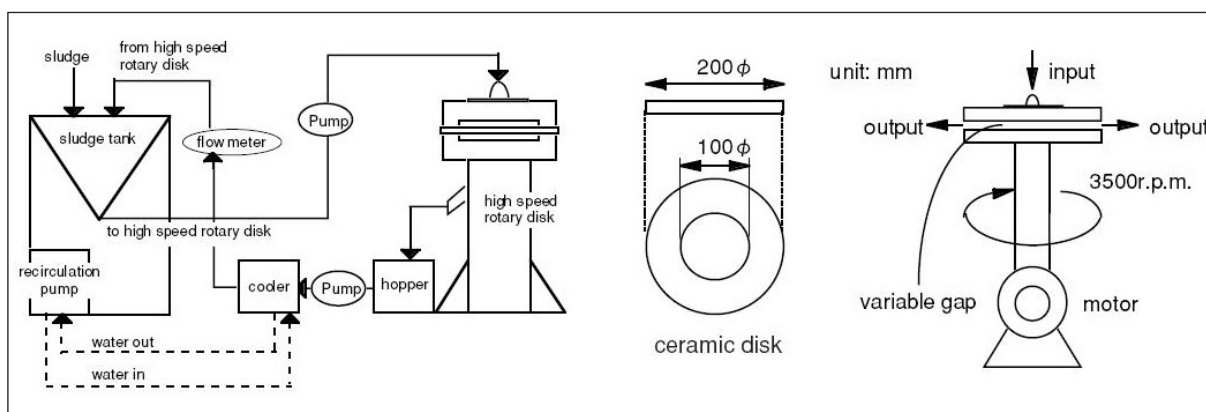
En hög grad av sönderdelning av bioslammet, mätt som ökningen av halten löst TOC (total organic carbon) i förhållande till den ursprungliga totalhalten TOC, erhöles vid försök i laboratorieskala vid användning av en kulkvarn (Jung m.fl., 2001). Olika typer av kulor med olika storlek kan användas. I detta fall användes glaskulor med en storlek på 0,5 mm och rotationshastigheten 3200 rpm. Vid processen utvecklas värme, varför kylning måste kunna ske. En principskiss över en kulkvarn visas i Figur 3-1 (nästa sida).

I en undersökning konstaterades att vid användning av kulkvarn erhöles bäst resultat när små kulor (0,2–0,25 mm jämfört med 1–1,5 mm) användes (Baier och





Figur 3-1. Principskiss över kvarn med roterande skivor och glaskulor. (Från Jung m.fl., 2001, med tillstånd från Elsevier).



Figur 3-2. Försöksuppställning för metoden med roterande skiva som beskrivs av Imai m.fl. (2003). (Med tillstånd från prof. Tsuyoshi Imai, Yamaguchi University).

Schmidheiny, 1997). Behandling i kulkvarn visades vara väsentligt effektivare än användning av en kvarn med snabbt roterande knivar. Nedbrytningen vid den efterföljande rötningen var dock inte helt proportionell mot ökningen av löst COD vid förbehandlingen. Orsaken är troligen att allt frigjort COD inte är lättnedbrytbart. Nedbrytningsgraden vid rötning ökade dock markant vid användning av förbehandling.

Ett annat sätt att utsätta slammet för höga skärspänningar är att använda en roterande skiva mot en fast skiva. Principen framgår av Figur 3-2. Metoden utnyttjades i en laboratoriestudie, där en rotationshastighet på 3500 rpm användes (Imai m.fl., 2003). Slammet pumpades in mellan skivorna, där avståndet kunde varieras mellan 200 och 500  $\mu\text{m}$ . Slammet cirkuleras mellan 25 och 50 gånger över anläggningen och kylning kunde ske om temperaturen blev för hög. Resultaten visade att ökningen av halten löst COD var störst om avståndet mellan plattorna var litet. Vid ett avstånd på 200  $\mu\text{m}$  ökade halten från ca 10 till drygt 250 mg/l vid behandling av aktivt slam.

## Centrifugering

Vid användning av en förtjockningscentrifug kunde en sönderdelning av celler erhållas genom att en speciell utrustning placerades i slutet av centrifugen (Dohányos m.fl., 1997). Genom att cellinnehåll frigjordes stimulerades den efterföljande anaeroba nedbrytningen samtidigt som tillgången på lättnedbrytbara organiska ämnen ökade. Vid laboratorieförsöken ökade metanproduktionen med i medeltal drygt 30 % vid rötning av aktivt slam, medan motsvarande ökning vid rötning av en blandning av aktivt slam och primärslam blev knappt 15 %. Den använda utrustningen hade fördelen att slamvattnet inte påverkades av den mekaniska sönderdelningen, eftersom sönderdelningen skedde där det förtjockade slammet lämnade centrifugen. En annan väsentlig fördel var att energiåtgången för sönderdelningen var obetydlig när den kombinerades med förtjockningen. Fullskaleerfarenheter från behandling med denna centrifug har rapporterats av Zábanská m.fl. (2006). Driftserfarenheter från tre

reningsverk med utrustningen installerad följdes under en längre period. Resultaten visade på ökad specifik biogasproduktion (15–26 %) och ökad nedbrytning av organiskt material vid rötningen.

## Tryckhomogenisering

Om slammet pumpas under högt tryck genom ett munstycke (högtryckshomogenisering) underskrids ångbildningstrycket lokalt och bubblor bildas. När trycket senare minskar kollapsar bubblorna, varvid starka krafter sliter sönder partiklar och celler. I en pilotstudie användes vid pumpning av aktivt slam ett tryck som varierade från 10 till 40 bar (Nah m.fl., 2000). Slammet pumpades genom ett munstycke mot en platta, varvid slammet också utsattes för stora krafter vid kollisionen med plattan. Utrustningen visas schematiskt i Figur 3-3. Halten löst COD ökade nära linjärt med trycket från ca 200 mg/l före behandlingen till ca 800 mg/l vid trycket 40 bar. I en efterföljande rötning kunde uppehållstiden halveras med bibehållen effektivitet. Liknande resultat erhöles vid försök med jämförbar metod i laboratorieskala (Engelhart m.fl., 2000). Försök i England i laboratorie- och pilotskala har också gett lovande resultat (Winnfors, 2004).

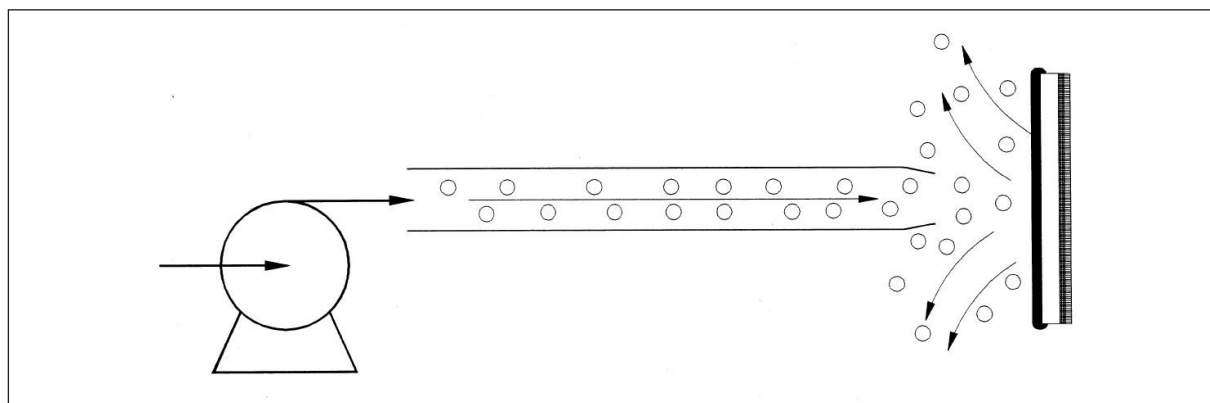
I en jämförande laboratorieundersökning där olika förbehandlingsmetoder testades gav användning av högtryckshomogeniseringen ökning av gasproduktionen med ca 20 % vid behandling av aktivt slam (Barjenbruch och Kopplow, 2003; Kopplow m.fl., 2004b). Man kunde också visa att de filament som fanns i slammet sönderdelades fullständigt, vilket emellertid inte medförde att skumningen upphörde i den efterföljande rötningsprocessen. Skälet till

skumningen var troligen slammets innehåll av extracellulära polymerer. Genom högtryckshomogenisering och rötning ökade recirkulationen av framför allt kväve jämfört med rötning utan förbehandling.

På Käppalaverket, Lidingö har en homogeniseringsutrustning (Biogest<sup>TM</sup>) testats. Anläggningen består av en bufferttank och en Biogestdysa. Principen bygger på att slammet pumpas in i bufferttanken och sedan genom dysan med 10–12 bars tryck där det kaviterar och sedan återgår till atmosfärstryck när det kommer tillbaka till bufferttanken. Utrustningen testades i fullskala dels genom att behandla överskottsslam innan rötning för att minska skumning p.g.a. filamentbildande bakterier och dels genom att behandla en delström av det rötade slammet för att öka nedbrytningen i röt-kammaren. Det första försöket med överskottsslam visade på en positiv effekt på mängden löst COD i slammet och på filamentlängden. Emellertid var inte effekten från behandlingen tillräcklig eftersom skumningsproblem uppstod vid rötningen. Vid det andra försöket (behandling av delvis rötat slam) utvärderades specifik gasproduktion och nedbrytningsgrad i röt-kammaren. Det gick inte att urskilja någon tydlig effekt av Biogestbehandlingen på dessa parametrar. (Sundin, 2006)

## Ultraljud

Genom att utsätta slammet för högfrekventa akustiska signaler, dvs. behandla slammet med ultraljud, skapas zoner med så lågt tryck att ångbildningstrycket underskrids och bubblor bildas (kavitation). Bubblorna växer i storlek och kollapsar, varvid starka mekaniska krafter sliter sönder cellerna. Mekanismen för att åstadkomma de krafter som behövs för cellernas sönderdelning är



Figur 3-3. Schematisk bild över högtryckshomogenisering. (Från Nah m.fl., 2000, med tillstånd från Elsevier).

således desamma som vid högtryckshomogenisering. Tiehm m.fl. (2001) konstaterade att användningen av låga frekvenser genererade större bubblor, vilka vid kollapsen resulterade i stora mekaniska krafter och alltså var mer effektiva än användningen av höga frekvenser, som gav små bubblor.

Vid användning av ultraljud (31 kHz) med hög intensitet kunde uppehållstiden vid röttningsförsök i pilotskala minskas från 22 dygn till 8 dygn med bibehållen nedbrytningsgrad (Tiehm m.fl., 1997). Halten löst COD ökade kraftigt vid ultraljudsbehandlingen och partikelstorleken i slammet minskade. Vid bibehållen uppehållstid (22 dygn) ökade nedbrytningsgraden av organiska ämnen från ca 45 % för icke förbehandlat slam till ca 50 % för ultraljudsbehandlat slam, dvs. den totala slammängden kunde minskas. Liknande resultat rapporteras av Onyeché m.fl. (2002) vid laboratorieförsök. Vid dessa försök användes ultraljud med frekvensen 20 kHz. Man konstaterade emellertid att mer energi åtgick för behandlingen med ultraljud än vad som vanns vid den ökade metanproduktionen.

I en studie konstaterades att halten löst COD ökade väsentligt mindre av behandling med ultraljud än vid tillsats av enzymer (Davidsson och la Cour Jansen, 2006). Vid efterföljande rötning ökade dock metanproduktionen signifikant för det ultraljudsbehandlade slammet, medan ökningen av metanproduktionen inte var i proportion till den ökade halten löst COD för det enzymsbehandlade slammet.

En kombination av ultraljud och tillsats av alkali visades i en laboratoriestudie öka produktionen av VFA vid behandling av aktivt slam för syrabildning. Kombinationen var effektivare än enbart behandling med alkali. Förhållandet VFA:COD ökade från 10 % till mellan 66 och 84 % vid behandling med alkali och ultraljud. (Chiu m.fl., 1997).

Ultraljud (25 kHz) med så låg intensitet att ångbildningsstrycket inte underskreds och bubblor således inte bildas har visats öka reaktionshastigheten vid biologisk rening av industriella avloppsvatten. Vid försöken, vilka utfördes i laboratorie- och pilotskala, användes en effekt varierande mellan 0 och 1,5 W/m<sup>3</sup> avloppsvatten. För låg eller för hög effekt gav försämrade resultat. Nedbrytningshastigheten kunde höjas med över 100 %. Mekanismerna är inte klarlagda. (Schläfer m.fl., 2000; Schläfer m.fl., 2002).

