
Rapport SGC 215

Förstudie

Rötning med inledande hydrolyssteg för utökad metanutvinning på avloppsreningsverk och biogasanläggningar

©Svenskt Gastekniskt Center – April 2010



Emelie Persson, BioMil AB
Elin Ossiansson, BioMil AB
My Carlsson, AnoxKaldnes AB
Martina Uldal, AnoxKaldnes AB
Lars-Erik Olsson, AnoxKaldnes AB

SGC:s FÖRORD

FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

Denna rapport finns även tillgänglig på Avfall Sveriges hemsida (www.avfallsverige.se) och på Svenskt Vattens hemsida (www.svensktvatten.se).

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat eller dylikt i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns på SGC:s hemsida www.sgc.se.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verk-samma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD).

SGC har följande delägare: Svenska Gasföreningen, E.ON Gas Sverige AB, E.ON Sverige AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energikoncernen AB (publ) och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Avfall Sverige
Svenskt Vatten
Statens energimyndighet

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Jörgen Held

SAMMANFATTNING

Anaerob nedbrytning av organiskt material sker i flera steg med hjälp av olika mikroorganismgrupper vilkas optimala levnadsförhållanden kan skilja sig mycket åt avseende näringsförhållanden, pH-krav, tålighet för förändringar, tillväxt- och näringsupptagsmönster. Ett sätt att optimera rötningsprocessen, och därmed öka biogasproduktionen och nedbrytningsgraden av det organiska materialet, kan vara att fysiskt dela upp rötningsprocessen i två delsteg bestående av ett inledande hydrolys- och syrabildningssteg följt av ett metanbildningssteg i en rötkammare.

Ett problem med dagens biogasprocesser är att inte allt organiskt material som tillförs processen blir tillgängligt för ombildning till biogas. Detta är speciellt markant vid rötning av avloppsslam där närmare hälften av tillfört organiskt material kvarstår efter rötning. Även effektivare utnyttjande av substrat på biogasanläggningar är en viktig faktor för att öka lönsamheten för biogasproduktion. Möjligheten att använda sig av olika förbehandlingsmetoder diskuteras för att öka graden av omsättning av organiskt material till biogas i rötkammaren. Dessa är inte sällan såväl energi-, kemikalie- som kostnadskrävande. Att effektivare utnyttja och bättre optimera de mikrobiologiska stegen i biogasprocessen genom ett inledande separat hydrolyssteg är en metod som inte medför kemikalieanvändning eller ökat energibehov.

Denna förstudie baseras på litteraturstudier relaterade till rötning med inledande biologisk förhydrolys och insamlad kunskap från fullskaleanläggningar, universitet och högskolor samt leverantörer av utrustning. Närmare 70 publicerade, för ämnet relevanta, vetenskapliga artiklar har hittats vid de litteratursökningar som genomförts. Artiklarna har delats in efter syfte för varje enskild studie. En stor andel av artiklarna har berört modellering varför ett särskilt avsnitt i rapporten ägnats åt detta.

Resultatet av litteraturstudien visar att flertalet försök med rötning med ett inledande hydrolyssteg som gjorts med substrat som avloppsslam, organiskt avfall och nötgödsel gett fördelar i form av exempelvis högre metanutbyte, ökad nedbrytningsgrad och/eller ökad behandlingsskapacitet. Även andra fördelar har visat sig erhållas med metoden, exempelvis eliminering av skumningsproblem i rötkammaren, stabilare process och patogenavdödning.

Det är svårt att dra några generella slutsatser om optimalt pH för hydrolys. Optimalt pH varierar sannolikt beroende på framförallt substratets sammansättning och egenskaper. pH-reglering tycks i de flesta fall inte vara nödvändigt för en bra process, vilket är viktigt med tanke på kostnaderna för tillsats av syra eller bas i en fullskaleapplikation. Vad gäller process-temperatur så ger en ökning upp till ca 55 °C i de flesta fall en snabbare hydrolyshastighet.

Optimal uppehållstid och organisk belastning vid optimering av hydrolys beror på substratets sammansättning och egenskaper. För varje kombination av processparametrar finns ett optimum som ändras om någon av processförutsättningarna förändras. För avloppsslam verkar generellt 4-7 dagars uppehållstid kunna vara lämpligt och för nötgödsel har i ingående studier 2-4 dagar använts.

Simulering av hydrolys kan visa ett tydligt optimum för vilken uppehållstid som ger den högsta hydrolyshastigheten. Det kan användas för att designa en process i flera steg så att hydrolyshastigheten och därmed biogasproduktionen kan optimeras. Modelleringsförsök visar även att rötningsprocesser i flera steg kan simuleras med god överrensstämmelse till data.

Vätgas kan produceras i ett inledande hydrolyssteg, vilket kan vara en möjlighet för bio-hytanproduktion men också innebära en säkerhetsrisk om anläggningen inte är anpassad för detta. Inga säkerhetsproblem med vätgasbildning har emellertid observerats vid identifierade fullskaleanläggningar.

Rötning med inledande biologisk förhydrolys borde kunna implementeras på en röttningsanläggning med relativt enkla medel genom att i huvudsak komplettera med en omrörd och isolerad tank. Betydelsen och effekten av ett inledande separat hydrolyssteg är emellertid avhängigt substratets egenskaper och anläggningens övriga processmässiga betingelser som organisk belastning och uppehållstid. Det mervärde som erhålls genom att komplettera med ett extra steg i röttningsprocessen måste vägas upp mot kostnaden och det merarbete i form av processuppföljning och underhåll som krävs.

Sex olika fullskaleanläggningar i Sverige (3 st.), Tyskland (1 st.) och USA (2 st.) har identifierats som drivs, eller gjort försök, med biologisk förhydrolys. Samtliga anläggningar har erhållit betydande processfördelar vid rötning med inledande hydrolyssteg jämfört med utan, exempelvis ökat metanutbyte, ökad nedbrytningsgrad, ökad behandlingskapacitet och eliminering av skumningsproblem.

SUMMARY

Anaerobic degradation of organic matter is a multi-step process through the action of various groups of microorganisms whose optimum conditions can differ considerably regarding e.g. nutrient and pH demand, sensitivity for changes and patterns for growth and nutrient uptake. One way of optimizing the anaerobic digestion process, and thereby increase the biogas production and the reduction of organic matter, can be to physically divide the anaerobic digestion process in two steps consisting of an initial hydrolysis and acid production step followed by a methane production step in an anaerobic digester.

One problem with the biogas processes of today is that not all organic matter that is added to the process becomes available for conversion into biogas. This is particularly evident in digestion of waste water treatment sludge where almost half of the organic matter added remains after anaerobic digestion. More efficient utilization of substrate in biogas plants is an important element to increase the profitability of biogas production. The possibility to use different pre-treatment methods is being discussed to increase the degree of conversion of organic matter into biogas in the digester. Pre-treatment methods are often energy as well as cost demanding and can require the addition of chemicals. To use the microbiological steps in the biogas process more efficiently by adding an initial hydrolysis step is a method that does not require the usage of chemicals or increased energy consumption.

This pre-study is based on literature studies related to anaerobic digestion with initial biological hydrolysis and collected knowledge from full-scale plants, universities and suppliers of equipment. Nearly 70 published scientific articles relevant to the subject have been found in the performed literature searches. The articles have been subdivided according to the purpose of each article. A large part of the articles have concerned modelling of anaerobic digestion why a separate section of the report has been devoted to this.

The literature study shows that the majority of the experiments with an initial hydrolysis step that have been performed with substrates such as waste water treatment sludge, organic waste or dairy manure have given advantages in the form of for example higher methane yield, increased degree of degradation and/or increased treatment capacity. In addition other advantages have been achieved by the method, for example elimination of foaming in digester, more stable process and pathogen inactivation.

It is difficult to draw any general conclusions about optimal pH for hydrolysis. Optimal pH most likely differs, mainly in relation to the composition and characteristics of the substrate. It seems that pH-control, in most cases, is not necessary to achieve a satisfactorily process, which is important considering the costs for addition of acid or base in a full scale application. Concerning process temperature an increase up to 55 °C have in most studies resulted in a higher hydrolysis rate.

Optimal retention time and organic load for optimization of the hydrolysis process depends on the composition and characteristics of the substrate. For each combination of process parameters there is an optimum that changes if any of the process conditions does change. For waste water treatment sludge generally 4-7 days retention time seems to be appropriate and for dairy manure 2-4 days have been used successfully in studied scientific papers.

Simulation of hydrolysis can show a clear optimum for which retention time gives the highest hydrolysis rate. This can be used to design a multi-step process so that the hydrolysis rate, and thus the biogas production, can be optimized. Modelling experiments also show that multi-step digestion processes can be simulated with a good correspondence to data.

Hydrogen gas can be produced in an initial hydrolysis step which gives the opportunity to produce bio-hythane but can also be a safety risk if the plant is not designed for this. No safety problems with hydrogen formation have however been observed at identified full scale plants.

Anaerobic digestion with an initial biological hydrolysis step should be possible to implement at a digestion plant with relatively simple means by mainly the addition of one stirred and insulated tank. The importance and effect of an initial separate hydrolyse step is however dependent on the characteristics of the substrate and other process parameters of the plant such as organic load and actual retention time. The added value achieved by addition of an extra step in the digestion process has to be revised compared to the costs and the additional work required for process monitoring and maintenance.

Six full scale plants in Sweden (3), Germany (1) and USA (2) that are in operation, or have done experiments, with separate biological hydrolysis step have been identified. All of the plants have achieved considerable process advantages with digestion with an initial hydrolysis step compared to without, for instance increased methane yield, increased degree of degradation of organic matter, enhanced treatment capacity and elimination of foaming problems.

INNEHÅLL

1	INLEDNING	8
1.1	BAKGRUND	8
1.2	SYFTE	8
1.3	MÅL	9
1.4	METODER	9
1.5	OMFATTNING OCH AVGRÄNSNINGAR	10
1.6	ORDLISTA	10
2	RÖTNINGSPROCESSEN	12
2.1	RÖTNINGSPROCESSENS OLIKA DELSTEG	12
2.1.1	Hydrolys	12
2.1.2	Syrabildning (Acidogenes)	13
2.1.3	Ättiksyrabildning (Acetogenes)	13
2.1.4	Metanbildning (Metanogenes)	14
2.1.5	Biogasprocessen med biologisk förhydrolys	14
3	RÖTNING MED INLEDANDE HYDROLYSSTEG	16
3.1	HASTIGHETSBEGRÄNSANDE STEGET	16
3.2	OPTIMERING AV RÖTNINGSPROCESSEN GENOM SEPARERADE PROCESSTEG	16
3.3	SEPARAT BIOLOGISKT HYDROLYSSTEG JÄMFÖRT MED ANDRA METODER	17
4	MODELLERING AV HYDROLYS	18
4.1	FÖRSTA ORDNINGENS MODELL	19
4.2	ANDRA ORDNINGENS MODELL	20
4.3	MONOD-KINETIK	21
4.4	CONTOIS-KINETIK	22
4.5	VAL AV MODELL	22
4.6	HYDROLYSMODELLER OCH FÖRHYDROLYS	23
5	RESULTAT LITTERATURSTUDIE	24
5.1	ÖVERSIKT PUBLICERAT MATERIAL	24
5.2	EFFEKT PÅ OLIKA SUBSTRAT	25
5.2.1	Substratets lämplighet för förhydrolys	25
5.2.2	Avloppsslam	27
5.2.3	Matavfall	28
5.2.4	Nötgödsel	29
5.2.5	Grödor	30
5.2.6	Substrat som innehåller toxiska substanser	30
5.3	OPTIMALA PROCESSFÖRHÅLLANDEN FÖR HYDROLYS	30
5.3.1	Inhibering av hydrolys	30
5.3.2	pH	31
5.3.3	Temperatur	33
5.3.4	Uppehållstid och organisk belastning	34
5.4	INTRESSANTA UPPTÄCKTER FRÅN MODELLERINGSFÖRSÖK	36
5.4.1	Modeller för anaerob nedbrytning	36
5.4.2	Bestämning av hydrolyskonstanten	37
5.4.3	Modellering av tvåstegsprocesser	39
5.4.4	Sammanfattning modelleringsförsök	40
5.5	PATOGENREDUKTION	40
5.6	FÖRHÅLLANDEN SPECIFIKA FÖR AVLOPPSRENINGSVÄRK	41

5.7	VÄTGASPRODUKTION.....	42
5.8	BIOLOGISKT HYDROLYSSTEG JÄMFÖRT MED ANDRA METODER	43
5.9	INVERKAN PÅ UTFORMNING OCH DRIFT AV ANLÄGGNING.....	45
6	ERFARENHETER FRÅN FULLSKALEANLÄGGNINGAR.....	47
6.1	IDENTIFIERADE ANLÄGGNINGAR	47
6.2	ERHÅLLNA DRIFTSERFARENHETER	48
7	FORSKNING PÅ UNIVERSITET OCH HÖGSKOLOR.....	52
7.1	SVERIGE	52
7.2	UTLANDET.....	52
8	INFORMATION FRÅN LEVERANTÖRER AV UTRUSTNING	55
9	DISKUSSION OCH SLUTSATSER.....	57
10	REFERENSER.....	59
10.1	PUBLICERAT MATERIAL.....	59
10.2	ANDRA REFERENSER.....	64
	BILAGA 1 - Matris för läsning av publicerat material	66
	BILAGA 2 – Använda processförhållanden för studier av optimering av hydrolys	68

1 INLEDNING

1.1 BAKGRUND

Anaerob nedbrytning av organiskt material sker i olika steg med hjälp av olika mikroorganismgrupper vilkas optimala levnadsförhållanden kan skilja sig mycket åt avseende näringsförhållanden, pH-krav, tålighet för förändringar, tillväxt- och näringsupptagsmönster. Ett sätt att optimera rötningsprocessen, och därmed öka biogasproduktionen och nedbrytningsgraden av det organiska materialet, kan vara att fysiskt dela upp rötningsprocessen i olika delsteg som bättre tillgodoser de olika mikroorganismgruppernas skilda optimala levnadsförhållanden. Genom att separera hydrolys och syrabildning från metanbildningssteget med ett inledande separat hydrolys- och syrabildningssteg före röt-kammaren finns möjlighet att optimera de olika stegen bättre.

Ett problem med dagens biogasprocesser är att inte allt organiskt material som tillförs processen blir tillgängligt för ombildning till biogas. Detta är speciellt markant vid rötning av avloppsslam där närmare hälften av tillfört organiskt material kvarstår efter rötning. Detta beror till stor del på de stabila slamflockar som bildats i de biologiska reningsstegen på avloppsreningsverken. Även effektivare utnyttjande av substrat på biogasanläggningar är en viktig faktor för att öka lönsamheten för biogasproduktion.

Möjligheten att använda sig av olika förbehandlingsmetoder diskuteras för att öka graden av omsättning av organiskt material till biogas i röt-kammaren. Dessa är inte sällan såväl energi-, kemikalie- som kostnadskrävande. Se exempelvis utredning om effekterna av ultraljudsbehandling på svenska avloppsreningsverk (Dåverhög och Balmér, 2008). Att effektivare utnyttja och bättre optimera de mikrobiologiska stegen i biogasprocessen är en möjlig metod som inte medför kemikalieanvändning eller ökat energibehov. Såväl litteratur som inledande egna försök pekar mot en betydande potential för högre metanutvinning vid utformning av biogasprocessen i två steg på detta sätt.

Ett annat problem med dagens rötningsanläggningar är det metanläckage som framförallt uppkommer från utgående rötrest från processen. Detta fenomen är negativt ur två aspekter, dels fångas inte värdefull metangas upp och dels bidrar den utsläppta metangasen till växthus-effekten eftersom metan är en stark växthusgas. Anledningen till fortsatt metanbildning i utgående substrat är att organiskt material som kan brytas ner fortfarande finns kvar efter rötning. För att minska risken för metangasbildning efter rötning behöver mer organiskt material brytas ner i rötningsprocessen.

1.2 SYFTE

Syftet med denna förstudie var att undersöka hur rötning med ett inledande biologiskt hydrolyssteg påverkar nedbrytningen av organiskt material och metangasproduktionen genom att göra en teori- och litteratursammanställning över publicerade försöksresultat och erfarenheter med rötning med biologisk förhydrolys. Information har samlats in från fullskaleanläggningar som finns för inhämtande av erhållna drifterfarenheter och processprestanda, liksom kontakter har tagits med universitet och högskolor samt leverantörer av utrustning.

1.3 MÅL

Att utifrån insamlat material från såväl universitet/högskolor, internationella konferenser, näringsliv och utländska anläggningar göra en bedömning av huruvida och under vilka förutsättningar rötning med inledande separat hydrolyssteg kan vara en intressant processlösning för befintliga och framtida biogasanläggningar och avloppsreningsverk.

1.4 METODER

Kunskaper har inhämtats från:

- internationella erfarenheter
- universitet och högskolor
- befintliga anläggningar
- leverantörer av utrustning/anläggningar

Två generella litteratursökningar har gjorts under hösten 2008 respektive hösten 2009 med hjälp av Lunds universitets sökverktyg för vetenskapligt publicerat material. Utifrån erhållna artiklar vid dessa sökningar har därefter utökade sökningar skett efter hand med utgångspunkt från de referenser som hittats här. Tips på publicerat material har även erhållits via projektets referensgrupp samt via olika forskare vid universitet och högskolor. Vid läsning av artiklar har en matris för läsning använts (se Bilaga 1).

Frågeställningar som ligger till grund för matrisen är följande:

- Ger rötning med förhydrolys ett högre energiutbyte än utan?
- Ger rötning med förhydrolys en högre nedbrytningsgrad av organiskt material än utan?
- Finns andra eventuella processmässiga fördelar med rötning med förhydrolys, exempelvis bättre patogenreduktion?
- Behövs uppvärmning för en effektiv förhydrolys?
- Vilka är optimala processförhållanden för förhydrolys?
- Behövs pH-reglering?
- Är rötning med förhydrolys mer lämpligt för vissa typer av substrat?

Kontakter har tagits per e-post eller telefon med några universitet och högskolor, leverantörer av utrustning samt identifierade fullskaleanläggningar som drivs med förhydrolys. Kontakter via olika nätverk som SGC internationella nätverk Task 37 har också erhållits.

Projektet har genomförts i samarbete med en referensgrupp bestående av Anneli Petersson, SGC, Christopher Gruvberger, VA Syd i Malmö/Lund, Annika Nyberg, Ellinge reningsverk i Eslöv, Ola Fredriksson, Gryaab i Göteborg, Jan Erik Petersson, Öresundsverket i Helsingborg samt Magnus Svensson från NSR i Helsingborg.

1.5 OMFATTNING OCH AVGRÄNSNINGAR

Vid litteratursökningarna har en stor mängd publicerat material påträffats och för att begränsa studien har processlösningar som skiljer sig från den vi utgått ifrån, en hydrolys-/syrabildningstank med påföljande metanbildningssteg där hela flödet går genom båda stegen, sorterats bort. Exempel på processlösningar som sorterats bort är system med utlakning i fastbäddsprocesser med recirkulering av processvätska från ett fastbädd hydrolyssteg till ett metanbildningssteg med bärrmaterial, UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) eller processer med bärrmaterial och anaeroba filter.

Begreppet tvåstegsrötning har visat sig ofta användas i litteraturen som benämning för olika typer av processlösningar. Exempelvis kan det användas för att beskriva processer som kombinerar termofil och mesofil rötning, eller som beskrivning på processer med separat hydrolys-/syrabildningssteg. Ett försök till uppdelning kan vara tvåstegs- (two-stage) respektive tvåfas- (two-phase) rötning. En röttningsprocess där hydrolys/syrabildning och metanbildning är fysiskt separerade kallar vi här tvåfasrötning, medan tvåstegsrötning inkluderar alla processlösningar med två på varandra följande behållare. Tvåstegsrötning med två rötkammare där metanbildning sker har i flera studier visat sig ge en högre biogasproduktion än enstegsrötning men omfattas inte av denna studie.

Mycket specifika substrat såsom avfall från olivoljeberedning innehållande fenoler har valts bort eftersom de inte har ansetts vara intressanta för de svenska biogasanläggningarna. Likaledes har processer som har varit anpassade för avloppsvattenbehandling inte tagits upp.

Under litteraturstudierna har en stor andel material påträffats som rör modellering av hydrolys och därför har ett särskilt avsnitt i utredningen ägnats åt detta. Modellering kan användas för att uppskatta om biologisk förhydrolys kan ge ökad utröttningsgrad, och estimerar den ökade biogasproduktionen. Då modellering och kinetik är tätt sammankopplat kan denna del läsas som en fördjupning av teoridelen.

1.6 ORDLISTA

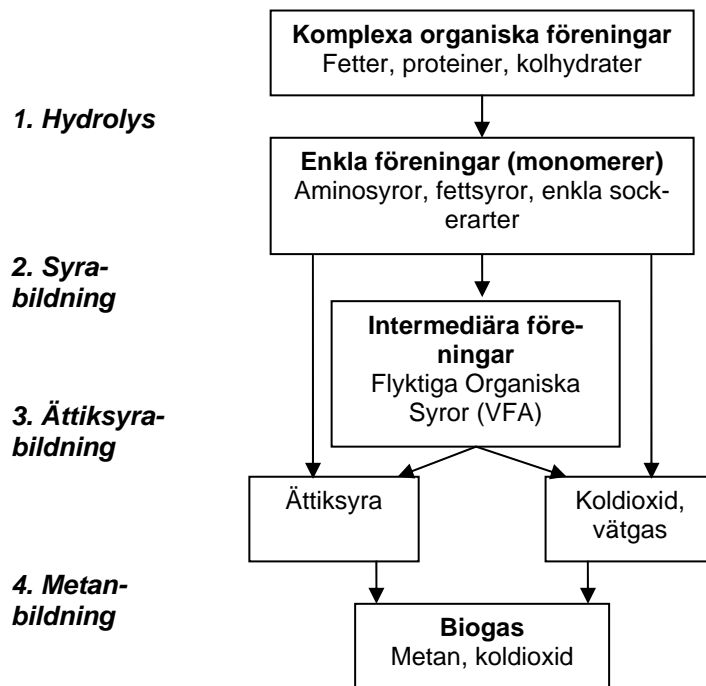
Maximal nedbrytningsgrad	Högsta möjliga nedbrytningsgrad av organiskt material som kan uppnås.
Tvåfasrötning	En röttningsprocess där hydrolys/syrabildning och metanbildning är fysiskt separerade.
Tvästegsrötning	Rötning med två på varandra följande behållare.
Utröttningsgrad	Procentuell reduktion av organiskt material som uppnås i en process.
TS	Torrsubstanshalt, det som återstår när vattnet torkats bort från ett material. Anges vanligen som procent av våtvikt.
VS	Ett mått på andelen organiskt material, Volatile Solids, mäts som torrsubstans minus aska. Anges vanligen som procent av TS.
VFA	Volatile fatty acids, flyktiga fettsyror.
COD	Chemical Oxygen Demand, ett mått på mängden organiska föreningar.

