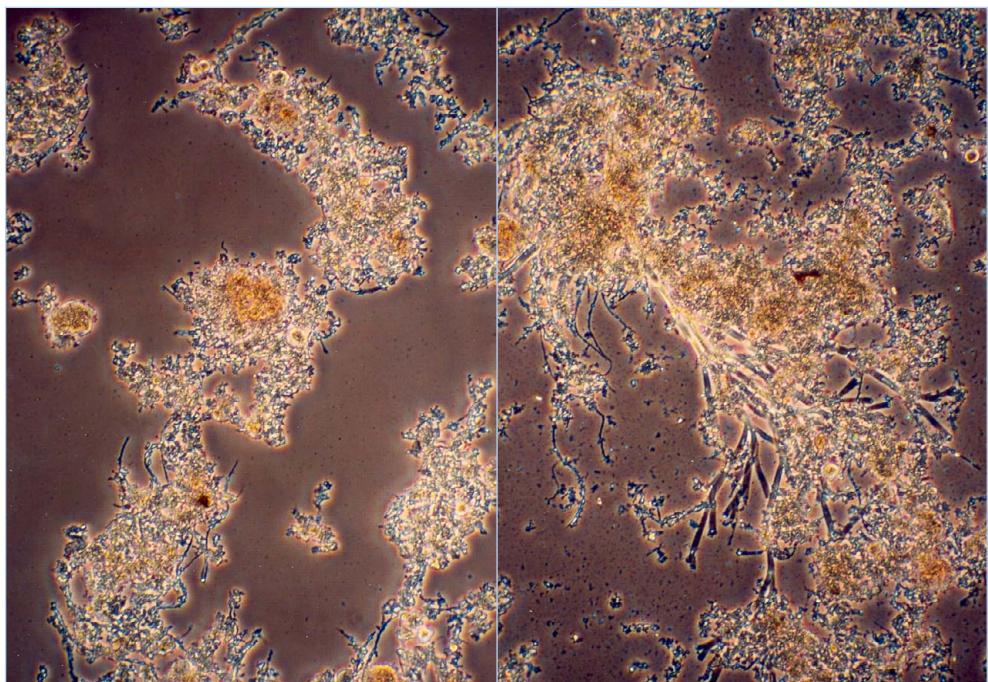


Ultraljudsbehandling, en kostnadseffektiv metod för att öka gasproduktionen och minska mängden slam?

*Maria Dåverhög
Peter Balmér*



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 Fåhræus	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.

Rapportens titel:	Ultraljudsbehandling, en kostnadseffektiv metod för att öka gasproduktionen och minska mängden slam?
Title of the report:	Ultrasound pretreatment, a cost-effective way to increase gas production and decrease the amount of sludge?
Rapportens beteckning Nr i serien:	2008-02
Författare:	Maria Dåverhög (Borås Stad), Peter Balmér (VA-strategi)
Projektnr:	25-102
Projektets namn:	Är ultraljudsbehandling kostnadseffektivt för att öka gasproduktionen och minska slammängden vid kommunala reningsverk?
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling (f.d. VA-Forsk)
Rapportens omfattning Sidantal: Format:	31 A4
Sökord:	Biogas, bioslam, desintegrering, rötning, skumning, slam, ultraljud, överskottsslam
Keywords:	Anaerobic digestion, biogas, disintegration, foaming, sludge, secondary sludge, soluble chemical oxygen demand, ultrasound, waste activated sludge
Sammandrag:	Borås Stad och Oskarshamns kommun har i två års tid kört två olika ultraljudsanläggningar för behandling av överskottsslam innan rötning. Ingen väsentlig ökning av gasproduktion eller minskning av slammängd har kunnat påvisas. Däremot har ultraljudsbehandlingen minskat skumning i rötkammaren.
Abstract:	The City of Borås and Oskarshamn municipality have in two years time sonicated the waste activated sludge before anaerobic digestion. Neither a great increase nor a reduction in the amount of sludge has been shown. However, sonication has had a positive effect on foaming in the digesters.
Målgrupper:	VA, Tekniska förvaltningar, forskare, konsulter
Omslagsbild:	Överskottsslam före och efter ultraljudsbehandling. Foto: Anders Ternström, AnoxKaldnes
Rapporten beställs från:	Finns att hämta hem som pdf-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2008
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

Förord

Biogas blir en allt viktigare produkt för reningsverken. Flera svenska reningsverk uppgraderar redan idag biogasen till fordonsgas eller använder den som energikälla. Efterfrågan på biogas ökar stadigt. Synen på slammet håller successivt på att förskjutas från att ha varit ett kvittblivningsproblem till att betraktas som en resurs. Ny teknik kommer därför fram på markanden i syfte att öka biogasproduktion. En av dessa tekniker är ultraljudsbehandling av överskottsslam. Förutom att öka biogasproduktionen kan ultraljudsbehandling av överskottsslam ha den positiva bieffekten att skumning i rötkammaren minskar.

De två svenska kommunerna, Borås Stad och Oskarshamn har valt att satsa på varsin ultraljudsanläggning, dels för att öka biogasproduktionen, men även för att minska skumning i rötkammaren och minska mängden slam.

Bakgrunden till denna studie var frågor som: Ökar gasproduktionen med ultraljudsbehandling? Är behandling av överskottsslam med ultraljud kostnadseffektiv? Minskar ultraljudsbehandling mängden slam och skumning i rötkammaren? I rapporten redovisas de erfarenheter och driftekonomi som erhållits efter 2,5 år av ultraljudsbehandling av överskottsslam i de båda kommunerna.

Ett stort tack riktas till alla som varit med och genomfört studien, i synnerhet kan nämnas laboratoriepersonalen vid Gässlösa, Charlotta Karlsson och Pia Rapp i Oskarshamn, Maria Dåverhög, Borås stad och Peter Balmér, VA-Strategi AB. De två senare har planerat och genomfört projektets olika försök, utvärderat data och författat rapporten.

Borås, september 2007

Anders Fransson, projektledare

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	7
Summary	8
1 Introduktion	9
2 Bakgrund	9
3 Syfte	9
4 Ultraljudsteknik	10
5 Kort beskrivning av reningsverken och utrustningen	10
5.1 Borås Stad	10
5.1.1 Beskrivning av Gässlösa reningsverk	10
5.1.2 Ultraljudsutrustning Gässlösa	11
5.2 Oskarshamns kommun	12
5.2.1 Beskrivning av Ernemars avloppsreningsverk	12
5.2.2 Ultraljudsutrustning Ernemar	12
6 Principer och försöksupplägg	13
6.1 Principer för att mäta effekten av ultraljudsbehandling	13
6.2 Försöksupplägg Gässlösa	14
6.3 Försöksupplägg Ernemar	15
7 Resultat	15
7.1 Gässlösa	15
7.1.1 Drifterfarenheter – ultraljudsanläggningen	15
7.1.2 Fullskaledrift – responstid och utrötningsgrad	15
7.1.3 Analyser – ökning av organisk substans i vätskefas	18
7.1.4 Påverkan på flockstruktur, filament och mikroorganismer	19
7.1.5 COD-balans	20
7.1.6 BOD-analyser	21
7.2 Ernemar	21
7.2.1 Drifterfarenheter – ultraljudsanläggningen	21
7.2.2 Analyser – Ökning av organisk substans i vätskefas	22
8 Jämförelse med andra studier	22
9 Är ultraljudsteknik lönsamt?	24
9.1 Energiutvinning och minskning av slam	24
10 Ultraljudsutrustning på andra verk	26
11 Diskussion och slutsatser	26
Referenser	28
Bilagor	31

Sammanfattning

Borås Stad och Oskarshamns kommun har köpt in varsin ultraljudsanläggning för förbehandling av överskottsslam innan rötning. Tanken är att överskottsslammet ska sönderdelas och göras mer tillgängligt för nedbrytning i rötkammaren och därmed öka biogasproduktionen. I Borås fanns primärt en önskan om att slippa skumning i rötkammaren samtidigt som man ökar biogasproduktionen. I Oskarshamn ville man minska mängden slam och få en förbättrad slutavvattning. Effekterna av ultraljudsbehandlingen har sammanställts och jämförts med investering, driftkostnader och energiförbrukning för ultraljudsanläggningen.

Att följa upp effekten av ultraljudsbehandlingen med gasmätning eller slamproduktion var inte möjligt på grund av driftproblem med ultraljudsanläggningarna. Istället fick effekterna av ultraljudsbehandlingen baseras på andelen löst COD före och efter ultraljudsbehandling.

Resultaten av ultraljudsbehandling för Gässlösaverket visade på en ökning på ca 1 % löst COD vid de aktuella energiinsatserna. Detta innebar att förändringarna i gasproduktion och slammängd beräknades till marginella. Däremot har ultraljudsbehandlingen haft positiv effekt på de skumningsproblem som Gässlösa reningsverk i Borås tidigare varit drabbat av. Vid Ernemarsverket fick man en ökning på ca 3 % löst COD. Energiinsatsen var här motsvarande större.

Inget tyder på att ultraljudsbehandling av överskottsslam är lönsamt om man önskar öka gasproduktionen. Visserligen balanseras den högvärdiga elenergi som måste tillföras ultraljudsanläggningen av ökad gasproduktion men till detta skall läggas övriga drift- och underhållskostnader och de avsevärda kapitalkostnaderna. Ultraljudsbehandling ger också en minskad slammängd men slamdisponeringskostnaderna måste vara mycket höga om detta skall kunna motivera ultraljudsbehandling. Ultraljudsbehandling kan minska skumning i rötkammarna och för verk som har skumningsproblem kan detta vara ett motiv för ultraljudsbehandling.

Förutom erfarenheterna om ultraljudsbehandling av överskottsslam har en större förståelse om hur rötkammare reagerar på belastningsförändringar erhållits. Den stora mängd data som har samlats in har använts för att ta fram förhållandet mellan COD/VS, både för primär-, överskotts- och rötslam. Balanser över rötkammarna på Gässlösaverket visar att ingående COD balanseras väl mot utgående COD i rötslam och gasens COD-innehåll. COD-balanser bedöms kunna utvecklas till ett användbart verktyg för utvärdering av rötkammardrift.

Summary

At the wastewater treatment plants (WWTP) in Borås and Oskarshamn two different ultrasound units were installed to treat the thickened secondary sludge with ultrasound prior to digestion. The working hypothesis is that the ultrasound treatment increases the availability of the organic matter to bacteria in the digesters and in this way increases the biogas production. In the case of Borås the additional intent was to counter excessive foaming a common problem when the secondary sludge is led into the digesters. In Oskarshamn the main concerns were the reduction of the quantity of sludge, and if possible, raising the amount of total solids in the dewatered sludge. In this report the effects of treating secondary sludge with ultrasound are presented and the ramifications in terms of investments, maintenance costs and energy demand for the ultrasound units are discussed.

Monitoring the effects of ultrasound treatment on gas and sludge production was not possible due to operational problems with the ultrasound units. Instead, an assessment of the effects of ultrasound treatment was based on the quantity of dissolved COD before and after the treatment.

Ultrasound treatment of the secondary sludge at Gässlösa, Borås resulted in a 1 % increase in quantity of dissolved COD at an energy input of approximately 2.2 kWh/m³ sludge. In terms of substantive changes in the amount of gas production and the quantity of sludge, the effects were negligible. But, the ultrasound treatment of excess sludge had a positive effect on preventing foaming in the digesters – a recurring problem at Gässlösa. At Ernemar WWTP in Oskarshamn the extra amount of dissolved COD was approximately 3 %, but the increase in COD production was in step with the greater energy input.

There is nothing indicating that treating excess sludge with ultrasound is beneficial, if the ambition is to increase the gas production. It is a sizeable investment and the energy content in the extra amount of gas produced is equivalent to the increased input in electric energy – and it must be borne in mind that electrical energy is of greater quality. However, the ultrasound treatment appears to have a positive effect on foaming in the digesters, which can be a major source of problems in certain WWTPs.

Besides leading to a greater understanding of the application of ultrasound in the treatment of excess sludge, this project has resulted in a better grasp of how digesters respond to changes in organic load. The great amount of data collected have been used to establish a relationship between COD/VS for primary, secondary and digested sludge. Balances over the digesters show that ingoing COD is well balanced by outgoing COD and the COD content of the gas. COD-balances can be a useful tool for evaluating digester performance.

1 Introduktion

Slam utgör en mycket stor del av ett reningsverks kostnader, dels för behandling på reningsverket och dels för disponering. Med stora volymer att hantera finns mycket att vinna även på små minskningar av slammängder. Det finns i princip två sätt att minska slammängderna; att förbättra avvattningen eller att öka nedbrytningen av organiskt material.

Avvattningen bestäms av avvattningsutrustningen och av slammets avvattningsegenskaper. Avvattningsegenskaperna kan förbättras med kemisk eller termisk behandling. Det finns även exempel där armeringsmaterial i form av fibrer blandas in i slammet så att detta tål högre skjuvkrafter vid avvattningen.

Bättre nedbrytning ger förutom mindre slammängd som torrsubstans även en ökad gasproduktion om slammet stabiliseras genom rötning. Ökad nedbrytning kan erhållas genom förbehandling av slammet med termiska, biologiska (t.ex. enzymtillsatser), kemiska (t.ex. ozon) eller mekaniska (t.ex. ultraljud, malning, tryckförändringar) metoder. En översikt har publicerats av Ödegaard (2004).

Detta projekt tar upp möjligheten att utvinna mer biogas vid rötningsprocessen med hjälp av mekanisk desintegrering med ultraljud av överskottsslammet.