I en laboratorieundersökning av Ek (2005) studerades effekten från ultraljudsbehandling av bioslam (420W, 6 min, 20 kHz, 8,4 kWh/m<sup>3</sup>) på efterföljande

rötning. Ultraljudsbehandlingen gav en ökning i gasproduktion motsvarande 13 %. Det konstaterades att mer energi åtgår för ultraljudsbehandlingen än vad som potentiellt kan uppnås i form av ökad metanproduktion från slammet vid den aktuella torrsubstanshalten (3,5 %). Torrsubstanshalten i slammet bedömdes behöva höjas till över 5 % för att nå en energimässig nettovinst.

Ultraljud har visats påverka polymerer så att de blir effektivare vid förtjockning och avvattning av aktivt slam (Bien och Wolny, 1997). Experiment med polymer och ultraljud, separat och i kombination, visade att ultraljud påverkar polymerens uppbyggnad så att bättre avvattning uppnås. Nödvändig behandlingstid och intensitet för optimal avvattning var beroende av typ av polymer.

## Jämförelse av mekaniska metoder

I en laboratoriestudie jämfördes fyra olika mekaniska metoder för förbehandling av aktivt slam före rötning (Kopp m.fl., 1997; Müller m.fl., 1998). Slammet, vilket hade en TS-halt varierande från 0,8 till 1,5 %, behandlades i kulkvarn, med högtrycksmunstycke, med skärspänning med användande av roterande skivor samt med ultraljud. Effekten jämfördes genom att mäta "sönderdelningsgraden", vilken beräknades genom att mäta slammets syreupptagningsförmåga före och efter behandlingen. (Syreupptagningsförmågan sjönk vid behandlingen, eftersom sönderdelade celler inte kan förbruka syre.) Resultaten vid försöken visade att en hög sönderdelningsgrad kunde nås med alla metoderna utom med hjälp av skärspänning med roterande skivor. Energibehovet för att nå en hög sönderdelningsgrad varierade dock kraftigt mellan metoderna. Ultraljudbehandlingen krävde nära 10 gånger så mycket energi som behandlingen med högtrycksmunstycke, medan behandlingen med kulkvarnen var något effektivare än ultraljudsbehandlingen. För att nå en hög sönderdelningsgrad vid behandlingen med högtrycksmunstycke krävdes en energitillsats på ca 2 kWh/kg SS. Erforderlig energi påverkades dock av slammets TS-halt och energitillsatsen per kg TS kunde minskas om det behandlade slammet höll en högre TS-halt. Vid röttningsförsök i laboratorieskala konstaterades att uppehållstiden kunde kortas väsentligt genom den mekaniska förbehandlingen och att utröttningsgraden ökade. Vid avvattning av det rötade slammet nåddes

högre TS-halt när rötning av det mekaniskt förbehandlade slammet hade skett, men polymeråtgången ökade också. Genom att nedbrytningsgraden ökade frigjordes också mer av det kväve som bundits i slammet.

### 3.3 Termisk och kemisk hydrolys

Detta stycke innefattar huvudsakligen metoder som termisk behandling, kemisk behandling och termokemisk behandling. Termisk behandling sönderdelar cellväggen, vilket frigör cellinnehållet som görs tillgängligt för biologisk nedbrytning. Kemisk behandling av slam görs framförallt genom att tillsätta syra eller bas för att lösa upp slammet. Även ozonering är en form av kemisk behandling där slammet oxideras antingen med ozon eller med fria hydroxylradikaler som bildas av ozonet.

#### Termisk behandling

Termisk behandling av slam genom värmetillförsel kan ändra slamstrukturen. Genom att mikroorganismernas cellmembran bryts ned vid uppvärmningen frigörs vattenlösligt cellinnehåll och därigenom ökar andelen löst organiskt material. Det har i en undersökning med blandslam (70 % kemslam och 30 % bioslam) (Barlindhaug och Ødegaard, 1996) visats att kolhydrater bryts ned lättast och att proteiner lättast övergår i löst form medan fett är opåverkat av termisk hydrolys. I en annan undersökning (Li och Noike, 1992) med termisk hydrolys av överskottslam (aktivt slam) visade det sig lättare att bryta ned kolhydrater än proteiner och svårast att bryta ned fett. Termisk behandling av slam användes till en början för att förbättra avvattningen men har senare utnyttjats som förbehandlingsmetod innan rötning för att öka gasproduktionen eller för att internt producera kolkälla för reduktion av näringsämnen vid reningsverken. En termisk behandling kan även leda till en hygienisering av slammet genom att patogener dödas vid hög temperatur. Termisk förbehandling har även kombinerats med högtrycksbehandling eller kemisk behandling.

Framförallt hydrolys av slam vid höga temperaturer (> 100 grader) har visat sig sönderdela slammet och

lösa ut organiskt material (Li och Noike, 1992; Müller, 2001; Kim m.fl., 2003; Kopplow m.fl., 2004b). Eftersom höga temperaturer kräver stor energiåtgång har emellertid även termisk behandling vid lägre temperaturer (< 100 °C) undersökts och visat sig ge betydande effekt t.ex. på biogasproduktionen vid efterföljande rötning (Wang m.fl., 1997; Barjenbruch och Kopplow, 2003; Skiadas m.fl., 2005).

Barlindhaug och Ødegaard (1996) undersökte inverkan från parametrar som temperatur, pH, torrsubstanshalt och uppehållstid på andelen löst COD vid termisk hydrolys av slam (kemslam + bioslam). Resultaten visade att ökad temperatur har störst inverkan, en höjd temperatur ökar andelen COD som löses ut i slammet. En ökad uppehållstid har en positiv effekt på andelen löst COD vid lägre temperatur (160 °C) men inte vid högre temperatur (200 °C). Effekten av att tillsätta syra för att sänka pH blir på liknande sätt också störst vid hydrolys vid lägre temperatur. Halten torrsubstans var mindre betydande eftersom halten löst COD bara ökade i begränsad omfattning när TS-halten i slammet sänktes från 4,9 % till 3,4 %. Det konstateras också att slammets ursprung och innehåll har stor betydelse för hydrolysggraden i form av t.ex. löst COD och att optimala hydrolysförhållanden är individuella för varje reningsverk (Barlindhaug och Ødegaard, 1996)

I en undersökning med termisk behandling av slam vid olika temperaturer av Li och Noike (1992) sågs att ökningen av löst COD blir större ju högre temperatur som används vid förbehandlingen. Högre temperaturer (upp till 170 °C) gav också positiv effekt på nedbrytningen av organiskt material och omvandlingen till metan vid rötning. Vid temperaturer över 170 °C kan det emellertid bildas för rötningsprocessen svårnedbrytbara och/eller hämmande organiska föreningar. Vid rötning av förbehandlat slam (170 °C och 60 min) fördubblades gasproduktionen jämfört med obehandlat slam. Den positiva effekten på rötningen från den termiska behandlingen förklarades av tre fenomen: 1) en stor del av det partikulära materialet hydrolyserades till lösta enkla föreningar; 2) flyktiga fettsyror (som kan utnyttjas i den anaeroba processen) producerades och 3) det återstående partikulära materialet blev mer tillgängligt för hydrolyserande bakterier i rötprocessen.

Det finns och har funnits flertalet fullskalanläggningar (Neyens och Baeyens, 2003) med termisk hydrolys. Tre processer med olika syfte har främst förekommit: Porteous, Zimpro och Cambi.



**Porteous** – processen utvecklades huvudsakligen för att förbättra avvattningen av slammet innan förbränning. Processen består av en uppvärmning till 185–200 °C i ca 30 min. Under 60-talet fanns ett trettioåtal anläggningar i drift (Storbritannien och USA). Under 70-talet stängdes samtliga p.g.a. höga energikostnader och driftsproblem.

**Zimpro** – denna process var ursprungligen en kontinuerlig våtoxideringsprocess vid 250 °C, med fullskaleanläggningar i USA och Storbritannien. P.g.a. problem med bl.a. lukt och korrosion stängdes alla anläggningar. Numera finns Zimpro i modifierad form för behandling av avloppsslam; lågtrycksoxidation vid temperatur <200 °C.

**Cambi** – processen innebär att slammet satsvis utsätts för en kombination av hög temperatur och tryck (ca 165 °C och 6 bar) före rötning. Flera fullskaleanläggningar finns i drift sedan mitten av 90-talet (Panter och Kleiven, 2005), se Tabell 4-1. Erfarenheterna från dessa visar att processen kan förbättra rötningen och avvattningen av avloppsslam.

I en studie av Skiades m.fl. (2005) jämfördes en vanlig termofil rötprocess med en process bestående av termisk förbehandling vid 70 °C under två dygn och efterföljande termofil rötning (Figur 3-4). De två processtyperna applicerades både på primärslam och på sekundärslam. Den termiska förbehandlingen gav ökad metanproduktion för båda slamtyperna (11 % för primärslammet och 38 % för sekundärslammet). Dessutom gav den termiska behandlingen en total avdödning av fekala streptokocker.

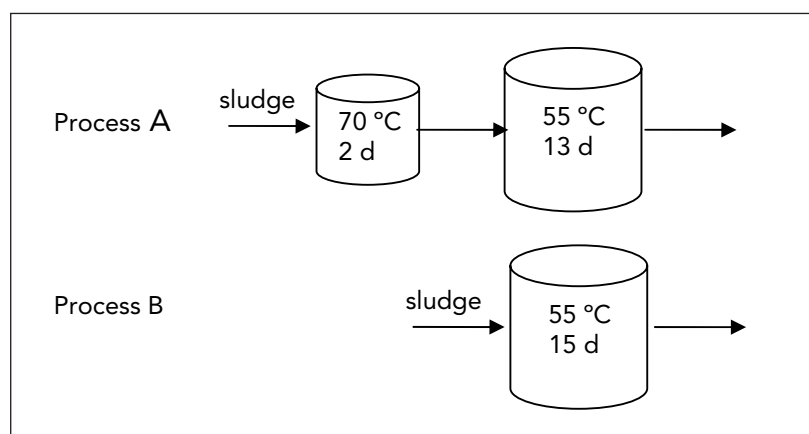
En termisk förbehandling innan rötning bestående av uppvärmning av överskottsslam till 121 °C i 30 min

studerades av Kim m.fl. (2003). Resultaten från röt-försöken visade att denna termiska behandling leder till en ökning av biogasproduktionen med 35 % och en ökning i nedbrytningsgrad motsvarande 57 %.

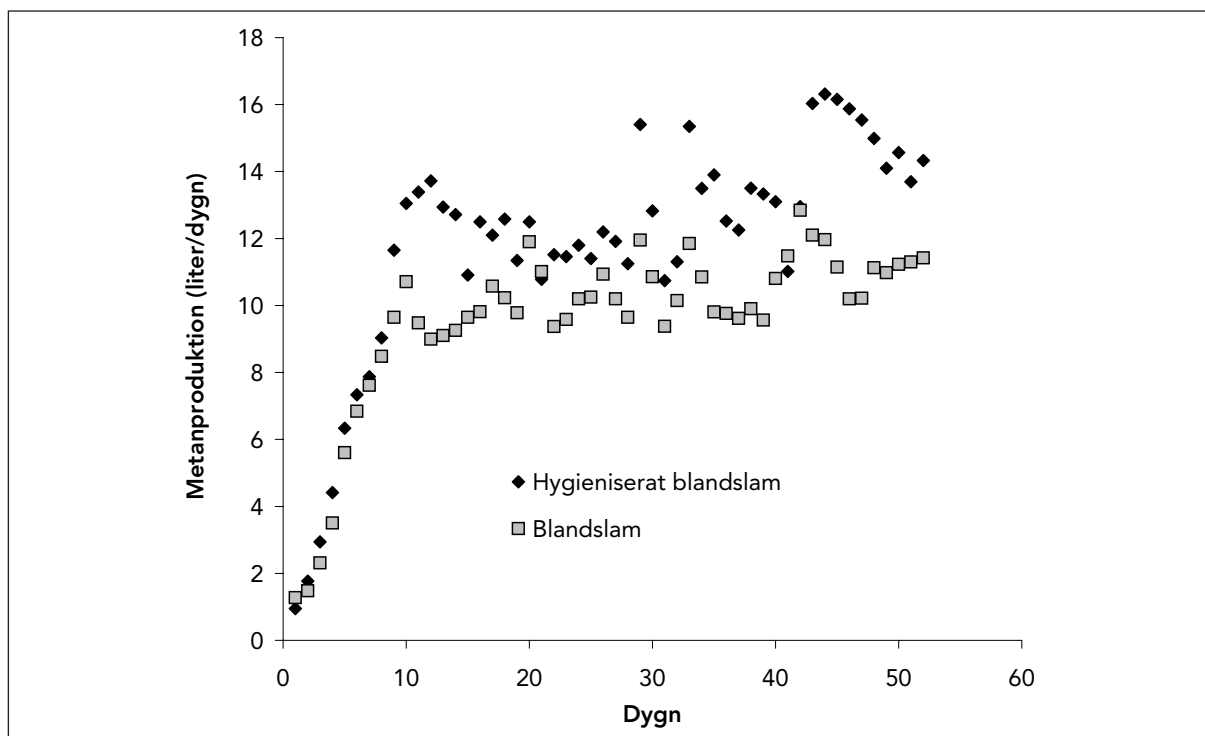
Termisk förbehandling (80, 90 och 121 °C) av slam (60 % bioslam och 40 % primärslam) innan rötning testades i Tyskland av Barjenbruch och Kopplow (2003). De termiskt behandlade slammerna gav högre gasproduktion och nedbrytningsgrad än obehandlat slam vid rötning. Den termiska behandlingen visade sig också reducera skumningsproblemen. Behandlingen vid 121 °C medförde att skumtäckets försvann helt.