SCOD	COD som är löst i vattenfasen.
TCOD	Totala mängden COD, både löst och i partikulär form.
Alkalinitet	Ett mått på buffringskapaciteten i ett system, mängden alkaliska (basiska) ämnen, mäts ofta i halten av HCO_3^-
Primärslam, (PS)	Avskiljt slam i försedimenteringsbassänger på avloppsreningsverk före biologisk rening
Överskottsslam, (ÖS)	Biologiskt slam som tas ut från biologiska reningssteg på avloppsreningsverk för att slamhalterna i dessa inte successivt ska öka med tillväxten av biomassa.
HRT	Hydraulic Retention Time, hydraulisk uppehållstid.
SRT	Solids Retention Time, partikulär uppehållstid.
OLR	Organic Loading Rate, organisk belastning, mängd organiskt material per volymenhet och dag.

2 RÖTNINGSPROCESSEN

2.1 RÖTNINGSPROCESSENS OLIKA DELSTEG

Anaerob nedbrytning sker i flera steg där olika grupper av bakterier bryter ned organiskt material (Figur 1). Nedan följer en närmare beskrivning av varje processteg.



Figur 1. Schematisk bild över nedbrytningsförloppet under rötning

2.1.1 Hydrolysis

Hydrolysissteget är det första steget i nedbrytningskedjan där proteiner, fetter och kolhydrater bryts ner till aminosyror, fettsyror och enkla sockerarter. Ordet hydrolysis kommer från grekiskans *lysis* (klyvning) och *hydro* (vatten). Hydrolysis är en sönderdelning av en kemisk förening genom reaktion med och upptagning av vatten. Anaeroba mikroorganismer producerar extracellulära enzymer såsom lipaser, cellulaser och proteaser för att påskynda reaktionen. Reaktionshastigheten beror på flera faktorer, bland annat koncentrationer av mikroorganismer och substrat, pH och temperatur. Förloppet har beskrivits i tre steg (Vavilin m.fl., 1996):

1. Bakterier fäster till ytan på partiklarna.
2. De utsöndrar enzymer och partiklarna bryts ned till monomerer (aminosyror, fettsyror och enkla sockerarter).
3. Monomererna används av biomassan som växer och bildar nya bakterier.

Kolhydrater → socker (cellulaser)

Proteiner → aminosyror (proteaser)

Lipider → långa fettsyror och glycerol (lipaser)

2.1.2 Syrabildning (Acidogenes)

I nästa steg, syrabildningssteget, fermenteras aminosyror och enkla sockerarter vidare till flyktiga organiska syror (VFA) såsom ättiksyra, propionsyra och smörsyra samt vätgas, och koldioxid. Även mindre mängder alkoholer kan bildas i fermenteringen. Långa fettsyror bryts ned genom ättiksyrabildning (se 2.1.3). Alkalinitet (buffringskapacitet i form av HCO_3^-) förbrukas i syrabildningen, och pH sänks av de sura produkterna. De syrabildande bakterierna (acidogenerna) växer snabbt eftersom processen genererar mycket energi. Därför anses syrabildningen vara det snabbaste steget i rötningsprocessen, vilket är anledningen till att VFA kan ackumuleras i reaktorn om nästföljande steg inte är i balans.

Sammansättningen av VFA som bildas beror på substrat, processutformning och bakteriernas metabola vägar. Det har visats att pH och temperatur påverkar vilka VFA som bildas av överskottsslam, där mesofil syrabildning gav en större andel propionsyra och en lägre andel ättiksyra än termofil syrabildning (Zhang m.fl., 2009). VFA med långa kolkedjor, som valeriansyra förknippas främst med nedbrytning av proteiner (McInerney, 1988, i Chen m.fl., 2007). Även slam från reningsverk med liknande processutformning kan ge relativt olika sammansättning av VFA (Ucisik och Henze, 2008). I Chen m.fl. (2007) noterades att ättiksyra, propionsyra och iso-valeriansyra var de dominerande VFA vid syrabildning från överskottsslam vid samtliga undersökta pH 4-11. Den största koncentrationen av VFA erhöles vid pH 7 trots att metanbildningen då var som högst. I Zhang m.fl. (2009) påvisades ett optimum för syrabildningen vid pH 8. Dessa värden är något högre än det tidigare angivna optimet på pH 5-6 (Chen m.fl., 2007).

Kolhydrater + alkalinitet → flyktiga organiska syror + vätgas + koldioxid

Aminosyror + alkalinitet → flyktiga organiska syror + ammonium + vätgas + koldioxid

2.1.3 Ättiksyrabildning (Acetogenes)

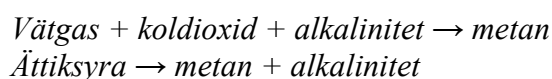
Ättiksyra bildas vid nedbrytning av långa fettsyror och VFA med flera kolatomer, till exempel propionsyra och valeriansyra. För att processen ska vara termodynamiskt gynnsam krävs att halten av vätgas är mycket låg. I ättiksyrabildningen produceras vätgas, och totalt sett ökas vätgasproduktionen genom detta steg. Därför är processen mer gynnsam vid samexistens med metanbildande bakterier som konsumerar vätgas och håller trycket på en låg nivå (ett så kallat syntrofiskt förhållande). Den frigjorda energin i varje steg återspeglas i tillväxthastigheten för bakterierna (acetogenerna), som är lägre än för acidogenerna (Siegrist m.fl., 2002). Nedbrytningen av VFA hämmas dessutom av vätgas, lågt pH, acetat och ammoniak (Siegrist m.fl., 2002). Processen har också visat sig vara inhiberad av långa fettsyror under sura förhållanden (Miron m.fl., 2000). I Liu m.fl. (2006) noterades att ett lågt pH under 5 gav en betydligt lägre vätgasproduktion och en högre andel smörsyra jämfört med ättiksyra än vid försök med pH 5-5,5. Det tyder på att ättiksyrabildningen hämmades av den sura miljön vid lågt pH. Eftersom bakterierna växer långsamt och hämmas av flera föreningar är ättiksyrabildningen en känslig process.

VFA → ättiksyra + vätgas + koldioxid

Långa fettsyror + alkalinitet → ättiksyra + vätgas + koldioxid

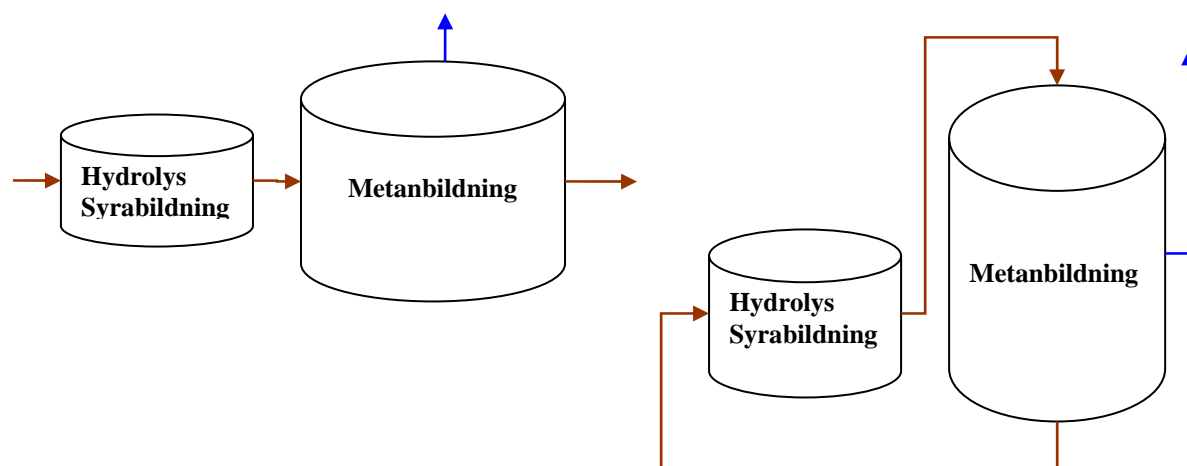
2.1.4 Metanbildning (Metanogenes)

Metan bildas dels genom upptag av vätgas och koldioxid av hydroklastiska metanbildare, dels genom acetoklastiska metanbildare som konsumerar ättiksyra. Den största delen av metanet i rötning av avloppsslam genereras genom acetoklastisk metanbildning (Pavlostathis och Giraldo-Gomez, 1991). Metanbildarna är också en känslig bakteriegrupp som inte klarar av för högt eller lågt pH. Runt pH 7,5 (Liu m.fl., 2006) eller mellan pH 6,6 och 7,3 (Siegrist m.fl., 2002) har visat sig vara mest gynnsamt för metanproduktion. Acetoklastiska metanbildare inhiberas även av ammoniak (Batstone m.fl., 2002), varför höga proteinhalter kan leda till att metanbildningen hämmas och att VFA ackumuleras.



2.1.5 Biogasprocessen med biologisk förhydrolys

En översikt över de viktigaste substraten och produkterna i den anaeroba nedbrytningen visas i Tabell 1. En total fassetparation genom biologisk förhydrolys innebär att hydrolys och syrabildning sker i det första steget. En fassetparation kan uppnås genom olika processlösningar, till exempel ett förhydrolyssteg eller en bädd med perkolerande vätska (se Figur 2). Denna studie ägnas enbart åt fassetparation genom två separata tankreaktorer med en förhydrolys och ett metanbildande steg. För att ingen metanbildning ska ske i det första steget bör uppehållstiden vara relativt kort. Ättiksyrabildning sker sannolikt inte i detta steg eftersom vätgastrycket är för högt. I det andra steget är uppehållstiden tillräckligt lång för att de känsliga metanbildarna inte ska tvättas ut ur rötchkammaren.



Figur 2. Exempel på processer med fassetparation. Till vänster en tvåstegsprocess med förhydrolystank, och till höger en process med perkolatbädd och ett biofilter där metanbildningen sker.

Tabell 1. Översikt över delprocesserna och de viktigaste substraten och produkterna i anaerob nedbrytning. Ett + eller - betyder att substansen bildas respektive konsumeras i processen.

Process	Kolhydrater	Protein	Lipider	Socker	Aminosyror	Långa fettsyror	Alkalinitet	Ättiksyra	Övriga VFA	Vätgas	Koldioxid	Metan
Hydrolys av kolhydrater	-			+								
Hydrolys av protein		-			+							
Hydrolys av lipider			-			+						
Syrabildning från socker				-			-	+	+	+	+	
Syrabildning från aminosyror					-		-	+	+	+	+	
Ättiksyrabildning från långa fettsyror						-		+		+	+	
Ättiksyrabildning från VFA								+	-	+	+	
Metanbildning från vätgas							-			-	-	+
Metanbildning från ättiksyra							+	-				+

3 RÖTNING MED INLEDANDE HYDROLYSSTEG

3.1 HASTIGHETSBEGRÄNSANDE STEGET

Hydrolysen är normalt hastighetsbestämmande i anaerob nedbrytning om substratet är partikulärt (Pavlostathis och Giraldo-Gomez, 1991). Det betyder att en ökad hydrolyshastighet ger en snabbare biogasproduktion. Många studier har därför utförts för att öka hydrolysen av svårnedbrytbart substrat och utvärdera förbehandlingsmetoder. I Davidsson m.fl. (2008) jämförs olika metoder för hydrolysis av avloppsslam med avseende på effekt och energieffektivitet. Vikten av en snabb hydrolysis för att öka utrottningsgraden beror på substratets maximala nedbrytningsgrad, hydrolyshastigheten och uppehållstiden i processen. Om uppehållstiden är så lång att den maximala nedbrytningsgraden uppnås i processen leder inte en ökad nedbrytningshastighet till en ökad utrottningsgrad. I ett fall där utrottningsgraden inte påverkas av ökad hydrolyshastighet kan detta ändå skapa möjligheter i form av minskad behövlig uppehållstid och därmed minskade kostnader för uppvärmning eller möjlighet att ta emot mer substrat. Om hydrolyshastigheten är låg eller uppehållstiden kort är det däremot sannolikt att en biologisk förhydrolysis kan leda till en ökad utrottningsgrad.

3.2 OPTIMERING AV RÖTNINGSPROCESSEN GENOM SEPARERADE PROCESSTEG

Ett system med två efterföljande reaktorer ökar sannolikheten för att substratet ska uppnå en högre uppehållstid eftersom risken för direkt genomflöde genom processen minskar. Biologisk förhydrolysis ökar även hydrolyshastigheten och den övergripande processeffektiviteten av följande skäl (Fox och Pohland, 1994):

- Kontaktytan mellan hydrolyserande biomassa och substrat förbättras och enzymkoncentrationen ökar.
- I det metanbildande steget minskar konkurrensen från de syrabildande bakterierna för de känsliga ättiksyrabildande bakterierna, vilket ökar processens effektivitet.
- pH i det metanbildande steget blir lättare att kontrollera och hålla vid ett optimalt värde.
- Processen blir mer stabil då flödet utjämnas i hydrolyssteg och pH i metanbildande steget blir mindre variabelt.

Andra process fördelar kan även vara förbättrad pumpbarhet efter förhydrolysis, minskade problem med skumbildning i röt-kammaren samt en ökad patogenavdödning (se vidare kap. 5 och 6).

Nackdelar med förhydrolysis kan vara:

- Det syntrofiska förhållandet mellan ättiksyrabildande och metanbildande bakterier försvåras genom att processen delas upp i flera steg.
- Processen blir svårare att konstruera och driva.
- Erfarenhet saknas av processen och hur nedbrytningen av olika substrat påverkas.
- Vätgas kan erhållas vilket kan vara en säkerhetsrisk om anläggningen inte designats för detta.

3.3 SEPARAT BIOLOGISKT HYDROLYSSTEG JÄMFÖRT MED ANDRA METODER

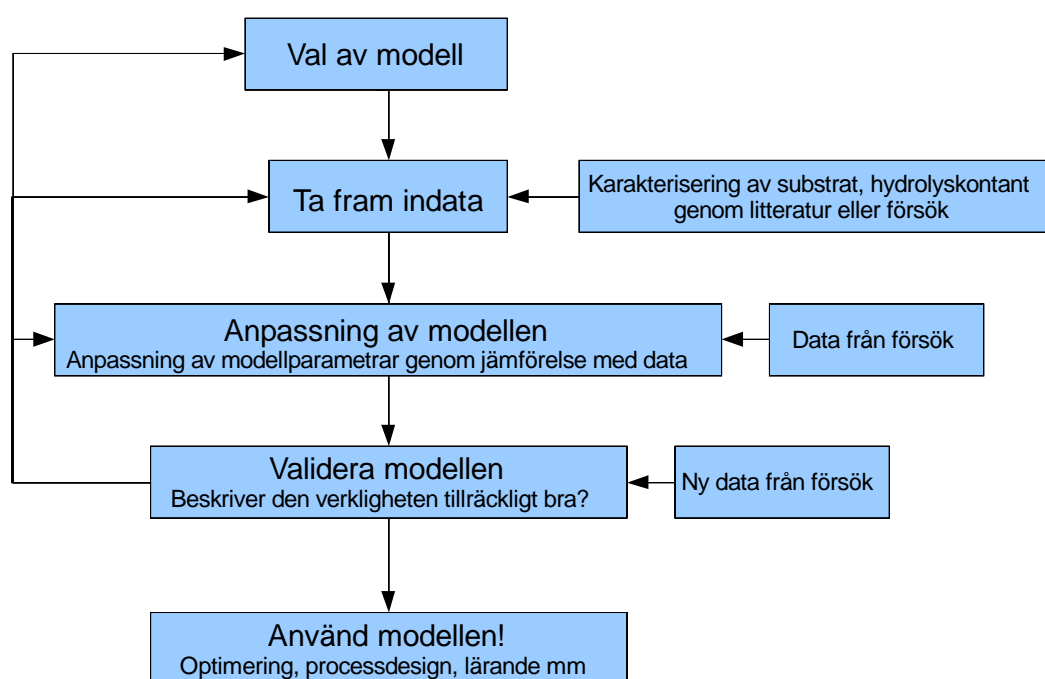
Olika sätt att påskynda hydrolys kan vara termiska, mekaniska, kemiska, biologiska eller fysikaliska metoder. För att metoden ska vara motiverad måste man se till nettoenergiutbytet, miljöpåverkan och resurshushållning för systemet. Många metoder kan vara energikrävande och ett minsta krav kan tyckas vara att inte mer energi går åt än vad som fås ut genom att tillämpa förbehandlingen. I Davidsson m.fl. (2008) konstateras att slamhydrolysmetoderna ultraljud, termisk behandling och elektriska fält på de undersökta reningsverken uppvisade negativa energibalanser. Förbehandlingsmetoder som kräver mer energi i form av el eller värme än den extra energin som kan erhållas i rötkamrarna kan vara problematiska att använda. Miljövinster i form av ökad biogasproduktion, ersättning av extern kolkälla och minskade slamvolymer får vägas mot den ökade energianvändningen (Davidsson m.fl., 2008). Det finns också en viktig skillnad mellan ökad processhastighet och ökad nedbrytbarhet, och det är inte givet att det sistnämnda uppnås med alla förbehandlingsmetoder. Exempelvis mekaniska metoder där flockarna i överskottsslam slås sönder ökar hydrolyshastigheten, men inte nödvändigtvis nedbrytningsgraden. För att nedbrytningsgraden ska ökas krävs en metod där cellerna slås sönder.

Fördelen med biologisk hydrolys jämfört med andra alternativ kan vara:

- Försumbart eller mycket litet extra värmebehov
- Inga kemikalier eller tillsatta enzymer behövs
- Låg kostnad
- I befintliga anläggningar möjlighet att använda redan existerande bassängvolym

4 MODELLERING AV HYDROLYS

Modellering är ett användbart verktyg för att öka förståelsen för komplexa system genom att undersöka olika scenarier och värdera känsligheten av olika parametrar. En modell utvecklas utifrån praktiska försök. I första steget utförs försök, och en modell som passar data väljs ut där konstanterna anpassas (Figur 3). I nästa steg (validering) testas modellen med nya försök och simuleringar för att undersöka om den är användbar. En modell som har visat sig ge en bra bild av verkligheten kan användas för att förstå, designa och optimera en process. Exempelvis kan försök analyseras och ge underlag för optimering av en fullskaleprocess, eller optimal design av ett försök i pilotskala.



Figur 3. Översiktligt schema för användning av modellering.

Hydrolysmodellen belyser vilka faktorer som begränsar hydrolyshastigheten och hur processförhållandena kan optimeras. Påverkan av till exempel pH, partikelstorlek eller uppehållstid kvantifieras med hjälp av en modell. Det ger resultat som visar på hur förhållanden för hydrolyshastighet kan optimeras genom ändrade driftsparametrar och hur en rötningsprocess ska designas för att maximera gasproduktionen. Skillnaden mellan hydrolyshastighet och nedbrytningsgrad tydliggörs också med modellering. En underskattning av hydrolyshastigheten har visat sig leda till en lägre modellerad utrötningsgrad än i verkligheten (Batstone m.fl., 2009). Det tyder på att en ökad hydrolyshastighet även kan ge en ökad utrötningsgrad. Modellering kan användas för att uppskatta om biologisk förhydrolyshastighet kan ge ökad utrötningsgrad, och estimerar den ökade biogasproduktionen. Då modellering och kinetik är tätt sammankopplat kan denna del läsas som en fördjupning av kap. 2 och 3.

I en modell för anaerob nedbrytning bör särskild vikt läggas vid modelleringen av hydrolysen eftersom detta ofta är det hastighetsbestämmande steget (Siegrist m.fl., 2002). Vikten av hydrolysen i rötningsprocessen kan även visas genom att undersöka hur konstanter som är kopplade till hydrolysen påverkar gasproduktionen. Om en liten ändring i en hydrolyskonstant ger en stor ökning i den simulerade biogasproduktionen är känsligheten för hydrolysen stor. I flera fall har den stora känsligheten för hydrolyskonstanten påvisats, bland annat i Myint m.fl. (2007). En stor känslighet för hydrolyskonstanten innebär att rötningsprocessen kan effektiviseras genom att öka hydrolyshastigheten, till exempel genom förhydrolys.

Nedan beskrivs några av de vanligaste modellerna för hydrolys som använts för att modellera enbart hydrolys, eller för att modellera hydrolys som ett delsteg i anaerob nedbrytning.

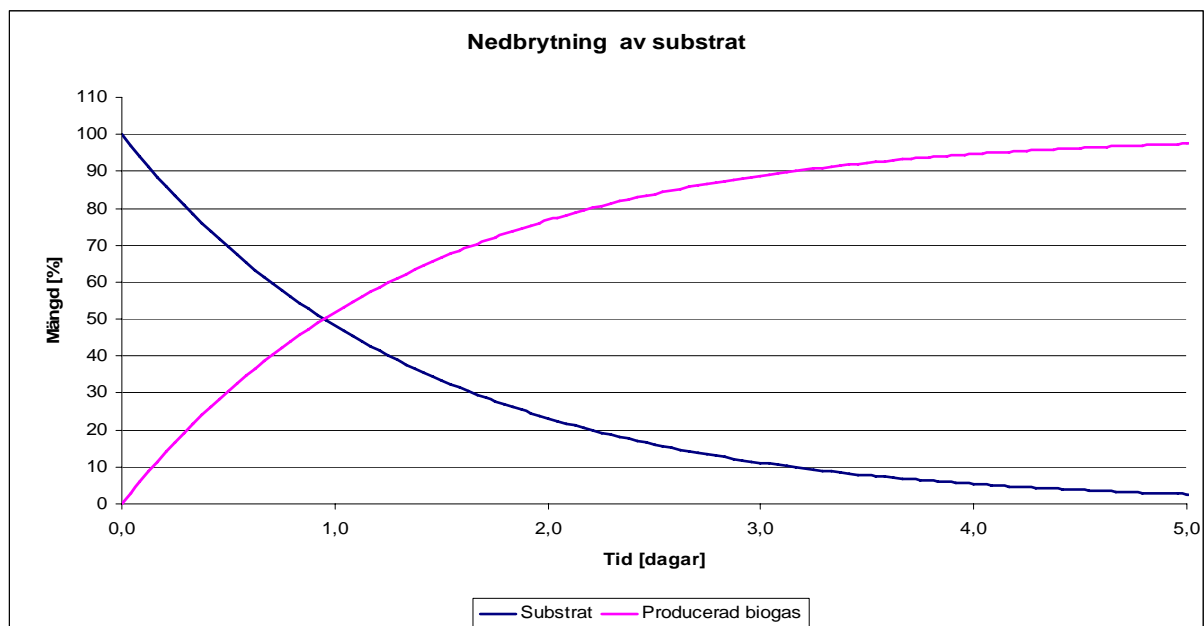
Tabell 2. Symboler med beskrivning.