De fördelar som lyfts fram i samband med ultraljudsbehandling av slam är:

- Ökad gasproduktion
- Ökad nedbrytning av material
- Ökad nedbrytningshastighet och därmed mindre behov av rötkammarvolym
- Ökad rötkammarstabilitet
- Minskad skumning i rötkammare
- Förbättrad avvattning

En nackdel med metoden är energibehovet. I fokus står därför frågan om energianvändning; vinner man mer energi än vad man stoppar in? Ultraljudsbehandling kan även påverka polymerbehov vid avvattning och avvattningsegenskaper.

Två reningsanläggningar, Gässlösa reningsverk i Borås och Ernemars reningsverk i Oskarshamn har köpt in var sin ultraljudsanläggning, av olika fabrikat. Föreliggande rapport redogör för driftserfarenheterna hur anläggningarna har fungerat och vilken effekt de har haft på biogasproduktion, slammängd och skumning. Projektiden har varit 2,5 år.

2 Bakgrund

Överskottsslammet vid reningsverket i Borås har sedan många år inte tagits in i rötkamrarna utan letts i en sidoström från förtjockning direkt till avvattningen eftersom överskottsslammet har orsakat problem med skumning vilket omöjliggjort rötning. En önskan har därför länge funnits att hitta en teknik att förbehandla slammet innan rötning så att överskottsslammet kan tas in i rötkamrarna utan att skapa driftproblem. Att även kunna öka gasproduktionen är av intresse eftersom Borås Stad uppgraderar biogas till fordonsgas. Utifrån dessa förutsättningar bedömdes ultraljuds-tekniken som intressant för Borås Stad. Ultraljudsanläggningen togs i drift i januari 2005. Projekterfarenheterna från de 2,5 år som fortlöpt sedan driftstarten är sammanställda i föreliggande rapport.

Oskarshamns kommun hade möjlighet att med LIP-bidrag förnya sin slambehandling. Man anlade en ny slamavvattning baserad på modifierade torkbäddar och för att minska slammängderna installerades även en ultraljudsanläggning. Det fanns även förväntningar om att ultraljudsanläggningen skulle underlätta avvattningen av slammet. Ultraljudsanläggningen togs i drift 2003.

3 Syfte

Syftet med projektet var att i fullskala under normala driftbetingelser fastlägga hur stor ökning av gasproduktionen och hur stor minskning av mängden slam man kan uppnå genom ultraljudsbehandling av överskottsslam vid ett kommunalt reningsverk. De eventuellt uppnådda positiva effekterna skulle ställas mot investering och driftkostnad, speciellt energiförbrukning, för ultraljudsbehandlingen. Ett ytterligare syfte för Boråsanläggningen har varit att undersöka om ultraljudsbehandling av överskottsslam minskar skumning i rötkammare.

4 Ultraljudsteknik

Processerna som äger rum i en rötkammare kan i princip beskrivas som fyra steg: hydrolys, syrabildning, bildning av ättiksyra och metanbildning. I hydrolysstegets sönderdelas högmolekylära organiska föreningar till lågmolekylära lösliga föreningar som kan metaboliseras mikrobiellt. Hydrolysteget är det hastighetsbegränsande steget vid rötning av slam. I det biologiska överskottsslammet är en stor del av det organiska materialet inkapslat i celler. Detta är därmed inte direkt tillgängligt för rötning. Kan man genom förbehandling frigöra detta material redan innan rötkammaren kan det underlätta hydrolysstegets och uppehållstiden i rötkammaren kan förkortas. Ett sätt att förbehandla överskottsslam kan vara genom ultraljudsbehandling. Thiem m.fl. (2001) skriver dock: "Det saknas information om i vilken grad desintegrering av slam påverkar rötningsprocessen".

Behandling med ultraljudsteknik bygger på att slam utsätts för ultraljud, dvs. frekvenser på 20 kHz och högre. Dessa frekvenser ligger utanför det ljudintervall som det mänskliga örat kan uppfatta. Thiem m.fl. (2001) beskriver processen som att den höga frekvensen, vid en viss tillförd effekt, orsakar en periodisk komprimering/förtunning av mediet. I och med detta växer gasblåsor till för att några mikrosekunder senare kollapsa. Kollapsen framkallar starka skjuvkrafter runt gasblåsan. Skjuvkrafterna orsakar sönderdelning av cellerna i blåsans omgivning. I och med denna sönderdelning frigörs en del av det organiska material som tidigare varit bundet till slammet och återfinns i stället i den lösta fraktionen. Thiem m.fl. (2001) refererar till att temperaturen och trycket inuti den kollapsande gasblåsan uppgår till ca 5 000 K och flera hundra atmosfärer.

Ultraljudsbehandlingens inverkan på slammet beror på tillförd energi, frekvens och substratets egenskaper. Thiem m.fl. (2001) har visat att sönderdelning av överskottsslam är effektivare vid låga frekvenser, dvs. frekvenser i storleksordningen 20 kHz. Bougrier, Carrère och Delgenès (2005) hävdar att enligt deras undersökningar krävs det en minimiinsats på ca 1000 kJ/kg TS (0,28 kWh/kg TS) för att slå sönder cellerna i slammet. Lägre energiinsats reducerar flockstorleken men sönderdelar inte celler. Climent m.fl. (2007) undersökte effekten av energiinsatser på upp till 100 000 kJ/kg SS. Utlösningen av organiskt

material ökade linjärt upp till ca 20 000 kJ/kg SS för att sedan successivt avta.

5 Kort beskrivning av reningsverken och utrustningen

5.1 Borås Stad

5.1.1 Beskrivning av Gässlösa reningsverk

Gässlösa reningsverk har en anslutning på ca 80 000 fysiska personer. Med industri och andra verksamheter är anslutningen ca 100 000 pe (räknat på 70 g BOD/person, dygn). Tillrinningen är som årsmedelvärde ca 40 000 m³/d.

Gässlösa har grovrening, försedimentering, biologisk rening med kväveavskiljning enligt Biondenitoprincipen. Total slamålder är ca 25–30 dagar, varav ca hälften är aerob. Det finns ett separat kemiskt efterfällningssteg. Avskiljning sker med lamellsedimentering. Primärslammet och överskottsslammet förtjockas mekaniskt i varsin viraförtjockare. Slammet rötas därefter och avvattnas i centrifuger. Rötkammaren drivs mesofilt och värms upp via värmeväxlare på cirkulerande slam. Omrörning sker med propelleromrörare. Verket har fyra stycken rötkammare med en total volym på 6000 m³. Total slammängd in till rötkamrarna på ett år är ca 95 000 m³ (med en TS-halt på ca 3 %) varav ca 15 % utgörs av överskottsslam. Detta ger en genomsnittlig nominell uppehållstid på 23 dygn. Att överskottsslammet utgör en så pass liten del som 15 % av den totala slamvolymen beror på att det periodvis är avsevärd slamflykt från mellansedimenteringsbassängerna. Det överskottsslam som går ut från mellansedimenteringen avskiljs i kemsteget och följer sedan med kemslammet till försedimenteringsbassängerna. Den totala slammängden ut från reningsverket är ca 2 300 ton TS per år.

Ultraljudsutrustningen på Gässlösa är placerad efter viraförtjockaren. Överskottsslammet från biosteget, avvattnas i förtjockaren till en TS-halt mellan 3–5 %. Efter förtjockning pumpas slammet vidare av en excenterskruvpump till ultraljudsanläggningen. På utloppssidan av ultraljudsanläggningen pumpar ytterligare en excenterskruvpump slammet mot röt-kammaren.

Vid Gässlösa reningsverk har tidigare endast primärslam rötats eftersom problem med skumning har uppstått då överskottsslam tillförts rötningen. I bilaga A finns en processbild över reningsverket.

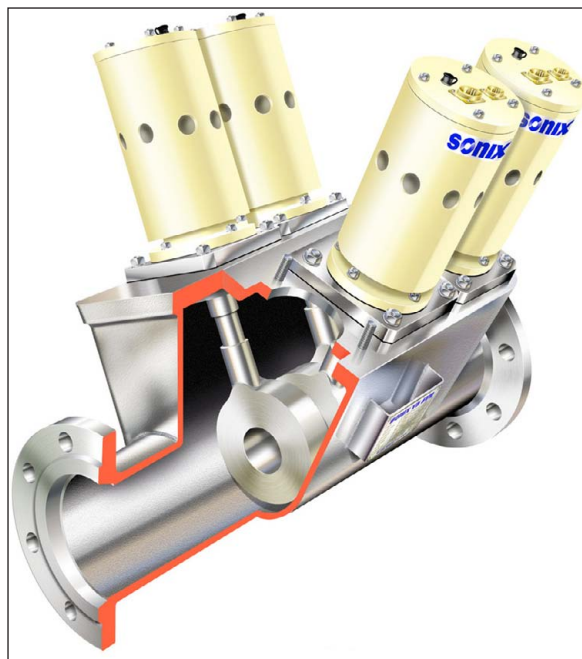
5.1.2 Ultraljudsutrustning Gässlösa

Ultraljudsutrustningen i Borås består av fyra stycken ”horn” som sitter i serie se figur 5-1 och figur 5-2. Antalet horn på anläggningen är bestämt utifrån det slamflöde reningsverket har. När överskottsslammet går igenom ultraljudsanläggningen passerar det genom centrumhålen och på yttersidorna av de fyra hornen. I dessa utrymmen skapas intensiva kavitationsfält, där celler och flockar i slammet sönderdelas av kavitationen. Genom denna sönderdelning ökar slammets specifika yta och därmed tillgängligheten av det organiska materialet för bakterierna i rötkammaren.

Ultraljudsutrustningen hanterar TS-halter på upp till 6 % och flöden upp till 6,25 m³/h. Vid tillförd energimängd på 2 kWh/m³ överskottsslam skall, enligt leverantören, en utrötningsgrad på 50 % på överskottsslammet uppnås. Tillförd effekt för varje horn som är i drift är ca 2,2 kW. Trycket i anläggningen är 1 till 2 bar och tryckdifferensen över anläggningen



Figur 5-1. Ett s.k. horn som är påverkat av kavitation. (Foto Maria Dåverhög).



Figur 5-2. Ultraljudsenheten på Gässlösa. Slammet passerar 4 horn i serie. (Bilden från Sonico Ltd).

ska inte överstiga 0,5 bar. Anläggningen får inte köras med enbart vatten i systemet. Utrustningen upptar relativt lite utrymme, ca 1x1x1 meter. Anläggningen är av typen Sonix™, utvecklad av Sonico Ltd, England. Figur 5-3 visar hela ultraljudsanläggningen.



Figur 5-3. Ultraljudsanläggningen installerad på Gässlösa. (Foto Maria Dåverhög).

5.2 Oskarshamns kommun

5.2.1 Beskrivning av Ernemars avloppsreningsverk

Ernemars reningsverk är uppbyggt med grovrening med fingaller, sandfång, försedimentering och biologisk rening och kväveavskiljning med fördenitrifikation. Fosfor avskiljs genom efterfällning med polyaluminiumklorid och avskiljning med flotation. Kemslammet pumpas till sandfånget och avskiljs således tillsammans med primärslammet i försedimenteringen. Vid hög tillrinning till verket är det tidvis avsevärd slamflykt från mellansedimenteringen varför primärslammet tidvis också innehåller en hel del överskottsslam. Periodvis kan slamflykten vara så pass stor att något överskottsslam ej behöver tas ut.

Slambehandlingen vid verket bestod ursprungligen av förtjockning, rötning och avvattnings med centrifug. Oskarshamn kommun byggde 2002 med s.k. LIP-bidrag om slambehandlingen. Det installerades mekaniska förtjockare för primärslam och överslottsslam, det installerades en ultraljudsanläggning för desintegrering av överskottsslam före rötning och det installerades modifierade torkbäddar som skulle ersätta den mekaniska avvattnings. Torkbäddarna skiljer sig från konventionella torkbäddar genom att de kan försättas under undertryck för att underlätta dräneringen. Det kan också tillföras luft under torkbäddarna. Leverantören kallar dessa torkbäddar "biofilter". I bilaga B finns en processbild över reningsverket.