Rötningsförsök med blandslam (primärslam + bioslam 50:50) som hygieniserats vid 70 °C i en timme finns redovisade i Davidsson och la Cour Jansen (2006). Resultaten visar på att behandlingen leder till en ökning av andelen löst COD från 5 % till 12 % och en ökning av metanutbytet motsvarande 20 % vid rötning (se Figur 3-5, nästa sida).

Snabb termisk behandling genom upphettning till hög temperatur (100–220 °C) under väldigt kort tid (10–30 s) har även undersökts (Zheng m.fl., 1998). Upphettning av överskottsslam till 220 °C under 30 s ledde till att 55 % av de fasta ämnena löstes upp. Vid röt-försök gav denna behandling av slammet en gasproduktionsökning motsvarande 80 % jämfört med obehandlat slam. Snabb termisk behandling har även studerats av Štěpová (2005). Erfarenheterna från drift i fullskala visar på ökad nedbrytning av organiskt material vid rötning av förbehandlat slam och en minskning av patogenmängden efter rötning.



Figur 3-4. Kontinuerliga processer som undersökts av Skiades m.fl. (2005).



Figur 3-5. Metanproduktion per dygn under kontinuerlig rötning av obehandlat blandslam och hygieniserat (70 °C i 1 timme) blandslam.

## Kemisk hydrolys

Genom att tillsätta kemikalier, t.ex. en stark syra eller ett oxidationsmedel, kan cellväggarna förstöras, varvid cellinnehållet frigörs. Vanliga kemiska föreningar som används är natriumhydroxid (NaOH), kaliumhydroxid (KOH), magnesiumhydroxid ( $Mg(OH)_2$ ), kalciumhydroxid ( $Ca(OH)_2$ ), ozon ( $O_3$ ), väteperoxid ( $H_2O_2$ ) och olika syror. De mest studerade kemiska metoderna är tillsats av natriumhydroxid respektive ozonbehandling. I en studie av Kim m.fl. (2003) studerades effekten av olika basiska tillsatser (NaOH, KOH,  $Mg(OH)_2$  och  $Ca(OH)_2$ ) vid pH 12. Natriumhydroxid och kaliumhydroxid visade sig ha störst effekt på andelen utlöst COD (40 % resp 37 %). Vidare undersöktes effekten av olika koncentration av NaOH. Andelen löst COD ökar kraftigt i takt med att NaOH-koncentrationen ökar upp till 7 g/l. Därefter är ökningen i löst COD svagare. Liknande resultat har redovisats av Penaud m.fl. (1999), som också undersökt COD-löslighet hos slam efter kemisk hydrolys (NaOH, KOH,  $Mg(OH)_2$  och  $Ca(OH)_2$ ). I båda studierna konstateras det att monohydroxider leder till högre andel löst COD än dihydroxider. Förklaringen till detta är förmodligen att dihydroxiderna inte löses upp i lika hög grad som monohydroxiderna. I studien av Penaud m.fl. (1999) konstaterades att NaOH-tillsats

vid dos över 10 g/l gav en negativ inverkan på nedbrytningen vid anaeroba förhållanden, p.g.a. bildandet av svårnedbrytbara föreningar.

Ozonering av slam har visat sig effektivt för att hydrolysera slam. Ozon är ett starkt oxiderande ämne som reagerar med organiskt material på två olika sätt; indirekt och direkt. När ozonet löser sig i vatten kommer en del av ozonet att finnas kvar som löst  $O_3$  och en del används för att bilda fria hydroxylradikaler ( $\bullet OH$ ) (Carballa m.fl., 2007). Organiskt material bryts ned direkt genom oxidation med löst  $O_3$  och indirekt genom oxidation med de fria hydroxylradikalerna. Båda reaktionerna sker simultant och oberoende av varandra, men hydroxylradikaler är ett starkare oxidationsmedel än ozon.

I en undersökning av Weemaes m.fl. (2000) testades ozonering av blandslam vid olika ozondoser (0,05–0,2 g  $O_3$ /g COD). Slam som behandlats med dosen 0,1 g  $O_3$ /g COD visade sig ge 80 % högre metanproduktion och mycket snabbare nedbrytning än obehandlat slam vid rötning. Högre ozondoser än 0,1 g/g COD gav inte en betydande större effekt på rötningen.

Att ozonering är effektivt för att frigöra COD i slam och därmed öka biogasproduktionen rapporteras även av Carballa m.fl. (2007). COD-lösligheten ökade med 60 % och specifika metanproduktionen ökade med 25 % vid mesofil rötning, men bara 5 %

vid termofil rötning. Undersökningen visade emellertid på försämrade avvattningsegenskaper hos slammet efter ozonbehandling. Kostnaden för en ozonbehandling vid använd dos (20 kg O<sub>3</sub>/ton TSS) uppskattades motsvara 2–4 % av totala kostnaden för slambehandling på verket.

## Termokemisk hydrolyys

Genom att kombinera kemisk och termisk hydrolyys kan goda resultat uppnås vid lägre temperaturer än för enbart termisk hydrolyys. Generellt sätt verkar syratillsats öka lösligheten hos slam både vid lägre och högre temperaturer (Weemaes och Verstraete, 1998). Även tillsats av basiska ämnen i samband med värmetillförsel har undersökts med varierande effekt på slammets löslighet. Tillsats av NaOH under värmetillförsel visade sig ge goda resultat på COD-lösligheten i undersökningar av Penaud m.fl. (1999) och Kim m.fl. (2003).

Termisk, kemisk och termokemisk hydrolyys av två olika slam jämfördes i en studie av Tanaka m.fl. (1997). De två undersökta slammen skiljde sig i ursprung genom att det ena slammet bestod av överskottsslam från ett reningsverk som mestadels renar avloppsvatten från hushåll och det andra bestod av överskottsslam från ett reningsverk som renar avloppsvatten från både hushåll, industrier och affärsverksamheter. Den termokemiska kombinationen (130 °C i 5 min och tillsats av 0,3 g NaOH per g VSS) visade sig ge bäst resultat i form av löst organiskt material och ökning av metanproduktionen. Behandlingen gav en utlösning av organiskt material (VSS) motsvarande 35 % (för slammet från blandat avloppsvatten) och 70 % (för slammet från hushållsavloppsvatten). Metanproduktionsökningen jämfört med obehandlat slam var i de två fallen 100 % (för slammet från blandat avloppsvatten) respektive 30 % (för slammet från hushållsavloppsvatten). Behandlingen löste ut organiskt material från slammet (med ursprung från hushållsavlopp) i form av både kolhydrater (90 %), fett (61 %) och protein (6 %).

Hydrolyskinetik vid förbehandling av slam vid 50–90 °C och pH 8–11 studerades av Vlyssides och Karlis (2004). Två faser med distinkt olika hydrolyshastighet kunde urskiljas vid förbehandling. Under den första behandlingstimmen var hydrolyshastigheten hög och därefter (2–10h) följde en långsammare hydrolyys. Resultaten indikerade dessutom att kolhydrater hydrolyseras först, följt av aminosyror och

protein och till sist fetter och lipider. Rötförsöken visade att nedbrytningen av slam som behandlats vid lägre temperatur och pH var större än nedbrytningen av slam som behandlats vid hög temperatur och högt pH.

Kreproprocessen, som är en termokemisk behandlingsmetod för slam, bygger på att slammet behandlas termiskt (150 °C) vid lågt pH. Behandlingen ger en utlösning av metaller, fosfor samt en del kväve och organiskt material i form av hydrolysat. Ca 40 % av slammets organiska substans går i lösning (Eliasson m.fl., 2000). De olika komponenterna skall sedan kunna avskiljas genom olika separationsprocesser och återanvändas/återvinnas. Kreproprocessen testades i en pilotanläggning på Öresundsverket i Helsingborg under en period. Då anläggningen kräver en hög investeringskostnad samt tillsats av kemikalier finns den ej i fullskala idag.

## Behandling med elektriska impulser

Om cellerna i slammet utsätts för snabba elektriska spänningsvariationer bryts cellväggarna upp, varvid cellinnehållet frigörs. Behandling av slammet i pulserande elektriska fält har visats kunna resultera i öppna porer i cellen och därmed celldöd och frigörande av cellinnehållet (Kopplow m.fl., 2004a; Kopplow m.fl., 2004b). Behandlingsmetoden gav en ökad nedbrytningsgrad vid röttningsförsök i laboratorieskala. Energi-användningen för det pulserande elektriska fältet var drygt 40 kWh/m<sup>3</sup> slam. Gasutbytet blev väsentligt högre än när högtryckshomogenisering med en energi-användning på drygt 15 kWh/m<sup>3</sup> slam användes. Torrsubstanshalten hos det behandlade slammet var 4–5 %.

## 3.4 Biologisk hydrolyys

Vid biologisk slambehandling utnyttjas den naturliga biologiska nedbrytningen i slammet, vilken underlättas genom att förbättra villkoren för mikroorganismerna eller genom att tillföra hydrolysbakterier eller enzymer.

## Aerob hydrolylys

En aerob biologisk slamhydrolylys i form av autotermisk behandling före rötning har undersökts av Ward m.fl. (1998). Metoden går ut på att luft eller syre tillsätts under ett separat steg (ca 24 h) varvid exoterma aeroba reaktioner medför värmeavgång så att slammets temperatur höjs till 50–60 °C. Metoden har visats sig ha god effekt på avdödning av patogener. Däremot visade den aktuella studien att effekten på efterföljande rötning (vid mesofil temperatur) är ganska låg. Endast någon procents ökning av nedbrytningsgraden erhöles generellt och endast vid en längre uppehållstid i rötningen erhöles en något höjd gasproduktion.

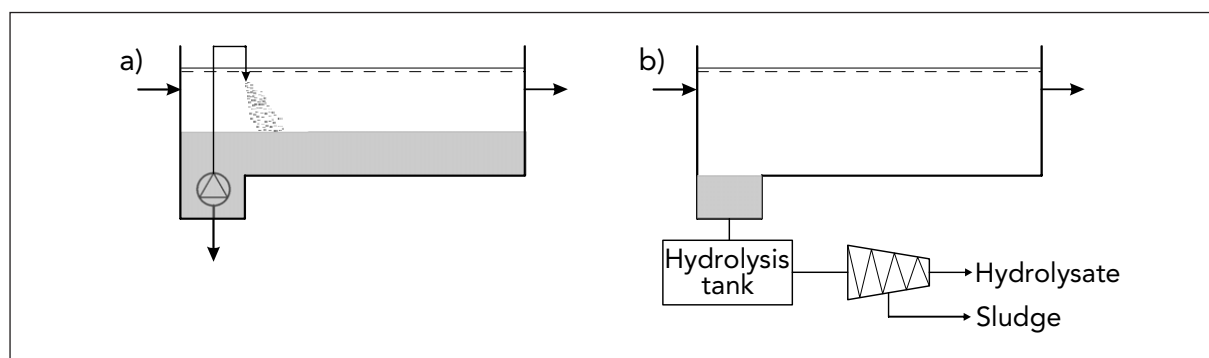
Biologisk hydrolylys av aktivt slam med hjälp av aeroba bakterier har jämförts med termokemisk hydrolylys vid NaOH-tillsats (7 g/l) vid 121 °C i 30 min. (Park m.fl., 2005). En flerstegsrötprocess bestående av ett hydrolylyssteg (termokemisk eller biologisk), ett syrabildningssteg och ett metanbildningssteg utvärderades. Resultaten visade att båda hydrolylysmetoderna förbättrade halten löst COD efter hydrolylys, nedbrytningsgraden och metanutbytet. Den termokemiska behandlingen var snabbare och effektivare än den biologiska, men är också dyrare genom tillsats av både kemikalier och energi.