Symbol	Beskrivning
\hat{K}_X	Halvmättnadskonstant (Monod och Contois)
A	Exponent för första ordningens kinetik med biomassa
B	Koncentration av hydrolyserande bakterier
k_H	Hydrolyskonstant (första ordningen med och utan biomassa)
X	Koncentration av nedbrytbart partikulärt material
θ	Uppehållstid för partikulärt material
θ_H	Hydrolyshastighet
θ_{mH}	Maximal specifik hydrolyshastighet

4.1 FÖRSTA ORDNINGENS MODELL

En första ordningens modell (1) med avseende på mängd nedbrytbart substrat är den vanligaste modellen för hydrolyshastigheten θ_H , och har använts med framgång (Vavilin m.fl., 1996). I denna modell antas att endast substratkoncentrationen är begränsande för hydrolyshastigheten, vilket innebär att koncentrationen av hydrolyserande bakterier ej antas påverka processen. I de fall hydrolyserande bakterier finns i så stor mängd att hydrolyshastigheten inte ökar vid ytterligare tillsats av bakterier är första ordningens kinetik en bra modell (till exempel Vavilin m.fl. 2008). Vid hög organisk belastning är första ordningens modell mindre lämplig att använda eftersom ett förlopp där biomassan tvättas ur reaktorn inte kan simuleras väl. Ett nedbrytningsförlopp enligt första ordningens modell i en satsreaktor visas i Figur 4. Eftersom substratkoncentrationen är högre i en förhydrolys än i en röt-kammare ger modellen en högre hydrolyshastighet med förhydrolys. Hydrolyskonstanten k_H med enheten d^{-1} uppskattas vanligtvis genom utrötningsförsök (se kap. 5.4.2).

$$\theta_H = -k_H \cdot X \quad (1)$$

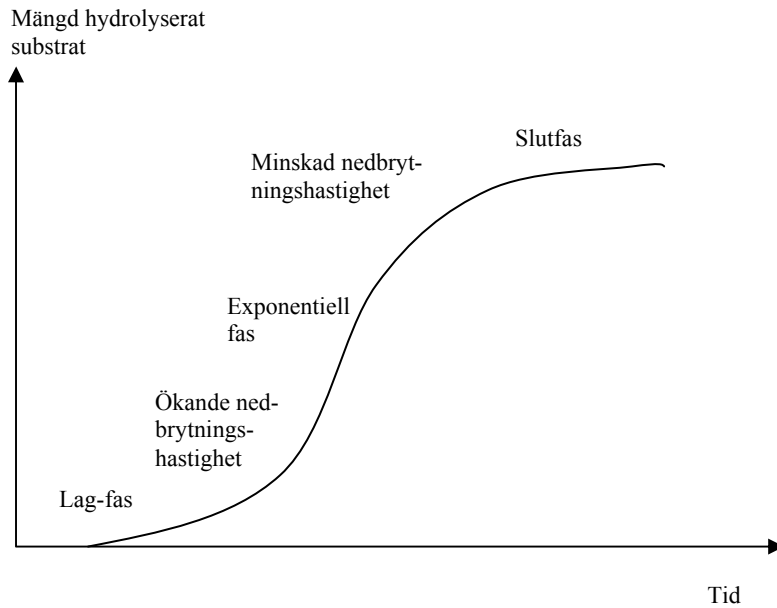


Figur 4. Nedbrytning av substrat enligt en första ordningens modell. Eftersom hydrolysen antas vara den hastighetsbegränsande processen motsvaras de hydrolyserade produkterna av den producerade biogasen.

4.2 ANDRA ORDNINGENS MODELL

En låg koncentration av biomassa borde rimligtvis leda till en låg halt av enzymer och därmed en lägre hydrolyshastighet. Omvänt borde en hög koncentration av biomassa underlätta nedbrytningen av substrat. Ett linjärt samband mellan koncentrationen av bakterier som är fästa vid partiklar och hydrolyshastigheten har också visats (Jensen m.fl., 2009). Om biomassan inkluderas i hydrolysmodellen (1) skapas en andra ordningens modell (2). Valentini m.fl. (1997) introducerar även exponenten A som innebär att nedbrytningen går snabbare vid lägre halt av biomassa eftersom substratet är mer tillgängligt för bakterierna. Modellen visade en bra passning till data från försök med cellulosa. Författarna beskriver hydrolysförloppet som en S-formad kurva (Figur 5), notera skillnaden från nedbrytnings-kurvan i Figur 4. En fördel med en andra ordningens modell är att en reaktor med låg koncentration av biomassa kan modelleras bättre. Det har även visats att modellen passar väl för höga halter av biomassa (Myint och Nirmalakhandan, 2006).

$$\theta_H = -k_H \cdot X \cdot B^A \quad (2)$$

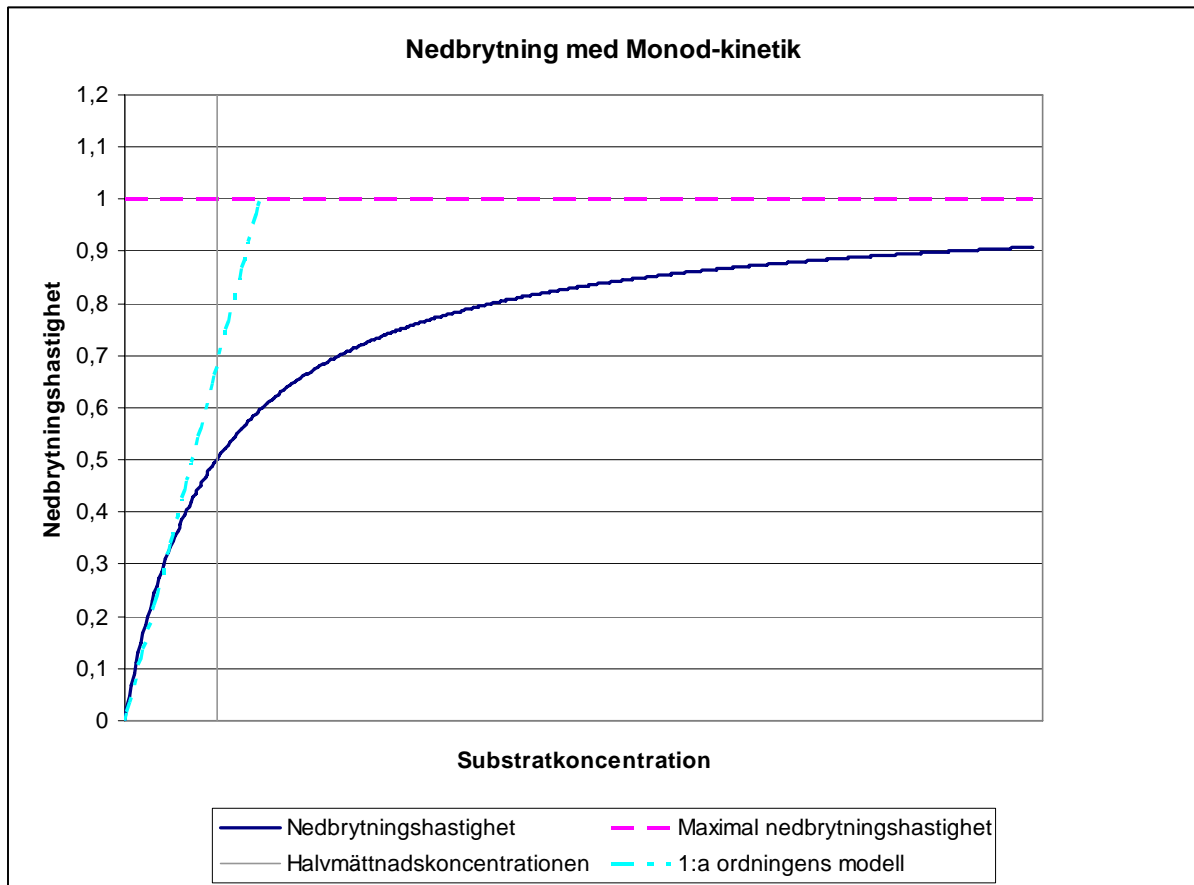


Figur 5. Mängd hydrolyserat substrat som funktion av tiden baserat på hydrolysbeskrivning i Valentini m.fl. (1997).

4.3 MONOD-KINETIK

Monod-kinetik (3) har också föreslagits och använts i flera studier. Modellen är en vanlig kinetisk beskrivning av en enzymatisk process där enzymer fäster till ett substrat och katalyserar nedbrytningen. Vid låga värden på nedbrytbart substrat X är de flesta enzymerna ”fria” och fäster snabbt till substratet. Hydrolyshastigheten är då proportionell mot substratkoncentrationen, och modellen liknar ett första ordningens samband (1). Vid högre substratkoncentrationer, där X är större än halvmättnadskonstanten \hat{K}_X närmar sig hastigheten ett maximalt värde eftersom enzymerna redan är fästa vid substratet (Figur 6). Ett lågt värde på halvmättnadskonstanten innebär att substratet är lättillgängligt även vid en låg substratkoncentration, därför är den ett mått på hur lätt enzymerna fäster till substratet. I Monod-kinetiken, liksom i första ordningens modell finns ingen direkt koppling mellan biomassan och hydrolyshastigheten. Monod-kinetiken har prövats i ett flertal studier, bland annat av Vavilin m.fl. (1996) och Liu m.fl. (2008). I dessa fall visade sig Monod-kinetiken vara mindre lämpad. Vavilin m.fl. (1996) drar slutsatsen att hydrolysen inte kan tolkas som en traditionell enzymatisk process.

$$\theta_H = -\theta_{mH} \cdot \frac{X}{\hat{K}_X + X} \quad (3)$$



Figur 6. Nedbrytning med Monod-kinetik.

4.4 CONTOIS-KINETIK

För aeroba processer är Contois en ofta använd modell (Vavilin m.fl. 1996). Contois- modellen (4) har likhet med Monod-kinetik men inkluderar kvoten mellan partikulärt substrat och biomassa, där \hat{K}_X betecknar halvmätnadskonstanten. Vid låga värden på kvoten mellan substrat och biomassa är substratkonzentrationen begränsande, medan en hög kvot innebär att biomassan begränsar hydrolysen. Återigen kan parallellen dras till den första ordningens modell som ett specialfall då biomassa finns i överskott och hydrolyshastigheten är proportionell mot partikelkoncentrationen X .

$$\theta_H = -\theta_{mH} \cdot B \cdot \frac{\frac{X}{B}}{\hat{K}_X + \frac{X}{B}} \quad (4)$$

4.5 VAL AV MODELL

Simuleringar utfördes av Vavilin m.fl. (1996) för att validera 1:a ordningens modell, Contois- och Monodkinetik mot data från rötningsexperiment med gödsel, avloppsslam och cellulosa. Överlag gav samtliga modeller godtagbara resultat, endast Monod-modellen utmärkte sig särskilt genom att ge en sämre korrelation med data från rötning av cellulosa. Författarna drar slutsatsen att en modell som beskriver förloppet med kolonisering av en aktiv yta och påföl-

jande nedbrytning ger en relativt god korrelation med data för olika uppehållstider. En viktig skillnad mellan Monod-kinetiken och första ordningens modell är att hydrolyshastigheten inte ökar nämnvärt med ökande substratkoncentration över en viss nivå som beror på halvmättnadskonstanten K_X . En första ordningens modell är mindre lämplig för att modellera reaktorer med kort uppehållstid, då bakterierna riskerar att tvättas ut ur reaktorn.

I Sötemann m.fl. (2005) jämförs första ordningen med och utan biomassa, Monod- samt Contois-kinetik för anaerob nedbrytning av avloppsslam. Samtliga modeller passade bra till data, men första ordningens modell och Contois hade en något bättre passning. I valet mellan dessa ansåg författarna att Contois-modellen där biomassan är inkluderad framstår som mer rimlig.

Batstone (2006) menar att första ordningens kinetik är att föredra då anpassningen till data oftast är så tillfredställande att mer komplicerade modeller inte går att rättfärdiga. För varje ny parameter som introduceras i en modell ökar osäkerheten eftersom det är svårt att bestämma en konstant exakt. Samtidigt anses första ordningens modell ofta vara för enkel för en komplex process som hydrolys. I ett fall då uppehållstiden är kort är modellen uppenbarligen otillräcklig eftersom modellen bygger på antagandet att mängden biomassa inte är begränsande. I Yehuda m.fl (2000) där första ordningens hydrolysmo- dell appliceras efterlyses en mer utvecklade kinetisk modell. En andra ordningens modell har ansetts vara att föredra framför Contois-kinetik eftersom den inkluderar biomassan, men inte har lika många parametrar (Myint och Nirmalakhandan, 2006).

4.6 HYDROLYSMODELLER OCH FÖRHYDROLYS

En sammanställning av hydrolysmo- dellerna (Tabell 3) visar på de begränsande faktorerna för hydrolys. Eftersom modellerna har visat sig ge en bra beskrivning av verkliga processer tyder detta på att de viktigaste begränsande faktorerna för hydrolyshastigheten har inkluderats. Det står klart att en hög koncentration av partikulärt substrat och hydrolyserande biomassa gynnar processen. Då både halten av substrat och biomassa är högre i en förhydrolys än i en enstegs- process leder detta till en ökad tillgänglighet vilket gör att hydrolyshastigheten kan ökas. Hydrolysmo- dellerna stärker därmed uppfattningen att en inledande förhydrolys ökar hastigheten i hydrolyssteg. Med hjälp av modellering kan hydrolyshastigheten uppskattas för olika förhållanden, och en kvalitativ jämförelse av hydrolyshastigheten för olika processer blir möjlig utan praktiska försök.

Tabell 3. Översikt över vanliga hydrolysmo- dellers begränsande faktorer för hydrolyshastigheten.

Modell	Begränsande faktor
1:a ordningen	Partikulärt substrat
2:a ordningen	Partikulärt substrat, biomassa
Monod	Partikulärt substrat, tillgänglighet av substrat
Contois	Faktor partikulärt substrat/ biomassa, tillgänglighet av substrat

5 RESULTAT LITTERATURSTUDIE

5.1 ÖVERSIKT PUBLICERAT MATERIAL

Totalt har närmare 70 publicerade artiklar relevanta för denna studie identifierats efter litteratursökning på Lunds universitets sökdatabas samt fördjupade sökningar via exempelvis BIOSIS och Science Citation Index. Ytterligare material hittades vid sökningarna, exempelvis erhöles ca 20 artiklar rörande fastbäddssystem med utlakning av processvätska till ett metanbildande steg och ca 20 artiklar med alternativa processlösningar såsom UASB eller anaeroba filter i den metanbildande reaktorn. Dessa publikationer sorterades i denna studie bort för att begränsa omfattningen till system som liknar dagens svenska biogasanläggningar och rötningssystem på avloppsreningsverk. Skulle fortsatta sökningar genomföras och härledning av fler referenser i hittat publicerat material genomföras skulle än fler relevanta publicerade studier med all säkerhet påträffas. Denna litteraturstudie är därför inte fullständig, men ett försök att spegla forskningen som bedrivits på rötning med inledande biologisk hydrolys.

För att få en uppfattning om vilket syfte de publicerade studierna har haft har de lästa artiklarna sorterats in efter olika identifierade syften. Eftersom en och samma studie kan ha flera syften är summan här större än antalet studier. Att försöka optimera processförhållandena avseende uppehållstid, organisk belastning, temperatur och pH, för antingen bara hydrolyssteg eller såväl hydrolys- som metanbildningssteg, har behandlats av flest antal studier (se Tabell 4). Sedan behandlas i fallande ordning undersökning av metanutbyte för rötning med förhydrolys, modellering av processtegen för antingen bara hydrolyssteg eller såväl hydrolys- som metanbildningssteg, jämförelse mellan rötning med och utan förhydrolys, sammanställning av information från olika studier, produktion av intern kolkälla i kombination med rötning med förhydrolys eller optimering av hydrolyssteg, vätgasutvinning i hydrolyssteg, sammansättning av mikroorganismer i hydrolys- respektive metanbildande steget samt patogenreduktion vid rötning med biologisk förhydrolys.

Tabell 4. Antal publicerade studier i fallande ordning uppdelat på syftet för studierna.

Syfte	Antal publicerade studier
Optimera processförhållanden	29
Undersöka metanutbyte för rötning med biologisk förhydrolys	21
Modellering av processtegen	17
Jämföra rötning med och utan förhydrolys	18
Sammanställa information från flera källor	14
Producera intern kolkälla	7
Vätgasutvinning	3
Sammansättning av mikroorganismer	3
Patogenreduktion	2

En stor andel av publicerade studier har gjorts på avloppsslam, antingen för blandat avloppsslam (13 st), eller på enbart överskottsslam (11 st) eller primärslam (5 st). En av studierna har gjorts på human night soil, d.v.s. mänskliga fekalier, eventuellt utsorterade från urin i enkla behållare. Övriga substrat som studerats är exempelvis nötgödsel, organiskt hushållsavfall och samrötning med olika substrat (se Tabell 5).

Tabell 5. Antal publicerade studier i fallande ordning uppdelat på substrat som studerats.

Substrat	Antal publicerade studier
Avloppsslam	30
Nötgödsel	8
Organiskt hushållsavfall	5
Samrötning exempelvis organiskt avfall/ gödsel/slam	4
Stärkelse/glukos/acetat/artificiellt kolhydratrikt	4
Socketbetsmassa från sockerproduktion	2
Majsensilage	1
Cellulosa	1
Solrosoljekaka	1
Vatten från mesostillverkning	1

I de studier där försök har utförts har en majoritet av dessa skett i kontinuerlig eller semikontinuerlig lab-skala, men en del är även utförda i lite större skala eller i fullskala (se Tabell 6).

Tabell 6. Antal publicerade studier i fallande ordning uppdelat på skala på försöken som utförts.

Substrat	Antal publicerade studier
Lab-skala, kontinuerlig-/semikontinuerlig	21
Lab-skala, satsvis	15
Pilot-skala	13
Fullskala	4

Det stora flertalet av studierna som inkluderats i denna studie är publicerade under 00-talet, förutom ca 10 studier som publicerats under 90-talet.

5.2 EFFEKT PÅ OLIKA SUBSTRAT

5.2.1 Substratets lämplighet för förhydrolys

Effekten av biologisk förhydrolys beror på substratets egenskaper. En kritik som framförts mot fassetparering av rötningsprocessen är att det syntrofiska förhållandet mellan ättiksyrabildande och metanbildande bakterier försvåras. Huruvida detta är ett problem i processen beror på de metabola vägarna. Ett substrat som i hög grad bryts ned genom ättiksyrabildning borde vara mindre lämpat att behandla i en fassetparerad process eftersom nedbrytningen inte blir termodynamisk gynnsam i det syrabildande steget. I Fox och Pohland (1994) diskuteras vilka substrat som bryts ned lättare i en biologisk förhydrolys. Nedbrytningen av kolhydrater är termodynamiskt gynnsam under syrabildande förhållanden och kolhydratrika substrat anses därför vara lämpade att behandla i en tvåfasprocess. Vissa aminosyror bryts inte ned under acidogena förhållanden, men de flesta typer av proteiner bryts ned till stor del i en förhydrolys. Fett är däremot ett mindre lämpat substrat att behandla i flera steg. Nedbrytningen till vätgas och ättiksyra sker genom β -oxidation, som inte är möjlig utan en syntrofisk nedbrytning med det metanbildande steget. Man har emellertid sett att omättade fetter mätas under syrabildande förhållanden, vilket underlättar nedbrytningen i ett efterföljande steg med metanbildning.

Sammanfattande resultat från de studier som genomförts för olika substrat med syfte att jämföra rötning med och utan förhydrolys redovisas i Tabell 7.

Tabell 7. Resultat från studier som jämfört rötning med och utan ett inledande separat hydrolyssteg för några olika substrat. Skillnad i metanutbyte och skillnad i VS-reduktion för rötning med inledande separat hydrolyssteg jämfört med rötning utan separat hydrolyssteg.

Studie	Substrat	Temperatur hydrolyssteg/ rötkammare (°C)	Uppehållstid hydrolyssteg/ rötkammare HRT (d)	Ökning i metanut- byte vid rötning med förhydrolys (%)	Ökning i VS- reduktion vid röt- ning med förhydro- lys (%)
Andryszak m.fl. (2004)	Avloppsslam – blandat	37/37	-	31	21
Bhattacharya m.fl. (1996)	Avloppsslam – blandat	35/35	(2-2,7) / (10-12)		2-6
Bhattacharya m.fl. (1996)	Avloppsslam – ÖS	35/35	(2-2,7) / (10-12)		9
Cooney m.fl. (2007)	Glukos och jäst-blandning	35/35	-	Ökning	
Demirer och Chen (2004)	Nötgödsel	35/35	(1,25-4) /66	7-65	
Demirer och Othman (2008)	Avloppsslam – ÖS	60/35	(2-4) /30		26-49 (COD _{total})
Ghosh m.fl. (1995)	Avloppsslam – ÖS	37/35	(2-4) / (9-14)		17-70
Kunte m.fl. (2004)	Human night soil*	30/30	5/20	25	
Liu m.fl. (2006)	Organiskt hushållsavfall	37/37	2/15	21	
Nges och Liu (2009)	Avloppsslam – blandat	(25/50/70) /37	2/27	7/12/5,5	0/8/8
Nielsen m.fl. (2004)	Nötgödsel	68/55	3/12	6-8	9
Oechsner m.fl. (2009)	Majsensilage	55/37	10/ -	- 8,4	
Oles m.fl. (1997)	Avloppsslam – blandat	(55-60) /37	(2,6-5,5) / (14-55)	16,5	25
Park m.fl. (2008)	Artificiellt hushållsavfall**	55/55	(1-4,5) / (5-10)	0	
Pavan m.fl. (2000)	Organiskt avfall – frukt o grönsaker	(35/55) /55	(1-6,6) / (7,7-18,4)	Kunde ej drivas stabilt utan förhydrolys	Kunde ej drivas stabilt utan förhydrolys
Watts m.fl. (2006)	Avloppsslam – ÖS	(47/54/60) /37	2/15		0/0/46
Wen m.fl. (2007)	Nötgödsel	35/35	(1-15) / (1-15)	Ingen fassetparation kunde uppnås	Ingen fassetparation kunde uppnås
Yang m.fl. (2003)	Vatten från mesost-tillverkning	55/55	(0,1-0,7) / (1,5-10)	6	
Yilmaz och Demirer (2008)	Nötgödsel	35/35	2/8,6	0***	

* mänskliga fekalier ev. utsorterade från urin, vanligt förekommande från kåkstäder i U-länder

** 50 % grönsaker, 20 % frukt, 20 % nudlar och bröd, 2,5 % kött, 5 % fisk, 2,5 % ägg

*** Samma metanutbyte men vid halverad uppehållstid för rötning med förhydrolyssteg

5.2.2 Avloppsslam

Primärslam och överskottsslam har olika egenskaper beroende på hur reningsprocessen ser ut och hydrolyseras med olika hastighet. En jämförelse av slam från danska reningsverk visar att andelen löst COD efter 5 dagar för överskottsslam var betydligt lägre (1,9-5,6 % SCOD/TCOD) jämfört med primärslam (9,5 och 16,7 %) (Ucisik och Henze, 2008). I överskottsslammet finns celler, celldelar och extracellulära polymerer som håller ihop flockarna. Författarna ansåg att anledningen till den låga nedbrytningsgraden för överskottsslam är dålig tillgänglighet av substratet. Överskottsslam med hög slamålder anses allmänt ha en lägre nedbrytningsgrad och hydrolyshastighet på grund av ackumulering av svårnedbrytbara celldelar. Ucisik och Henze (2008) konstaterade däremot att det överskottsslammet som hade högst slamålder i deras studie hade högst löslighet. Övriga slam i studien hade ungefär samma löslighet oavsett slamålder. Förekomsten av försedimentering sänkte nedbrytbarheten för överskottsslammet.