Från år 2003 är således slambehandlingen uppbyggd så att primärslam och överskottsslam förtjockas var för sig i en mekanisk förtjockare till 4–6 % TS. Det förtjockade primärslammet pumpas direkt till röt-kammaren. Det förtjockade överskottsslammet kan antingen pumpas direkt till röt-kammaren eller till röt-kammaren via ultraljudsanläggningen. Efter rötning gick slammet under 2004 och fram till augusti 2005 till avvattnings på torkbäddarna. Den ursprungliga tanken var att slammet skulle ackumuleras på torkbäddarna under 6–7 år varefter det skulle bortforslas. (Jämfört med s.k. vassbäddar är torkbäddarnas yta liten, ca 0,25 m² per ansluten person). Torkbäddarna har inte fungerat som förväntat och efter drygt 1,5 års drift var de fyllda med slam. Enbart obetydliga mängder har kunnat tillföras efter augusti 2005 och i

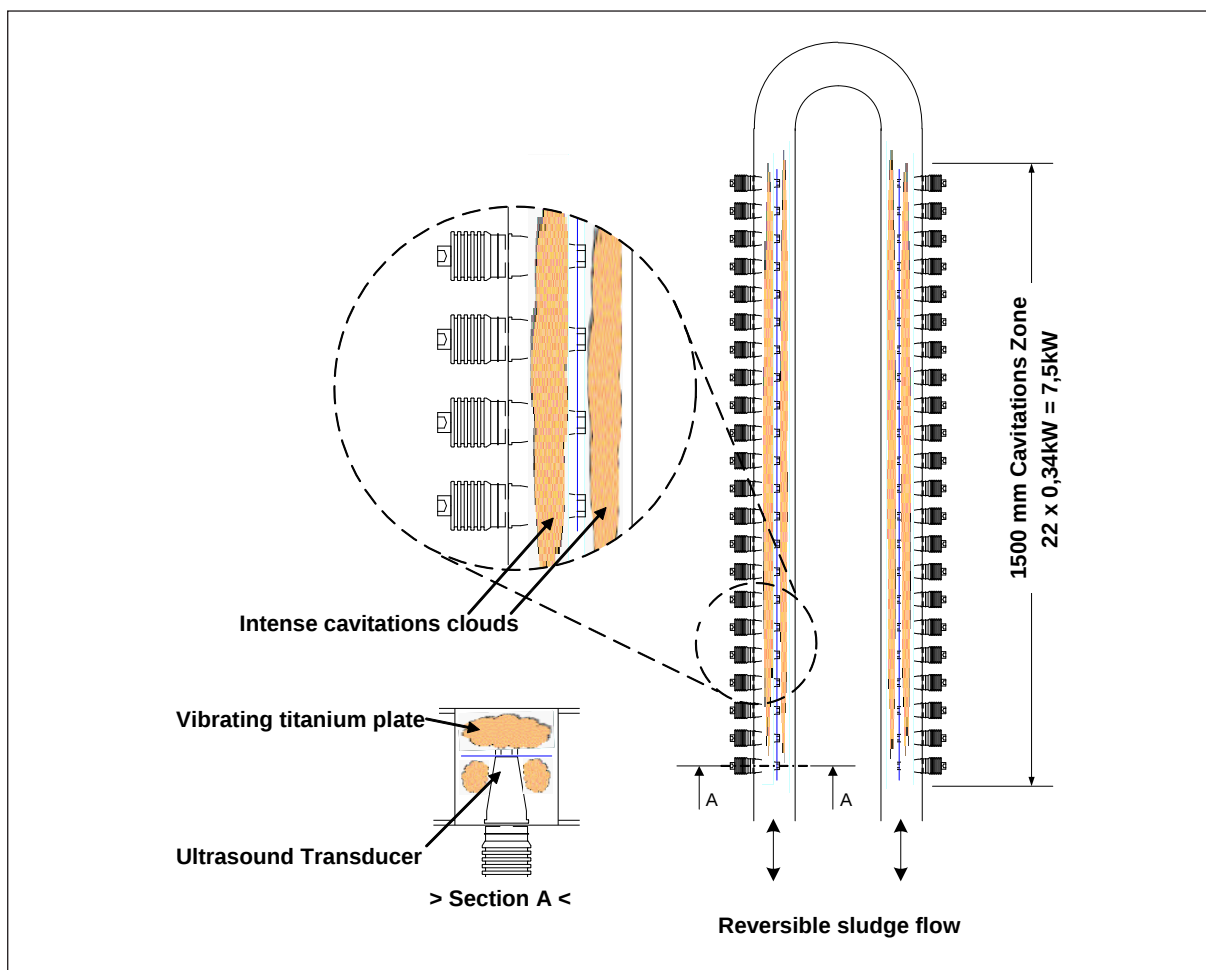
juli 2007 är bäddarna fortsatt helt fyllda. Dräneringen kan inte mer än kompensera för nederbörden. Sedan augusti 2005 har därför slammet avvattnats med centrifugerna.

5.2.2 Ultraljudsutrustning Ernemar

Utrustningen i Ernemar är levererad av UltraSonus. Ett foto av installationen finns i figur 5-4 och en principskiss i figur 5-5. Reaktorn består av en lång spalt. I mitten av spalten finns en skiva som är förbunden med ett antal ultraljudsgivare. När skivan vibrerar genereras kavitationsbubblor. Slammet pumpas genom reaktorn. För att kunna hålla önskad flödes-hastighet genom reaktorn cirkuleras en del av slammet. Installerad effekt på ultraljudsutrustningen är 15 kW. Utrustningen styrs av en lokal dator och är utrustad med flödes- och TS-mätare. Detta ger möjlighet att driva anläggningen med en förutvald energiinsats per kg TS. Energiinsatsen ligger i området 0,3–0,5 kWh/kg TS.



Figur 5-4. Ultraljudsanläggningen installerad på Ernemar. (Bilden från UltraSonus).



Figur 5-5. Principskiss på ultraljudsanläggningen på Ernemar. (Bilden från UltraSonus).

6 Principer och försöksupplägg

6.1 Principer för att mäta effekten av ultraljudsbehandling

Principer att mäta effekten av ultraljudsbehandling kan vara:

1. Ökad mängd gas

Det är svårt att säkert mäta gasflöden, men trots fel i absolutvärden bör dock förändringar i gasflöden kunna mätas. När det gäller gasflöden så reagerar rötprocesserna snabbt på förändringar i tillförsel av nedbrytbart material. Genom att öka eller minska tillförseln av mängden slam som kan brytas ned, dvs.

variera tillförd mängd organiskt material borde det vara möjligt att kunna påvisa skillnader i producerad mängd gas och därmed även kunna påvisa skillnader i nedbrytbarhet.

2. Minskad mängd slam – bättre utrötningsgrad

Att säkert mäta minskning i slammängd är svårt eftersom avskild slammängd varierar. Om den industriella belastningen är liten finns möjlighet att göra årsvisa jämförelser. Detta förutsätter även god kontroll av tillförd mängd externslam. En slammminskning på årsbasis av 10 % bedöms vara möjlig att påvisa. En observerad minskning kan verifieras genom att följa upp utrötningsgraden i rötkammaren.

3. Ökning av koncentration av konservativa ämnen i slammet

Om man förutsätter att avskiljningen i vattenreningen av en konservativ substans (t.ex. fosfor) är konstant, så skall koncentrationen av denna substans i slammet

öka om nedbrytningen av slammet ökar. Variationskoefficienten för fosforkoncentrationen i rötat slam är ofta drygt 5 % varför det krävs åtskilliga prover för att kunna fastlägga om någon signifikant förändring föreligger.

4. Ökning av organisk substans i vätskefas

Att mäta förändring av organisk substans (analyserat som COD¹) i vätskefas är enkelt. Nackdelen är att man inte direkt mäter det intressanta, dvs. ökad gasmängd eller minskad slammängd. Tidigare forskning har dock visat på ett klart samband mellan överföring av organisk substans till vätskefas och ökad gasproduktion (Thiem m.fl. 2001; Grönroos m.fl. 2005; Bougrier, Carrère och Delgenès 2005; Climent m.fl. 2007; Nickel och Neis 2007). Förutom att analysera halten COD kan man även analysera halten BOD mätt före och efter ultraljudsbehandling. Eilertsen (referensgruppsmöte 6/9 2005) menar att genom att ultraljudsbehandla överskottsslam får man en påverkan på slammet som gör det mer lättnedbrytbart även om inte cellerna sönderdelas i så hög grad att man mäter någon ökning i löst COD.

5. Påverkan på flockstruktur, filament och mikroorganismer

Genom att mikroskopera överskottsslam före och efter passage genom ultraljudsanläggningen kan eventuella skillnader i flockstruktur och påverkan på filament detekteras.

6.2 Försöksupplägg Gässlösa

På Gässlösa reningsverk analyseras de olika fraktionerna slam med avseende på bl.a. TS och GF på veckobasis enligt särskilt schema. Under hela projektperioden har provtagningsprogrammet utvidgats med ytterligare ett antal parametrar. Det utökade provtagningsprogrammet återfinns i bilaga C. På flera ställen i slamhanteringen sitter flödesmätare och TS-mätare för kontinuerlig övervakning av processen.

På Gässlösa valdes att undersöka ultraljudsbehandlingen enligt följande:

Ökad mängd gas – responstider

För att kunna bedöma effekten av en varierad tillförsel av nedbrytbart material bör man veta hur responstiderna ser ut för rötkamrarna, dvs. hur snabbt de reagerar på förändringar i organisk belastning. Försök med tillförsel av vissa slamfraktioner och reduktion av andra har därför gjorts. Försöken har följts upp genom mätning av gasflöden och uppmätta responstider från det att belastningen minskade till dess att gasproduktionen når fortfarighetstillstånd.

Minskad mängd slam – bättre utrötningsgrad

Beräkningar har gjorts på utrötningsgraden i de olika rötkamrarna. Detta har gjorts med underlag från det stora antalet mätningar som genomförts enligt kontrollprogrammet.

Ökning av organisk substans i vätskefas

Enligt provtagningsprogrammet har analyser på COD-halten i löst fas och på hela provet gjorts på förtjockat överskottsslam och ultraljudsbehandlat överskottsslam. Även halten BOD² har analyserats på förtjockat överskottsslam och ultraljudsbehandlat överskottsslam.

Påverkan på flockstruktur, filament och mikroorganismer

Vid ett antal tillfällen har slamprover för mikroskopering tagits före och efter ultraljudbehandling. Mikroskoperingen har utförts av AnoxKaldnes i Lund.

Ökning av koncentration av konservativa ämnen i slammet

Detta tillvägagångssätt har inte använts då det bedömdes att metodiken var för okänslig i relation till analysmetodens osäkerhet och rimlig provtagningsfrekvens.

Under projektets första två år tog alla 4 rötkammare på Gässlösa emot det ultraljudsbehandlade bioslammet. Under projektets sista 6 månader alternerades dock införseln av slam till ett rötkammarpar i taget. Primär- och externslam gick alltid in till bägge rötkammarparen men det ultraljudbehandlade slammet gick under några månader endast till det ena rötkammarparet för att sedan endast föras in till det andra paret.

1 COD – Chemical oxygen demand, den kemiska syreförbrukningen.

2 BOD – Biochemical oxygen demand, den biologiska syreförbrukningen.

6.3 Försöksupplägg Ernemar

Intentionerna för uppföljningen vid Ernemar var densamma som för Gässlösa. Då det i likhet med förhållandena vid Gässlösa inte heller vid Ernemar funnits några längre perioder med störningsfri drift så inskränker sig möjligheterna till uppföljning till att se på utlösningen av organisk substans över ultraljudsanläggningen.

7 Resultat

7.1 Gässlösa

7.1.1 Drifterfarenheter – ultraljudsanläggningen

Vid Gässlösa har det varit svårt att få längre sammanhängande perioder med full drift på ultraljudsanläggningen. Tiden då alla fyra horn har fungerat har varit mycket begränsad. Oftast har bara ett eller två horn varit i drift trots att mängden slam "krävt" fler horn. Detta har omöjliggjort, pga. skumningsproblematik, införsel av överskottsslam till rötkammaren under långa perioder. Istället har överskottsslammet efter ultraljudsbehandling letts direkt till slutavvattnings. Någon generell förklaring till att hornen inte har fungerat har inte erhållits från leverantören utan det har varit problem med hornens legeringar, fel i programvaran, fel på omformaren i själva hornet m.m. Hornen har inte haft den livslängd som utlovats.

Ultraljudsenheten är enligt leverantören känslig för tryckstötter. När förtjockaren startar upp och slammet börjar ledas till ultraljudsanläggningen stiger till en början trycket. Trycket har stundtals överskridit satt larmgräns och anläggningen har stannat. En karens på 7 minuter, från och med att förtjockaren har startat och börjat leverera slam tills dess att ultraljudet går igång, har lagts in för att skydda mot dessa tryckstötter. Även tryckdifferensen mellan in- och utlopp har varit

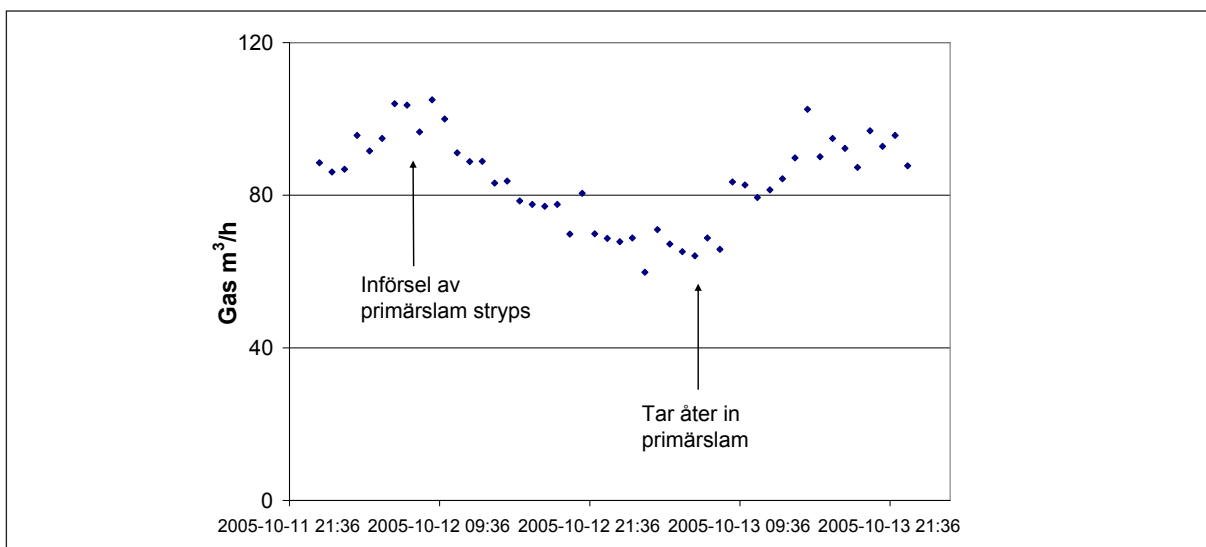
tvungen att hållas under 0,5 bar, något som inte har varit helt lätt. Leverantören har inte specificerat varför hornen är känsliga för tryckstötter. Trycket in till ultraljudsanläggningen har varierats beroende på hur hornen arbetar (när hornen är äldre kan man behöva justera upp trycket), men har hållits inom intervallet 1,2–2 bar. Vid upphandling av anläggningen bedömde leverantören att det inte fanns något behov av automatisk vattenspolning av anläggningen, något som senare ändå fick installeras. Spolningen syftar till slam inte ska fästa på hornen i allt för stor grad.