## Anaerob hydrolylys

För en stabil drift av biologisk kväve- och fosforavskiljning krävs tillräcklig tillgång på lättomsättligt organiskt material, men i svenskt kommunalt avloppsvatten är den tillgängliga mängden oftast otillräcklig. Den *totala* mängden organiskt material är emellertid oftast tillräcklig i avloppsvattnet, men eftersom mycket av det är svårnedbrytbart är det inte direkt användbart

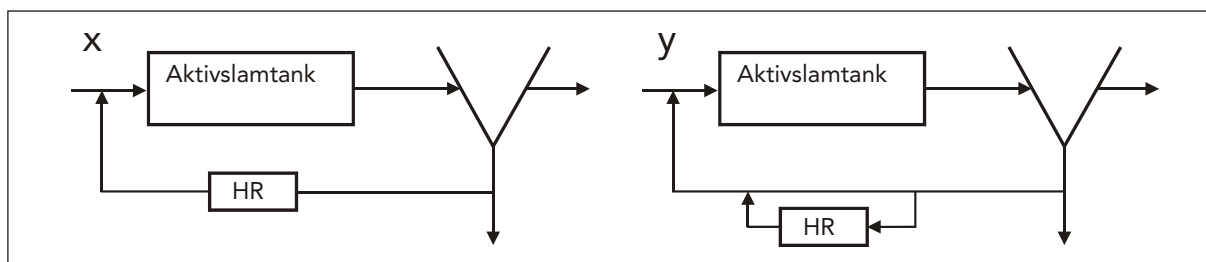
för denitrifikation eller biologisk fosforavskiljning. Anaerob hydrolylys kan användas för att producera lättomsättligt organiskt material från primärslam eller returslam och enligt en undersökning av Nikolić och Sundin (2006) utnyttjar redan ett tiotal reningsverk den möjligheten. Sju verk (Kungsbacka, Landskrona, Nyköping, Helsingborg, Arvika, Borås och Kalmar) av de 66 som ingick i undersökningen använder intern hydrolylys för att stabilisera kväveavskiljningsprocessen medan ytterligare två använder hydrolylys för att skapa möjligheter att driva en bio-P-process. (Gävle och Surahammar). I t.ex. Helsingborg används hydrolylyprodukterna till både biologisk kväve- och fosforavskiljning.

Primärslamshydrolylys kan i princip anordnas på två sätt, se Figur 3-6. I alternativ a hålls slammet kvar längre än i en vanlig försedimentering så att ett slamlager bildas på botten. I slamlaget kommer anaerobi att råda och hydrolylys att ske. För att sedan tvätta ur de bildade lösta hydrolylyprodukterna lyfts slammet från slamfickan till just under vattenytan t.ex. med hjälp av en dränkbar pump. Lösta föreningar kommer då att följa med vattenströmmen till nästa steg medan slammet sedimenterar igen. Avskiljningen av slam kommer dock inte att bli fullständig varför en ökad halt suspenderat material är att förvänta i det försedimenterade vattnet. I alternativ b pumpas primärslam till en separat hydrolylystank och därefter separeras hydrolylysatet från slammet t.ex. genom centrifugering. Denna s.k. sidströmshydrolylys är enklare att kontrollera än huvudströmshydrolylys (alternativ a) eftersom sidströmshydrolylys drivs oberoende av vattenflödet. Driftsoperatören kan välja var och när kolkällan ska doseras och dessutom anpassa den doserade mängden till ett varierande behov. En inledande studie på Klagshamns avloppsreningsverk av primärslamshydrolylys visade att ca 55 % av det externa kolbehovet kan ersättas med



Figur 3-6. Två processlösningar för primärslamshydrolylys. a) Hydrolyysen sker i huvudströmmen. b) Hydrolyysen sker i en separat tank.





Figur 3-7. Schematisk beskrivning av två olika sätt att arrangera returslamshydrolys. HR = Hydrolysreaktor.

internt producerad kolkälla (Jönsson m.fl., 2007). Bouzas m.fl. (2002) ger exempel på avloppsreningsverk där mellan 30 och 90 % av det externa kolbehovet kunnat ersättas med hydrolysisprodukter.

Även returslamshydrolys kan i princip anordnas på två sätt, se Figur 3-7. I alternativ x leds hela returslamflödet via den anaeroba hydrolysreaktorn medan bara en del av returslamsflödet hydrolyseras i alternativ y.

En stor fördel med returslamshydrolys jämfört med primärslamshydrolys är att slammet och hydrolysisprodukterna inte behöver skiljas åt efter reaktionen. Först och främst betyder det färre installationer och enklare drift, men det innebär även att 100 % av den producerade kolkällan kan utnyttjas. Vid primärslamshydrolys kommer en väsentlig del av hydrolysatet att finna sig i slamfasen efter separationen. Endast ca 75 % av hydrolysatet kan avskiljas och utnyttjas för närsaltsavskiljning om slammet förtjockas från 2 % TS till 8 % TS.

Enligt Vollertsen m.fl. (2006) har nästan 30 danska reningsverk infört returslamshydrolys eller testat det i full-skala enligt alternativ y under det senaste decenniet i syfte att gynna biologisk fosforavskiljning (bio-P). Aktivslamtanken har i dessa fall varit anoxisk/aerob och det för bio-P-processen nödvändiga fosforsläppet har skett i den anaeroba hydrolystanken. Erfarenhet från dessa anläggningar visar att de bästa resultaten uppnås om 4–7 % av returslamflödet leds in i hydrolystanken och om uppehållstiden i den hålls kring 30–40 timmar.

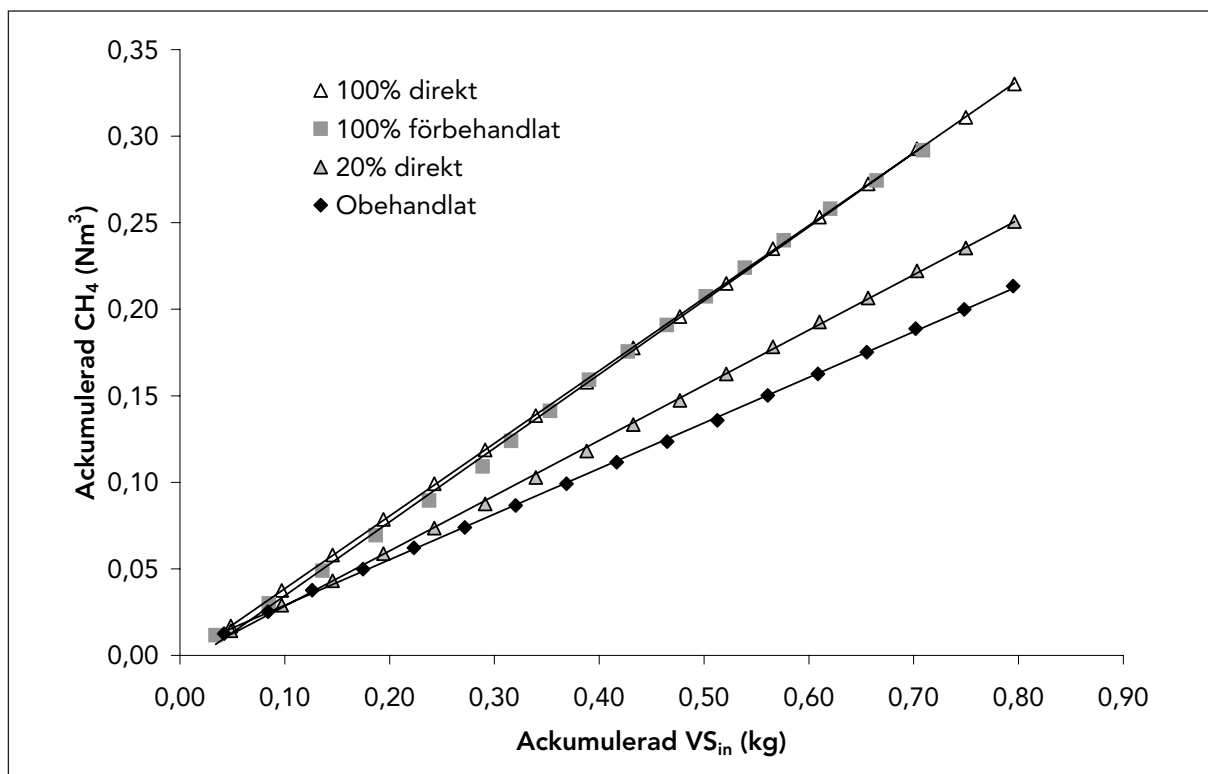
Fullskalestudier av Andreassen m.fl. (1997) visar att utbytet av lättomsättligt organiskt material i termer av löst COD per total COD är betydligt lägre för returslamshydrolys (2,5 % vid 8–17 °C) än för primärslamshydrolys (9–16 % vid 20°). Daton och Wallergård (2003) uppmätte i laboratorieförsök ett utbyte på 20–24 % (löst COD/totalCOD) för primärslamshydrolys vid 20 °C och ca 14 % vid 10 °C.

Utbytet vid returslamshydrolys beror förutom på temperaturen även på hur lång slamålder det slam som hydrolyseras har samt på om reningsverket drivs

med eller utan förbehandlingssteg. Enligt Jönsson och Jansen (2006) blev det maximala utbytet vid 20 °C uttryckt som löst COD/total COD 13 % för ett returslam som hämtades på ett reningsverk som drivs utan försedimentering och utan nitrifikation, dvs. med kort slamålder. Returslam från ett reningsverk med nitrifikation men fortfarande utan försedimentering gav 5,5 % i utbyte medan kombinationen försedimentering och kort slamålder gav 3 % och returslam från ett reningsverk som drivs med nitrifikation och med försedimentering endast gav 1 % i utbyte. Samma studie visade att vid 10 °C blev det maximala utbytet för slammet från reningsverket utan försedimentering och med kort slamålder 8 %.

## Enzymbehandling

Vid tillförsel av enzym som bryter ned cellväggar och sönderdelar större organiska föreningar frigörs och bildas lättnedbrytbara organiska föreningar. Metoden kan sägas likna biologisk hydrolys, men är smalare i sitt angreppssätt eftersom endast ett eller några enzymer används. Varje specifik förening kräver ett specifikt enzym för att brytas ned. Tillsats av olika enzymer till slam för att förbättra rötningen har undersökts av flera. Resultat finns bland annat i Jansen m.fl. (2004) och i Davidsson m.fl. (2007). Resultaten från försöken visar på en förbättrad rötning och ökad gasproduktion genom tillsats av enzymer (se Figur 3-8, nästa sida). Två olika enzymdoser testades, 100 % (motsvarande 60 kg enzym pr ton TS resp 20 % (motsvarande 12 kg enzym pr ton TS) och dessutom testades både att göra enzymbehandlingen som en förbehandling till rötningen i ett separat steg med kontrollerad temperatur och pH och att tillsätta enzymerna direkt till röt-kammaren. Metanutbytena i  $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{ton VS}_{\text{in}}$  var: 263 (obehandlat slam), 319 (20 % direkt enzymdos) 420 (100 % direkt enzymdos) respektive 426 (100 % enzymdos – förbehandlat). Direkt inmatning av



Figur 3-8. Ackumulerad metanproduktion mot tillförd mängd organiskt material (VS) under en utvärderad två-veckorsperiod av kontinuerliga rötförsök. Obehandlat slam, slam som förbehandlats med enzymer och slam tillsammans med direkt enzymtillsats till röt-kammaren testades i parallella rötförsök. Två olika enzymdoser användes, 100 % (60 kg enzym pr ton TS) och 20 % (12 ton enzym pr ton TS). Kurvornas lutning representerar metanutbytet (metan per tillförd VS). (Davidsson m.fl., 2007).



Figur 3-9. Installation för enzymtillsats på Lundtofte reningsverk, Danmark. I bakgrunden syns enzymtankarna. Främst till vänster finns pumpanordning för att pumpa in enzymerna till värmeväxlarna (till höger) där de blandas med slammet.

enzymer har testats i fullskala på Lundtofte reningsverk i Danmark, se Figur 3-9.

### 3.5 Kombinerad behandling

Kombinationer av ovanstående metoder kan givetvis också användas. Genom att kombinera olika metoder som hydrolyserar slammet på olika sätt (olika mekanismer verkar) kan en effektivare behandling uppnås. I en studie av Chiu m.fl. (1997) undersöktes effekten av att kombinera alkalisk (NaOH) och mekanisk behandling i form av ultraljud på överskottsslam. Den kombinerade behandlingen visade sig ge en högre hydrolyshastighet än separat behandling. Genom att tillsätta NaOH under ultraljudsbehandlingen kunde behandlingstiden reduceras jämfört med att först lutbehandla och sedan ultraljudsbehandla. En vanlig kombination av hydrolysmetoder är kemisk och termisk behandling, s.k. termokemisk behandling (se även separat avsnitt om detta). Flertalet experimentella försök med denna metod har gjorts (Neyens och Baeyens, 2003) och ett antal teknologier har utvecklats i kommersiellt syfte, t.ex. Krepro, Protox och Synox. Emellertid finns inte många av teknikerna implementerade i fullskala, p.g.a. höga kostnader.