Bhattacharya m.fl. (1996) använde sig av blandslam från tre olika avloppsreningsverk för att undersöka skillnaden mellan rötning med och utan inledande förhydrolys på olika slam. Verken hade 50 % vatten från hushåll och 50 % industriellt vatten, 90 % vatten från hushåll och 10 % industriellt vatten respektive 85 % vatten från hushåll och 15 % industriellt vatten. Försöken gav 31, 51 respektive 53 % VS-reduktion. För det slam som gett högst VS-reduktion testade man även med två olika uppehållstider i förhydrolyssteg, 2 respektive 2,7 dygn, vilket resulterade i 54 respektive 53 % VS-reduktion. För samma reningsverk rötade man även enbart överskottsslam och erhöll 43 % VS-reduktion. Resultaten från försöken innebar 5, 2 respektive 6 % ökning av VS-reduktionen för blandslammen respektive 8,7 % ökning av VS-reduktionen för överskottsslammet jämfört med rötning utan förhydrolys.

Demirer och Othman (2008) undersökte termofil förhydrolys och mesofil metanbildning för överskottsslam. Syftet med studien var att se om rötning kombinerat med förhydrolys även är fördelaktigt vid lägre organiska belastningar, här ca 1-4 g VS/L och dag. Vid jämförelse med ej förhydrolyserat substrat erhöles ca 26-49 % extra COD_{total} reduktion efter rötning, vilket visar att förhydrolys även kan vara fördelaktigt vid låga belastningar vilket ofta är fallet vid rötning på avloppsreningsverk.

Nges och Liu (2009) visade att ett separat inledande hydrolyssteg med en uppehållstid på 2 dygn vid 25 eller 50 °C kan resultera i 7 respektive 12 % mer metangas vid mesofil rötning av avloppsslam. Termofil rötning gav vid försöken sämre metanutbyten än med mesofil temperatur i metanbildningssteget. Författarna testade även förbehandling vid 70 °C i studien och erhöles då 5,5 % mer metangas efter mesofil rötning av substratet.

Watts m.fl. (2006) jämför en termofil hydrolys i kombination med mesofil rötning med en enstegs mesofil process för biologiskt överskottsslam. Tre olika, relativt närliggande temperaturer undersöks för hydrolyssteg, 47, 54 och 60 °C. Inga fördelar gentemot enstegsrötning kunde ses för de två lägre temperaturerna i förhydrolyssteg vid samma totala uppehållstid (17 dygn), men vid den 6 °C högre temperaturen, 60 °C, erhöles hela 46 % högre VS-reduktion jämfört med enstegsrötningen. COD-analyser visade att skillnaden inte berodde på högre hastighet av partikulärt material som går i lösning. Skillnaden anses istället kunna bero på att den högre temperaturen modifierar eller partiellt hydrolyserar substratets partiklar, vilket underlättar omsättningen i metanbildningsreaktorn. Den partiella hydrolysen förklaras som en kombination av den fysikaliska värmen samt kemisk och biologisk aktivitet.

Andrzych m.fl. (2004), Ghosh m.fl. (1995) samt Oles m.fl. (1997) har alla gjort framgångsrika försök med tvåfasrötning i fullskala i USA och Tyskland. Andrzych m.fl. (2004) och Oles m.fl. (1997) har gjort sina försök på ett blandat avloppsslam med 31 respektive 16,5 % ökning av metanproduktionen jämfört med traditionell enstegsrötning. Ghosh m.fl. (1995) gjorde sina försök på ett reningsverk utan försedimentering, d.v.s. slammet som rötades kom från de biologiska reningsstegen, och här erhöles uppemot 70 % ökad VS-reduktion jämfört med enstegsrötning. Mer om dessa fullskaleförsök finns att läsa i kapitel 6.

Kunte m.fl. (2004) har gjort sina försök på insamlad latrin, vanligt förekommande i kåkstäder. 25 % ökad metanproduktion erhöles i dessa försök jämfört med enstegsrötning. Utöver denna effekt erhöles också ett betydande mervärde genom en förbättrad patogenavdödning, se vidare kapitel 5.5.

Sammanfattningsvis kan sägas att förhydrolys har visat sig fördelaktigt vid rötning av avloppsslam i de flesta av de studerade försöken, samt att effekten kan vara större om hydrolysstegets drivs vid termofil temperatur. Det är också möjligt att en större effekt erhöles på överskottsslam än på ett blandat slam eller primärslam.

5.2.3 Matavfall

Liu m.fl. (2006) undersökte rötning av organiskt hushållsavfall med och utan förhydrolyssteg med målsättningen att producera vätgas i förhydrolysstegets. 43 ml H₂/g VS_{tillfört} erhöles i hydrolysstegets och 500 ml CH₄/g VS_{tillfört} erhöles i metanbildningsstegets. Trots att vätgas togs ut i hydrolysstegets gav processen med förhydrolys 21 % mer metangas jämfört med enstegsprocessen. Den totala uppehållstiden för tvåfasprocessen var dock 2 dagar längre, 17 dagar jämfört med 15 dagar, men skillnaden i metanproduktion får ändå ses som betydande. Den totala VFA-halten i utgående rötrest från processen med förhydrolys var nästan hälften av den ut från enstegsprocessen.

Park m.fl. (2008) erhöles ingen skillnad i metanutbyte när man jämförde rötning med och utan separat hydrolyssteg för artificiellt sammansatt matavfall. Flera olika organiska belastningar och uppehållstider användes. Emellertid menade man att en process med förhydrolys kan vara lättare att driva och vara mer stabil för organiska belastningar > 20 g COD/L och dygn.

I Yang m.fl. (2003) kombinerades praktiska försök med tillämpning av en matematisk modell, "response surface methodology", för att bestämma optimala förhållanden för hydrolysyryabildningsstegets för behandling av avfall från mesostillverkning. Förutom ett 6 % högre metanutbyte erhöles även högre processhastigheter för rötningen med förhydrolyssteg jämfört med utan. 116 % högre nedbrytningshastighet av COD och 43 % högre produktionshastighet av metan erhöles.

I Pavan m.fl. (2000) studerades termofil rötning med ett inledande separat hydrolyssteg för organiskt källsorterat avfall från en matmarknad, främst bestående av frukt och grönsaker. En specifik gasproduktion runt 600 ml CH₄/g VStillfört erhöles i tvåfssystemets med en total uppehållstid på ca 12 dagar (2-3 dagar i 1:a steget och 8-9 dagar i 2:a steget). Total VS-reduktion varierade mellan ca 67-84 % för de olika försöksserierna. Det konstaterades att typen av substrat har stor betydelse för utformningen av processen och begränsar även dess användningsområde. Vid tidigare termofila försök med enstegsrötning av motsvarande substrat gick dessa inte att driva stabilt. Författarna drar således slutsatsen att tvåfasrötning verkar vara

obligatoriskt för rötning under termofila förhållanden när potentiellt högt nedbrytbara substrat, såsom frukt och grönsaksavfall, behandlas.

Sammanfattningsvis kan sägas att rötning med förhydrolys kan ge ett ökat metanutbyte och en högre nedbrytningsgrad vid rötning av organiskt matavfall, men att effekten sannolikt beror av sammansättning av avfallet och vilka övriga processbetingelser som föreligger i processen. Flera av studierna har använt sig av termofila temperaturer i metanbildningssteget och resultaten tyder på att det kan vara gynnsamt med ett förhydrolyssteg även ur en annan aspekt för att erhålla en mer stabil process vid dessa processtemperaturer, speciellt vid höga belastningar.

5.2.4 Nötgödsel

Wen m.fl. (2007) har utfört försök med nötflytgödsel med flera reaktorer i serie vid mesofil temperatur. 3 olika behandlade flytgödsel med en TS-halt på ca 8, 18 respektive 28 % användes. Ingen fassetparation kunde emellertid erhållas, då inkommande gödsel redan innehöll höga halter av VFA samt god buffrande kapacitet. Störst metanutbyte erhöles i den första reaktorn, med minskat utbyte i vardera påföljande reaktor. Högst COD-reduktion erhöles för den gödsel med högst TS-koncentration. Yilmaz och Demirer (2008) har också studerat rötning av nötgödsel men har i sina studier kommit till en annan slutsats. Rötning med ett separat hydrolyssteg var här mer effektivt då försöken gav ungefär samma mängd metangas som rötning utan förhydrolys men med en halverad total uppehållstid. Utifrån detta resultat och litteraturstudier uppskattade författarna att rötning med ett inledande separat hydrolyssteg skulle kunna ge 42 % mer gasutbyte med likvärdig uppehållstid som enstegsrötningen, d.v.s. 20 dagar. Den uppskattade ökningen borde ha underbyggts med parallella försök med samma uppehållstid kan tyckas, men försöken visar ändå på betydande prestandaförbättring jämfört med enstegsrötning. Reaktorerna var inte omrörda med syfte att se huruvida även mycket enkla utformningar av röttningsanläggningar kan ge goda resultat i exempelvis lågteknologiska applikationer på landsbygden.

Demirer och Chen (2004) har utrett påverkan av organisk belastning och uppehållstid på hydrolys- och metanbildningssteg för nötgödsel. Ökningen i biogasproduktion jämfört med ej förhydrolyserade prov varierade kraftigt vid satsvisa utröttningsförsök för olika kombinationer av organisk belastning och uppehållstid, mellan ca 7-65 % ökning i biogasproduktion (se vidare kap 5.3.4).

Nielsen m.fl. (2004) erhöles 6-8 % högre metanutbyte och 9 % högre VS-reduktion vid rötning med jämfört med utan förhydrolys. Temperaturen i det separata hydrolysstegets var dock här så hög att den snarare tangerade en termisk förbehandling i enlighet med ABP-förordningens hygieniseringskrav (se kap 5.5).

Sammanfattningsvis kan sägas att rötning med förhydrolys av nötgödsel i de flesta fall verkar kunna ge en effektivare process. I ett av försöken kunde emellertid ingen fassetparation uppnås, helt enkelt för att substratet redan var så pass nedbrutet. Liksom för övriga substrat är därför effekten av ett separat hydrolyssteg avhängigt substratets egenskaper, såväl som processmässiga betingelser såsom organisk belastning och uppehållstid, vilket bland annat Demirers och Chens försök beskrivna här ovan visar (Demirer och Chen, 2004).

5.2.5 Grödor

Hutnan m.fl. (2000) respektive (2001) har gjort studier på rötning med förhydrolys för sockererbetsmassa från sockerframställningsindustri. Betmassan hade goda rötningsegenskaper och en hög nedbrytningsgrad erhöles, 96 % COD-reduktion, vid semikontinuerliga försök vid mesofila temperaturer. Metankoncentrationen i biogasen var så hög som i medeltal 71,9 %. Inga jämförelser med rötning utan separat hydrolyssteg genomfördes dock.

I Oechsner m.fl. (2009) erhöles ett försämrat metanutbyte vid rötning av majsensilage med ett förhydrolyssteg jämfört med utan förhydrolys. Detta förklaras enligt författarna av att vätgasen som bildats i hydrolyssteg inte utnyttjades i metanbildningssteget. Högre metanhalt erhöles emellertid i rötkammaren efter förhydrolys jämfört med utan, 61 % jämfört med 52 %.

Sammanfattningsvis kan sägas att antalet studier som hittats rörande rötning av grödor är för få för att kunna dra några slutsatser om effekten av förhydrolys på detta substrat. Det finns emellertid universitet såväl som leverantörer som finner rötning med separat hydrolyssteg för grödor intressant (se vidare kap. 7 och 8).

5.2.6 Substrat som innehåller toxiska substanser

Studier som undersökt behandling av substrat som innehåller toxiska, inhiberande eller svårnedbrytbara ämnen indikerar att rötning uppdelat på två faser med ett inledande separat hydrolyssteg kan underlätta eller möjliggöra rötning av sådana substrat (Mousa och Forster, 1999). Exempel på sådana ämnen kan vara fenoler från vindestilleriavfall eller restprodukter från olivoljeframställning (se exempelvis Beccari m.fl., 1996). I Mousa och Forster (1999) visade försök att inhiberingseffekter av garvsyra blev mindre uttalade vid rötning med förhydrolys.

5.3 OPTIMALA PROCESSFÖRHÅLLANDEN FÖR HYDROLYS

Optimala processförhållanden för hydrolys beror på faktorer såsom substrat, pH, temperatur, uppehållstid och organisk belastning. Flera olika vetenskapliga publikationer som lästs inom denna litteraturstudie beskriver försök för att undersöka optimala processförhållanden för hydrolys under olika förutsättningar. En översiktlig sammanställning över vilka parametrar som använts och varierats i försöken finns i Bilaga 2, och i nedanstående underkapitel presenteras resultat från några av dessa försök som ansetts intressanta eller visar på variationen över erhållna resultat. Sammanfattande tabeller för försök avseende pH, temperatur respektive uppehållstid och organisk belastning finns också sist i respektive underkapitel för att underlätta överblicken (se Tabell 8, Tabell 9, Tabell 10).

5.3.1 Inhibering av hydrolys

Inhibering innebär att en process hämmas av ett ämne. Ofta är det produkten i en reaktion som hämmar processen, så kallad produktinhibering. Studier om hur VFA och långa fettsyror påverkar hydrolysen visar på motstridiga resultat (Vavilin m.fl. 2008). I litteraturen finns det stöd både för uppfattningen att hydrolysen inhiberas av VFA, och att den inte påverkas av höga VFA-halter. Det är ofta svårt att skilja effekten av lågt pH och en hög halt av VFA. Därtill påverkas substratens löslighet på olika sätt av pH.

He m.fl. (2007) undersökte hur acetathalt påverkade hydrolysen av potatis. Tillsats av 20 g acetat/L hämmade hydrolysen av både kolhydrater och protein med i genomsnitt 18 respektive 25 %. Deprotonerad acetat hämmade hydrolysen mer än protonerad ättiksyra. Höga halter av långa fettsyror kan hindra hydrolysen genom produktinhibering och adsorption (Miron m.fl., 2000).

Sammanfattningsvis kan således sägas att produktinhibering av hydrolys av bland annat VFA kan föreligga i ett separat hydrolyssteg.

5.3.2 pH

Flera olika studier har undersökt hur olika pH påverkar hydrolysen genom att exempelvis reglera pH genom att tillsätta en syra eller bas och sedan även eventuellt jämföra med att låta pH vara oreglerat och förändras i enlighet med de biologiska och kemiska förändringarna i substratet under processen.

I försök av Chen m.fl. (2007) hydrolyserades biologiskt överskottsslam från ett avloppsreningsverk snabbare vid lågt eller alkaliskt pH än vid pH 7. Den snabbaste hydrolyshastigheten erhöles vid pH 11. Författarna menade att alkaliskt pH ledde till upplösning av sura grupper i slammets extracellulära polymera substanser. Påverkan av pH var här likvärdig för proteiner och kolhydrater. I Zhang m.fl. (2009), där likaledes överskottsslam hydrolyserades, upptäcktes ett minimum för proteinhydrolys vid pH 6. pH mellan 4-11 undersöktes och författarna kunde se en ökad hydrolys av både proteiner och kolhydrater vid alkaliska förhållanden. Oreglerat pH gav vid mesofil temperatur den lägsta hydrolyshastigheten i försöken, medan oreglerat pH vid termofil hydrolys gav ett medelbra resultat.

I Ge m.fl. (2010) gav en pH-sänkning till 4,5 ingen ökad hydrolys av primärslam från ett avloppsreningsverk. Det påpekades också att reglering av pH i fullskaleprocesser för avloppsslam kan vara svårt på grund av buffrande verkan från ammonium. Ponsa m.fl. (2008) provade också att surgöra pH, men för ett blandat avloppsslam, för att se hur detta inverkar på hydrolys- och syrabildning. Försöken kunde inte visa på någon inverkan av surgörningen jämfört med utan.

He m.fl. (2007) undersökte hur pH påverkade hydrolysen av potatis. Resultaten visade att hydrolysen har ett optimum vid pH 7, och minskar avsevärt vid pH 5 för både protein och kolhydrater.

Yilmaz och Demirer (2008) undersökte påverkan av uppehållstid, organisk belastning och pH-reglering på hydrolyssteg avseende VFA-produktion och VS-reduktion för nötgödsel. Resultatet visade att reglering av pH till 5,0-5,5, vid erhållen optimal kombination av uppehållstid och organisk belastning, ej gav en bättre hydrolys och syrabildning än vid oreglerat pH (pH 6,2-6,4).

Dinamarca m.fl. (2003) undersökte inverkan av pH på hydrolys av organiskt hushållsavfall. Endast relativt höga pH, 6, 7, och 8 respektive oreglerat pH, testades. Resultaten visade att pH ej behöver regleras för att erhålla en stabil process eller en god hydrolys och syrabildning. Något högre VS-reduktion erhöles emellertid i hydrolyssteg vid reglering av pH till 7 och 8 jämfört med oreglerat pH, 85 % reduktion av VS istället för 78 %. Utifrån denna skillnad bedömdes av författarna kostnaden för pH-reglering ej vara motiverad. Park m.fl. (2008) erhöles en större VFA-produktion samt högre halt löst COD i hydrolysförsök av ett artificiellt sammansatt matavfall när pH reglerades med hjälp av en bas, natriumhydroxid, till pH 6.

Hutnan m.fl. (2000) utförde optimeringsförsök för hydrolys och syrabildning för sockerbetsmassa vid mesofil temperatur. 2, 3, 4, 5 och 6 dagars uppehållstid testades vid pH 4, 4,5, 5, 6 respektive utan pH-reglering. 4 dagars uppehållstid i förhydrolyssteg visade sig vara tillräckligt och bäst resultat erhöles vid pH 4-4,5. pH-reglering i hydrolyssteg gav upp till en tredjedel mer metangas vid utrotningsförsök av proverna. I Hutnan m.fl. (2001) genomfördes försök i pilotskala som byggde på optimeringsresultaten från den föregående laboratoriestudien. Man fann här att recirkulering av slam gav ett mer stabilt pH i såväl förhydrolys som metanbildningssteg.

Sammanfattningsvis kan sägas att studierna visar på skilda resultat och att det är svårt att utifrån dessa dra några generella slutsatser om optimalt pH för hydrolys. Optimalt pH varierar sannolikt beroende på framförallt substratets sammansättning och egenskaper. Tillsats av en bas verkar emellertid kunna förbättra hydrolysprocessen för flera av de studerade substraten, exempelvis har studier med överskottsslam, potatis och matavfall visat på förbättrade resultat. Funnet optimum för sockerbetsmassa enligt Hutnan m.fl. (2000) visar dock på motsatt trend med optimum vid surare pH. pH-reglering tycks i de flesta fall inte vara nödvändigt för en bra process, vilket är viktigt med tanke på kostnaderna för tillsats av syra eller bas i en fullskaleapplikation. pH-reglering är inte heller något som tillämpas i de fullskaleanläggningar som identifierats som drivs med ett inledande hydrolyssteg (se vidare kap. 6). En sammanställning av resultaten visas i Tabell 8.

Tabell 8. Sammanställning av resultat från studier som gjort försök vid olika pH.

Huvudförfattare och publikations år	Substrat	pH	pH-reglering	Erhållet optimum eller annat resultat
Chen, 2007	Avloppsslam –ÖS	4/5/6/7/8/9/10/11	ja	Mindre än eller större än 7, optimum pH 11
Dinamarca, 2003	Organisktavfall – hushållsavfall	6/7/8/oreglerat	ja/nej	7–8
Ge, 2010	Avloppsslam – PS	4,5/oreglerat	ja/nej	surgöring till pH 4,5 förbättrar ej
He, 2007	Potatis, enzymer från slam	5/6/7/8/9	ja	7
Hutnan, 2000	Sockerbetsmassa	4/4,5/5/5,5/6/6,5/oreglerat	ja	4–4,5
Park, 2008	Organiskt avfall	6/oreglerat	ja/nej	6
Ponsa, 2008	Avloppsslam – $\frac{1}{4}$ PS + $\frac{3}{4}$ ÖS	6,2–7,1	ja/nej	surt pH förbättrar ej
Yilmaz, 2008	Nötgödsel	5/5,5/oreglerat	ja/nej	6,2–6,4 (oreglerat)
Zhang, 2009	Avloppsslam – ÖS	4/5/6/7/8/9/ 10/11/oreglerat	ja/nej	>7

5.3.3 Temperatur

Zhang m.fl. (2009) utförde hydrolysförsök med biologiskt överskottsslam vid mesofil och termofil temperatur. Försöken visade att mängden löst (hydrolyserat) COD var väsentligt högre vid termofil temperatur. Mängden kolhydrater och proteiner som hydrolyserades ökade med ca 4 gånger vid termofil jämfört med mesofil hydrolys vid oreglerat pH. Vid surt och alkaliskt pH vid pH-reglering var skillnaden mellan mesofil och termofil hydrolys mindre.