Dessa driftproblem har inneburit att både drift- och verkstadspersonal har lagt ner avsevärd tid på underhåll och justeringar på hela installationen. Eftersom ultraljudsanläggning varit i drift så liten del av tiden har det inte varit möjligt att utvärdera effekten på gasproduktion och slammängd från driftsdata. Utvärdering av ultraljudsbehandlingen har därför fått förlitat sig på analysresultaten från provtagningsprogrammet.

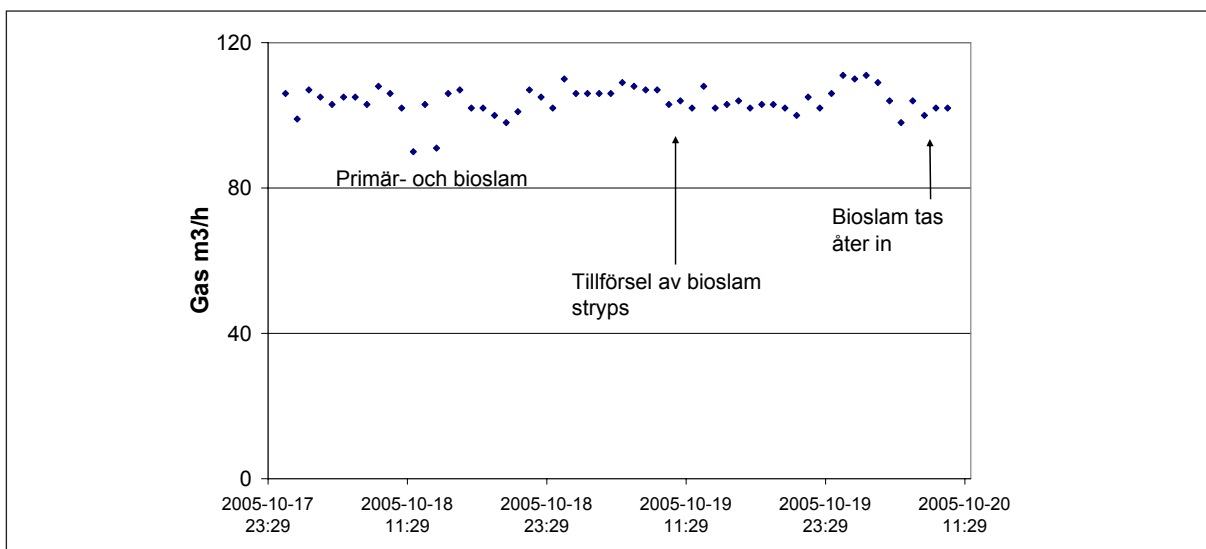
7.1.2 Fullskaledrift – responstid och utrötningsgrad

Den ursprungliga tanken var att följa upp förändringar i gasproduktion vid drift med och utan ultraljudsbehandling av överskottsslammet. För att göra detta krävdes att det först gjordes en utredning om hur rötprocessen i rötkammaren reagerar på belastningsförändringar, dvs. hur snabbt efter det att man har ändrat tillförd mängd nedbrytbart material kan man se detta på producerad mängd gas. Några inledande försök gjordes därför med att reducera införseln av primärslam respektive överskottsslam. Efter det att slamtillförseln reducerats loggades gasproduktionen. Vid reduktion av primärslam var gasminskningen omedelbar och mätbar. Vid strypning av överskottsslammet noterades ingen nedgång i gasutveckling under de 22 timmar på testet kördes. Överskottsslammet utgör dock en mindre del av den totala mängden. För att testa ultraljudsbehandlat överskottsslam, minskades tillförseln av primärslam under ett dygn. Sedan togs åter ultraljudsbehandlat slam in i rötkammaren. Gasproduktionen loggades. Ingen effekt på gasproduktionen noterades efter uppehållet. Alla tre försöken illustreras i figur 7-1 (nästa sida).

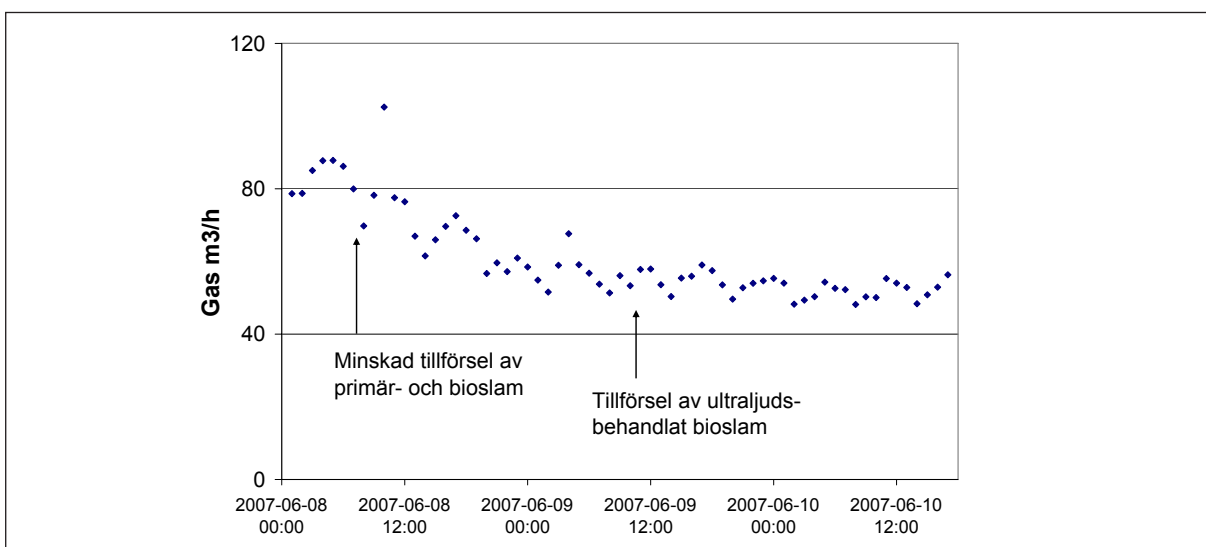
Beskickningen av överskottsslam in till rötkamrarna har varit mycket ojämn under hela projektiden. Endast



a. Tillförseln av primärslam stryps från ca 9,5 m³/h till 2,9 m³/h och gasproduktionen sjunker omedelbart.



b. Tillförseln av överskottsslam stryps från 2,2 m³/h från till 0 m³/h, ingen förändring i gasproduktionen noteras.



c. Tillförsel av 2 m³/h ultraljudsbehandlat överskottsslam utan att gasproduktionen stiger.

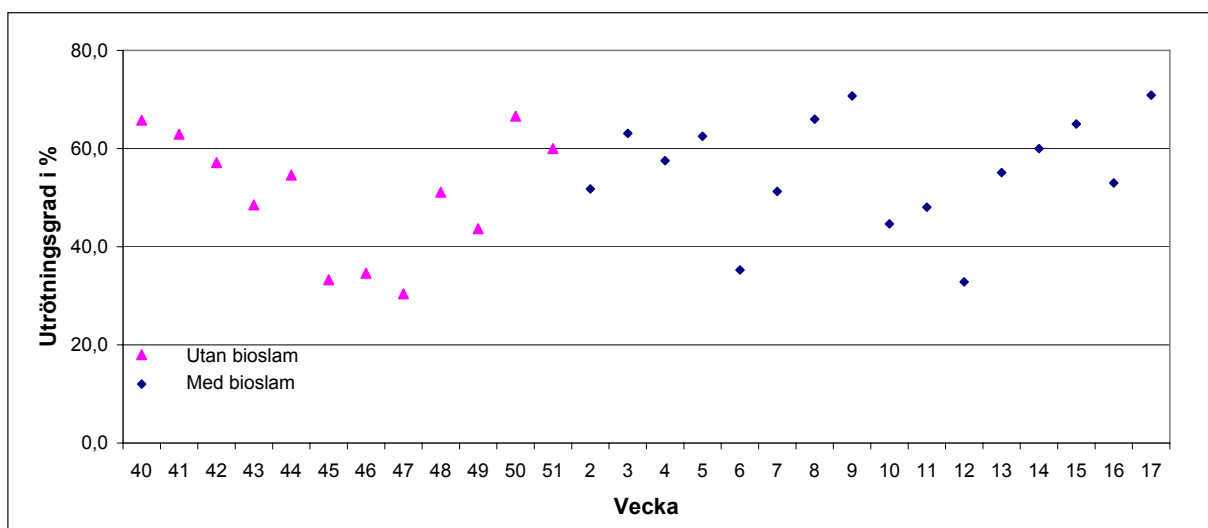
Figur 7-1 (a, b och c). Ändrad tillförsel av slam och vilken påverkan det har på gasproduktionen.

under våren 2007 var det möjligt att kontinuerligt ta in överskottsslammet i röt-kamrarna. Utrötningsgraden beräknas därför endast för det röt-kammarpar som under våren 2007 tog emot ultraljudsbehandlat överskottsslam.

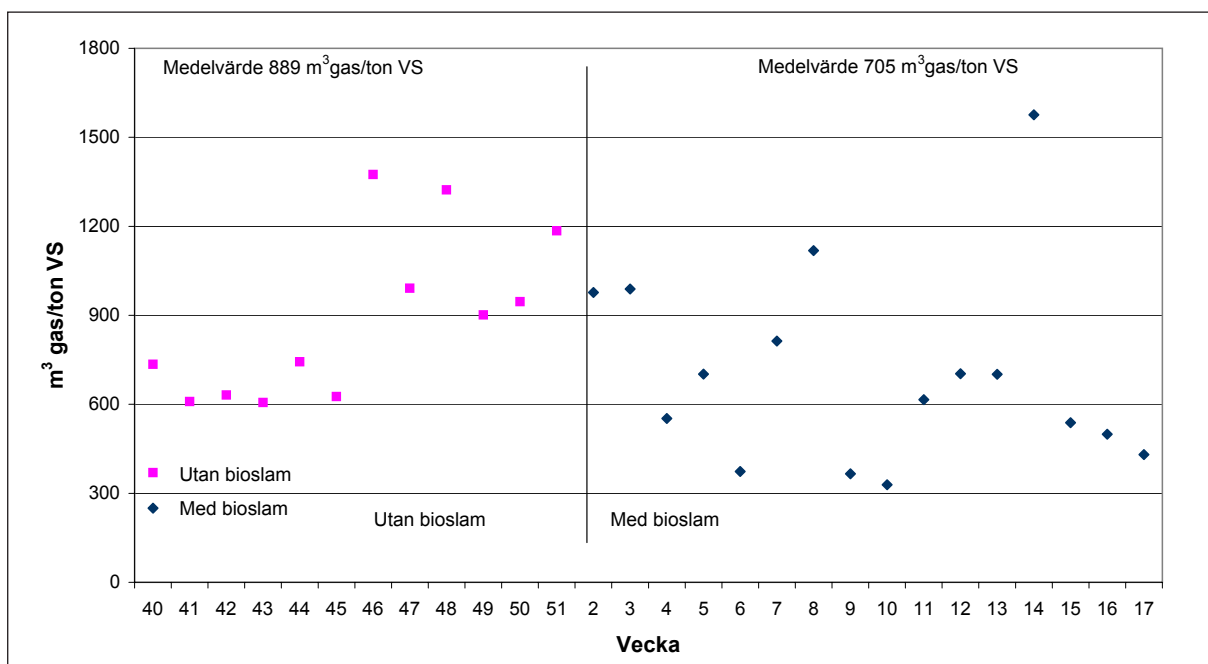
Tabell 7-1 nedan visar utrötningsgraden för ett röt-kammarpar med och utan tillförsel av ultraljuds-behandlat överskottsslam. Variationen mellan veckorna är stor enligt figur 7-2 men det ultraljudsbehandlade överskottsslammet verkar inte ha bidragit till en lägre

Tabell 7-1. Jämförelse mellan utrötningsgraden hos ett röt-kammarpar beroende på tillförsel av ultraljudsbehandlat överskottsslam eller inte.

Typ av slam	Utrötningsgrad %	Standardavvikelse	Undersökningstid
Primär- och externslam (ett röt-kammarpar)	51	12,1	3 månader
Primär-, extern- och UL-överskottsslam (ett röt-kammarpar)	55	10,4	4 månader



Figur 7-2. Variation av utrötningsgraden beräknad på veckobasis i ett röt-kammarpar.