Kim m.fl. (2003) har testat termisk-kemisk behandling och termisk-mekanisk (ultraljud) behandling av slam och jämfört resultaten med separat slambehandling. Vid en behandlingstid på 120 min sågs väldigt liten skillnad i andel löst COD för slam som behandlats enbart med ultraljud jämfört med slam som behandlats med både ultraljud och värme.

Kombinationer av ultraljudsbehandling, termisk behandling (70 °C) och enzymbehandling på bioslam jämfördes i en laboratorieundersökning av Davidsson och la Cour Jansen (2006). Vid separat behandling hade ultraljudsbehandling och termisk behandling av slam före rötning visat sig ge ungefär lika stora ökningar av metanutbytet. Kombinerad behandling, dvs. både ultraljudsbehandling och uppvärmning visade sig inte ge högre metanutbyte än separat behandling. Däremot tyder resultaten på att det är fördelaktigt att ultraljudsbehandla eller värma upp slammet och sen tillsätta enzymer till rötningen. Med denna metod kunde ökningen i metanutbytet som erhöles från respektive metod adderas.

## 4 Erfarenheter från anläggningar i fullskala

En målsättning inom projektet har varit att hitta anläggningar för slamhydrolys i fullskaledrift. Fullskaleanläggningar har sökts via vetenskapliga och

icke-vetenskapliga publikationer, via leverantörer av anläggningar och via diverse sökmotorer på Internet. Huvuddelen av de fullskaleanläggningar som hittats finns i Tabell 4-1 och 4-2 nedan. Det finns framförallt fler ultraljudsanläggningar i fullskala, t.ex. i Tyskland, men här endast medtagits de som hittats i Skandinavien.

Tabell 4-1. Resultat av sökningen efter fullskaleanläggningar/fullskaleförsök.

| Anläggning                                  | Land, startår         | Hydrolysmetod                                       | Syfte                                                   | Referens                                        |
|---------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| HIAS WWTP, Hamar                            | Norge, 1995           | Cambi, termisk hydrolys, 130–180 °C, 30 min.        | Minska slammängd och öka biogasproduktionen             | Kepp m.fl., 2000; Panter och Kleiven 2005)      |
| Chertsey                                    | England, 1998         | Cambi, termisk hydrolys                             | Fördubblad rötkapacitet                                 | Panter och Kleiven 2005                         |
| Naestved                                    | Danmark, 2000         | Cambi, termisk hydrolys                             | Minskad slammängd                                       | Panter och Kleiven 2005; Studiebesök april 2007 |
| Aberdeen                                    | Skottland, 2001       | Cambi, termisk hydrolys                             | Förbättrad rötning                                      | Panter och Kleiven 2005                         |
| Dublin                                      | Irland, 2002          | Cambi, termisk hydrolys                             | Slamreduktion och förbättrad avvattning                 | Panter och Kleiven 2005                         |
| Fredericia                                  | Danmark, 2002         | Cambi, termisk hydrolys                             | Förbättrad utrötning och avvattning av slammet          | Panter och Kleiven 2005                         |
| Borregaard                                  | Norge, 2000           | Cambi, termisk hydrolys                             | Ersätta alkalisk hydrolys på industrireningsverk        | Panter och Kleiven 2005                         |
| Niigate                                     | Japan, 2003           | Cambi, termisk hydrolys                             |                                                         | Panter och Kleiven 2005                         |
| Bydgoszcz                                   | Polen, 2005           | Cambi termisk hydrolys                              | Förbättrad utrötning och avvattning av slammet          | Panter och Kleiven 2005                         |
| Bryssel                                     | Belgien, 2006         | Cambi termisk hydrolys                              | Slambehandling på nybyggt reningsverk                   | Panter och Kleiven 2005                         |
| Brisbane                                    | Australien, 2005/2006 | Cambi termisk hydrolys                              | Förbättra utrötningen av slammet                        | Panter och Kleiven 2005                         |
| Witry-lès-Reims WWTP (2500 pe pilot-plant). | Frankrike             | Termisk hydrolys, 150–185 °C, 12–15 bar, 30–60 min. | Minska slammängden. Pilotanläggning. Ej i drift längre. | Chauzy m.fl., 2005                              |
| Liberec WWTP                                | Tjeckien, 2002        | Förtjockningscentrifug                              | Minskad slammängd                                       | Zábranská m.fl., 2006                           |
| Fürstentfeldbruck WWTP                      | Tyskland, 2002        | Förtjockningscentrifug                              | Minskad slammängd                                       | Zábranská m.fl., 2006                           |
| Aachen-Soers                                | Tyskland, 2003        | Förtjockningscentrifug                              | Minskad slammängd                                       | Zábranská m.fl., 2006                           |
| Avonmouth WWTP, Bristol                     | England               | Ultraljudsbehandling                                | Testanläggning                                          |                                                 |
| Kävlinge avloppsreningsverk                 | Sverige, 2003         | Ultraljudsbehandling av bioslam                     | Förbättra rötningen                                     | Studiebesök mars 2007                           |

| Anläggning                              | Land, startår | Hydrolysmetod                   | Syfte                                      | Referens          |
|-----------------------------------------|---------------|---------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|
| Ernemars avloppsreningsverk, Oskarshamn | Sverige, 2002 | Ultraljudsbehandling            | Minska slammängden och öka gasproduktionen | Andersson 2002    |
| Gässlösa avloppsreningsverk, Borås      | Sverige       | Ultraljudsbehandling av bioslam | Förbättra rötning och minska skumning      | Borås kommun      |
| Helsingör, reningsverk                  | Danmark       | Ultraljudsbehandling, 20kHz     | Ökad nedbrytning och ökad gasproduktion    | Helsingør kommune |
| Krutuddens reningsverk, Östhammar       | Sverige, 2001 | Ultraljudsbehandling            | Pilotanläggning                            | UltraSonus        |
| Lundtofte reningsverk                   | Danmark       | Enzymtillsats                   | Fullskaleförsök                            |                   |

Tabell 4-2. Fullskaleförsök/anläggningar med slamhydrolys för produktion av kolkälla.

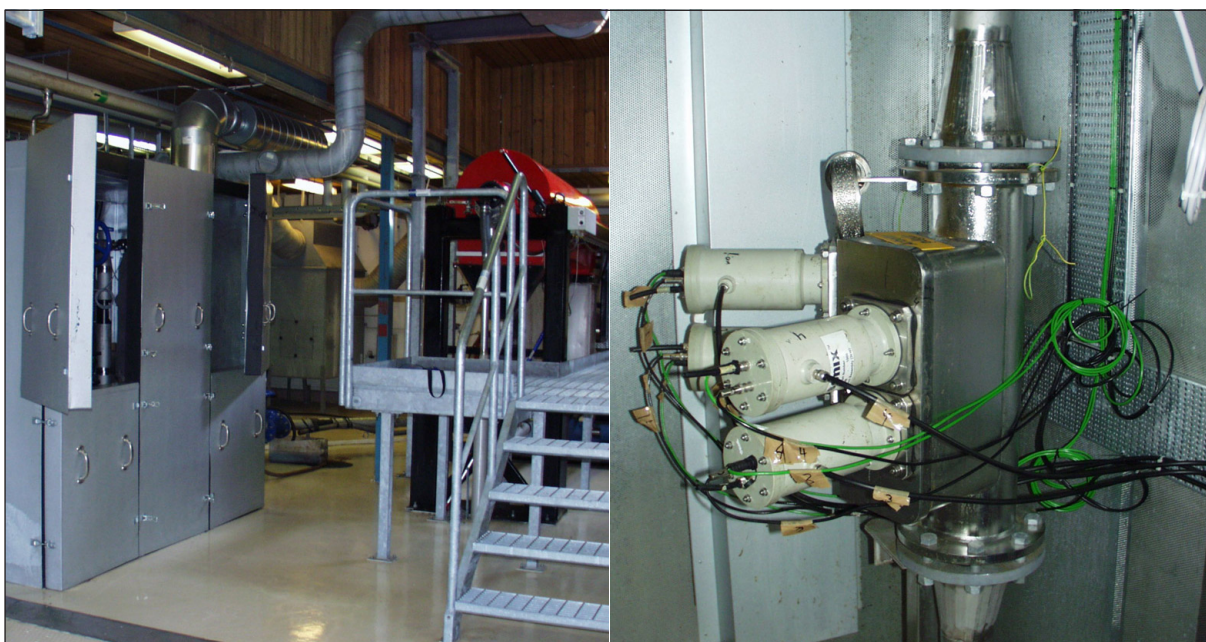
| Anläggning                                                | Land, ev. startår | Hydrolysmetod                         | Syfte                                                                            | Referens              |
|-----------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Danska fullskaleförsök, Lundtofte, Viby, Frederikssund    | Danmark           | Biologisk slamhydrolys                | Produktion av hydrolysat som kolkälla för biologisk fosforreduktion och N-rening | Andreasen m.fl., 1997 |
| Ryaverket, Gbg, fullskaleförsök 2005                      | Sverige           | Anaerob hydrolys i försedimenteringen | Intern produktion av kolkälla till DN                                            | Nivert, 2005          |
| Öresundsverket, Helsingborg. fullskladrift i mer än 10 år | Sverige           | Anaerob hydrolys i försedimenteringen | Intern produktion av kolkälla till Bio-P                                         | Tykesson m.fl., 2005  |

#### 4.1 Studiebesök på Kävlinge avloppsreningsverk, Sverige

Kävlinge avloppsreningsverk renar avloppsvatten (~50 000 PE) i tre steg, mekaniskt, biologiskt och kemiskt. I princip allt biologiskt överskottsslam (~1 ton TS/dygn) förtjockas till ca 4 % TS och ultraljudsbehandlas innan det rötas tillsammans med det förtjockade primärslammet. Ultraljudsanläggningen (Figur 4-1, nästa sida) innefattar fyra ultraljudshorn (2 kW/horn) och frekvensen ligger på >20 kHz. Ultraljudsanläggningen installerades 2003 och det ursprungliga syftet med behandlingen var att öka kapaciteten för att kunna röta både primärslam och bioslam. Tidigare rötades endast primärslammet. Bioslammet innehåller mycket filamentbildande bakterier. Under samma period som ultraljudsanläggningen

installerades gjordes en omställning från mesofil rötning till termofil rötning (50 °C). Det är därför svårt att bedöma vilken effekt ultraljudsbehandlingen haft på rötningen. Generellt så har de senaste årens drift visat på en tydlig effekt av ultraljudsbehandlingen, ca 30 % ökning av halten löst COD, reducerad skumning i rötkammaren och en fördubblad biogasproduktion. Den ökade biogasproduktionen kan delvis bero på att större slammängder rötas och att den termofila processen ger högre gasutbyte. Ultraljudsanläggningen kräver underhåll i form av hornbyte ~1 gång/år. Erfarenheterna från Kävlinge är att det är själva förtjockningen av bioslammet innan ultraljudsanläggningen som kräver mest, då bioslammet är svårt att förtjocka. Bioslammet centrifugeras med en låg tillsats av polymer. Tidigare har en stor del av den organiska belastningen utgjorts av avloppsvatten som tagits emot från ett slakteri på orten. Nedskärningar i slakteriets





Figur 4-1. Ultraljudsanläggning för bioslam på Kävlinge Avloppsreningsverk. Till vänster: ultraljudsanläggningen installerad i ett skåp. Till höger: Ultraljudsenheten med fyra horn.

verksamheter de senaste åren minskar emellertid belastningen på reningsverket avsevärt.