Siegrist m.fl. (2002) erhöll 1,6 gånger högre hydrolyshastighet för blandat avloppsslam vid en temperaturökning från 35 till 55 °C. Ponsá m.fl. (2008) undersökte också effekten med en höjning av temperaturen i hydrolyssteg för ett blandat avloppsslam, men här från 55 till 65 °C. Ingen skillnad kunde här ses i resultat. Vid jämförelse av en tvåfasprocess med mesofil respektive termofil förhydrolys och efterföljande mesofil rötning för primärslam visades att den totala metanproduktionen med termofil förhydrolys var 25 % högre (Ge m.fl. 2010). En ökning av temperaturen i förhydrolystanken från 50 till 65 °C gav ingen ytterligare effekt, vilket påpekades indikera att för höga temperaturer inte gynnar de syrabildande bakterierna.

Cha m.fl. (1997) undersökte nedbrytningsgraden av stärkelse vid 30, 25, 20 respektive 15 °C. De olika temperaturerna gav i fallande temperaturordning 92, 84, 72 respektive 25 % nedbrytningsgrad, vilket visade på att nedbrytningen här påverkades av temperaturen i hög grad med bättre resultat för högre temperatur. Donoso-Bravo m.fl. (2009) mätte hydrolyshastigheten för stärkelse vid temperaturintervallet 12-45 °C med högst uppmätt hastighet vid 37 °C. Hastigheten var då ungefär dubbelt så hög jämfört med processtemperaturerna vid 25 och 45 °C. Detta optimum sammanföll med den optimala temperaturen för de syrabildande mikroorganismernas tillväxthastighet.

Veeken och Hamelers (1999) undersökte påverkan av temperaturen, 20, 30 respektive 40 °C, på hydrolyshastigheten för olika organiska material bestående av fullkornsbröd, löv, bark, halm, apelsinskal, gräs respektive filterpapper. Hydrolyshastigheten steg med ökad temperatur, men ingen signifikant skillnad kunde ses avseende hur stor nedbrytningsgrad som kunde uppnås.

Pavan m.fl. (2000) studerade termofil rötning med ett inledande separat hydrolyssteg för organiskt källsorterat avfall från en matmarknad, främst bestående av frukt och grönsaker. Ökning av temperaturen i hydrolyssteg från mesofil, 35 °C, till termofil, 55 °C, förbättrade här inte gasutbytet eller kinetiken.

I en studie med nötgödsel (Yilmaz och Demirer, 2008) testades hydrolys vid 25 respektive 35 °C. Här uppmättes en högre syrabildningsgrad vid den högre temperaturen, 30 % jämfört med 25 %.

Sammanfattningsvis kan sägas att en högre processtemperatur upp till ca 55 °C i de flesta fall ger en snabbare hydrolyshastighet, undantaget en studie med stärkelse där ett tydligt optimum fanns vid 37 °C. Att höja temperaturen ytterligare till 60-65 °C har i ingående studier ej gett ett bättre resultat. En termofil hydrolys kan eventuellt ge en bättre utröttningsgrad i ett efterföljande mesofilt metanbildande steg.

Tabell 9. Sammanställning av resultat från studier som gjort försök vid olika temperaturer för hydrolysteget.

Huvudförfattare och publikations år	Substrat	Temperatur (°C)	Erhållet optimum eller annat resultat
Cha 1997	Stärkelse	15/20/25/30	30
Donoso-Bravo, 2009	Stärkelse, glukos, acetat	12/22/30/37/ 45	37
Ge, 2010	Avloppsslam – PS	35/50/60/65	50
Pavan, 2000	Organiskt avfall – frukt och grönsaker	35/55	Ingen skillnad
Ponsa, 2008	Avloppsslam – ¼ PS + ¾ ÖS	55/65	Ingen skillnad
Siegrist, 2002	Avloppsslam –blandat	35/55	55
Veeken, 1999	Organiskt avfall	20/30/40	Ökad temp ger ökad hydrolyshastighet men inget samband med nedbrytningsgrad
Yilmaz 1, 2008	Nötgödsel	25/35	35
Zhang, 2009	Avloppsslam –ÖS	35/55	55

5.3.4 Uppehållstid och organisk belastning

Biologisk hydrolys kan vara en mycket snabb process för ett lättnedbrytbart substrat. En mindre ökning i uppehållstiden för en biologisk hydrolys kan innebära en skiftning från hydrolys till metanproduktion. Potatis kan till exempel hydrolyseras nära 100 % på ca 40 timmar (Sanders m.fl., 2000). I de fall vätgasproduktion utgör en säkerhetsrisk är uppehållstiden extra viktig att övervaka. För mer svårnedbrytbart substrat är känsligheten för uppehållstiden inte lika stor. I Miron m.fl. (2000) konstaterades att syrabildande förhållanden rådde för en uppehållstid för partiklar upp till 8 dagar vid försök med primärslam. I Ucisik och Henze (2008) valdes en uppehållstid på 5 dagar för hydrolys av primär- och överskottsslam baserat på litteraturdata för att undvika metanbildning. I Zhang m.fl. (2009) bildades endast en mindre mängd metan vid termofil och mesofil hydrolys av överskottsslam efter 7 dagar. Ponsá m.fl. (2008) undersökte inverkan av bland annat organisk belastning och uppehållstid på hydrolys av ett blandat avloppsslam med två olika slamkoncentrationer, ca 2-3 % TS respektive 4-5% TS. Sammansättningen av slammet angavs vara ¼ primärslam och ¾ överskottsslam. Olika optimum för VFA-produktion hittades för de två koncentrationerna, 1 dags uppehållstid med 13 gVS/L och dag för den lägre koncentrationen respektive 4 dagars uppehållstid med 7,8 gVS/L och dag för den högre koncentrationen.

I pilotförsök med Cambi-behandlat blandslam, d.v.s. slam behandlat vid högt tryck och temperatur, av Blumensaat m.fl. (2005) erhöles en stabil biogasproduktion i det termofila försteget med en uppehållstid så låg som 2 dagar. Biogasen hade en hög halt av metan (ca 70 %) och innehöll knappt någon vätgas. En uppehållstid på endast 1,33 dagar gav däremot ingen biogasproduktion.

De la Rubia m.fl. (2009) undersökte påverkan av uppehållstid och organisk belastning på hydrolys- och syrabildningssteg för behandling av oljekaka från solrosoljetillverkning. 8, 10, 12 respektive 15 dygns uppehållstid samt 4-9 g VS/L och dag testades. Uppehållstiden visade sig här ha underordnad betydelse jämfört med den organiska belastningen för att optimera processen. För hela försöksserien erhöles ca 20-30 % ökning av lösligheten av organiskt material. Högst syrabildningsgrad, ca 84 %, erhöles för belastningen 6 g VS/L och dag och 10 dygns uppehållstid. Högre organisk belastning gav lägre syrabildningsgrad.

Demirer och Chen (2004) utredde påverkan av organisk belastning och uppehållstid på hydrolys- och metanbildningssteget för nötgödsel. 1,25-4 dygns uppehållstid samt 4-30 g VS/L och dygn användes. Högst total VS-reduktion och biogasproduktion uppnåddes för 4-10 g VS/L och dygn. För högre organisk belastning, 20-30 g VS/L och dygn, erhöles sämre VS-reduktion i hydrolyssteg. En möjlig förklaring till detta anges vara urtvättning av syrabildare vid de relativt låga uppehållstiderna som användes. Detta föreslås kunna avhjälpas med någon form av bärarmaterial för att förlänga partikeluppehållstiden i hydrolyssteg. I en annan studie med nötgödsel (Yilmaz och Demirer, 2008) användes 1,25-4 dygns uppehållstid (samma som i föregående studie) samt 5-15 g VS/L och dygn. Den lägsta uppehållstiden gav mycket låg VS-reduktion. Bäst VS-reduktion, 19,5 %, erhöles vid 4 dygns uppehållstid och 15 g VS/L och dygn. 2 dygns uppehållstid och 15 g VS/L och dygn eller 4 dygns uppehållstid och 10 g VS/L och dygn gav ungefär samma VS-reduktion, ca 15 %. Vid beaktande av ekonomiska aspekter (minimering av reaktor volym) valdes 2 dygns uppehållstid och 15 g VS/L och dygn som bästa kombination av organisk belastning och uppehållstid från försöksserierna.

Sammanfattningsvis kan sägas att optimal uppehållstid och organisk belastning vid optimering av hydrolys beror av substratets sammansättning och egenskaper, och att det för varje kombination av processparametrar finns ett optimum som ändras om någon av processförutsättningarna förändras. Beroende på substratets egenskaper verkar dock känsligheten för exempelvis optimal uppehållstid för att erhålla en god hydrolyprocess kunna vara relativt låg, exempelvis 2-4 dagar kan ge ungefär samma resultat. För avloppsslam verkar generellt, beroende på egenskaper och sammansättning, 4-7 dagar kunna vara lämpligt och för nötgödsel har i ingående studier 2-4 dagar använts. En sammanställning över erhållna resultat finns i Tabell 10.

Tabell 10. Sammanställning av resultat från studier som gjort försök vid olika uppehållstider och organiska belastningar för hydrolysteget.

Huvudförfattare och publikation år	Substrat	Temperatur (°C)	Upphållstid HRT (d)	Organisk belastning OLR (g VS/L*d)	Erhållet optimum eller annat resultat
Blumensaat, 2005	Cambi-behandlat avloppsslam – ÖS + PS	55	1,33/2/4	10/21/32 g COD/L*d	1,33 d, vid 2 d erhölls stabil metanproduktion
De la Rubia, 2009	Solros oljekaka	35	8/10/12/15	4–9	10 d och 6 g VS/L*d. OLR viktigare än HRT för optimeringen
Demirer, 2004	Nötgödsel	35	1,25–4	4–30	2–4 d och 4–10 g VS/L*d
Miron, 2000	Avloppsslam – PS	25	3–15		< 8 d
Ponsa, 2008	Avloppsslam – $\frac{1}{4}$ PS + $\frac{3}{4}$ ÖS	55	1–4	13-21 g VS/L och 25-30 g VS/L	1 d och 13 g VS/L*d (vid lägre VS-halt) alternativt 4 d och 7,8 g VS/L*d (vid högre VS-halt)
Sanders, 2000	Stärkelse, ymp från UASB	30	2		40 h
Usicik, 2008	Avloppsslam –ÖS + PS	37	5	5–30	5 d
Yilmaz 2, 2008	Nötgödsel	35	1,25/ 2/4	5/10/15	4 d och 15 g VS/L*d, men 2 d och 15 g VS/L*d tillräckligt bra
Zhang, 2009	Avloppsslam –ÖS	35/55	17	19 g COD/L	Efter 7 d liten metanbildning

5.4 INTRESSANTA UPPTÄCKTER FRÅN MODELLERINGSFÖRSÖK

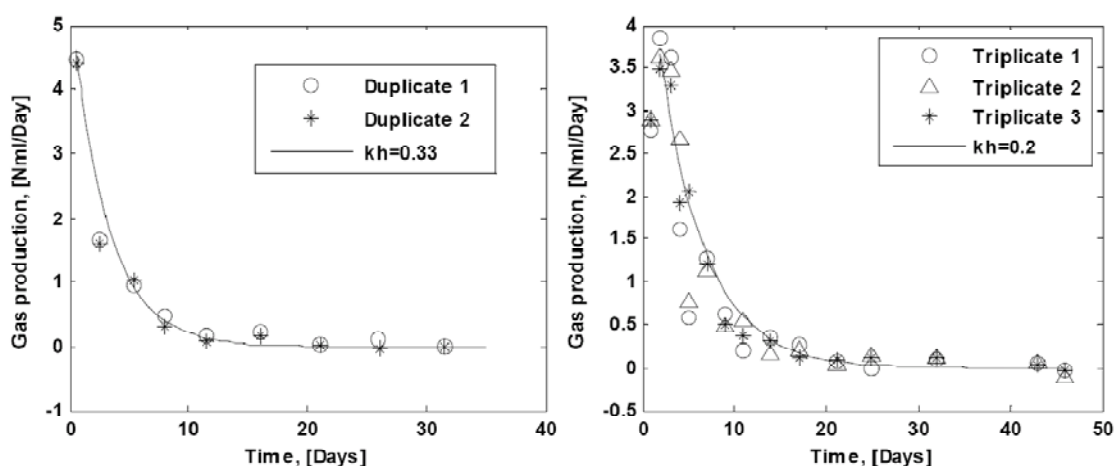
5.4.1 Modeller för anaerob nedbrytning

Ett flertal olika modeller med varierande komplexitet har föreslagits för att simulera anaerob nedbrytning. De enklaste modellerna baseras endast på det hastighetsbestämmande steget i rötningsprocessen, vilket har ansetts vara antingen metanbildning från ättiksyra, nedbrytning av långa fettsyror eller hydrolys (Apples m.fl., 2008). Som tidigare nämnts anses dock hydrolys vara det hastighetsbestämmande steget i de flesta fall vid rötning av partikulärt material (bland andra Pavlostathis och Giraldo-Gomez, 1991, Vavilin m.fl., 1996). Vid en sammanställning av modeller för anaerob nedbrytning (Apples m.fl., 2008) framgår att 5 av 6 modeller inbegriper första ordningens kinetik för hydrolysen. 2 av 6 modeller innefattar Contois-kinetik, och endast i en modell beskrivs hydrolysen med Monod-kinetik.

För att skapa en mer fullständig och enad modell samlade International Water Association (IWA) ledande forskare inom området för att utveckla en gemensam modell kallad Anaerobic digestion model no 1 (ADM1). Modellen publicerades i Batstone m.fl. (2002) och har därefter validerats och modifierats i flera artiklar, bland andra Ramirez m.fl. (2009) och Blumensaat och Keller (2005). Den innefattar tillväxt, nedbrytning och inhibering av acidogener, acetogener och metanogener. Hydrolysmodellen i ADM1 är uppbyggd som en desintegrationsprocess av partiklar till kolhydrater, fett och proteiner med en efterföljande hydrolysis. Båda processerna beskrivs som en första ordningens modell med avseende på substratkoncentrationen. Att dela upp hydrolysen i två steg på detta sätt ger bättre förutsättningar att simulera nedbrytningen av celler i exempelvis biologiskt överskottsslam. Det möjliggör också att ha olika hydrolyskonstanter för kolhydrater, fett och proteiner.

5.4.2 Bestämning av hydrolyskonstanten

Utröttningsförsök är det vedertagna sättet att mäta hydrolyshastighet och maximal nedbrytbarhet och ligger ofta till grund för viktiga beslut angående de ekonomiska förutsättningarna i projekt (Batstone m.fl., 2009). Mätningar av maximal nedbrytbarhet är också viktigt för att bedöma om en ökad hydrolyshastighet kan ge en ökad utrötning i processen. Ett problem med utröttningsförsök är att förhållandena skiljer sig från en fullskaleprocess vad gäller pH, buffringkapacitet etc. Dessutom ändras förhållandena under ett utröttningsförsök med tiden vilket påverkar mikroorganismerna och kan ge icke-representativa resultat för en kontinuerlig process (Batstone m.fl., 2009). Data från utröttningsförsöken används för att anpassa en första ordningens modell (Figur 7). Uppskattningen av hydrolyskonstanten kan även göras genom att stoppa inmatningen i en kontinuerlig process. Däremot är det svårt att identifiera nedbrytbarhet och hydrolyshastighet för sig i en fullskaleprocess (Batstone m.fl., 2009). Hydrolyskonstanten är inte substratspecifik, utan kan variera mycket beroende på hydrolyserande biomassa, partikelstorlek och kemiska egenskaper. Jämförelse av hydrolyskonstanter kan emellertid ge en bild av skillnaden mellan nedbrytningshastigheten för olika substrat (Tabell 11).



Figur 7. Exempel på hur data från utröttningsförsök kan användas för att anpassa en första ordningens modell och uppskatta hydrolyskonstanten k_H . (Från Lidholm och Ossiansson 2008).

Tabell 11. Första ordningens hydrolyskonstanter för några olika substrat.

Substrat	Temperatur [°C]	k_H [d ⁻¹]	Källa
Blandat avloppsslam	35	0,25	Siegrist m.fl. (2002)
Blandat avloppsslam	55	0,4	Siegrist m.fl. (2002)
Överskottsslam	Mesofil	0,15-0,25	Batstone m.fl. (2009)
Nötgödsel	55	0,13	Vavilin m.fl. (2008)
Stärkelse	37	21,1	Donoso-Bravo m.fl. (2009)

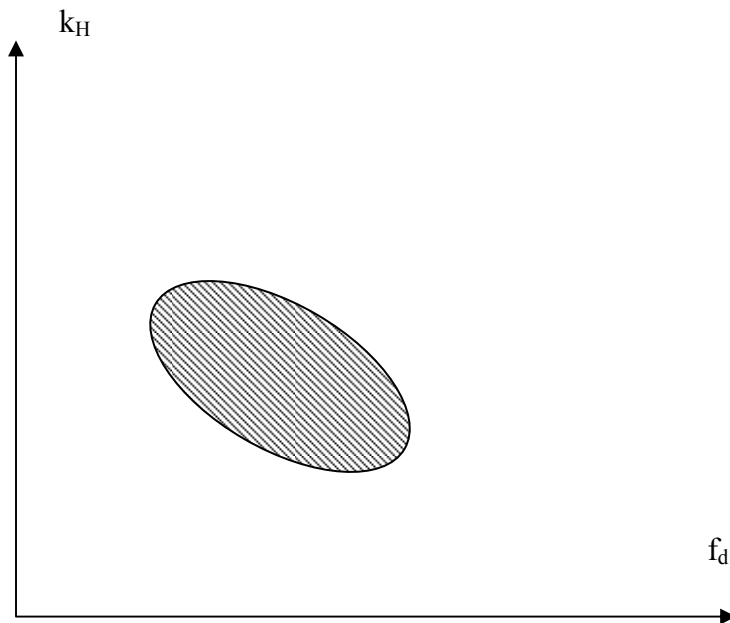
Ett försök att istället uppskatta maximala nedbrytbarheten f_d hos det inkommande substratet och första ordningens hydrolyskonstant k_H i en kontinuerlig fullskaleprocess gjordes av Batstone m.fl. (2009). Resultaten jämfördes sedan med uppskattningar från utröttningsförsök.

Modellen ADM1 användes för att simulera mesofil rötning med termisk förhydrolys av biologiskt överskottsslam med hög slamålder. I fullskaleprocessen uppskattades f_d och k_H genom anpassning till mätvärdena på VS och gasflöde. Vid varje tidpunkt söktes sålunda värden på f_d och k_H som gav den bästa anpassningen av modellen till data. Eftersom flera olika kombinationer av värden på nedbrytbarhet och hydrolyskonstant kan ge samma resultat på VS-halt och gasflöde presenteras resultatet som ett konfidensområde i en graf (Figur 8). För utröttningsförsöket kunde båda parametrarna uppskattas inom ett intervall på $0,15 < k_H < 0,30$ och $0,4 < f_d < 0,5$.

För fullskaleprocessen kunde f_d uppskattas med snäva konfidensintervall genom VS-mätningar till 0,49 och 0,54. k_H kunde däremot inte uppskattas väl för fullskaleprocessen; endast ett undre värde på 5 d⁻¹ kunde ges med avseende på gasflödet. Det innebär att hydrolyskonstanten ej var identifierbar i fullskaleprocessen. Simulering av gasflödet med parameter-skattningarna från utröttningsförsöket visade på en underskattad gasproduktion, vilket berodde på det låga k_H -värdet. Enligt författarna kunde underskattningen av hydrolyshastigheten i utröttningsförsöket ha flera orsaker:

- Hydrolysmodellen var inte tillämplig eftersom avloppsslam ofta består av en lätt- och en svårnedbrytbar fraktion.
- Låga substrathalter i utröttningsförsöken gav minskad hydrolyshastighet.
- Biomassan i ymp från den kontinuerliga processen var inte anpassad till förhållandena i ett satsvist försök. I kontinuerliga processer är dynamiken dominerad av lättnedbrytbart material, men i utröttningsförsök påverkas processdynamiken av det svårnedbrytbara materialet.

Det är intressant att en underskattad hydrolyshastighet gav en lägre gasproduktion, då detta tyder på att den låga hydrolyshastigheten begränsade gasproduktionen. I detta fall skulle en ökad hydrolyshastighet, till exempel genom biologisk förhydrolys eller tillsats av enzymer ge goda chanser till en ökad gasproduktion.



Figur 8. Konfidensområde för maximal nedbrytbarhet f_d och första ordningens hydrolyskonstant k_H för den erhållna gasproduktionen eller VS-halten i utflödet. Med 95 % sannolikhet ligger värdena inom det markerade området. En högre utrotningsgrad motsvarar en lägre hydrolyshastighet och vice versa.

5.4.3 Modellering av tvåstegsprocesser

En intressant applikation av modellering för att optimera uppehållstiden i en förhydrolys gjordes av Vavilin m.fl. (2001). Författarna använde Contois-kinetik och en första ordningens modell för att hitta den substratkoncentration som gav den högsta hydrolyshastigheten. Denna substratkoncentration motsvarade en viss uppehållstid. Modellering med Contois-kinetik kunde visa på ett optimum för uppehållstiden i en förhydrolys. För en första ordningens modell kunde däremot inget maximum hittas för hydrolyshastigheten, då denna var som högst vid inflödeskoncentrationen. Eftersom mängden biomassa måste vara mycket liten vid en kort uppehållstid, och hydrolysen då rimligtvis måste vara begränsad, är detta orimligt. Fördelen med tvåstegsrötning är emellertid tydlig i de fall då substratkoncentrationen i en förhydrolys är högre, vilket ger en högre hydrolyshastighet.

Modellering av en tvåfasprocess med avloppsslam med en termofil förhydrolys och efterföljande mesofil rötning utfördes av Blumensaat och Keller (2005). Biogas bildades även i det inledande hydrolysstegets trots den korta uppehållstiden på 2 eller 4 dagar. Detta berodde med största sannolikhet på att avloppsslammet förbehandlats i en Cambi-process vid högt tryck och temperatur vilket ökade nedbrytbarheten. Med modellen ADM1 kunde biogasproduktionen och de flesta övriga processparametrar simuleras med god överensstämmelse till data.