Figur 7-3. Mängden producerad gas i m³ per nedbruten VS i ton, uppmätt i ett röt-kammarpar. Om man istället anger per ton tillförd VS så blir genomsnittsvärdena 450 respektive 390 m³ biogas.

utröttningsgrad. Beräkningarna är gjorda på mängden organiskt material ($VS=TS*GF$) in och ut. Figur 7-2 visar hur utröttningsgraden varierat per vecka. Den högre utröttningsgraden med ultraljudsbehandlat slam enligt tabell 7-1 motsägs dock av gasmätningarna (figur 7-3, ovan), vilka indikerar sämre nedbrytning när ultraljudsbehandlat överskottsslam tillförs. Detta visar på svårigheten med uppföljning i fullskala.

Mängd och typ av slam in till verket har varierat under projektiden och omöjliggjort direkt mätning av en eventuell slamminskning.

7.1.3 Analyser – ökning av organisk substans i vätskefas

Utgångspunkten har varit att mäta förändringar i halten COD i behandlat och obehandlat överskottsslam. Överskottsslammet efter förtjockaren har

analyserats med avseende på COD-halt både totalt i hela provet och i den lösta fraktionen. Likaså har det ultraljudsbehandlade slammet analyserats med avseende på löst COD. Slammet har centrifugerats för att kunna skilja den lösa fasen från det fasta materialet. Förhållandet COD-analyserna emellan visar på hur mycket COD som övergått till en mer lättnedbrytbar, löst fraktion.

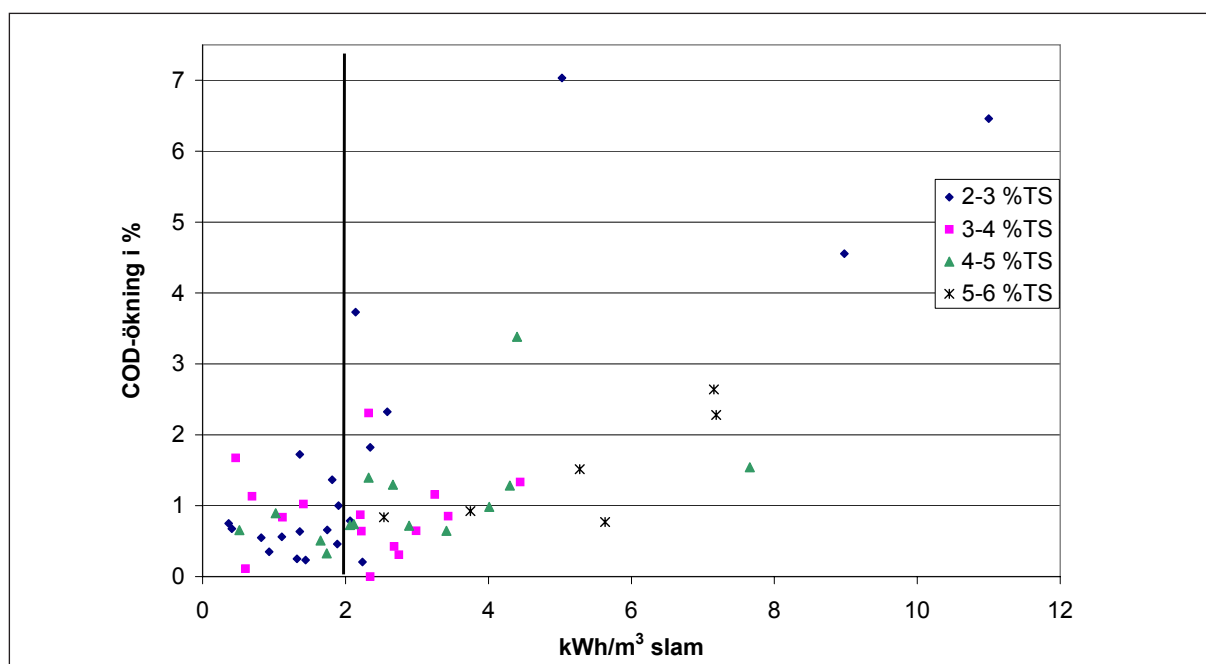
$$\frac{COD_{UL\text{ löst}} - COD_{0\text{ löst}}}{COD_{0\text{ totalt}}} \times 100 = \% \text{ förändring} \quad (7-1)$$

Formel 7-1. Procentuell förändring på andelen löst COD i det ultraljudsbehandlade slammet jämfört med det obehandlade.

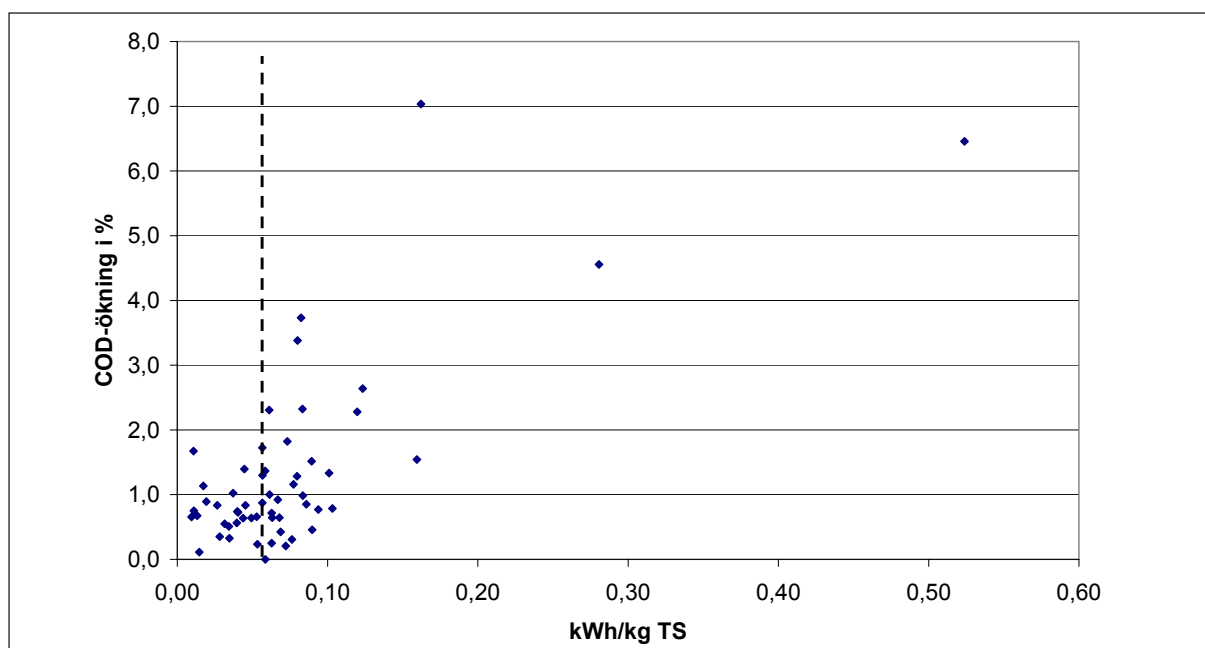
Variationer i uppmätt COD-halt tillsammans med andra data visas i tabell 7-2. Vid plottning av kvoten COD/VS ($VS=TS*GF$) på normalfördelningspapper erhålls en raklinje, vilket tyder på att data är normalfördelade.

Tabell 7-2. Analysdata på överskottsslammet. Baserat på 83 stycken slamprov.

		Medel	Median	Standardavvikelse
Överskottsslam	COD (mg/l)	48 200	48 500	13 100
	COD/VS	1,56	1,54	0,39
Öslam centrifugat	COD (mg/l)	701	635	397
ULbehandlat öslam centrifugat	COD (mg/l)	1353	1200	



Figur 7-4. Procentuell ökning av löst COD relativt total-COD beroende på TS och energiinsats i kWh/m³ slam vid ultraljudsbehandling. Den gräns för vilken det, enligt leverantören, krävs att erhålla en 50 %-utrötning av överskottsslammet är inritad i bilden.



Figur 7-5. Procentuell ökning i löst COD beroende på tillförd energi i kWh/kg TS. Med en TS-halt på 4 % blir gränsen (enligt leverantören) för att erhålla en 50 %-utrötning av överskottsslammet 0,05 kWh/kg TS. Denna är inritad i bilden.

Energiinsatsen per enhet slam har varierats för att se hur detta påverkar frigöringen av organisk substans. Ökningen i löst COD har satts i relation till slammets TS-halt och tillförd energimängd (figur 7-4 och 7-5, ovan).

För de data som redovisas i figur 7-5 ligger ökningen i löst COD i medeltal omkring 1,0 % och medianen på 0,9 %. För att erhålla en utröttningsgrad på ca 50 % av överskottsslammet erfordras enligt leverantören en energimängd på 2 kWh/m³ behandlat slam varför det i driften har eftersträövats att hålla minst denna nivå på energiinsatsen. Vid ungefär 3/5 av de tillfällen som prov togs var den tillförda energin över angiven nivå. Övriga tid begränsades av att för få horn var i drift och tillförd energi var då mindre än 2 kWh/m³. Dock är det svårt att se någon skillnad i procentuell ökning av halten COD då tillförd effekt ligger i intervallet 1–4 kWh/m³. Om däremot den tillförda energi överstiger 4 kWh/m³ tycks det som om andelen löst COD ökar ju mer energi som tillförs.

7.1.4 Påverkan på flockstruktur, filament och mikroorganismer

Mikroorganismer och bakterier i överskottsslammet som passerar genom ultraljudsanläggningen skall förhoppningsvis slås sönder. Ett huvudmotiv för

installationen av ultraljudsanläggningen på Gässlösa var att minska skumningsproblemen i rötkammaren. Därför har det varit av särskilt intresse att se om behandlingen ”klipper upp” filamentbakterier som t.ex. Microtrix Parvicella som anses vara orsaken till skumningsproblem i rötkamrarna. Under försökets gång har skumning inträffat vid ett antal tillfällen. Det har inte kunnat uteslutas att det i de fallen var överskottsslammet som orsakade skumningen. Men under projektets sista 6 månader med ultraljudet igång och då övrig drift på verket var stabil, bl.a. ingen slamflykt, uppträdde ingen skumning.

Förtjockat överskottsslam och ultraljudsbehandlat överskottsslam har mikroskoperats³ vid tre tillfällen under projektetiden. Observationerna redovisas i tabell 7-3 (nedan).

Gemensamt för alla de mikroskoperade proven på ultraljudsbehandlat slam är att det fortfarande finns mikrodjur kvar efter behandling. Dessa djur är känsliga för yttre påverkan, väsentligt känsligare än bakterieceller (Ternström muntlig kommentar), detta tyder på att allt slam inte har utsatts för påverkan från ultraljudet vid passage förbi hornen.

Antalet prov som mikroskoperats är få men resultaten indikerar att ultraljudsbehandling påverkar filamenten.

³ Samtliga mikroskoperingar har utförts av AnoxKaldnes i Lund.

Tabell 7-3. Observationer från jämförande mikroskopering mellan obehandlat och ultraljudsbehandlat överskottsslam. Kommentarer från mikroskoperingsprotokollen.

Datum	Observationer	Driftdata
2005-02-08	Flockar: Tydlig minskning av storleken men fortfarande sammanhängande flockar efter UL. Mikrofauna: Minskning av antalet med ca 60–70 %. Eftersom djuren är känsliga tyder detta på låg effekt eller att en relativt stor del av flödet passerat utan behandling. Frisimmande bakterier: Liten men signifikant ökning	Horn i drift: 3 Slamflöde: 2 m ³ /h Tillförd energi: 3,3 kWh/m ³ TS: 4,7 %
2005-02-15	Flockar: Tydlig minskning av storleken men fortfarande många sammanhängande flockar efter UL. Rikligt även med små flockar (<50 µm) vilka var ovanliga före UL. Mikrofauna: 80 % av alla ciliater och >80 % minskning av stora flagellater. Övriga djur för få för att bedöma. Frisimmande bakterier: Signifikant ökning. Generellt: Kraftig men inte fullständig effekt (fortfarande en del levande djur).	Horn i drift: 4 Slamflöde: 2,5 m ³ /h Tillförd energi: 3,5 kWh/m ³ TS: 4,8 %
2007-02-21	Flockar: Stora flockar dominerar, men storleken har minskat jämfört med referensen. Antalet pinpointflockar är ganska högt. Filament: Antalet fria har ökat jämfört med referens. Mikrofauna: Har minskat jämfört med referens. Frilevande bakterier: Har ökat. Generellt: UL har haft effekt, ciliaterna är fortfarande vid liv vilket visar att bara delar av slammet påverkats.	Horn i drift: 1 Slamflöde: 2 m ³ /h Tillförd energi: 1,1 kWh/m ³ TS: 3,9 %
2007-02-21	Flockar: Biomassan domineras av mycket stora flockar, ingen ändring jämfört med referens. Filament: Antalet fria har ökat jämfört med referens. Mikrofauna: Har minskat något. Frilevande bakterier: Har ökat. Generellt: Effekten är mindre än provet ovan.	Horn i drift: 2 Slamflöde: 1 m ³ /h Tillförd energi: 4,4 kWh/m ³ TS: 3,9 %

7.1.5 COD-balans

Det är inte bara överskottsslam som har analyserats med avseende på COD utan dessa analyser har gjorts på samtliga slamfraktioner som har gått in till röt-kamrarna. Med de COD-analyser som gjorts på inkommande och utgående slam till röt-kammaren har en COD-balans upprättats. Minskningen i COD kan teoretiskt omräknas till bildad metangas. Denna

beräknade mängd gas jämfördes sedan med den uppmätta gasmängden. Tabell 7-4 visar god överensstämmelse vilket indikerar att man kan använda COD-analyserna för att beräkna mängden producerad gas. Tabell 7-5 (nedan) visar COD-data för de olika slamfraktionerna.