## 4.2 Studiebesök på Centralrenseanlægget i Næstved, Danmark

På reningsverket i Næstved, Danmark finns sedan år 2000 en Cambianläggning (Figur 4-2, nästa sida) installerad för behandling av överskottsslam innan rötningen. Syftet med anläggningen är att reducera slammängden. Verket som har en kapacitet på 54 000 PE använder sig av biologisk rening i form av aktivt slam med sidströmshydrolys för produktion av kolkälla till biologisk fosforavskiljning. Överskottsslammet föravvattnas till TS 16–17 % innan det behandlas i Cambianläggningen som består av tre tankar, några pumpar och en ångpanna. Ett förenklat flödesschema över reningsverket finns i Figur 4-3, nästa sida. Cambiprocessen värmer upp slammet till 165 °C och höjer trycket till 6 Bar under minst 30 min. Efterföljande mesofila rötning (37 °C) ger ett biogasutbyte runt

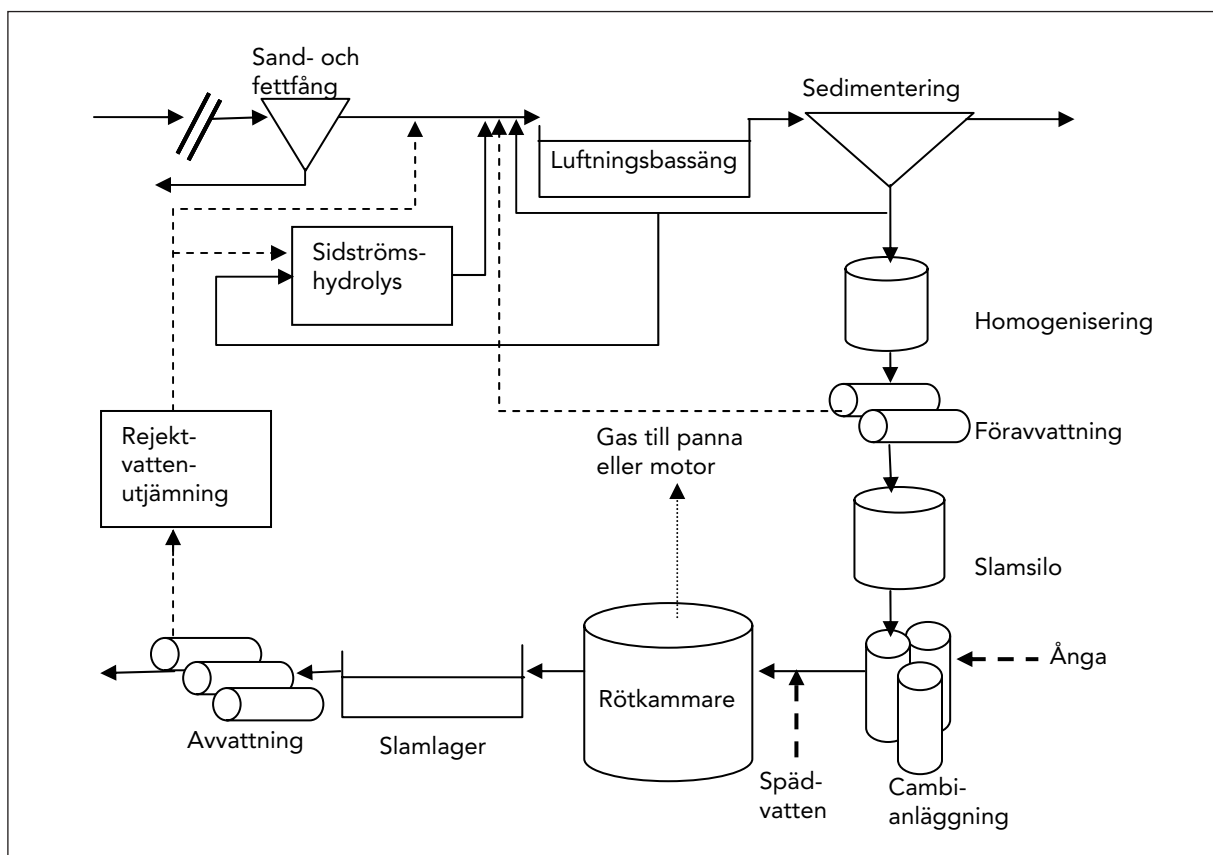
0,3 m<sup>3</sup>/kg VS. Eventuellt kommer biogasutbytet att höjas då rötkammaren alldeles nyligen varit tömd för att avlägsna sedimenterat material (finkornig sand) som reducerat den aktiva volymen med 20 %. Det är dock oklart om Cambiprocessen haft någon inverkan på den stora andelen sand i rötkammaren. Numera finns ett utpumpningssystem för sand i botten av rötkammaren installerat. Rötslammet mellanlagras innan det avvattnas i en silbandspress till en TS-halt runt 30 % (Figur 4-2). Allt slam används senare på lantbruksmark. Cambianläggningen har gett en halvering av slammängden (våtmängd) till lantbruket. Effekten beror delvis på förbättrad utrötning och delvis på förbättrade avvattningsegenskaper hos slammet.

Cambianläggningen och rötningen frigör mycket (55–60 %) av det bundna kvävet i slammet som förs tillbaka till verket genom rejektivattnet från slutavvattningen. Rejektivattnet utjämnas via sidströmshydrolysen som har en lång uppehållstid. Verkets erfarenheter av Cambiprocessen är goda efter en del inkörningsproblem (problem med ångpannan, avkylningen och pumpar). Anläggningen kräver en hel del tillsyn och resurser i form av arbetskraft.





Figur 4-2. Till vänster: Cambianläggningen på Næstveds rensningsverk, Danmark. Till höger: avvattnat rötslam med torrsubstanshalt ~30 %.



Figur 4-3. Förenklat flödesschema över Næstved Rensningsverk med Cambianläggning för behandling av slammet innan rötning.

## 5 Utvärdering av hydrolysmetoder

För att kunna utvärdera olika slamhydrolysmetoder är det av intresse att jämföra till exempel energiåtgång, kostnader, miljöpåverkan och effekt i form av t.ex. ökad produktion av lättnedbrytbar kolkälla, ökad gasproduktion och minskad slammängd. Nedan finns en sammanställning av utvärderingar som gjorts i litteraturen.

Müller (2001) har jämfört olika hydrolysmetoder (mekaniska, termiska, kemiska och biologiska). Kostnadsnivå, energiåtgång, COD-sönderdelning, slitstyrka hos utrustning, driftstabilitet och utvecklingsnivå har jämförts för de olika metoderna, samtidigt som parametrar som nedbrytningsgrad, nedbrytningshastighet, bakteriereduktion, avvattningsegenskap, luktgenerering, bildande av svårnedbrytbara ämnen etc. I en annan studie av Müller m.fl. (2004) jämfördes effekten på rötning av fyra hydrolysmetoder i fullskala: kul-kvarn, ozonering, centrifugering och ultraljud. Ozoneringen gav störst COD-nedbrytning, men var också den metod som krävde störst energiåtgång per behandlad mängd slam. Centrifugeringen gav lägst effekt på nedbrytningen, men var också den metod som hade lägst energiåtgång. Kostnaderna för hydrolysmetoderna är höga. Störst kostnad utgör energikostnaden (ca 1/3) och investeringskostnaden för utrustning (ca 1/3).

I Weemaes och Verstraete (1998) jämförs ett antal ”våta” slambehandlingsmetoder. För- och nackdelar med olika metoder konstateras och kostnader uppskattas i €/ton TS. Kostnaderna i denna studie uppskattas variera enormt mellan de olika metoderna, från 3 €/ton TS till 8330 €/ton TS. Effekten från respektive behandling uttryckt som nedbruten andel av cellen varierar från 5–95 %, men ligger för de flesta metoder över 50 %. Mekaniska metoder anses effektiva, men ibland lite komplicerade och kräver stor energiåtgång. Icke-mekaniska metoder som termokemisk, kemisk och biologisk behandling anses ha potential för effektiv nedbrytning och är i en del fall enkla, men har ibland visat sig medföra problem med korrosion och lukt.

Bougrier m.fl. (2006) har jämfört termisk behandling, ultraljudsbehandling och ozonering av samma

överskottsslam. Alla behandlingar ledde till ökad löslighet av COD och fasta ämnen, men termisk behandling gav störst utlösning. Ultraljudsbehandlingen hade mest inverkan på slammets partikelstorlek (mediandiameter  $\sim 10 \mu\text{m}$ ) medan ozoneringen inte påverkade partiklarna ( $33 \mu\text{m}$ ) nämnvärt. Den termiska behandlingen ökade till och med partikelstorleken ( $\sim 77 \mu\text{m}$ ) jämfört med obehandlat slam ( $\sim 36 \mu\text{m}$ ). Försöken inkluderade även satsvisa röt-försök. Ultraljudsbehandlat slam och termiskt behandlat slam resulterade i högst metanproduktion och även högst nedbrytningsgrad. Dessa båda behandlingar gav 50–60 % ökning av biogasproduktionen jämfört med obehandlat slam. Det konstateras även i studien att behandlingarna leder till olika påverkan på slammet. Termisk behandling ger hög COD-löslighet, bryter inte ned slamflockarna men leder till en hög nedbrytningsgrad vid rötning. Ultraljudsbehandling ger liten COD-löslighet, reducerar partikelstorleken (flockarna bryts ned) och ger en hög nedbrytningsgrad. Ozonbehandlingen ger en medelhög COD-löslighet, påverkar inte partikelstorleken nämnvärt och ger en liten ökning i nedbrytningsgrad jämfört med obehandlat slam.

Energiåtgång och ökning i metanproduktion vid rötning av förbehandlat slam för olika metoder i litteraturen har sammanställts (Tabell 5-1). Det är främst för de mekaniska metoderna som energiåtgång har angivits i litteraturen och många av referenserna beskriver laboratorieförsök, där uppgifter om energiåtgång och ekonomi är osäkra i förhållande till en fullskalanläggning. För en del metoder (bl.a. mekaniska och termiska) kan specifika energiåtgången eventuellt minskas genom att förtjocka slammet innan behandlingen. De uppgifter som hittats i litteraturen visar att framförallt ultraljudsbehandling kräver stor energiåtgång per behandlad mängd slam. Ökningen i metanproduktion som respektive behandling medför varierar från 0,018–0,086 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg TS. Framförallt de mekaniska metoderna och termisk behandling verkar medföra en tydlig ökning i metanutbyte. För de metoder i litteraturen som både angett energiåtgång och metanökning kan en energibalans ställas upp. Det är endast en av metoderna, högtryckshomogenisering, som har en positiv energibalans, dvs. högre energiproduktion i form av producerad mängd metan än energiåtgång.

Tabell 5-1. Energiåtgång, ökning i metanproduktion, energibalans, ökning av nedbrutet organiskt material för olika slambehandlingsmetoder i litteraturen.

| Metod                                               | Energi-<br>åtgång<br>kWh/l | Energi-<br>åtgång<br>kWh/kg<br>TS | Ökning<br>metanprod.<br>ml CH <sub>4</sub> /g tillfört<br>COD/VSS | Slam-para-<br>metrar | Ökad<br>metan-<br>prod.<br>Nm <sup>3</sup> /kg<br>tillfört TS | Ökad<br>metan-<br>produktion<br>kWh/kg<br>tillfört TS | Energi-<br>balans<br>(prod-kons)<br>kWh/kg<br>tillfört TS | Ökning<br>nedbruten VS<br>el. COD<br>g VS/kg slam | Energiåtgång/<br>reducerad<br>slammängd<br>kWh/kg TS<br>kWh/kg VS | Referens                |
|-----------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Ultraljud<br>20 kHz, 225W                           |                            | 1,74                              | 104<br>ml CH <sub>4</sub> /gCOD                                   | TS 20g/l             | 0,078                                                         | 0,78                                                  | -0,96                                                     | 4,6 g COD/kg                                      | 0,008                                                             | Bougrier<br>m.fl., 2006 |
| Termisk<br>170 grader                               |                            | 2,60                              | 113<br>ml CH <sub>4</sub> /gCOD                                   | COD 15 g/l           | 0,085                                                         | 0,85                                                  | -1,75                                                     | 4,9 g COD/kg                                      | 0,011                                                             |                         |
| Termisk<br>190 grader                               |                            |                                   | 112<br>ml CH <sub>4</sub> /gCOD                                   | TS 20g/l             | 0,084                                                         | 0,84                                                  |                                                           | 4,9 g COD/kg                                      |                                                                   | Bougrier<br>m.fl., 2006 |
| Ozon<br>0,1 g O <sub>3</sub> /g TS                  |                            |                                   | 107<br>mlCH <sub>4</sub> /g COD                                   | COD 15 g/l           | 0,080                                                         | 0,80                                                  |                                                           | 4,7 g COD/kg                                      |                                                                   |                         |
| Ozon<br>0,16 g O <sub>3</sub> /g TS                 |                            |                                   | 25<br>mlCH <sub>4</sub> /g COD                                    | TS 20g/l             | 0,019                                                         | 0,19                                                  |                                                           | 1 g COD/kg                                        |                                                                   | Bougrier<br>m.fl., 2006 |
| Pulserande elektriska fält<br>280 kJ/l              | 0,078                      | 1,73                              | 51<br>mlCH <sub>4</sub> /g COD                                    | COD 15 g/l           | 0,038                                                         | 0,38                                                  |                                                           | 2,3 g COD/kg                                      |                                                                   |                         |
| Pulserande elektriska fält<br>150 kJ/l              | 0,0422                     | 0,93                              | 17,5<br>l/kg VSS                                                  | 40-50 g TS/l         | 0,018                                                         | 0,18                                                  | -1,55                                                     | 0,95 g TS/kg                                      |                                                                   | Kopplow<br>m.fl., 2004b |
| Termisk behandling<br>121 grader i 60 min           | 0,124                      | 2,75                              | 68<br>l/kg VSS                                                    | 40-50 g TS/l         | 0,068                                                         | 0,68                                                  | -0,25                                                     | 1,9 g TS/kg                                       |                                                                   | Kopplow<br>m.fl., 2004b |
| Högtryckshomogenisering<br>Upp till 600 bars tryck  | 0,017                      | 0,37                              | 70<br>l/kg VSS                                                    | 40-50 g TS/l         | 0,070                                                         | 0,70                                                  | -2,05                                                     | 1,4 g TS/kg                                       |                                                                   | Kopplow<br>m.fl., 2004b |
| Förtjockningscentrifug<br>(överskottsslam)          |                            |                                   | 61<br>l/kg VSS                                                    | 40-50 g TS/l         | 0,061                                                         | 0,61                                                  | 0,24                                                      | 1,4 g TS/kg                                       |                                                                   | Kopplow<br>m.fl., 2004b |
| Förtjockningscentrifug<br>(primär + överskottsslam) |                            |                                   | 0,077<br>l CH <sub>4</sub> /g COD                                 | TS/COD ~0,9          | 0,086                                                         | 0,86                                                  |                                                           |                                                   |                                                                   | Dohányos<br>m.fl., 1997 |
| Ultraljud<br>Primär + bioslam, 31 kHz               | 0,064                      | 2,30                              | 0,04<br>l CH <sub>4</sub> /g COD                                  | TS/COD ~0,10         | 0,044                                                         | 0,44                                                  |                                                           |                                                   |                                                                   | Dohányos<br>m.fl., 1997 |
|                                                     |                            |                                   |                                                                   | 27,8 g VS/kg         |                                                               |                                                       |                                                           | 1,28 g VS/kg                                      | 0,050                                                             | Tiehm m.fl.,<br>1997    |