I Sverige är nyttjandet av modeller begränsat, men en simulering av biogasproduktionen på Henriksdals reningsverk i Stockholm gjordes inom projektet Biogasmax (Hellstedt m.fl., 2009) för att undersöka hur denna påverkas av seriedrift och tillsats av hushållsavfall. Simuleringarna med modellen ADM1 utfördes både med och utan disintegrationssteg eftersom slammet kan antas vara mer lättnedbrytbart än det material som måste desintegreras innan hydrolys. Resultatet visade att biogasproduktionen för seriedrift ökades mer i de fall disintegrationssteget inkluderas, upp till 6 %. Simuleringarna för Henriksdal visar hur viktig hydrolyshastigheten är för biogasproduktionen.

modellen är vid simulering av biogasprocessen. Eftersom hydrolysmodellen så tydligt påverkar hur biogasproduktionen estimeras är det av stor vikt att utvärdera parametrarna i hydrolysen för att få en tillförlitlig simulering.

5.4.4 Sammanfattning modelleringsförsök

Utrötningsförsök är det vedertagna sättet att mäta hydrolyshastighet och nedbrytbarhet. I kontinuerliga processer går det inte att entydigt bestämma båda dessa parametrar, däremot har försöken gett indikationer på att hydrolyshastigheten varit begränsande för biogasproduktionen. Simulering med Contois-kinetik kan visa ett tydligt optimum för vilken uppehållstid som ger den högsta hydrolyshastigheten. Det kan användas för att designa en process i flera steg så att hydrolyshastigheten och därmed biogasproduktionen kan optimeras. Modelleringsförsök visar även att rötningsprocesser i flera steg kan simuleras med god överrensstämmelse till data. En ökad biogasproduktion på upp till 6 % med seriedrift har simulerats på Henriksdals reningsverk.

5.5 PATOGENREDUKTION

Huyard m.fl. (2000) har studerat patogenreduktion vid rötning med separat inledande hydrolyssteg för avloppsslam bestående av 60 % primärslam och 40 % överskottsslam. Hydrolystestades vid två temperaturer, 55 respektive 60 °C, med 2 dagars uppehållstid i kombination med ett metanbildningssteg vid 37 °C med 10 dagars uppehållstid. Ingen reglering av pH utfördes. Man testade även att tillföra höga doser av polio virus och ascaris (spolmask) ägg, så kallad spikning. Resultaten visade att tillräcklig reduktion för att nå kraven för Class A slam enligt amerikanskt regelverk (EPA 40 CFR 503) och franskt regelverk för hygienisering (Arrêté du 8/1/98) kunde uppnås. VS-reduktionen efter rötning blev 61 %. Reduktionen av de studerade patogenerna var 5.5 log för fekala coliformer, 4 log för polio virus och 2.6 log för ascaris ägg. Reduktionshastigheten av de fekala coliformerna jämfördes vid de två olika temperaturerna i förhydrolyssteg och en högre reduktionshastighet erhöles vid 60 jämfört med 55 °C. Författarna angav dock att 55 °C är tillräckligt samt att den lägre temperaturen ger en bättre värmeekonomi i fullskaleanläggning.

Kunte m.fl. (2004) behandlade rötning av fekalier från människor, så kallad human night soil, och undersökte om tillförlitlig patogenreduktion kunde erhållas med hjälp av rötning med förhydrolysis. Höga doser tillsattes även av de undersökta patogenerna, som en engångsdos samt dagligen under 20 dagar, för att simulera exempelvis en epidemi. Rötning med förhydrolysis gav en fullständig reduktion av de undersökta patogenerna *Salmonella typhi*, *Shigella dysenteriae* och *Vibrio cholerae* med 5 dagars uppehållstid i hydrolysis/syrabildningssteg och 20 dagars uppehållstid i metanbildningsreaktorn vid ca 30 °C i båda reaktorerna. Den fullständiga patogenavdödningen tros bero på de höga VFA-halterna (17 000-19 000 mg/L) och det sura pH (5,8-6,1) som erhöles i hydrolysis/syrabildningssteg. Ingen reglering av pH tillämpades. I parallella försök utan separat hydrolysissteg erhöles ingen fullständig patogenreduktion och salmonella var detekterbart i rötammarna med 20 och 30 dygns uppehållstid. Med kortare uppehållstid, 5 eller 10 dagar, kunde salmonella inte detekteras, men då var VFA-halterna i nivå med dem i det separata hydrolysis/syrabildningssteg som användes för tvåfasrötningen. Förutom patogenavdödning erhöles även ca 25 % ökat metanutbyte i försöken med förhydrolysis jämfört med utan med liknande uppehållstider (se även Tabell 7). Författarna rekommenderade att rötning med separat hydrolysissteg tillämpas i länder som hanterar mänskliga fekalier, såsom human night soil, för att erhålla en god hygienisk säkerhet och en god metanproduktion.

Några studier som hittats i litteratursökningarna för rötning med separat hydrolyssteg använder sig av så höga temperaturer i hydrolyssteg att de knappast kan sorteras under biologisk hydrolysis utan snarare består av termisk hydrolysis. Eftersom krav på hygienisering kommer för fler substrat, exempelvis avloppsslam, är detta givetvis ett intressant område. Nielsen m.fl. (2004) är ett exempel på en studie där man använder sig av en så hög temperatur i hydrolyssteg att den är att jämföra med ABP-förordningens hygieniseringskrav på 70 °C i 1 timme. Försöken utfördes på nötgödsel som förbehandlades vid 68 °C i 3 dygn varefter det rötades termofilt vid 55 °C i 12 dygn. Med samma totala uppehållstid, 15 dygn, gav rötningen med förhydrolysis 6-8 % högre metanutbyte och 9 % högre VS-reduktion jämfört med rötning utan förhydrolysis (se även Tabell 7). 7-9 % av metanproduktionen erhöles i hydrolyssteg.

Sammanfattningsvis kan sägas att rötning med ett inledande biologiskt hydrolyssteg kan medföra en god patogenavdödning på grund av den höga VFA-halt och det låga pH som kan erhållas i materialet i det separata hydrolysis- och syrabildningssteg. Rötning med inledande biologiskt hydrolyssteg kan således vara ett alternativ för hygienisering vid högre temperaturer.

5.6 FÖRHÅLLANDEN SPECIFIKA FÖR AVLOPPSRENINGSVERK

Att behandla avloppsslam genom rötning på avloppsreningsverk har som främsta syfte att stabilisera och reducera mängden slam samt förbättra dess avvattningsegenskaper så att så liten mängd avloppsslam som möjligt behöver distribueras ut från reningsverket. På senare tid har emellertid även energiproduktion blivit ett viktigt fokus, vilket kan ge både för- och nackdelar för verkets övriga driftsekonomi. En högre gasproduktion ger högre nedbrytningsgrad och därmed mindre slam ut från reningsverket, men även högre halter av kväve och eventuellt fosfor i rejecktvalet från slamavvattningen som innebär en högre internbelastning på reningsverkets biologiska reningssteg. Detta är ett specifikt problem för avloppsreningsverken eftersom man avvattnar sin rötrest, och rejektet förädlas mycket sällan vidare till exempelvis en gödselprodukt.

Förutom biogasproduktion kan avloppsslammet även användas som en resurs för att tillverka kolkälla till de biologiska vattenreningsstegen genom slamhydrolysis. Detta är attraktivt då inköp av kolkälla utgör en stor utgiftspost och den externa kolkällan även ger upphov till en ökad slamproduktion. En intressant modell för reningsverken skulle kunna vara att kombinera slamhydrolysis för produktion av intern kolkälla med separat hydrolyssteg som förbehandling för ökat metanutbyte i rötammarna.

I Jönsson m.fl. (2009) studerades bl.a. hur produktion av intern kolkälla påverkar metanutbytet. I studien användes förfällt primärslam från Klagshamns avloppsreningsverk söder om Malmö. Hydrolysis av slammet utfördes vid 20 °C och med ca 4 dagars uppehållstid, varefter slammet centrifugerades och överstående lösning analyserades för sina egenskaper som kolkälla. Satsvisa utrötningsförsök vid mesofil temperatur utfördes därefter på det kvarvarande slammet samt som referens på slam som ej hydrolyserats. Studien visade att en högkvalitativ kolkälla kunde produceras utan att metanutbytet försämrades. Detta berodde troligtvis på att slamhydrolysen, förutom att ha gett upphov till löst COD i vätskefasen, även påverkade resterande organiskt material i slammet så att detta blev mer lättomsatt i efterföljande rötningsteg. Resultatet är mycket intressant då det visar på möjligheten att kombinera kolkällaproduktion med rötning utan att nödvändigtvis minska biogasproduktionen.

Watts m.fl. (2006) har gjort mätningar för att undersöka utlösning av fosfor efter rötning med separat inledande hydrolyssteg för överskottsslam innehållande bio-P slam, d.v.s. biologiskt

slam från fosforavskiljning. Försöken visade att 80-90 % av inkommande fosfor förelåg bundet efter rötning, vilket innebär att internbelastningen av fosfor ökade något men att den ej blev betydande. Författarna menar att det är intressant att titta på rötning av endast överskottsslam eftersom det finns en trend att i allt större utsträckning använda primärslammet för produktion av intern kolkälla för biologisk fosfor- och kväverening. En annan aspekt av ökade halter av löst fosfor som tas upp av Shimp och Sandino (2002) är eventuell påverkan på strukturbildning vid hantering av rejektvatten, där man menar att för lite erfarenheter ännu finns för att veta om och hur det skulle kunna påverka.

En aspekt av rötning av avloppsslam är också framtida behov och krav på hygienisering. Rötning med förhydrolys är inte en förbehandlingsmetod som nödvändigtvis uppfyller kraven på hygienisering, men genom att till exempel använda en termofil temperatur i förhydrolyssteg med en minsta uppehållstid enligt kraven på hygienisering skulle hygienisering kunna kombineras med förbehandlingen.

Ett vanligt förekommande problem vid rötning på avloppsreningsverk där överskottsslam ingår är skumning i rötkammaren. Flera studier pekar på möjligheten att använda rötning med förhydrolys som metod för att eliminera detta problem (Gosh m.fl., 1995, Andryszak m.fl., 2004, Shimp m.fl., 2002). Exempelvis försvann skumningsproblemen helt vid Woodridge-Greenevally avloppsreningsverk i Illinois efter implementering av ett inledande biologiskt hydrolyssteg före rötkammarna (se vidare kap. 6.2).

Hellstedt m.fl. (2009) har gjort en utredning inom det europeiska projektet Biogasmax för att se huruvida ökad biogasproduktion skulle kunna åstadkommas vid Henriksdals reningsverk i Stockholm. Tänkbara metoder för att öka biogasproduktionen utvärderades, varav förhydrolys var en av metoderna. Systemet med förhydrolys utvärderades inte närmare i rapporten, men togs upp som en möjlighet genom att använda en rötkammare med ca 3-4 dygns uppehållstid och sedan övriga rötkammare som parallella metanbildningssteg (6 stycken). Författarna angav att alternativet i sig troligtvis inte skulle ge upphov till någon större gasökning, men att volym i rötkammaren, ca 8000 m³, skulle kunna frisättas genom att processhastigheten ökade. Denna volym skulle då kunna användas för att ta in externt organiskt material och därigenom öka gasproduktionen.

Sammanfattningsvis kan sägas att tillämpning av ett inledande biologiskt hydrolyssteg på avloppsreningsverk i flera fall verkar kunna ge många positiva effekter såsom åtgärd mot skumning om sådana problem föreligger samt möjliggöra högre utrotningsgrad och/eller större behandlingskapacitet. Rötning med inledande hydrolyssteg skulle även kunna kombineras med intern produktion av kolkälla utan att detta behöver ske på bekostnad av minskad gasproduktion samt vara en potentiell hygieniseringsmetod.

5.7 VÄTGASPRODUKTION

Behandling av organiskt material i två steg, med ett inledande separat hydrolyssteg med efterföljande rötkammare för metanbildning, kan även vara ett sätt att producera en blandning av metan och vätgas, så kallad bio-hytan. Kombinerad metan- och vätgasproduktion har inte varit fokus för denna rapport, men eftersom vätgas kan uppkomma i ett förhydrolyssteg beroende på processförhållandena i detta, är det intressant att undersöka under vilka förhållanden detta kan ske och hur det påverkar processen.

I Cavinato m.fl. (2009) var målet för utredningen att undersöka en integrerad behandling av avfall och avloppsslam samt att producera vätgasberikad biogas, bio-hytan. Försöken utfördes på en pilotanläggning på avloppsreningsverket i Treviso i Italien där matavfall behandlades i ett separat hydrolyssteg för att sedan blandas med överskottsslam från avloppsreningsverket i rötkammaren. Försöken visade att rötning med ett inledande hydrolyssteg kan användas för produktion av en blandning av metan och vätgas utan tillsats av någon syra eller bas för att reglera processen. Vätgasutbytet var lågt, men genom optimering av uppehållstid och organisk belastning antogs detta kunna bli högre. I förhydrolyssteget erhöles ca 80 % CO₂ och 20 % H₂. Vid förbränning i gasmotor för kraft-värmeproduktion kan emissioner av kolväten minskas och en högre verkningsgrad erhållas genom inblandning av vätgas i biogasen.

Cooney m.fl. (2007) gjorde en studie där man försökte att kombinera metan- och vätgasproduktion från ett artificiellt substrat bestående av framförallt jäst och glukos. I första steget erhöles 30-40 % H₂ med hjälp av bland annat reglering av pH till 5,5 och optimering av den organiska belastningen. Ett högre metanutbyte erhöles i rötkammaren efter förhydrolys jämfört med rötning utan förhydrolys, men det framgår inte av studien hur mycket (se även Tabell 7). Upphållstiden i det metanbildande steget kunde emellertid inte förkortas för systemet med förhydrolys för att erhålla optimalt gasutbyte.

Liu m.fl. (2006) kombinerade vätgas- och metanproduktion från organiskt hushållsavfall. Vid satsvisa experiment för hydrolyssteg vid pH 3,5–8,5 med 0,5 enheters intervall visade pH 5-5,5 högst vätgasproduktion. Vid pH 6-8,5 bildades också metangas. Varken metan eller vätgas bildades vid pH 3,5–4,5. I semikontinuerliga försök behövdes emellertid ingen reglering av pH för att separera hydrolys/syrabildning från metanbildning. Författarna visade även att vätgasproduktionen kunde ökas med 88 % i hydrolyssteg genom att låta metangas från metanbildningssteget bubbla igenom hydrolyssteg. 21 % mer metangas erhöles än vid rötning utan förhydrolys, trots uttaget av vätgas från hydrolyssteg (se även Tabell 7).

Sammanfattningsvis kan sägas att vätgas kan produceras i ett inledande hydrolyssteg och att detta kan vara något som både kan vara önskat och oönskat. Om vätgas önskas har detta visats kunna produceras i kombination med metangas i en tvåfasprocess utan att metanproduktionen missgynnas. Samtidigt kan vätgasbildning i ett inledande hydrolyssteg innebära en säkerhetsrisk om anläggningen inte är konstruerad för att hantera detta. För de identifierade fullskalanläggningarna, se vidare kap. 6, har emellertid inga problem med vätgasbildning observerats.

5.8 BIOLOGISKT HYDROLYSSTEG JÄMFÖRT MED ANDRA METODER

Några studier eller litteratursammanställningar behandlar betydelsen av olika metoder för att optimera nedbrytningen och metanproduktionen vid rötning av organiskt material.

De Beare (2000) har gjort en sammanställning över utvecklingen fram till år 2000 för rötning av organiskt avfall från framförallt hushåll, butiker och livsmedelsindustri. Författaren konstaterade att endast 10,6 % av de identifierade anläggningarna i Europa som rötar mer än 10 % organiskt avfall är tvåfasprocesser. Ökningen från 1990 till 2000 för tvåfasrötning var endast 60 000 behandlade ton, medan den totala behandlingsmängden ökade från 122 000 till 1 037 000 under samma period. Den största ökningen av tvåfasrötning utgjordes av anläggningar som behandlade i huvudsak gödsel samrötat med mindre mängder organiskt avfall. Det påpekas att den forskning som genomförts avseende tvåfasrötning inte avspeglats i marknaden. Anledningar som tas upp till detta är att effektiva system uppnås med enfasrötning och att ökade investeringskostnader och komplexitet i processlösningen orsakar en dålig genomslagskraft.

I Hutnan m.fl. (2000) respektive (2001) gjordes försök i lab- respektive pilotskala med rötning med förhydrolys för sockerbetsmassa. Man jämförde här sina resultat med några tidigare studier med samma substrat, men där rötning utan förhydrolys (Lane, 1984 och Weiland, 1993) respektive rötning med hydrolyssteg med utlakning från fastbädd och recirkulering av processvätska till ett metanbildande steg (Weiland, 1993) genomfördes. Jämfört med dessa studier erhöles för rötning med förhydrolys högre organisk belastning, lägre uppehållstider och högre specifikt metanutbyte. Weiland (1993) erhöill 60-65% COD-reduktion med ungefär samma resultat för såväl rötning med och utan hydrolys, medan Hutnan m.fl. (2000) erhöill 95 % COD reduktion. För att erhålla en mer rättvisande bild hade det dock varit önskvärt om Hutnan m.fl. (2000, 2001) även hade utfört egna försök med rötning utan förhydrolys som referens.

Perez-Elvira m.fl. (2006) har gjort en litteratursammanställning där olika tekniker för att reducera produktionen av överskottsslam på avloppsreningsverk har sammanställts. Författarna anger att rötning med förhydrolys inte är särskilt utbredd trots studier som visat på framgångsrika resultat. Fördelar med metoden som tas upp är kortare reaktionstid, ökat metanutbyte och stabil alkalinitet. Negativt med metoden anges vara att den inte automatiskt ger klass A slam enligt EUs klassificering samt att det tycks finnas en allmän motvillighet mot att införa processen.

En annan rapport som sammanställer material är Shimp och Sandino (2002), där målsättningen varit att göra en översikt över tillgängliga tekniker som skulle kunna utveckla den konventionella rötningstekniken av avloppsslam i USA och EU. Författarna anger att tvåfasrötning vid mesofil temperatur borde vara den bästa processlösningen avseende VS-reduktion och ökat metanutbyte, speciellt om man vill undvika att arbeta med högre temperaturer eller större temperaturändringar. Man hänvisar dock till ett försök där en kombination av termofil och mesofil temperatur gav högre VS-reduktion jämfört med enbart mesofil tvåfasrötning, 64 respektive 59 % VS-reduktion (Reusser, 2001 ur Shimp och Sandino, 2002). Författarna tar också upp aspekten hygienisering där mesofil processtemperatur kan komma att inte godkännas. Både tvåfasrötning med mesofila temperaturer och med en kombination av termofil och mesofil temperatur ger möjlighet att öka kapaciteten i befintlig anläggning enligt författarna.

Ward m.fl. (2008) har gjort en sammanställning av tekniker för att optimera rötningssprocessen såsom genom exempelvis förbehandling, omblandningsteknik, metoder för att bibehålla mikroorganismerna i rötammaren och processtyrning. Man menar att rötning uppdelat i olika faser, såsom rötning med förhydrolys, kan förbättra process stabiliteten jämfört med enstegsrötning, särskilt vid behandling av lätt hydrolyserbart material. Rötning i flera steg ger även visst skydd mot ojämn organisk belastning orsakad av exempelvis ojämn kvalitet av inkommande material. Efter att ha passerat det första steget har materialet blivit mer homogent innan det går vidare till metanbildningssteget. Flerstegsprocesser är emellertid dyrare att bygga och driva. Att separera hydrolys och syrabildning från metanbildningssteget påpekas emellertid vara viktigt för att optimera rötningssprocessen.

Sammanfattningsvis kan sägas att rötning med inledande separat hydrolyssteg förekommer i positiva ordalag i sammanställningar över olika tekniker för behandling av organiskt material, men att det framkommer att processmetoden inte tillämpas i någon stor omfattning.

5.9 INVERKAN PÅ UTFORMNING OCH DRIFT AV ANLÄGGNING

Om rötning med ett inledande separat hydrolyssteg ska användas behöver anläggningens utformning anpassas för detta. Följande inverkan på utformning och drift av anläggningen kan sammanfattas utifrån litteraturstudien som gjorts:

- Minst två enheter behövs istället för minst en
- Minskat volymbehov för anläggningen då uppehållstiden kan kortas och den organiska belastningen ökas
- Uppsamling av gas från hydrolys/syrabildningssteget krävs
- Säkerhetsaspekter avseende eventuell vätgasbildning behöver ses över
- Mindre behov av spädning av material
- Stabilare process
- Mindre problem med skumning i röt-kammaren

Watts m.fl. (2006) erhöll 69-98 % av metanproduktionen i det metanbildande steget, själva röt-kammaren, resterande metangas erhöles i förhydrolyssteg. Flera andra studier redogör för viss metanbildning i hydrolyssteg, exempelvis Bhattasharya m.fl. (1996) där ca 15 % av metangasen erhöles i hydrolyssteg. Insamling av bildad gas från hydrolyssteg måste ske, dels för att förhindra läckage av metangas och dels för att motverka spridning av lukt. Eftersom en viss andel av metanproduktionen kan erhållas i hydrolys/syrabildningssteget bör denna tas tillvara genom att exempelvis ledas in i röt-kammaren/metanbildningssteget eller blandas med producerad biogas från röt-kammaren innan den används för värme-, kraft-värme eller fordonsgas produktion.

Under vissa förhållanden i hydrolyssteg finns även en möjlighet att vätgas bildas. Vissa ser detta som en möjlighet för produktion av bio-hytan (se kap 5.7), medan det samtidigt innebär en säkerhetsrisk eftersom vätgas är en mycket explosiv gas. Eftersom en del av metanbildningen sker via vätgas kan, om man väljer detta sätt att driva processen, vätgasen även ledas in i metanbildningssteget för att optimera metanutbytet från substratet. Säkerhetsaspekter angående bildning av vätgas i förhydrolys behöver utredas närmare.

Yilmaz och Demirer (2008) erhöles ingen vätgas men däremot mycket kvävgas i det separata hydrolyssteg vid sina försök med rötning av nötgödsel, vilket kan ställa till problem om biogasen ska uppgraderas till fordonsgas. Författarna misstänkte att detta eventuellt skulle kunna bero på denitrifikation i hydrolystanken.

Cavinato m.fl. (2009) undersökte termofil rötning med ett inledande termofilt hydrolyssteg för matavfall och samrötning med överskottsslam. I en presentation på en IWA konferens 2009 summerade huvudförfattaren att förhydrolys gav bättre prestanda i form av ökat metanutbyte och processtabilitet jämfört med enstegsrötning. Förhydrolyssteg möjliggjorde en hög belastning av organiskt avfall utan att problem med processtabilitet uppstod. Detta medförde att man skulle kunna använda mindre reaktorer, även om det behövs två enheter.