Kvoten COD/VS för både primärslam och överskottsslam i denna studie stämmer överens med de resultat som Krepp och Solheim (2000) redovisar.

Tabell 7-4. Uppmätta och beräknade gasmängder under april och maj 2007. Observera att mängden slam in till röt-kamrarna skiljer.

	Beräknad gasproduktion utifrån CODmätningar (m ³)	Uppmätt gasproduktion (m ³)
Rötkammare 1+2 (med UL)	121 030	113 040
Rötkammare 4+5 (utan UL)	96 601	98 300

Tabell 7-5. Analysdata från olika analyserade slamfraktioner.

		Medel	Median	Standardavvikelse
Överskottsslam	COD (mg/l)	48 200	48 500	13 100
	COD/VS	1,56	1,54	0,39
Primärslam	COD (mg/l)	60 200	58 000	16 100
	COD/VS	1,72	1,68	0,31
Rötslam	COD(mg/l)	22 050	21 000	6 100
	COD/VS	1,45	1,46	0,24

7.1.6 BOD-analyser

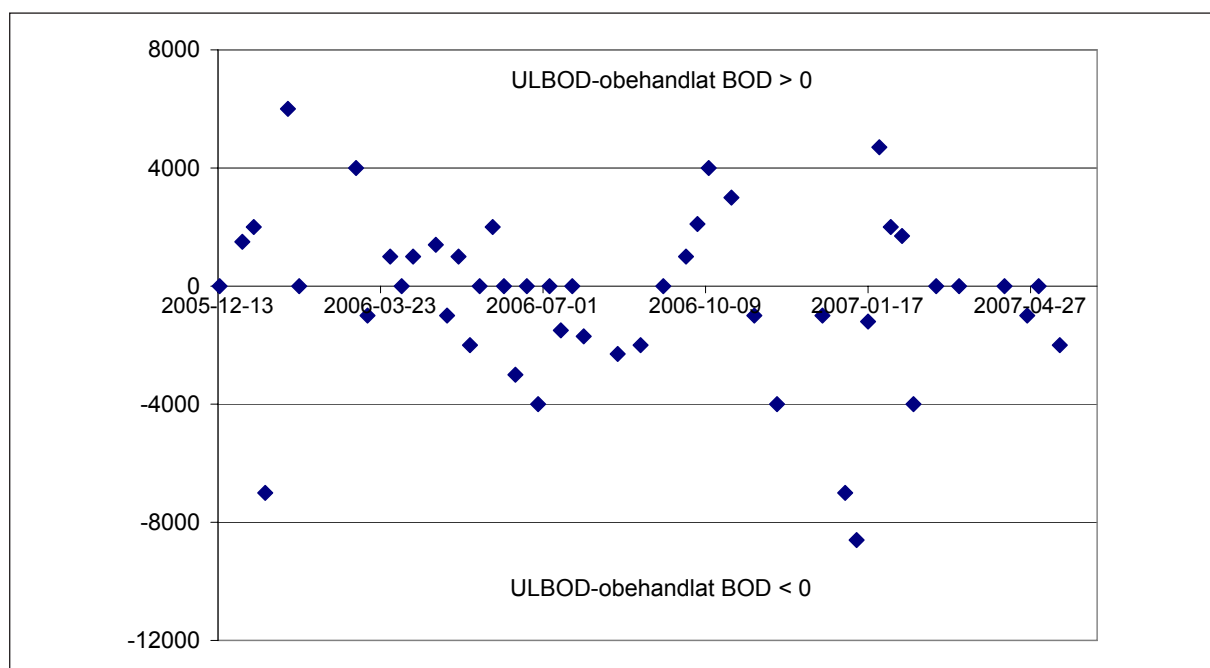
Analyser har även gjorts på den biokemisk syreförbrukningen, BOD. Halten BOD både ökar och minskar efter ultraljudsbehandling, se figur 7-6 (ovan).

Analysmetoden för BOD har stor spridning och det framgår tydligt att analysosäkerheten är väsentligt större än eventuell påverkan av ultraljudsbehandlingen. Det finns således inget stöd för hypotesen om att då slammet utsätts för ultraljudsbehandlingen så sker en påverkan av cellerna så att även om de inte går sönder helt så blir de mer lättnedbrytbara.

7.2 Ernemar

7.2.1 Drifterfarenheter – ultraljudsanläggningen

Ultraljudsanläggningen togs i drift januari 2003. Igångkörningsperioden blev lång eftersom många driftstörningar uppstod. Ultraljudsgeneratoren fick bytas ett antal gånger och det var även bekymmer med kylsystemet. Garantibesiktning skedde i januari 2005 och under 2003-4 var anläggningen i drift sammanlagt 95 dygn. Från september 2003 till februari 2004 var dock röt-kammaren ur drift varför tillgängligheten låg på knappt 20 % under de två första åren. Därtill har drift av ultraljudsanläggningen tidvis förhindrats av att överskottsslam inte funnits tillgängligt.



Figur 7-6. Differensen i BOD7 mellan ultraljudbehandlat överskottsslam och obehandlat dito. Totalhalten BOD är ca 13 000 mg/l.

Under 2005 och 2006 var det upprepade driftstörningar. En stor del av dessa berodde på igensättningar med slam i ultraljudsanläggningen. Leverantören rekommenderade att installera en s.k. macerator för att sönderdelade grövre föroreningar i slammet. Maceratorn är nu (juli 2007) installerad men drift av ultraljudsanläggningen med macerator har ännu inte prövats eftersom rötkammaren varit avställd sedan januari 2007 pga. omrörarproblem. På grund av de korta perioderna med ultraljudsbehandling har det inte varit möjligt att utvärdera en minskning i slammängd eller förbättrade avvattningssegenskaper.

7.2.2 Analyser – Ökning av organisk substans i vätskefas

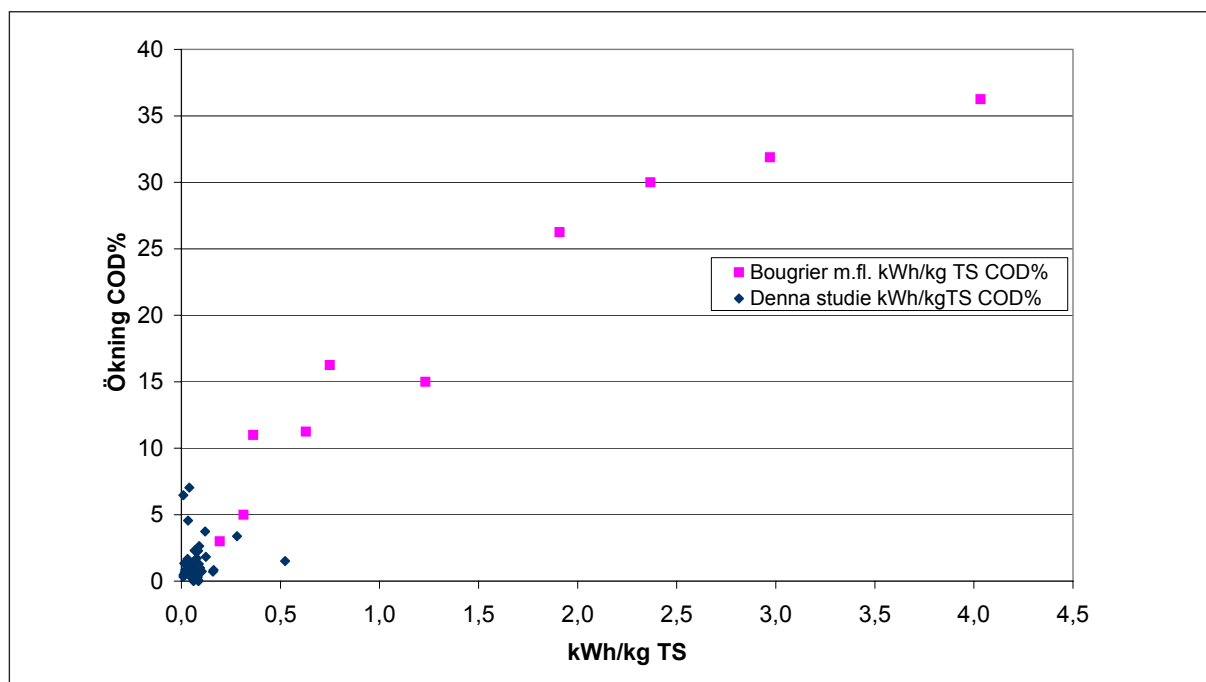
Från Ernemar finns det färre analyser över ultraljudsanläggningen bland annat på grund av att det varit kortare tid då både rötkammaranläggningen och ultraljudsanläggningen varit i drift. Differensen i löst COD över ultraljudsanläggningen har uppmätts vid 13 tillfällen. Resultaten visar att löst COD ökar med mellan 660 och 4 260 mg/l med ett medelvärde på 1 640 mg/l. Med ett uppskattat COD innehåll i förtjockat överskottsslam på ca 50 000 mg/l, innebär detta att ca 3 % av COD i överskottsslamm överförs

till löst fas. Utlösningen är ca 3 ggr större än den som uppmätts vid Gässlösaverket. Detta förefaller rimligt då anläggningen vid Ernemar skall ges en energiinsats på 0,3–0,5 kWh/kg TS. Jämför man med utlösningen vid Gässlösa vid de tillfällen man där haft energiinsatser på samma nivå så är utlösningen ungefär densamma.

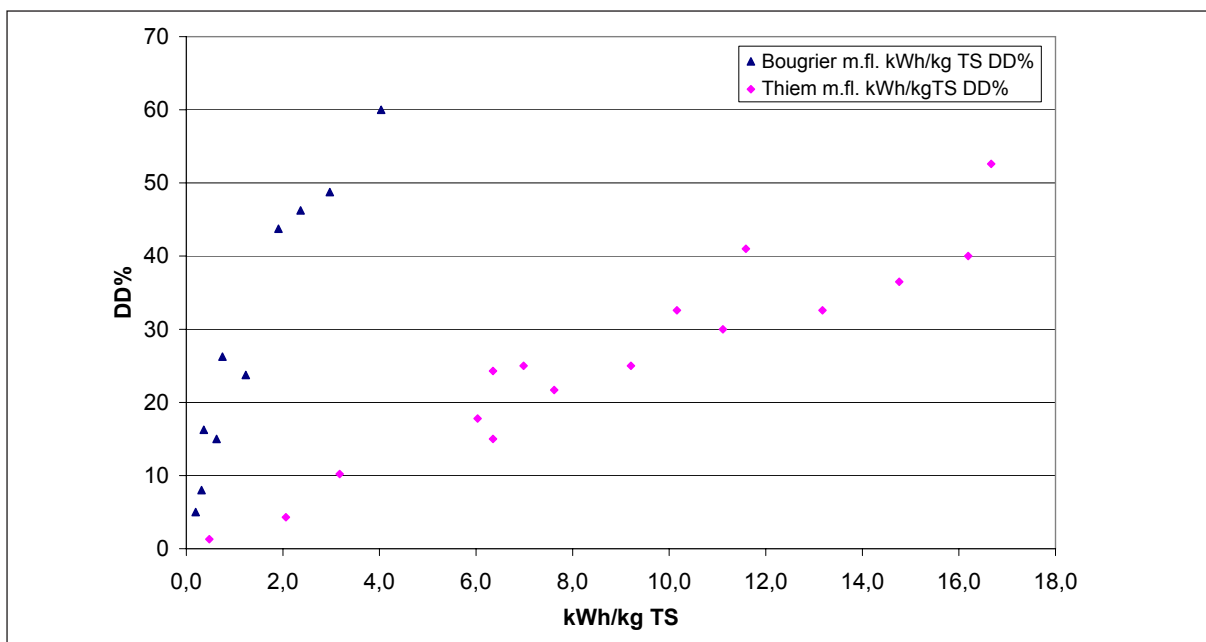
Det har även gjorts ett par BOD-analyser på överskottsslam före och efter ultraljudsbehandling. Inga signifikanta skillnader uppmättes.