\*Energiinnehållet 10 kWh/Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> har antagits  
Tomma fält indikerar att uppgift saknas

## 6 Diskussion

Många metoder för att behandla slam med syfte att förbättra rötningen och minska slammängden har testats i laboratorieförsök. Fullskaleerfarenheterna är färre. Det finns fullskaleanläggningar, men det är framförallt vissa metoder som är representerade. I Sverige och Norden finns främst Cambiprocessen (termisk hydrolys) och ultraljudsanläggningar att finna i fullskala.

Det finns en hel del fullskaleerfarenheter från slamhydrolys för att producera kolkälla. Bara i Sverige finns det ett tiotal reningsverk som hydrolyserar för att generera kolkälla till intern användning. De flesta använder kolkällan för att avskilja kväve, men ett par reningsverk producerar kolkälla för biologisk fosforavskiljning.

Det är svårt att jämföra erfarenheter och resultat från olika studier med olika behandlingsmetoder. Resultaten från respektive hydrolysmetod är beroende av slammets kvalitet och ursprung. Optimala förhållanden för parametrar som intensitet, tid, kemikalietillsats etc. blir därför individuella för respektive reningsverk och slam. Det finns några undersökningar som innefattar en jämförelse av olika metoders effekt på samma slam. Det finns dock endast ett fåtal studier där det har undersökts hur respektive metod fungerar på flera olika slam. Vid jämförelse av metodernas effekt på rötning (gasproduktion och nedbrytningsgrad) bör man tänka på att processparametrar för själva rötningen, som uppehållstid och temperatur, kan ha stor inverkan.

**Mekaniska metoder** – generellt sett ger dessa hög utlösning av COD, men kräver stor energiåtgång. Metoderna har också positiv inverkan på rötning, mer gas och högre nedbrytningsgrad, men nedbrytningsgraden vid rötning är inte alltid i proportion till COD-utlösningen från förbehandlingen. Fullskaleerfarenheter finns främst från förtjockningscentrifugering och ultraljudsbehandling, medan kvarnar och högtryckshomogenisering än så länge studerats i laboratorie- eller pilotskala. Vid jämförelse av fyra metoders effekt på nedbrytning av COD tillsammans med energiåtgång visades att kulkvarn, ultraljud och högtryckshomogenisering gav hög COD-utlösning, medan metoden som bygger på att skapa skärspänning med hjälp av roterande skivor (Müller, 1998) gav betydligt

lägre utlösning. Förutom den sistnämnda metoden, gav ultraljudsbehandlingen lägst utlösning per energitillförsel och högtryckshomogenisering högst utlösning per mängd tillförd energi.

**Termiska och kemiska metoder** – erfarenheterna av respektive metod sammanfattas nedan. Som förbehandlingsmetod innan rötning är det främst termisk hydrolys som återfinns i fullskala. Biologisk hydrolys appliceras också i fullskala, men då främst för att producera kolkälla för förbättrad näringsavskiljning.

Termisk behandling har i flera studier visat sig bryta ned stor del av slammet. Framförallt bryts kolhydrater ned och till viss del protein medan fetter är nästan opåverkade av termisk behandling (Barlindhaug och Ødegaard, 1996; Li och Noike, 1992). Erfarenheterna tyder på att nedbrytningen ökar ju högre temperatur som används, men att högre temperaturer ( $> 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) kan medföra att det bildas svårnedbrytbara föreningar som är negativa för en eventuellt efterföljande rötprocess. Fullskaleanläggningar med termiska processer över  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  har också haft problem med lukt och korrosion. Numera verkar det mest finnas fullskaleanläggningar med termisk behandling runt  $150\text{--}170\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Även mindre energikrävande termisk behandling vid lägre temperatur (runt  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) har visat sig ha betydande hydrolyseffekt vid laboratoriestudier.

Kemisk behandling har visat sig effektivt för att lösa ut organiskt material i slam. Framförallt är det tillsats av NaOH eller ozon som studerats. En stor nackdel är kostnaden för kemikalier. Ozonering har visat sig ge mycket hög nedbrytning av COD, men kostnaden är väldigt hög.

Kombinationen av termisk och kemisk behandling kan ge goda resultat. Tillsatsen av kemikalier medför att lägre temperatur kan användas med bibehållen effekt jämfört med enbart termisk behandling. En annan fördel med termokemisk behandling som setts vid basisk behandling och värmetillsats är att inte bara kolhydrater och proteiner, men även fett går i lösning, vilket visats av Tanaka m.fl. (1997) och Vlyssides och Karlis (2004).

**Biologisk behandling** i form av hydrolys genom aeroba mikroorganismer före rötning har testats med varierande resultat (Ward m.fl., 1998; Park m.fl., 2005) – dock har inga fullskaleerfarenheter hittats i litteraturen. Biologisk behandling genom tillsats av specifika enzymer har visat sig ha god potential för att förbättra rötningen av slam (Davidsson m.fl., 2007; Jansen m.fl.,



2004). Emellertid är kostnaden för enzymer relativt hög vilket kräver ytterligare optimering av metoden.

**Kombinerad behandling** – I flera laboratoriestudier har det visat sig fördelaktigt att kombinera olika behandlingsmetoder för att få en bättre nedbrytning av slammet än vad som fås med separat behandling. Kombinationer av kemiska och mekaniska metoder samt kombinationer av termiska och kemiska metoder är de som visat sig ge bäst resultat. Däremot har två olika studier visat att kombinationen värme och ultraljud inte ger någon större ökning av nedbrytningen jämfört med att bara behandla med en av metoderna (Kim m.fl., 2003; Davidsson och la Cour Jansen, 2006). Resultaten visar att kombinerad behandling ger bäst effekt när man väljer metoder som är olika varandra.

Det är svårt att utifrån de jämförelser av mekaniska och ickemekaniska metoder som finns (Müller, 2004; Bougrier m.fl., 2006; Weemaes och Verstraete, 1998) säga något generellt om vilken metod som är bäst. Olika metoder har visat sig mest effektiva i olika jämförande studier och det finns för- och nackdelar med alla metoder. Mekaniska metoder ger en hög utlösning av COD, men är energiintensiva. Termiska metoder kräver värmetillförsel och löser ej upp fett, men ger en positiv inverkan på rötningen och innebär samtidigt att en hygienisering av slammet fås. Kemisk och termokemisk behandling kan bryta ned stor del av det organiska materialet, men kräver tillsats av kemikalier.

Någon ekonomisk jämförelse av de olika metoderna har inte kunnat göras. De flesta beskrivningar av slamhydrolysmetoder som hittats i litteraturen saknar uppgifter om kostnader. För att kunna göra en jämförelse av kostnader måste fördelarna med slambehandlingen i form av till exempel ökad gasproduktion, ökad rötkapacitet, bättre avvattning, minskad slam mängd, minskat behov av extern kolkälla, minskad skumning värderas ekonomiskt, vilket kan vara både svårt och medför en subjektiv bedömning i många fall. Även en värdering av kostnader och nackdelar med en metod är svår att göra. Kostnad för energiåtgång, utrustning och kemikalier är relativt lätt att uppskatta, men en värdering av extra resurser i form av t.ex. underhåll är svår att göra med de erfarenheter som finns idag.

Energibalans har ställts upp för en del metoder. Generellt ser det ut som att de flesta metoder förbrukar mycket energi i förhållande till den ökade metanproduktion som fås. Det bör dock beaktas att det kan värderas som positivt om t.ex. lågvärdig energi i form av värme utnyttjas för att producera högvärdig energi i form av t.ex. metan, som kan användas som drivmedel för fordon och därmed ersätta fossila bränslen.

Metoderna som innefattar tillsats av något ämne (kemikalier, enzymer eller mikroorganismer) kan anses mindre hållbara i ett kretsloppstänkande, beroende förstås på vad som tillsätts. Å andra sidan innebär de mekaniska metoderna och de termiska metoderna ett utnyttjande av resurser i form av energi. Vad som är mest hållbart ur ett livscykelperspektiv är omöjligt att säga rent generellt utifrån den information som inhämtats. En utförlig livscykelanalys olika slambehandlingsmetoder med svenska förhållanden borde dock vara ett viktigt framtida insatsområde.

Det är också viktigt att beakta att de fördelar som en slambehandling medför i form av ökad nedbrytning och minskad slamproduktion medför en ökning av andelen lösta ämnen, vilket resulterar bl.a. i högre halt av kväve ( $\text{NH}_4$ ) i rejektvatten från centrifugeringen. Detta rejektvatten måste tas om hand och kräver utökade resurser på reningsverket och en kapacitetsökning om det inte redan finns kapacitet tillgänglig.

Slutligen kan det konstateras att slamhydrolys på reningsverk har god potential att förbättra reningen och samtidigt bidra till minskad miljöbelastning. Genom att införa slamhydrolys kan man förbättra miljön på många sätt beroende på hur hydrolysen används. Produktion av intern kolkälla medför ett minskat externt behov, ökad biogasproduktion kan minska användningen av fossila bränslen, förbättrad nedbrytning minskar slammängden etc. Det finns många metoder som är lovande med avseende på hydrolyseffekt. Ytterligare forskning och utveckling inom området kommer emellertid att krävas för att få effektivare metoder som t.ex. kräver mindre tillsatser av kemikalier och har lägre energibehov. Eventuellt samband mellan slamtyper och effektivitet hos respektive metod skulle behöva klargöras för att underlätta vid val av hydrolysmetod.

## Referenser

- Andersson, J. (2002). Ultraljud rötter slam i Oskarshamn. *Cirkulation*, 5/02.
- Andreasen, K., Petersen, G., Thomsen, T. och Strube, R. (1997). Reduction of Nutrient Emission by Sludge Hydrolysis. *Water Science and Technology*, 35(10), 79–85.
- Baier, U. och Schmidheiny, P. (1997). Enhanced anaerobic degradation of mechanically disintegrated sludge. *Water Science and Technology*, 36(11), 137–143.
- Barjenbruch, M. och Kopplow, O. (2003). Enzymatic, mechanical and thermal pre-treatment of surplus sludge. *Advances in Environmental Research*, 7, 715–720.
- Barlindhaug, J. och Ødegaard, H. (1996). Thermal hydrolysis for the production of carbon source for denitrification. *Water Science and Technology*, 34(1–2), 371–378.
- Bien, J. och Wolny, L. (1997). Changes of some sewage sludge parameters prepared with an ultrasonic field. *Water Science and Technology*, 36(11), 101–106.
- Borås kommun. (Ändrad 2007-01-09) Ultraljudsanläggning.  
(Elektronisk) Gatukontoret, Borås, Sverige. Tillgänglig: < <http://www.boras.se/gatukontoret/vattenochavlopp/avlopp/anlaggningar/gasslosaavloppsreningsverk/ultraljudsanlaggning,4,1843ca41046786bcd080003618.html> > (2007-04-16)
- Bougrier, C., Albasi, C., Delgenès, J.P. och Carrère, H. (2006). Effekt of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability. *Chemical Engineering and Processing*, 45, 711–718.
- Bouzas, A., Ribes, J., Ferrer, J. och Seco, A. (2007) Fermentation and elutriation of primary sludge: Effect of SRT on process performance. *Water Research* (41) 4, 747–756.
- Carballa, M., Manterola, G., Larrea, L., Ternes, T., Omil, F. och Lema, J.M. (2007). Influence of ozone pre-treatment on sludge anaerobic digestion: Removal of pharmaceutical and personal care products. *Chemosphere*, 67, 1444–1452.
- Chauzy, J., Graja, S., Gerardin, F., Crétenot, D., Patria, L. och Fernandes, P. (2005). Minimisation of excess sludge production in a WWTP by coupling thermal hydrolysis and rapid anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, Vol 52, No 10–11, pp 255–263.
- Chiu, Y.C., Chang, C.N., Lin, J.G. och Huang, S.J. (1997). Alkaline and ultrasonic pretreatment of sludge before anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, 36(11), 155–162.
- Daton, M. och Wallergård, A. (2003) *Utvärdering av VFA-resurserna för en bio-P-process på Västra Strandens avloppsreningsverk i Halmstad*. Examensarbete 2003-01, VA-teknik, LTH.