Demirer och Chen (2004) pekade på att rötning med förhydrolys är speciellt tillämpligt på substrat med höga TS-halter, exempelvis över 10 % TS, då organiskt material i och med hydrolyssteg delvis går i lösning och därmed sänker TS-halten, vilket underlättar hanteringen av

det i ett efterföljande omrört metanbildningssteg. Material som annars skulle övervägas att spädas blir på så sätt pumpbara och man håller således nere volymbehov, mängd rötrest samt uppvärmningsbehov.

Sammanfattningsvis kan sägas att rötning med inledande biologisk förhydrolys borde kunna implementeras på en röttningsanläggning med relativt enkla medel genom att i huvudsak komplettera med en omrörd och isolerad tank. Röttningsanläggningen blir emellertid sannolikt mer arbetskrävande då fler analyser krävs för processuppföljning och anläggningen inbegriper mer utrustning som kan behöva underhåll.

6 ERFARENHETER FRÅN FULLSKALEANLÄGGNINGAR

6.1 IDENTIFIERADE ANLÄGGNINGAR

Fullskaleanläggningar som använder sig av, eller har testat, biologisk förhydrolys har hittats bland annat genom de litteratursökningar som har gjorts. Eftersom vi i denna studie valt att fokusera på tvåfasprocesser i omrörda reaktorer där hela flödet passerar både förhydrolys- och metanbildningssteget faller vissa typer av tvåstegsanläggningar bort. Exempel på sådana anläggningar är anläggningar som hydrolyserar fasta fraktioner med utlakning av processvätska för recirkulering över ett metanbildande steg. Ett exempel på en sådan biogasanläggning är Kirchstockach i Brunthal i Tyskland (ur inventering av europeiska biogasanläggningar som behandlar hushållsavfall, la Cour Jansen m.fl., 2002).

I Tabell 12 följer en lista över identifierade anläggningar som drivs med, eller har gjort försök med, rötning med inledande biologiskt hydrolyssteg. I följande kapitel 6.2 finns sedan en beskrivning av de olika anläggningarna och deras erfarenheter med rötning med inledande hydrolyssteg.

Tabell 12. Översiktlig information om identifierade anläggningar.

Anläggning	Land	Substrat	Dimensionering	Temperatur hydrolyssteg/ metanbildningssteg	Omfattning drift*
Sobacken biogasanläggning, Borås Energi och Miljö	Sverige	Samrötning organiskt avfall	45 000 ton/år	mesofil/termofil	D
Öresundsverket avloppsreningsverk, Helsingborg	Sverige	Avloppsslam	200 000 p.e.	mesofil/mesofil	F
NSR biogasanläggning, Helsingborg	Sverige	Samrötning organiskt avfall	80 000 ton/år	mesofil/mesofil	F
Back River avloppsreningsverk, Baltimore	USA	Avloppsslam	680 000 m ³ avloppsvatten/dag	mesofil/mesofil	D
Woodridge-Greenevalley avloppsreningsverk, Illinois	USA	Avloppsslam (endast ÖS, verket har ingen förse-dimentering)	45 000 m ³ avloppsvatten/dag	mesofil/mesofil	D
Köln-Stammheim avloppsreningsverk	Tyskland	Avloppsslam	1,6 miljoner p.e.	termofil/mesofil	D/F

* F= Försök i pilot- eller fullskala med biologisk förhydrolys

D= Anläggningen drivs med biologisk förhydrolys

6.2 ERHÅLLNA DRIFTSERFARENHETER

Borås Energi och Miljö, (M. Kanerot, 2009-12-17)

På Sobacken avfallsanläggning i Borås där avfall från hushåll, verksamheter och slakterier samrötas har man sett att man får en relativt långtgående hydrolys med höga VFA-halter i sin stora blandningstank före röt-kammaren. Material som ska hygieniseras enligt animaliska bi-produktförordningen hygieniserades tidigare vid 70 °C i 1 timme för att sedan blandas med material som ej behövde hygieniseras i en blandningstank före själva röt-kammaren. Anläggningen är inte medvetet byggd för att drivas i två steg med ett inledande hydrolyssteg, men eftersom en viss del av materialet värmts upp före blandningstanken, i de tidigare tankarna för hygienisering enligt ABP-förordningen, så har troligen relativt omfattande hydrolys alltid skett här. Temperaturen i blandningskammaren ligger oftast kring ca 40 °C och den hydrauliska uppehållstiden är mellan 4 och 8 dygn.

Idag uppfyller man hygieniseringskravet genom att röta termofilt med en minsta hydraulisk uppehållstid på 10 timmar i röt-kammaren och en genomsnittlig hydraulisk uppehållstid på minst 7 dygn i röt-kammaren. Vid avstängning av hygieniseringstankarna med hygienisering vid 70 °C i 1 timme före den stora blandningstanken erhöll man emellertid många problem, varför man fortsatt värmer en viss del av materialet före blandningstanken. Problemen bestod i att materialen blev svårare att blanda i blandningstanken. Resultatet blev att man fick en instabil process med ojämn belastning. Dessutom uteblev förhydrolysen till stor del vid den låga temperaturen. Anläggningen har nu målsättningen att börja kunna arbeta mer aktivt för att optimera hydrolyssteg och utreda dess betydelse för processen.

När det gäller biogasanläggningar generellt är det givetvis så att viss hydrolys erhålls i mot-tagningstankar, bufferttankar och motsvarande, beroende på temperatur och uppehållstid i dessa. Specifikt för anläggningen i Borås är den höga temperaturen i blandningstanken som gjort detta fenomen mer uttalat, eftersom hygieniseringstankarna varit placerade före blandningstanken och inte efter.

Öresundsverket (försök i samarbete med AnoxKaldnes)

På Öresundsverket, avloppsreningsverket i Helsingborg, finns två röt-kammare som drivs i serie. I dagsläget drivs de med en temperatur på 37 °C i respektive röt-kammare. Avvattning sker med centrifuger och en TS-halt på ca 25 % uppnås. För ca 2 år sedan sjönk temperaturen i den första röt-kammaren på grund av en rad incidenter ner till 15 °C. Konsekvensen blev som väntat lägre nedbrytning av slammet, lägre gasproduktion och högre halt flyktiga syror, men också högre halt kväve i rejektvattnet efter centrifugering. En intressant konsekvens var att avvattningsbarheten av det rötade slammet ökade, från 24 till 32 % TS. En teori är att de förbättrade avvattningsegenskaperna var en följd av att nedbrytningen av extracellulära polymera substanser, EPS, ökat genom den sura hydrolysen i den första röt-kammaren. Lägre halter EPS i rötresten förmodas bidra till att vattnet lättare släpps vid avvattning. Eftersom avsättningen för avvattnat röt slam utgör en stor kostnad för ett reningsverk innebär en ökning av torrsubstanshalten i slammet en minskad utgiftspost för detta.

Ett försök i laboratorieskala genomfördes för att närmare utvärdera ett alternativt driftsätt med tvåstegsrötning, där istället för serierötning en förhydrolys äger rum i den första röt-kammaren och metanbildningssteget äger rum i den andra. Försöket utfördes dels med kall förhydrolys och lång uppehållstid (T=15-20 °C, HRT=8 d), dels med uppvärmd med kort uppehållstid (T=37 °C, HRT=2 d).

Syftet med försöket var att efterlikna fullskaleprocessen, med avseende på driftsförhållanden såsom flöde, temperatur och uppehållstid. Målet var att uppnå förbättrade avvattningsegenskaper med bibehållet gasutbyte.

När den första röt-kammaren mest producerar syror kommer den andra röt-kammaren, som drivs vid 37 °C, att behöva klara det mesta av metanproduktionen. Genomförbarheten och stabiliteten i detta utvärderades också i försöket.

Följande slutsatser och reflexioner erhöles efter genomförandet:

- Ett hydrolyssteg med låg temperatur (15-21 °C) och relativt lång uppehållstid (8 dygn) leder inte till en långtgående hydrolys och syrabildning.
- Ett hydrolyssteg med mesofil temperatur (37 °C) och kortare uppehållstid (2 dygn) ger en betydligt bättre syraproduktion och ett lägre pH-värde.
- Den andra röt-kammaren har under hela försöket klarat att hålla en hög metanproduktion vid 8 dygns uppehållstid, vilket i sig är ett intressant resultat.
- Analysresultaten indikerar att rötresten blir mer lättavvattnad efter förhydrolys.
- Det är möjligt att driva processen med 10 dygns uppehållstid, men utröttningsgraden blir då inte fullständig. Ett tänkbart, möjligt, driftsätt för Öresundsverket skulle vara att placera en 800 m³ uppvärmd hydrolystank före de befintliga röt-kammarna och sedan driva det metanbildandesteget i den första röt-kammaren och en efterrötning i den andra röt-kammaren. Efterröttningssteget skulle inte behöva värmas upp då temperaturen troligtvis ändå skulle komma att ligga runt 30 °C, vilket är tillräckligt för en fortsatt nedbrytning. Efterrötningen skulle uppskattningsvis kunna ge en vinst i metanproduktion på 10-20 %. Den totala uppehållstiden i systemet skulle då bli ca 18 dygn.

NSR biogasanläggning (försök i samarbete med AnoxKaldnes)

Försök med förhydrolys innan röt-kammaren har utförts i pilotskala på NSR biogasanläggning i Helsingborg vid två tillfällen, dels under perioden maj till november 2008 och dels under perioden september 2009 till februari 2010. Syftet med projektet var att få fram ett beslutsunderlag för ekonomisk bedömning av förhydrolys som förbehandlingsmetod för att öka stabilitet, utbyte och kapacitet i biogasanläggningen. Pilotanläggningen bestod av en omrörd förhydrolystank och en 900-liters omrörd röt-kammare. Uppehållstiden i hydrolystanken var ca 3 dagar, och i röt-kammaren först 21 dagar och därefter 17 dagar. Temperaturen i förhydrolystanken var 37 °C under försök 1 och första delen av försök 2, men höjdes till 42 °C under andra delen av detta försök. Anledningen till det var dels att utvärdera om hydrolyseffekten kunde förbättras genom högre temperatur i hydrolystanken, dels för att bättre efterlikna en eventuell framtida fullskaleprocess på NSR. Röt-kammaren drevs vid mesofil temperatur med en belastning på 3,2 kgVS/m³ och dag (HRT = 21 dagar) respektive 3,6 kgVS/m³ och dag (HRT = 17 dagar). Avfallsblandningen som användes som substrat under försöket var den hygieniserade blandningen som normalt går in till en av fullskaleanläggningens linjer. Både hydrolyssteg och rötsteg drevs utan pH-reglering.

Ett enklare labbförsök gjordes även för att utvärdera hur hydrolyseffekten påverkades av dels pH-reglering och dels av justering uppehållstiden. Fyra parallella hydrolyreaktorer med aktiv volym 1,5 liter drevs under 1 månads tid med uppehållstid 3 dagar samt med oreglerat pH, pH = 5, pH = 5,5 respektive pH = 6. Resultaten visade på en positiv inverkan på hydrolyseffekten vid pH ≥ 5,5 i form av högre koncentration löst COD. Därefter drevs de fyra lab-

reaktorerna under en månads tid med oregerat pH, men med en uppehållstid på 2,5 dagar, 3 dagar, 3,5 dagar respektive 4 dagar. Detta hade ingen tydlig effekt på koncentrationen av löst COD.

Resultaten av pilotförsöken visade på VFA-bildning i hydrolyssteg men ej på mer löst COD. Organiskt bundet kväve mineraliserades i hydrolyssteg. Hydrolyssteg hade även en utjämnande effekt på TS- och VS-halten i substratblandningen, vilket gav en jämnare belastning på röt-kammaren. NSR's biogasanläggning har en uppehållstid kring 27 dygn, exkl. efterrötning, och om man jämför kapaciteten för fullskalan med den som erhöles i försöken visar resultaten att man genom att placera ett separat hydrolyssteg innan metanbildningssteget kan öka kapaciteten med uppemot 25 %, från 27 till 20 dygns uppehållstid, med bibehållet metanutbyte och stabil drift.

Det är möjligt att en ännu effektivare hydrolysis hade kunnat uppnås i försöken om pH-reglering hade tillämpats i hydrolystanken. Detta skulle i så fall kunna ske genom antingen tillsats av lut eller recirkulering av rötrest från röt-kammaren till hydrolystanken en gång per dag. Labbförsök visade dock att det skulle krävas mycket stora mängder lut respektive rötrest för att höja pH, och det bedöms därför inte realistiskt att kunna utföra detta i fullskala.

Back River avloppsreningsverk, Baltimore, USA (Andrzejak m.fl., 2004)

På avloppsreningsverket Back River i Baltimore, USA, har parallella fullskaleförsök med rötning med och utan inledande separat hydrolyssteg studerats. En ny reaktor för förhydrolysissteget byggdes (760 m³) och två av verkets röt-kammare användes i serie som metanbildande steg. De två resterande röt-kammarna kördes i serie utan förhydrolysis vid samma belastning som linjen med förhydrolysis. Eftersom biomassa recirkulerades skildes den partikulära uppehållstiden (SRT) från den hydrauliska uppehållstiden (HRT). SRT i linjen med förhydrolysis var i medeltal 1,5 dygn i förhydrolysen och 8-12 dygn i det metanbildande steget. I linjen utan förhydrolysis varierade SRT mellan 15-50 dygn.

VS-reduktionen ökade från 48 till 58 % vid rötning med förhydrolysis jämfört med utan. 20-30 % metan erhöles i hydrolysgasen, i metanreaktorn låg metanhalt på 68-79 %. Specifik metanbildning, ml CH₄/g nedbruten VS, var likvärdig för de båda systemen. När man under ca 2 månader ökade belastningen med ca 60 % var VS-reduktionen likvärdig för de båda systemen. Historiskt har slammet bestått av ca 55 % primärslam och 45 % överskottsslam.

Reningsverket räknar med betydande kostnadsbesparingar genom att övergå till rötning med förhydrolysis genom ökad TS-reduktion, d.v.s. minskade kostnader för avsättning av slam, och ökade inkomster genom ökad gasproduktion. Ökad kostnad för kväverening kommer dock att erhållas på grund av den ökade nedbrytningsgraden. Avvattningsegenskaperna, erhållen TS-halt och polymerdos var likvärdig för systemen. Linjen med förhydrolysis verkade behöva en två månaders acklimatiseringsperiod före optimal drift infann sig.

Driftchefen på verket berättar att man är på gång med att handla upp en fullskaleanläggning för tvåfasrötning då försöken fallit så väl ut. Reaktorn som byggdes för förhydrolysis inför försöket är nu avställd, men under tiden används en utav röt-kammarna som förhydrolysissteg. Upphållstiden i denna blir emellertid längre än det optimala, som befunnits vara 2-3 dagar, men man erhåller ändå förbättrade resultat i form av högre VFA-produktion och nedbrytningsgrad. (Nick Frankos, 2010-02-04).

Woodridge-Greenevalley avloppsreningsverk, Illinois, USA (Ghosh m.fl., 1995)

Ghosh m.fl., 1995 har rapporterat om försök som utförts i pilot- och fullskala på ett avloppsreningsverk i USA. Verket hade sedan det byggdes 1983 stora problem med skumning vid rötning av överskottsslam. Rötning testades först i pilotskala med en ca 23 m³ förhydrolystank, varefter processlösningen implementerades i fullskala år 1990. Överskottsslammet förtjockades till ca 7-8 % TS för att erhålla en hög belastning. Reningsverket har ingen försedimentering utan består av rensavskiljning, aktivslamanläggning, biobäddar för nitrifikation och avslutande partikelavskiljning i sandfilter. Baserat på VS-innehåll bestod slammet till röt-kammaren till 97 % av slam från aktivslamanläggning och biobäddar.

Optimala processförhållanden för olika testade kombinationer av uppehållstid och organisk belastning befanns vara 3 dygn för hydrolys samt 9 dygn i röt-kammaren vid 4,7 kg VS/m³ och dygn. En total VS-reduktion på 70 % erhöles. Snabb uppstart av både hydrolys och metanbildningssteg kunde göras på ca 4 veckor. Processlösningen gav flera fördelar; uppehållstiden kunde halveras samtidigt som belastningen kunde dubblas samt att högre gasproduktion och högre VS-reduktion erhöles. Skumningsproblemen försvann, troligtvis då de skummande substanserna förstördes i hydrolys- och syrabildningssteget. Stabil metanbildning erhöles med endast 9 dygns uppehållstid i röt-kammaren. Ca 93 % av metanproduktionen erhöles i metanbildningssteget. Viss vätgasproduktion erhöles periodvis i hydrolyssteg. Termofil förhydrolys gav något bättre VS-reduktion, men på grund av stora luktproblem till följd av produktion av de flyktiga organiska syrorna valeriansyra (C5) och kapronsyra (C6) valdes mesofil temperatur för att få en god arbetsmiljö. Den färdiga fullskalan gav lika bra eller bättre prestanda än pilotskalan. Avvattningsförsök utfördes på rötrest från process med och utan förhydrolys och visade på samma avvattningsgrad men med 35 % mindre polymerdos för rötresten med förhydrolys.

Efter samtal med driftansvarig på Woodridge-Greenevalley avloppsreningsverk kan bekräftas att rötningprocessen fortfarande drivs framgångsrikt med ett inledande separat hydrolyssteg. Upphållstiden i förhydrolyssteg verkar dock ha förkortats och ligger på ca 1,5 dag. Gasen från hydrolyssteg facklas, även om den innehåller ca 30 % metan. Skälet till att den inte leds in till röt-kammaren uppges vara den ursprungliga konstruktionen av anläggningen. Ingen vätgasbildning eller säkerhetsrisk avseende detta har uppmärksamats. (Telefonsamtal med driftansvarig, 2010-02-04)

Köln-Stammheims avloppsreningsverk, Tyskland (Oles m.fl., 1997)

Oles m.fl. (1997) presenterade erfarenheter från fullskaleförsök med rötning med förhydrolys för tio avloppsreningsverk i Tyskland. Avloppsverken sträckte sig från små till stora, 14 000-1 600 000 p.e. Gemensamt för alla var en termofil temperatur, 55-60 °C i hydrolyssteg och mesofil temperatur, 35-37 °C, i det metanbildande steget/röt-kammaren. Upphållstiden varierade mellan 2,6-5,5 dagar för hydrolyssteg samt 14-55 dagar för metanbildningssteg. Rapporterad erhållen VS-reduktionen var 47-60 %, med metanutbytet 260-533 ml CH₄/g tillfört VS.

På Köln-Stammheims avloppsreningsverk, dimensionerat för 1,6 miljoner p.e. (personequivivalenter), gjordes en jämförande studie med och utan förhydrolys på deras slam med ca 6 % TS och 60 % VS av TS. När man ställt om till rötning med förhydrolys ökade VS-reduktionen från 48 till 60 % och det specifika metanutbytet ökade med 16,5 %. Idag drivs emellertid processen utan förhydrolys då slammängderna på avloppsreningsverket kraftigt har minskat och därför mindre incitament finns till att driva processen mer effektivt, se även vidare kap. 8 under Oswald Schulze Umwelttechnik GmbH, Tyskland (Jürgen Oles, 2010-02-02).

7 FORSKNING PÅ UNIVERSITET OCH HÖGSKOLOR

De svenska universitet, högskolor och andra institutioner som bedriver forskning kring rötning av organiskt material har kontaktats för att få en uppfattning om huruvida forskning relaterat till rötning med förhydrolys bedrivs. Likaså har kontakter med några utländska universitet och högskolor tagits.

7.1 SVERIGE

På SLU, Sveriges Lantbruksuniversitet, finns inga pågående försök med tvåstegsprocesser med separat hydrolys- respektive metanbildningssteg, men funderingar finns att arbeta på detta tema för framförallt cellulosebaserade material (A. Schnürer och Å. Nordberg, 2009-12-17).

Vid Lunds Tekniska Högskola bedrivs forskning bland annat kring kall hydrolys. En industri-doktorand finns som forskar inom området, liksom man på en IWA-konferens i Krakow i höstas presenterade en undersökning där intern produktion av kolkälla ställs i relation till metanutbyte i röt-kammaren (Jönsson m.fl., 2009). Den kalla hydrolys som man arbetar med är ämnad för att producera VFA och andra lösta föreningar till denitrifikations- eller bio-P-processer, men det är intressant att se hur intern produktion av kolkälla skulle kunna kombineras med förbehandling för bättre nedbrytning i röt-kammaren. Tidigare har en inventering över driftserfarenheter från europeiska biogasanläggningar som behandlar organiskt avfall gjorts och här identifierades några tvåfasanläggningar (la Cour Jansen m.fl., 2002). Användning av enzymer till förhydrolys är ett annat område som utretts och många förhydrolysexperiment med enzymer med påföljande rötning har genomförts. (J. la Cour Jansen och K. Jönsson, 2009-12-11 respektive 2009-12-14). På en gårdsbaserad försöksanläggning har även institutionen för Bioteknik under många år bedrivit forskning kring tvåfasrötning med hydrolys i fastbädd med utvinning av metan från cirkulerande processvätska.