8 Jämförelse med andra studier

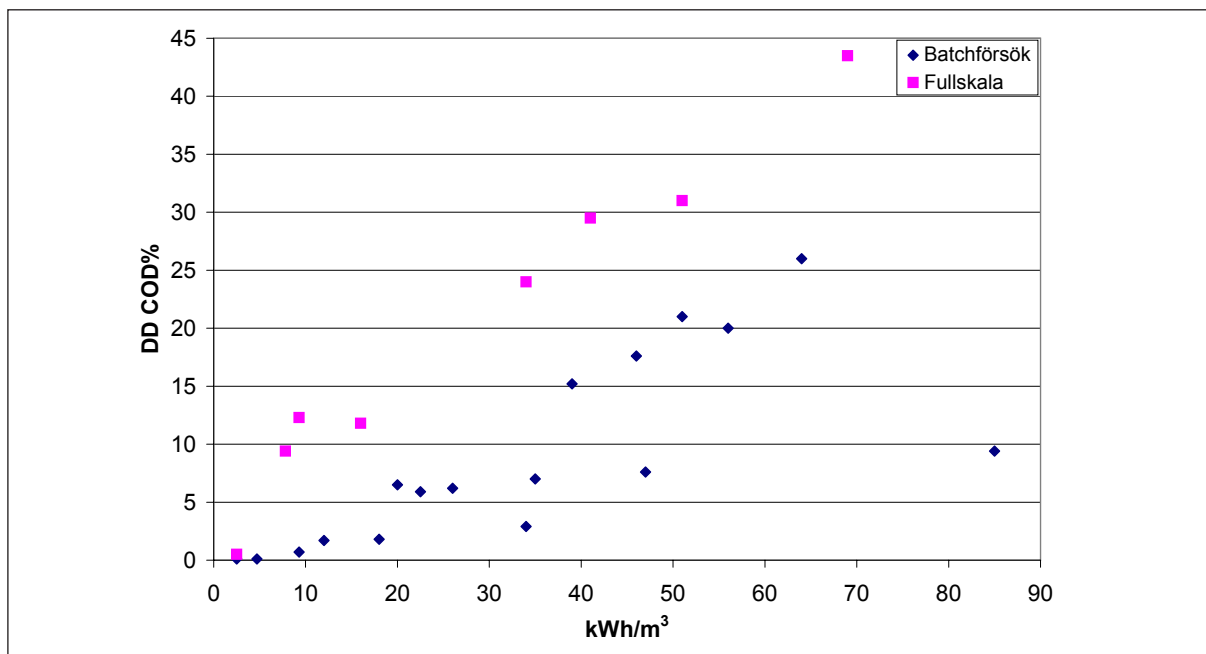
I figur 7-5 visades förhållandet mellan tillförd energi per kg TS och ökning i löst COD från denna studie. Ett tydligt samband är svårt att utläsa men ju mer energi som tillsätts desto större blir andelen löst COD. Detta är ett samband som flera andra författare har verifierat. I de försöken har energiinsatserna dock varit avsevärt större, se figur 8-1. Dessa redovisar därmed betydligt större ökning av löst COD. I vissa fall har



Figur 8-1. Jämförelse mellan föreliggande studie och tidigare genomförd studie.



Figur 8-2. Jämförelse mellan olika tidigare genomförda studier. Observera att ökningen i COD är mätt som DD_{COD}.



Figur 8-3. Från Nickel och Neis (2007) Jämförelse mellan fullskale- och batchförsök med samma energitillsats. Observera att energiinsatsen är angiven per m³.

man använt sig av DD_{COD}⁴, se figur 8-2. Förhållandet mellan DD_{COD} och löst COD (formel 7-1) är ca 1,6 (Bougrier, Carrère och Delgenès 2005).

Bougrier, Carrère och Delgenès (2005) hävdar att enligt deras undersökningar krävs det minst 0,28 kWh/kg TS (1000 kJ/kg TS) för att slå sönder cellerna

i slammet. Vid energiinsatser under 0,28 kWh/kg TS sönderdelas endast flocken och den lösta andelen COD ökar till ca 8 %. Vid betydligt högre energiinsatser, 2,7 kWh/kg TS (10 000 kJ/kg TS) är ökningen i löst COD ca 32 %. Ännu större energitillsatser gav en avtagande ökning i löst COD.

Resultaten i figur 8-1 och figur 8-2 som är tagna från andra författare är gjorda i labbskala. Nickel och Neis (2007) har jämfört fullskaleförsök med batchförsök (figur 8-3). Där visar det sig att trots att man tillsätter

⁴ $DD_{COD} = (COD_s - COD_{s0}) / (COD_{NaOH} - COD_{s0}) * 100$, COD_s är löslig COD efter ULbehandling, COD_{s0} är den initiala lösliga COD, COD_{NaOH} är den lösliga COD efter hydrolys med NaOH.

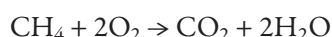
lika mycket energi så ger fullskaleförsöken upphov till en större del löst COD. Men även i dessa fall är energiinsatsen betydligt större än vid försöken i denna rapport. Nickel och Neis (2007) rapporterar inte energiinsatsen per kg TS men det synes som om hans data ungefärligen överensstämmer med Bougrier, Carrère och Delgenès (2005).

Vad det gäller sönderdelning av flockar och mikroorganismer så har Bougrier, Carrère och Delgenès (2005) visat att vid en energitillsats på 0,18 kWh/kg TS (660 kJ/kg TS) ändrades d_{50}^5 från 31,99 μm för obehandlat överskottsslam till 19,6 μm . dvs. flockarna slogs sönder och den specifika ytan ökade och därmed måhända även tillgängligheten av det organiska materialet i rötkammaren. Men enligt Bougrier, Carrère och Delgenès (2005) så skall endast flockstorleken reduceras vid låga energiinsatser (under 0,28 kWh/kg TS) och ingen sönderdelning av celler äga rum.

9 Är ultraljudsteknik lönsamt?

9.1 Energiutvinning och minskning av slam

Man kan räkna om ökningen i COD-halt till motsvarande mängd metan. Mängden syre som åtgår för att oxidera metan till koldioxid och vatten är:



Syremängden som åtgått är lika med den uppmätta mängden COD. De uppmätta absoluta ökningarna i löst COD efter ultraljudsbehandling låg i intervallet 0–1900 mg/l. I figur 9-1 redovisas vad detta motsvarar i metangasökning och i energiinnehåll. Medelvärdet för ökningen i löst COD för överskottsslam som behandlats med minst 2 kWh/m³ var 701mg/l. Värmemängden i motsvarande mängd metangas är då 2,6 kWh/m³.

Ökningen i löst mängd COD kan även räknas om till minskad mängd slam. Som redovisats i tabell 7-2 har ur alla analysdata på total COD, TS och GF ett samband, baserat på medianvärdet, tagits fram för överskottsslammet:

$$\frac{\text{COD}}{\text{VS}} = 1,54$$

1 mol CH ₄	motsvarar	2 mol O ₂
1 g COD	motsvarar	0,25 g CH ₄
0,25 g CH ₄	motsvarar	0,38 l vid 25 °C, 1 atm
1 m ³ CH ₄	motsvarar	9,9 kWh/m ³ (värmevärde)
Data för slam som behandlades med mer än 2 kWh/m ³		
[0-1900] g ΔCOD /m ³	motsvarar	[0-0,73] m ³ ΔCH ₄ /m ³
Medel 700 g ΔCOD /m ³	motsvarar	0,27 m ³ ΔCH ₄ /m ³
0,27 m³ ΔCH₄/m³	motsvarar	2,6 kWh/m³

Figur 9-1. Uppställningen visar hur mycket de uppmätta absoluta ökningarna i mg COD/l motsvarar i metangasökning och energi.

5 d_{50} innebär att 50 % av alla partiklar har en diameter lika med d_{50} eller mindre.

Genom att utgå ifrån detta samband och anta att all frigjord COD bryts ned och att denna COD inte skulle varit tillgänglig utan ultraljudsbehandling, kan minskad mängd VS i överskottsslammet beräknas enligt figur 9-2.

Den gasökning man erhåller bidrar med att i medeltal minska slammängden med 0,46 kg VS/m³, förutsatt att slammet behandlats med minst 2 kWh/m³. Detta innebär en minskning av överskottsslamets bidrag till slamproduktionen med ca 1 %. Minskningen av den totala slammängden blir då klart mindre än 0,5 %.

I tabell 9-1 är alla observerade effekter av ultraljudet samlade. Effekterna gäller då överskottsslammet har behandlats med mer än 2 kWh/m³.

I de undersökningar som visades i figurerna 8-2 och 8-3 har energitillförseln varit mycket högre än i föreliggande rapport. En beräkning på hur mycket COD som övergår till vätskefasen har gjorts med värden från Nickel och Neis (2007) och deras utförda fullskaleförsöket. Vid en tillförd energi på ca 34 kWh/m³ Nickel och Neis (2007) så blev ökningen i COD ca 24 %, räknat som DD. Med omräkningsfaktorn enligt Bougrier, Carrère och Delgenès (2005) blir motsvarande värde i löst COD 15 %. Med medelvärden (från Gässlösa) på COD-total och löst COD i obehandlat slam motsvarar detta en absolut ökning på ca 7 000 mg/l motsvarande biogas med ett värmevärde

på 25 kWh. Redan här går då ultraljudsbehandlingen med förlust ur energisynpunkt. Motsvarande minskning i slammängd blir ca 4,5 kg/m³. Läger man sedan till investeringar och övriga driftkostnader synes det svårt att få ultraljudsbehandlingen lönsam om inte slamdisponeringskostnaderna är exceptionellt höga.

Räknar man med en investering i Borås på 3 Mkr blir det en kapitalkostnad på ca 340 000 kr/år (10 års avskrivning och 4 % realränta). Antar man att utrustningen fungerar och behandlar 260 kg TS/h under 90 % av tiden så behandlas 2000 ton TS per år eller ungefär lika mycket COD. Om 1 % COD frigörs blir det 20000 kg/år. Kapitalkostnaden per kg frigjord COD blir då ca 17 kr. Om man får 3,5 kWh per kg COD (Krepp, Solheim 2000) så blir bara kapitalkostnaden per kWh 4,9 kr!

Vid Ernemarsverket var utlösningen av COD större än vid Gässlösaverket men energiinsatsen var motsvarande större. Relationen mellan minskade driftkostnader genom ökad gasproduktion och minskad slammängd kontra ökade kostnader för el-energi och underhåll blir således ungefär så som ovan relaterats för Gässlösaverket. För Ernemarsverket var investeringen i ultraljudsanläggningen också ca 3 Mkr. Eftersom Ernemarsverket är ca en femtedel i storlek av Gässlösaverket blir kapitalkostnaden där motsvarande högre.

COD/VS=1,54			
ΔCOD [0–1900] g /m ³	motsvarar	[0–1,2] kgVS/m ³	
Medel 700 g ΔCOD/m ³	motsvarar	0,46 kg VS/m ³	

Figur 9-2. Minskning i nedbrytbart material, VS, per kubikmeter slam i det uppmätta COD-intervallet.

Tabell 9-1. Observerade effekter på Gässlösa ARV.

Positiva effekter	Negativa effekter
Den ökning i metangas som härstammar från ökad mängd löst COD har i medel ett värmevärdet på 2,6 kWh/m ³ .	Ultraljudet drar i elenergi, ca 2,2 kWh/m ³ slam.
Ökning i gas innebär en minskad mängd slam på ca 0,46 kgVS/m ³ .	En extra pump krävs. Denna förbrukar mellan 0,3–0,5 kWh, beroende på slamflöde.
Möjligheten att ta in överskottsslam i röt-kammaren. Detta har gjort att flytande polymer till centrifugen har tagits bort och en besparing på ca 25 000 kr/månad.	Underhållskostnader. Underhållet har varit oerhört tidskrävande för både drift- och verkstadspersonal.
Minskad skumningsproblematik, ingen skumning uppträdde under 6 månader. Färre övertidstimmar under beredskap.	Stor investering, ca 3 miljoner kr

10 Ultraljudsutrustning på andra verk

I Sverige finns till dags dato bara ett annat reningsverk med samma ultraljudsutrustning som används på Gässlösa, Kävlinge reningsverk i Skåne. Där fungerar utrustningen bra (Nielsen, telefonsamtal). När skumning uppkommer i rötkammaren är detta en indikation om att något av hornen är uttjänt. Ett horn byts ut och skumningen försvinner. I samband med att ultraljudet installerades i Kävlinge gick man från mesofil till termofil rötning. Ingen studie gjordes på hur ultraljudsanläggningen inverkar på Kävlinges gasproduktion. Davidsson (2007) redovisar att ökningen i löst COD efter ultraljudsbehandling är ca 1 % i Kävlinge.

I Danmark har Helsingörs reningsverk köpt in en annan typ av ultraljudsanläggning. Denna har en lägre effekt än den på Gässlösa. Enligt uppgifter från Helsingör (Benny Höök, studiebesök) har deras biogasproduktion ökat med 15 % sedan ultraljudsanläggningen installerades. Leverantören⁶ garanterar en ökning på 20 %. Man har inte följt upp andelen löst COD i förhållande till ökad gasproduktion. Ett stickprov som togs i samband med studiebesöket på anläggningen visade att den procentuella ökningen av COD var högre än den som uppmätts på Gässlösa. Helsingör kommun har inga egna COD-analyser dokumenterade.

Anläggningen var mycket kompakt och personalen upplevde att den krävde ett minimum av underhåll.

Ingen annan kontakt har tagits med andra reningsverk med ultraljudsanläggningar.

11 Diskussion och slutsatser

Det har varit svårt att påvisa direkta effekter av ultraljudsbehandlingen på överskottsslammet. De försök som gjordes för att mäta eventuella gasökningar gav inget utslag. Vid responsförsök ökade inte gasproduktionen vid tillsats av överskottsslam, men ej heller vid tillsats av ultraljudsbehandlat överskottsslam. Detta är inte förvånande då mängden löst COD på Gässlösa endast ökade med 1 % efter ultraljudsbehandling.

Att utröttningsgraden skulle påverkas mycket av om man ligger över eller under 2 kWh/m³ verkar inte troligt. Resultaten i denna och i tidigare genomförda studier visar inte på att det föreligger några speciella tröskelvärden.

Den ökning i löst COD på i medeltal 1 % på Gässlösa och på 3 % på Ernemar stämmer överens med det som observerats i tidigare studier. De studierna har dock gjorts i laboratorieskala med energiinsatser som är högre än vad som tillförts anläggningarna i Borås och Oskarshamn. Samtidigt visar Nickel och Neis (2007) att ultraljudsbehandling i fullskala ger bättre cellsönderdelning än satsvis behandling i laboratorieskala.

En relevant fråga som inte besvaras är om ultraljudsbehandling möjliggör en större nedbrytning av organiskt material i rötkammaren än som varit möjlig utan behandling, eller om man bara får en snabbare nedbrytning. Nickel och Neis (2007) visar att vid uppehållstider på upp till 16 dygn blir dock nedbrytningen större efter ultraljudsbehandling av överskottsslam.