Davidsson, Å. och la Cour Jansen, J. (2006). Pre-treatment of wastewater sludge before anaerobic digestion – hygienisation, ultrasonic treatment and enzyme dosing. *Vatten*, 62(4), 335–340.

Davidsson, Å., Wawrzynczyk, J., Norrlöv, O. och Jansen, J. la Cour (2007). Strategies for Enzyme dosing to Enhance Anaerobic Digestion of Sewage Sludge. Accepterad för publicering i *Journal of Residuals Science and Technology*, DEStech publications, Inc.

Dohányos, M., Zábranská, J. och Jeníček, P. (1997). Enhancement of sludge anaerobic digestion by using of a special thickening centrifuge. *Water Science and Technology*, 36(11), 145–153.

Ek, A. (2005). *Ultrasonic treatment of sewage sludge in order to increase biogas yields*. LiU-Tema V-Ex-9. Linköpings Universitet, Inst. För Tema, Avd. för Vatten i natur och samhälle.

Eliasson, G., Tykesson, E., Jansen, J. la C. och Hansen, B. (2000). Utilisation of fractions of digester sludge after thermal hydrolysis. Chemical Water and Wastewater Treatment VI. Hahn H. H., Hoffmann E. and Ødegaard H. (Eds), Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-67574-4.

Engelhart, M., Krüger, M., Kopp, J. och Dichtl, N. (2000). Effects of disintegration on anaerobic degradation of sewage excess sludge in downflow stationary fixed film digesters. *Water Science and Technology*, 41(3), 171–179.

García-Heras, J.L. (2002). *Reactor sizing, process kinetics and modelling of anaerobic digestion of complex wastes*. In Mata-Alvarez, J. (ed.). Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. IWA Publishing. ISBN 1-900222-14-0.

Gujer, W. och Zehnder, A.J.B. (1983). Conversion processes in anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, Vol. 15, No. 8–9, pp. 127–167.

Hartmann, H., Angelidaki, I. och Ahring, B.K. (2000). Increase of anaerobic degradation of particulate organic matter in full-scale biogas plants by mechanical maceration. *Water Science and Technology*, 41(3), 145–153.

Helsingør Kommune (Uppdaterad 2007-03-23). Renseanlæg. (Elektronisk) Helsingør Kommune, Danmark.  
Tillgänglig: <http://www.helsingorkommune.dk/Byg%20og%20bo/Spildevand%20og%20kloakering/Renseanl%C3%A6g.aspx> (2007-04-16).

Imai, T., Fukagawa, M., Ukita, M., Sekine, M., Higuchi, T. och Kawamura, T. (2003). A study of solubilization of excess sludge by high speed rotary disk process. *Journal of Water and Environment Technology*, Vol. 1, No. 1, 79–84.

Jansen, J. la Cour, Davidsson, Å., Dey, E.S. och Norrlöv, O. (2004). *Enzyme assisted sludge minimization*. Chemical Water and Wastewater Treatment VIII, Ed. Hahn, H., Hoffman, E. and Ødegaard, H. IWA Publishing, November 2004, ISBN 184339068X

- Jung, J., Xing, X.H. och Matsumoto, K. (2001). Kinetic analysis of disruption of excess activated sludge by Dyno Mill and characterisation of protein release for recovery of useful materials. *Biochemical Engineering Journal*, 8, 1–7.
- Jönsson, K. och Jansen, J. la C. (2006) Hydrolysis of return sludge for production of easily biodegradable carbon – Effect of pre-treatment, sludge age and temperature. *Water Science and Technology*, 53(12), 47–54.
- Jönsson, K., Pottier, A., Dimitrova, I. och Nyberg, U. (2007) *Utilising laboratory experiments as a first step to introduce primary sludge hydrolysis in full-scale*. Presenterad på IWA-konferensen “10th IWA Specialised Conference on Design, Operation and Economics of Large Wastewater Treatment Plants”, September 9–13, 2007 i Wien.
- Kepp, U., Machenbach, I., Weisz, N. och Solheim, O. E. (2000). Enhanced stabilisation of sewage sludge through thermal hydrolysis – three years of experience with full scale plant. *Water Science and Technology*, Vol 42, No 9, pp 89–96.
- Kim, J., Park, C., Kim, T.-H., Lee, M., Kim, S., Kim, S.-W. och Lee, J. (2003). Effects of various pretreatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, Vol. 95, No. 3, pp. 271–275.
- Kopp, J., Müller, J., Dichtl, N. och Schwedes, J. (1997). Anaerobic digestion and dewatering characteristics of mechanically disintegrated excess sludge. *Water Science and Technology*, 36(11), 129–136.
- Kopplow, O., Barjenbruch, M. och Heinz, V. (2004a). Vorbehandlung von Überschuss-schlamm durch Elektroporation. *Chemie Ingenieur Technik*, 76(3), 317–321.
- Kopplow, Barjenbruch, M. och Heinz, V. (2004b). Sludge pre-treatment with pulsed electric fields. *Water Science and Technology*, Vol. 49, No. 10, pp. 123–129.
- Li, Y-Y. och Noike, T. (1992). Upgrading of Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge by Thermal Pretreatment. *Water Science and Technology*, Vol. 26, No. 3–4, pp. 857–866.
- Müller, J., Lehne, G., Schwedes, J., Battenberg, S., Näveke, R., Kopp, J., Dichtl, N., Scheminski, A., Krull, R. och Hempel, D.C. (1998). Disintegration of sewage sludges and influence on anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, 38(8/9), 425–433.
- Müller, J. A. (2001). Prospects and problems of sludge pre-treatment processes. *Water Science and Technology*, Vol. 44, No. 10, pp. 121–128.
- Müller, J.A., Winter, A. och Strükmann, G. (2004). Investigation and assessment of sludge pre-treatment processes. *Water Science and Technology*, Vol. 49, No. 10, pp. 97–104.

- Nah, W., Kang, Y.W., Hwang, K. och Song W. (2000). Mechanical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion process. *Water Research*, 34(8), 2362–2368.
- Neyens, E. och Baeyens, J.(2003). A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability. *Journal of Hazardous Materials*, B98 (2003) 51–67
- Nikolić, A. och Sundin, A. M. (2006). Teknik för förbättrad kväverening i Sverige – Resultat av landsomfattande enkätundersökning. *Vatten*, 62(4), 335–340.
- Nivert, E. (2005). *Slamhydrolys på Ryaverket – fullskaleförsök sommaren 2005*. Gryaab rapport 2005:9, GRYAAB, Göteborg.
- Onyeche, T.I., Schläfer, O., Bormann, H., Schröder, C. och Sievers, M. (2002). Ultrasonic cell disruption of stabilised sludge with subsequent anaerobic digestion. *Ultrasonics*, 40, 31–35.
- Palmowski, L.M. och Müller, J.A. (2000). Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, 41(3), 155–162.
- Panter, K. och Kleiven, H. (2005). Ten years experience of full scale thermal hydrolysis projects. In Proceedings of the 10th European Biosolids and Biowastes Conference, 13–16th November 2005, Wakefield, UK.
- Park, C., Lee, C., Kim, S., Chen, Y. och Chase, H.A. (2005). Upgrading of Anaerobic Digestion by Incorporating Two Different Hydrolysis Processes. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, Vol. 100, No. 2, pp,164–167.
- Penaud, V., Delgenès, J.P. och Moletta, R. (1999). Thermo-chemical pretreatment of a microbial biomass: influence of sodium hydroxide addition on solubilization and anaerobic biodegradability – analysis, synthesis, kinetics, reactions, spectroscopic properties. *Enzyme and Microbial Technology*, 25, 258–263.
- Schläfer, O., Sievers, M., Klotzbücher, H. och Onyeche, T.I. (2000). Improvement of biological activity by low energy ultrasound assisted bioreactors. *Ultrasonics*, 38, 711–716.
- Schläfer, O., Onyeche, T., Bormann, H., Schröder, C. och Sievers, M. (2002). Ultrasound stimulation of micro-organisms for enhanced biodegradation. *Ultrasonics*, 40, 25–29.
- Skiadas, I.V., Gavala, H.N., Lu, J. och Ahring, B.K. (2005). Thermal pre-treatment of primary and secondary sludge at 70 °C prior to anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, Vol. 52, No. 1–2, pp. 161–166.
- Štěpová, J. (2005). Minimization of biomass production in biological wastewater treatment processes. Ph.D. Thesis, Department of Water Technology and Environmental Engineering, Institute of Chemical Technology, Prague.

Sundin, A. M. (2006). Mer gas, mindre slam och mindre skum? Erfarenheter från Käppalaverket på Lidingö. I *Ny Teknik inom avloppsvattenrening*. Material från Envisys seminarium, Lund 15–16 november, 2006.

Tanaka, S., Kobayashi, T., Kamiyama, K. och Signey Bildan, M. (1997). Effects of thermochemical pretreatment on the anaerobic digestion of waste activated sludge. *Water Science and Technology*, 35(8), 209–215.

Tchobanoglous, G. och Burton, F. L., Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, Reuse, eds. B. J. Clark and J. M. Morris. McGraw Hill, New York, 1991, 1334 pp.

Tiehm, A., Nickel, K. och Neis, U. (1997). The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge. *Water Science and Technology*, 36(11), 121–128.

Tiehm, A., Nickel, K., Zellhorn, H. och Neis, U. (2001). Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization. *Water Research*, 35, 2003–2009.

Tykesson, E., Jönsson, L.-E. och la Cour Jansen, J. (2005). Experience from 10 years full-scale operation with enhanced biological phosphorus removal at Öresundsverket. *Water Science and Technology*, 52(12), 151–159.

Ultra sonus (ej daterad). Krutuddens Reningsverk i Östhammar. (Elektronisk) Ultra Sonus AB, Öregrund, Sweden. Tillgänglig: <[http://www.ultrasonus.se/images/Ref\\_Osthammar\\_Swedish.pdf](http://www.ultrasonus.se/images/Ref_Osthammar_Swedish.pdf)> (2007-04-16).

Vlyssides, A.G. och Karlis, P.K. (2004). Thermal-alkaline solubilisation of waste activated sludge as a pre-treatment stage for anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 91, 201–206.

Vollertsen, J., Petersen, G. och Borregaard, V. R. (2006) Hydrolysis and fermentation of activated sludge to enhance biological phosphorus removal. *Water Science and Technology*, 53(12), 55–64.

Wang, Q., Noguchi, C., Hara, Y., Sharon, C., Kakimoto, K. och Kato, Y. (1997). Studies on anaerobic digestion mechanism: Influence of pretreatment temperature on biodegradation of waste activated sludge. *Environmental Technology*, Vol. 18, No. 10, pp. 999–1008.

Ward, A., Stensel, D.H., Ferguson, J.F., Ma, G. och Hummel, S. (1998). Effect of Autothermal Treatment on Anaerobic Digestion in the Dual Digestion Process. *Water Science and Technology*, 38(8–9), 435–442.

Weemaes, M., Grootaerd, H., Simoens, F. och Verstraete, W. (2000). Anaerobic Digestion of Ozonized Biosolids. *Water Research*, Vol. 34, No. 8, pp 2330–2336.

Weemaes, M. och Verstraete, W. (1998). Evaluation of Current Wet Sludge Disintegration Techniques. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 1998, 73, 83–92.

Winnfors, E. (2004). Lovande ny teknik för aerob slamreduktion. *Cirkulation*, 3, 21.

Zábranská, J. , Dohányos, M., Jeníček, P. och Kutil, J. (2006). Disintegration of excess activated sludge – evaluation and experience of full-scale applications. *Water Science and Technology*, 53(12), 229–236.

Zheng, J., Graff, R.A., Fillos, J och Rinard, I. (1998). Incorporation of rapid thermal conditioning into a wastewater treatment plant. *Fuel Processing Technology*, 56, 183–200.





Box 47607 117 94 Stockholm

Tfn 08 506 002 00

Fax 08 506 002 10

E-post [svensktvatten@svensktvatten.se](mailto:svensktvatten@svensktvatten.se)

[www.svensktvatten.se](http://www.svensktvatten.se)