Att köpa in en ultraljudsanläggning innebär en stor investering. Från energisynpunkt ser det ut som att tillförd energi ungefär balanseras av energiinnehållet i den producerade biogasen. Den tillförda elenergin är dock i en mer högvärdig energiform än biogasen.

Tabell 10-1 Analysresultat, COD-halter från stickprov på överskottsslam från Helsingörs reningsverk. Provet togs i samband med ett studiebesök i Helsingör.

Total COD (mg/l)	COD ₀ löst (mg/l)	COD _{UL} löst (mg/l)	Ökning i %
53 000	250	1700	2,7

6 Fraunhofer 1,4kW Disintegration Modul System (DMS) ultraljudsystem.

Behandling av överskottsslam verkar minska skumning i rötammaren. Detta synes vara den faktor som kan motivera installation av ultraljudsutrustning. I Borås t.ex. där man överväger att hygienisera slammet med termofil rötning blir det av avgörande betydelse att allt slam kan tillföras rötammarna. Ur den aspekten är behandling av överskottsslam med ultraljud intressant för Gässlösaverket. Förutsättningen är dock

att driften ska fungera. Så mycket tid som har lagts ner på att sköta anläggningen är inte hållbart i det långa loppet. Driftproblematiken ses därför som det största problemet. Att få anläggningen att gå kontinuerligt med rimlig tillsyn är en grundläggande förutsättning.

Erfarenheterna från detta projekt kan vara värda att ta till vara på i framtida upphandlingar.

Referenser

Bourgrier, C., Carrère, H. & Delgenès, J.P. (2005). Solubilisation of waste-activated sludge by ultrasonic treatment, *Chemical Engineering Journal* 106, pp 163–169.

Climent, M. m.fl. (2007). Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions, *Chem. Eng. J.*, doi:10.1016/j.cej.2007.02.020.

Davidsson, Å. (2007), *Increase of biogas production at wastewater treatment plants*, Diss. Lunds universitet, Avdelningen för vattenförsörjning- och avloppsteknik, ISSN 1100-2778.

Grönroos, A., Kyllönen, H., Korpijärvi, K., Pirkonene, P., Paavola, T., Jokela, J. & Rintala, J., (2005). Ultrasound assisted method to increase soluble chemical oxygen (SCOD) of sewage sludge for digestion, *Ultrasonics Sonochemistry* 12, pp 115–120.

Krepp, U. & Solheim, O. E. (2000). *Thermodynamical assessment of digestion process*. Proc of the 5th European biosolids and organic residuals conference. ISBN 0 9539679 0 5.

Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment, disposal and reuse*. 4th ed. McGraw-Hill, New York. ISBN 0-07-041878-0.

Nickel, K. & Neis, U. (2007). Ultrasonic disintegration of biosolids for improved biodegradation, *Ultrasonics Sonochemistry* 14 pp 450–455.

Tiehm, A., Nickel, K., Zellhorn, M. & Neis, U. (2001). Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization, *Wat. Res.* 35, pp 2003–2009.

Ödegaard, H. (2004). Sludge minimization technologies – an overview. *Wat.Sci. Tech*, 49, pp 31–40.

Muntliga uppgifter

Eijlertsen, Jörgen, Scandinavian Biogas Fuels, internmöte om ultraljudsanläggningen 2005-09-06.

Höök, Benny, Helsingörs reningsverk, 2006-10-30, studiebesök.

Nielsen, Tom, Kävlinge kommun, mars 2007, telefonsamtal.

Ternström, Anders, Anox Kaldnes, 2007-06-29, telefonsamtal.

Bilaga A: Gässlösa reningsverk

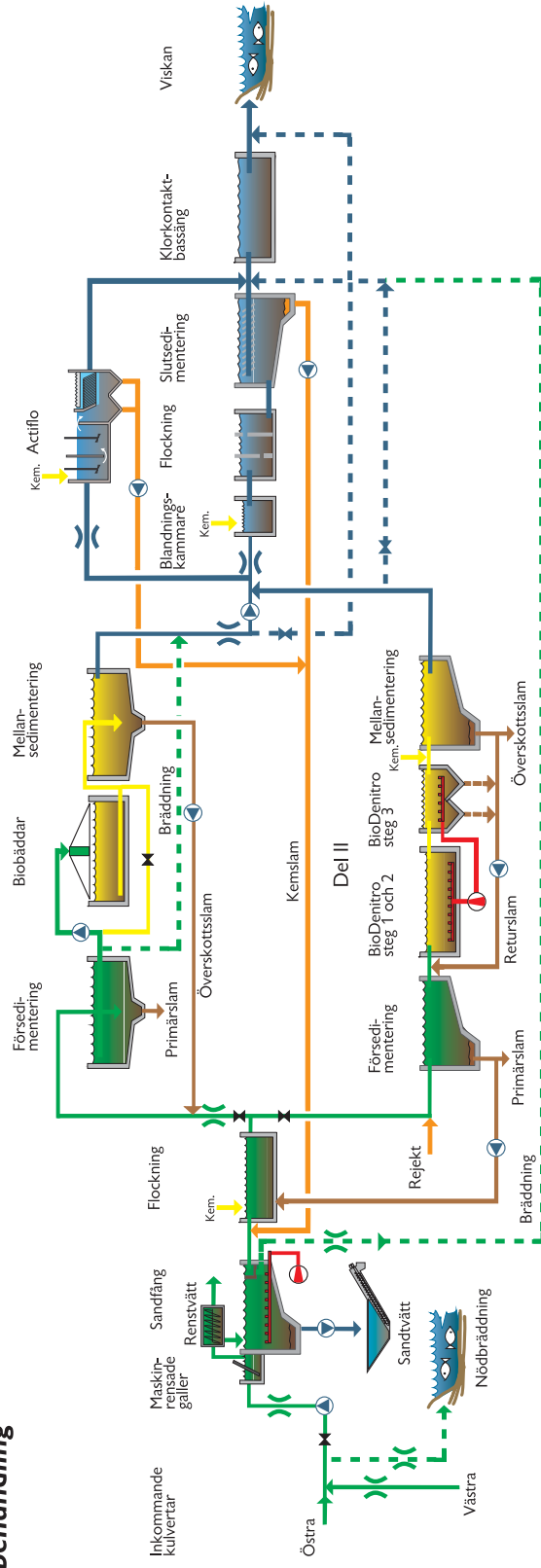
Gässlösa Reningsverk

Vatten- behandling

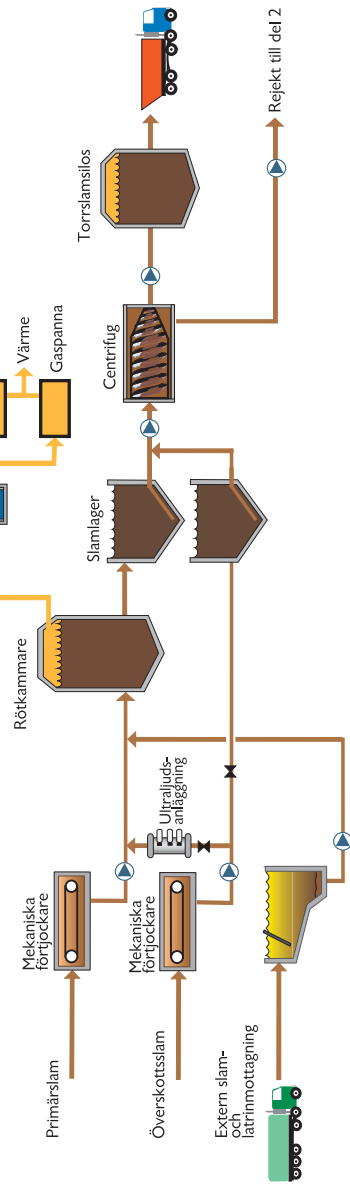
Mekanisk rening

Biologisk rening

Kemisk rening



Slambehandling

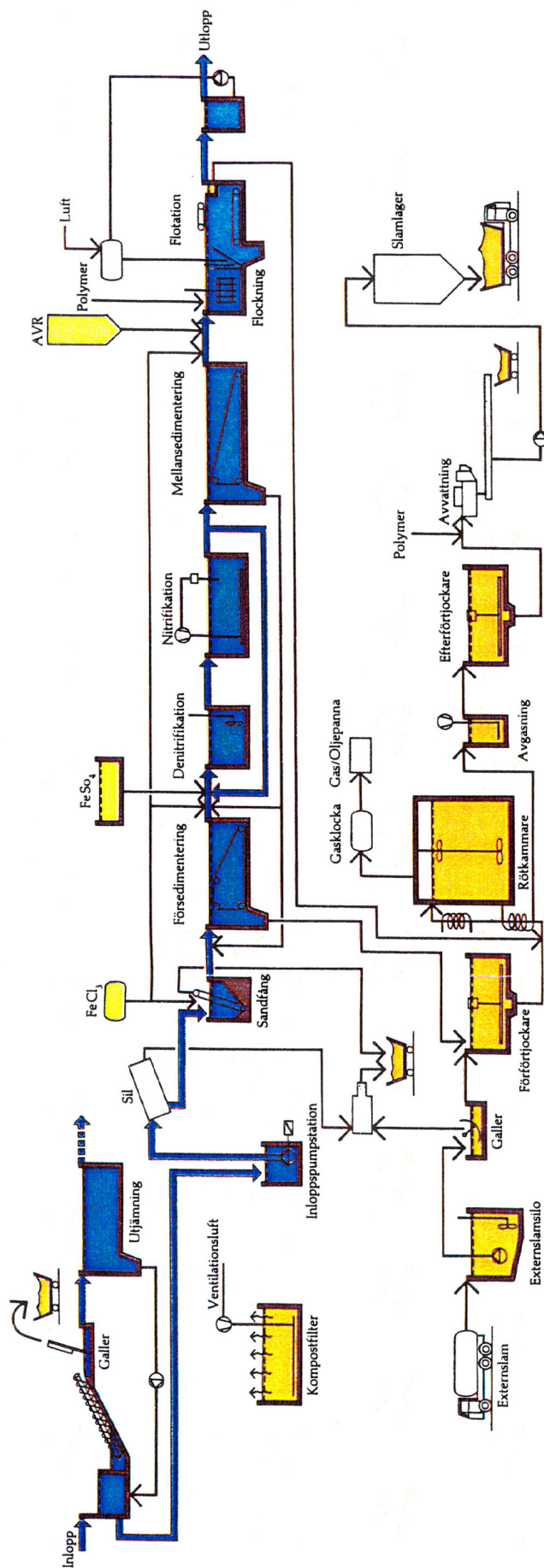


Bilaga B: Ernemars reningsverk

Sedan detta flytschema ritades har följande förändringar skett:

- Järnsulfatdoseringen är borttagen. För efterfällning doseras PAX.
- Rejektvatten från de två mekaniska förtjockarna leds in före denitrifikationen.
- Primärslammet med återfört kemslam leds till en mekanisk förtjockare och från denna till rötkammaren.

Överskottsslammet leds inte längre till försedimenteringen utan till en mekanisk förtjockare och från denna via ultraljudsanläggningen till röttkammaren. Det finns möjlighet att leda slammet förbi ultraljudsanläggningen.



Bilaga C: Analysprogram – Slam – Gässlösa

Analys	Primär slam Oförtj	Primär Slam Förtj	Bio- slam Oförtj	Bio- slam Förtj	Ultra- ljuds- beh	Rejekt samlat	Rejekt centri- fug	Rötk 1–4	Extern- slam	Röt- slam samlat	Avv slam
TS	1/v	1/v	1/v	1/v				1/v	1/v	1/v	1/v
GR	1/v	1/v	1/v	1/v		1/v	1/v	1/v	1/v	1/v	1/v
SS						1/v	1/v				
COD		○		○		1/v	1/v		1/v	○	
CODfilt					1/v						
BOD		○		○	○				1/v		
NH ₄ filt						1/v	1/v				
VFA								2/m			
HCO ₃								2/m			
Tot.alk								2/m			
pH								1/v			
COD filt		○		○						○	
TS filt		○		○						○	
GR filt		○		○						○	

Analysprogram – slam – Ernemar

Analys	Primär slam Oförtj	Primär slam Förtj	Bio- slam Oförtj	Bio- slam Förtj	Ultra- ljuds- behan	Rejekt primsl förtj	Rejekt bioslam förtj	Röt- kam	Röt- slam	Avvattn Slam*
TS		1/v		1/v					1/v	1/v
GF/GR		1/v		1/v					1/v	1/v
SS						1/v	1/v			
COD		○		○					○	
CODfilt					1/v					
NH ₄ filt										
VFA										
HCO ₃										
Tot.alk										
pH										
COD filt		○		○					○	
TS filt		○		○					○	
GR filt		○		○					○	

* Endast då den mekaniska avvattningen är i drift.

Beteckningen "○" betyder att det under tiden fram till utgången av 2005 kommer att tas 15–20 prov där det på samma prov görs TS, GR COD och CODfilt. Det kommer också att tas 15–20 prov där TS, TSfilt, GR och GRfilt analyseras på samma prov. Syftet är att etablera relationer mellan dessa parametrar. Dessa prover kommer att passas in efter arbetsbelastning men kommer att vara någorlunda jämnt spridda över tiden fram t.o.m. utgången av 2005. Programmet fortlöpte fram till juni 2007.



Box 47607 117 94 Stockholm

Tfn 08 506 002 00

Fax 08 506 002 10

E-post svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se