7.2 UTLANDET

Professor Peter Weiland, vid det tyska statliga forskningsinstitutet Johann Heinrich von Thünen-Institute, berättar att de för mer än 20 år sedan bedrev många pilot- och fullskalestudier med hydrolys som förbehandling. Substrat som testades var drank från etanolframställning, avfall från framställning av potatis/stärkelse, bryggeriavfall och sockerbeter. Framförallt visade undersökningarna att förbehandling med biologisk hydrolys gav en högre processtabilitet, exempelvis vid förändringar i substrategenskaper såsom ändring av typ av substrat eller substratkoncentration. I samtliga applikationer var det emellertid inte möjligt att fullständigt undvika metanbildning i hydrolyssteg. För att minska lukt och undvika metanemissioner var det därför viktigt att samla upp gasen från hydrolyssteg, som sedan kunde blandas med biogasen från det metanbildande steget och exempelvis förbrännas i en gasmotor. Peter Weiland påpekar att de flesta biogasanläggningar för rötning av energigrödor och gödsel som byggts i Tyskland efter 2004 uppförts som två- eller trestegsanläggningar (ca 63 % är tvåstegsanläggningar och 7 % trestegsanläggningar). Flerstegsanläggningarna resulterar i uppemot 10 % högre metanutbyte jämfört med enstegsanläggningarna, men ofta är uppehållstiden för flerstegsanläggningarna längre och detta kan vara den främsta orsaken till det högre utbytet. Endast ett fåtal av de här två- eller flerstegsanläggningarna drivs emellertid med ett separat hyd-

rolyssteg. Detta menar Peter Weiland beror på att denna processutformning är mer krävande avseende processkontroll, framförallt pH-kontroll, samt risk för att hydrolysgasen ska innehålla högre koncentrationer av vätgas. (Peter Weiland, 2009-12-17)

Vid Brandenburg University of Technology i Cottbus, Tyskland, har man nyligen utfört detaljerade studier avseende tvåfasrötning i en pilotanläggning för rötning av majsensilage. Pilotanläggningen byggdes i samarbete med den tyska leverantören Gicon, och dessa har sedan köpt rättigheterna för den utarbetade processtekniken. Systemet bestod av ett hydrolyssteg med utlakning av processvätska till en metanbildande reaktor med packat bärarmaterial (Busch m.fl., 2008). Försöken gjordes inom ett forskningsfinansierat projekt från German Federal Ministry of Education and Research. (Günter Busch, 2010-01-07)

Ett annat tyskt universitet som arbetar med tvåfasrötning är Universität Hohenheim där Hans Oechsner och Simon Zielonka har fördjupat sig i tvåfasrötning av framförallt gräsensilage. Man har nyligen startat upp ytterligare ett projekt med förhydrolys, och de första resultaten förväntas vara klara i mitten av 2010. Ämnet bedöms som intressant även i framtiden och avdelningen avser fortsätta göra försök med tvåfasrötning (H. Oechsner och S. Zielonka, 2009-12-18 respektive 2010-01-04). Det framgår av deras publikationslista att de flesta av försöken är utförda med ett utlakande hydrolyssteg och metanbildning från denna processvätska. I en publikation (Oechsner m.fl., 2009) pekar man på att om grödor ska odlas för biogasproduktion behöver rötningsprocessen effektiviseras för att anläggningen ska kunna vara lönsam. De menar att rötning med ett inledande hydrolyssteg ger möjlighet att belasta röt-kammaren ytterligare, vilket möjliggör en högre lönsamhet. De menar dock att mer forskning behövs för att få en djupare förståelse och möjlighet att förbättra utformningen av processen. De ser också vätgasbildning i hydrolyssteg som en säkerhetsrisk som behöver överbryggas.

Vid University Ca' Foscari of Venice, Department of Environmental Sciences, i Treviso i Italien pågår försök på en pilotanläggning i samarbete med stadens avloppsreningsverk där slam och organiskt avfall avses att samrötas. Försöken har skett med biologisk förhydrolys i serie med ett metanbildandesteg (Cavinato m.fl., 2009). Man kommer nu att fokusera mera på att optimera vätgasproduktion i hydrolyssteg, för att sedan blanda den med biogasen från metanbildningssteget och förbränna blandningen i en gasmotor. Vad gäller säkerhetsaspekter för vätgasproduktion i hydrolyssteg är detta inte något man vidtagit speciella åtgärder för hitintills i försöken (C. Cavinato, 2010-01-05).

Sustainable Environment Research Centre, University of Glamorgan, i Wales arbetar med tvåfasrötning med kombinerad vätgasproduktion. Man har drivit olika piloter för tvåfasrötning av substrat som biprodukter från vetestärkelseproduktion, grödor och avloppsslam. Från 600 ton biprodukter från vetestärkelse i veckan producerade man i piloten 12 800 Nm³ vätgas och 146 400 Nm³ metan. Metoden anges kunna vara särskilt lämplig för svårrotade substrat då det första vätgasbildande steget kan öka nedbrytbarheten och metanutbytet i ett andra metanbildande steg (Freda och Dennis Hawkes, 2009). Någon närmare information om deras forskning har inte erhållits.

Gas Technology Institute, GTI, i USA har varit med och gjort försök för att ta fram den tvåfasprocess som sedan implementerades på Woodridge-Greenevalley avloppsreningsverk i Illinois (se även kap. 6). Försöken utfördes på 80-talet, och processen uppmärksammades 1996 i tidningen *R&D magazine's* "R&D 100" award som en av många lovande produkter eller processer. Tvåfasrötning är enligt Diane L. Saber på GTI inte vanligt i USA och vad hon känner till finns inga andra anläggningar som byggts baserade på GTI's resultat än den på avloppsreningsverket i Illinois. Det ska finnas ett företag som arbetar med tvåfasrötning av

svingödsel, men som inte tycks klara sig så väl ekonomiskt. Diane menar att det krävs en del teknik och kunskap för att bygga och driva en tvåfasanläggning och att hennes intryck är att många avloppsreningsverk inte är intresserade på grund av det extra arbete det medför. Hon säger dock att det kommer in frågor till institutet lite då och då och att det är möjligt att intresset för processlösningen kan ändras. (Diane L. Saber, 2010-02-11)

8 INFORMATION FRÅN LEVERANTÖRER AV UTRUSTNING

Inget försök till en heltäckande kartläggning av leverantörer av biogasanläggningar har gjorts, men eftersom information från leverantörer kan hjälpa till att ge en tydligare bild över i vilken omfattning rötning med separat hydrolyssteg tillämpas, har information samlats in där den påträffats under arbetets gång, såväl som vissa kontakter tagits eller följts upp.

I la Cour Jansen m.fl. (2002) fanns 7 stycken olika leverantörer av utrustning för olika typer av två- eller flerstegsanläggningar som behandlade organiskt avfall exemplifierade.

Nedanstående leverantörer arbetar på något sätt med tvåfasrötning med inledande hydrolys, eller har gjort jämförande studier med denna metod.

Cambi

Norska Cambi hänvisar vid telefonsamtal (Paal Jahre Nilsen, 2009) till en rapport på deras hemsida med en jämförande studie mellan olika slambehandlingsmetoder (Panter och Auty, 2009) som utförts på uppdrag av ett engelskt vattenbolag. Här jämförs olika slambehandlingsmetoder översiktligt utifrån 18 tekniska, miljömässiga och ekonomiska kriterier. I kategorin förbehandlingsmetoder för rötning rankas termisk-, enzymatisk- och biologisk hydrolys samt förhygiensiering högst. Sedan går man vidare och jämför 6 olika kombinationer av processlösningar från hantering av råslam till disponering av utgående slam och gör beräkningar avseende kostnader, nettoenergi och växthusemissioner för dessa. Som förbehandling före rötning finns rötning med biologisk hydrolys/syrabildningssteg med i en av lösningarna och termisk förhydrolys med i tre av lösningarna, i övriga processkonfigurationer ingår ej förbehandling före rötning. Resultaten visade på eventuellt lägre kostnader för biologisk förhydrolys jämfört med termisk hydrolys, men termisk hydrolys bedömdes som bäst då man erhöll ett större nettoenergiutbyte och lägre växthusgasemissioner. Siffrorna ska ha baserats på litteratur och leverantörsuppgifter.

Rottaler-modell, Tyskland

Den tyska firman Rottaler-modell säljer biogasanläggningar med inledande biologisk hydrolys samt säljer utrustning för att komplettera befintliga anläggningar med förhydrolyssteg. Man har en referensanläggning med förhydrolys i Nebauer, Simbach i Tyskland som ska ha startats 2006 och som rötar ca 7500 årston majs- och gräsensilage samt gödsel. Anläggningen består av 4 hydrolystankar á 350 m³ och 6 rötammare á 1200 m³ (<http://www.rottaler-modell.de>). Leverantören har sökts för närmare upplysningar men säger sig ha så fullt upp att man inte hinner lämna uppgifter före denna rapportens tryckning.

Gicon, Tyskland

Gicon har nyligen i samarbete med Brandenburg University of Technology i Cottbus tagit fram en anläggning med ett separat inledande hydrolyssteg som man kallar för GICON-process. Försök gjordes i samarbete med universitetet och Gicon köpte sedan rättigheterna för den utarbetade processtekniken. Systemet verkar framförallt vara anpassat för utlakning ur fasta substrat. (<http://www.gicon.de/en/geschaeftsbereiche/energie-und-umwelt/be.html>)

Eisenmann, Tyskland

Eisenmann säljer anläggningar där den första tanken är en liggande pluggflödesreaktor med en längsgående blandningsaxel som rör om och matar fram materialet. Större delen av nedbrytningen sker i denna första reaktor och TS-halten reduceras här till cirka hälften. Den första reaktorn är den minsta i systemet, vilket gör att belastningen är relativt hög, och det är framförallt hydrolys och syrabildning som sker här samt produktion av ca 20-30 % av totalproduktionen av metangas. Efter denna inledande reaktor är substratet så pass nedbrutet att det går att pumpa till den andra reaktorn där den mesta av metanbildningen sker. Den andra röt-kammaren är totalomblandad såsom i konventionella röt-kammare.

Oswald Schulze Umwelttechnik GmbH, Tyskland

Senaste installationen av en tvåfasanläggning som företaget utfört skedde på avloppsreningsverket i Braunschweig, nära Hannover, med driftstart 2001/2002. Motiven till intresse för att köpa en anläggning med tvåfasrötning med ett termofilt hydrolyssteg är framförallt minskad uppehållstid och därmed ökad kapacitet i anläggningen samt hygienisering av materialet. Vätgasbildning i hydrolyssteg har vid samtliga anläggningar som installerats på avloppsreningsverk varit mycket liten och har inte betraktats som en säkerhetsrisk. Användningen av rötning med ett separat inledande hydrolyssteg vid termofil temperatur har dock minskat på senare år och flera avloppsreningsverk har av olika anledningar övergått till traditionell ens-tegs drift istället. Här bland angav leverantören mer komplicerad drift på grund av mer utrustning att underhålla och övervaka samt otillräckliga incitament för att driva processen mer effektivt. (Jürgen Oles, 2010-02-02).

Veolia

Veolia Water Solutions & Technologies i Italien säljer processlösningar med inledande separat hydrolyssteg för behandling av grödor (exempelvis majsensilage) som samrötas med gödsel. Både hydrolysen och metansteget drivs vid termofil temperatur. (<http://www.veoliawaterst.it/en/solutions/design-build/biogas/>)

9 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Trots lovande resultat från försök med rötning med biologisk förhydrolysis drivs rötningssystem nästan uteslutande som enstegsprocesser. Orsaken till detta är förmodligen att rötning i ett steg är det allmänt vedertagna och eftersom denna processutformning är såväl enkel som stabil krävs det mer kunskap och erfarenheter om hur en tvåfasprocess fungerar för att anläggningar ska byggas enligt denna modell.

Ett inledande hydrolysissteg före rötning kan innebära att nedbrytningsgraden är högre för inkommande organiskt material till röt-kammaren. Förutsättningarna för att de materialströmmar som kortsluts eller nästan kortsluts i processen ska hinna brytas ner i röt-kammare eller efter-rötningstank bör vara större om materialet in till röt-kammaren redan till stor del är hydrolyserat. Med ett inledande hydrolysissteg är det möjligt att behovet av ett efter-rötningsteg eller uppsamling av rötgas i efterkommande lagringstankar minskar. Tvåstegsrötning minskar också risken för kortslutning i processen, och effekten av förhydrolysis jämfört med tvåstegsrötning kan vara intressant att undersöka närmare.

Det är tyvärr ofta svårt att jämföra olika studier med varandra då förutsättningarna för försöken kan skilja, parametrarna genom vilka substraten karakteriserats inte är likvärdiga eller faktorer såsom effekt av förbehandling och partikelstorlek inte tydligt framgår. Det hade varit önskvärt att i större utsträckning kunna göra paralleller mellan substratens sammansättning och effekt av rötning med förhydrolysis samt optimum för hydrolysis- och metanbildningssteg. Några sådana slutsatser har inte kunnat göras baserat på denna litteraturstudie, men det skulle givetvis vara möjligt att försöka gå ännu djupare i det publicerade materialet som finns och genom kontakt med författarna eventuellt kunna få kompletterande uppgifter. Trots en sådan fördjupning är det emellertid inte säkert att några tydliga samband mellan substrat, processoptimum och effekt skulle kunna klarläggas, bland annat då det inte finns någon vedertagen metod för karakterisering av substrat.

De surare förhållandena som erhålls i ett inledande separat hydrolysissteg ger, förutom möjligheten att erhålla ett högre metanutbyte och en högre nedbrytningsgrad på kortare tid i efterföljande metanbildningssteg, även andra egenskaper i processen som kan ge positiva sidoeffekter. Den surare miljön kan bidra till följande:

- Effektivare patogenreduktion
- Effektivare utlösning av mineraler och spårämnen viktiga för rötningssystemet
- Eliminering av skumbildande ämnen
- Större möjlighet att bryta ner toxiska och inhiberande ämnen
- Möjlighet att förutom metangas även producera vätgas

Det är inte konstigt att skillnader i substrats sammansättning påverkar optimala förhållanden för anaerob nedbrytning eftersom nedbrytningsförloppet blir olika beroende på exempelvis förhållandet mellan kolhydrater, fett och proteiner och i vilken form dessa föreligger. Även för ett och samma substrat kan stora skillnader finnas, exempelvis biologiskt överskottsslam varierar i egenskaper och sammansättning beroende på avloppsvattnet som behandlas och hur reningsverkets processer är utformade. En stor andel av studierna som hittats vid littera-

tursökning över vetenskapligt publicerat material har fokuserat på avloppsslam. Majoriteten av de fullskalanläggningar som tillämpar eller gjort försök med rötning med ett inledande biologiskt hydrolyssteg har likaledes skett på avloppsreningsverk. Detta i kombination med de goda resultat som erhållits, inte minst i fullskala, pekar på att rötning med inledande hydrolyssteg kan vara en intressant processlösning här. Kanske speciellt för det biologiska överskottsslammet som ofta endast till viss del bryts ner i en traditionell röttningsprocess.

Även för andra substrat finns lovande resultat, exempelvis visar pilotförsök på NSR biogasanläggning i Helsingborg och de erfarenheter man erhållit på Sobackens biogasanläggning i Borås, att rötning med inledande förhydrolys kan ge väsentliga processförbättringar för samröttningsanläggningar av organiska avfall.

Utredningen visar på att vissa kunskapsluckor finns, och den som kanske tydligast framkommit är säkerhetsaspekten avseende möjlig vätgasbildning i ett förhydrolyssteg. Detta, tillsammans med fördjupad kunskap om effekten av förhydrolys på olika vanligt förekommande substrat för röttningsanläggningar, skulle det vara intressant att gå vidare med för ytterligare kunskapsinhämtning för framtida implementering av metoden för utökad metanutvinning på avloppsreningsverk och biogasanläggningar.

10 REFERENSER

10.1 PUBLICERAT MATERIAL

Nges, I.A., Liu, J. Effects of anaerobic pre-treatment on the degradation of dewatered-sewage sludge. *Renewable Energy* vol. 34, s. 1795–1800, (2009)

Andryszak, R., Fooksman, Y., Brooks, P. Evaluation of the two-phase anaerobic digestion process for Baltimore's Back River Wastewater Treatment Plant. *Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC 2004: session 61 through session 70*, pp. 584-608 (2004)

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

Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V., Pavlostathis, S.G., Rozzi, A., Sanders, W.T.M., Siegrist H., Vavilin, V.A. The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology* Vol 45 No 10 (2002)

Batstone, D.J., Tait, S., Starrenburg, D. Estimation of Hydrolysis Parameters in Full-Scale Anaerobic Digesters. *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 102, No. 5 (2009)

Batstone, D. J. Mathematical modelling of anaerobic reactors treating domestic wastewater: Rational criteria for model use. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 5:57–71 (2006)

Beccari, M., Bonemazzi, F., Majone, M., Riccardi, C. Interaction between acidogenesis and methanogenesis in the anaerobic treatment of olive oil mill effluents. *Wat. Res.* Vol. 30, No. 1, s. 183-189, (1996)

Bhattacharya, S.K., Madura, R.L., Walling, D.A., Farrell, J.B. Volatile solids reduction in two-phase and conventional anaerobic sludge digestion. *Wat. Res.* vol. 30, Nr. 5, pp. 1041-1048, (1996)

Blumensaat, F. Keller, J. Modelling of two-stage anaerobic digestion using the IWA Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1). *Water Research* 39 171–183 (2005)

Bouzas, A., Ribes, J., Ferrer, J., Seco, A. Fermentation and elutriation of primary sludge: Effect of SRT on process performance. *Water Research* vol 41, s. 747–756, (2007)

Busch, G., Großmann, J., Sieber, M., Burkhardt, M. A New and Sound Technology for Biogas from Solid Waste and Biomass. *Water Air Soil Pollut: Focus* 9:89–97 (2009)

Cavinato, C., Fatone, F., Bolzonella, D., Pavan, P. Two-phase thermophilic anaerobic co-digestion of organic waste and activated sludge: process optimization for bio-hythane production in a integrated waste-wastewater treatment approach. Abstract och presentation vid IWA Water & Energy -mitigation in the water sector & potential synergies with the energy sector konferens 29-31 oktober, Köpenhamn (2009)

- Cha, G.C., Chung, H.K., Chung, J.C. Suppression of acidogenic activities due to rapid temperature drop in anaerobic digestion. *Biotechnology Letters*, Vol 19, No 5, pp. 461–464, Maj (1997)
- Chang, C.N., Ma, Y.S., Lo, C.W. Application of oxidation–reduction potential as a controlling parameter in waste activated sludge hydrolysis. *Chemical Engineering Journal*, vol. 90, s. 273–281, (2002)
- Chen, Y., Jiang, S., Yuan, H., Zhou, Q., Gu, G. Hydrolysis and acidification of waste activated sludge at different pHs. *Water Research* 41, 683–689 (2007)
- Cooney, M., Maynard, N., Cannizzaro, C., Benemann, J. Two-phase anaerobic digestion for production of hydrogen–methane mixtures. *Bioresource Technology*, vol. 98, s. 2641–2651, (2007)
- Davidsson, Å., Jönsson, K., la Cour Jansen, J., Särner, E. Metoder för slamhydrolys. Rapport Nr 2008-09 *Svenskt Vatten Utveckling* (2008)
- De Baere, L. Anaerobic digestion of solid waste: state-of-the-art. *Water Science and Technology*, Vol 41, No 3, pp 283–290, (2000)
- De La Rubia , M.A., Raposo, F., Rincón, B., Borja, R. Evaluation of the hydrolytic–acidogenic step of a two-stage mesophilic anaerobic digestion process of sunflower oil cake. *Bioresource Technology*, vol. 100, s. 4133–4138, (2009)
- Demirel, B., Yenigün, O. Two-phase anaerobic digestion processes: a review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 77, s. 743–755, (2002)
- Demirer, G.N., Chen, S. Effect of retention time and organic loading rate on anaerobic acidification and biogasification of dairy manure. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 79, s. 1381–1387, (2004)
- Demirer, G.N., Othman, M. Two-Phase Thermophilic Acidification and Mesophilic Methanogenesis Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge. *Environmental Engineering science*, Vol. 25, Nr 9, (2008)
- Dinamarca, S., Aroca, G., Chamy, R., Guerrero, L. The influence of pH in the hydrolytic stage of anaerobic digestion of the organic fraction of urban solid waste. *Water Science and Technology*, Vol 48, No 6, pp 249–254, (2003)
- Donoso-Bravo, A., Retamal, C., Carballa, M., Ruiz-Filippi, G., Chamy, R.. Influence of temperature on the hydrolysis, acidogenesis and methanogenesis in mesophilic anaerobic digestion: parameter identification and modeling application *Water Science & Technology*, Vol. 60,1, 9–17 (2009)
- Dåverhög, M., Balmér, P. Ultraljudsbehandling, en kostnadseffektiv metod för att öka gasproduktionen och minska mängden slam? *Svenskt Vatten Utveckling Rapport nr 2008-02*. (2008)

- Fox, P., Pohland, F.G., Anaerobic Treatment Applications and Fundamentals: Substrate Specificity during Phase Separation. *Water Environment Research*, Vol. 66: 5, 716-724 (1994)
- Ge, H., Jensen, P.D., Batstone, D.J. Pre-treatment mechanisms during thermophilic–mesophilic temperature phased anaerobic digestion of primary sludge. *Water Research*, Vol. 44, s. 123–130, (2010)
- Ghosh, S., Buoy, K., Dressel, L., Miller, T., Wilcox, G., Loos, D. Pilot- and Full-Scale Two-Phase Anaerobic Digestion of Municipal Sludge. *Water Environment Research*, Vol. 67, No. 2, pp. 206-214, (Mar. - Apr., 1995)
- Han, Y., Sung, S., Dague, R.R. Temperature-phased anaerobic digestion of wastewater sludges. *Wat. Sci. Tech.*, vol. 36, nr 6-7, s. 367-374, (1997)
- Hawkes, F.R., Hawkes, D.L. Towards a Hydrogen Economy. *Proceedings of International Workshop on Anaerobic Digestion: An Old Story for Today and Tomorrow Narbonne, France 10-11th Dec (2009)*
- He, P.J., Lu, F., Shao, L.M.; Pan, X.J.; Lee, D. Kinetics of enzymatic hydrolysis of polysaccharide-rich particulates. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*. Vol 38, 21-27 (2007)
- Hellstedt, C., Starberg, K., Olsson, L.E., Hellström, D., Jonsson, L., Mossakowska, A. Ökad biogasproduktion vid Henriksdals reningsverk, Biogasmix, Stockholm Vatten rapport nr 4, (2009)
- Hutnan, M., Drtil, M., Mrafkova L. Anaerobic biodegradation of sugar beet pulp. *Biodegradation* 11: 203–211, (2000)
- Hutnan, M., Drtil, M., Derco, J., Mrafkova, L., Hornak, M., Mico, S. Two-Step Pilot-Scale Anaerobic Treatment of Sugar Beet Pulp. *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 10, No. 4, 237-243, (2001)
- Huyard, A., Ferran, B., Audic, J-M. The two phase anaerobic digestion process: sludge stabilization and pathogens reduction. *Water Science and Technology*, Vol 42, No 9, pp 41–47, (2000)
- Jensen, P.D., Hardin, M.T., Clarke, W. P. Effect of biomass concentration and inoculum source on the rate of anaerobic cellulose solubilization. *Bioresource Technology* 100, 5219–5225 (2009)
- Jönsson, K., Hey, T., Norlander, H., Nyberg, U. Impact on gas potential of primary sludge hydrolysis for internal carbon source production. *Conference proceedings of 2nd IWA Specialized Conference Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes 6-9 September, Krakow, Poland (2009)*.
- Kaseng, K., Ibrahim, K., Paneerselvam, S. V., Hassan, R. S. Extracellular Enzymes and Acidogen Profiles of a Laboratory-Scale Two-Phase Anaerobic Digestion System. *Process Biochemistry* 27, s. 43-47, (1992)

Kunte, D.P., Yeole, T.Y., Ranade, D.R. Two-stage anaerobic digestion process for complete inactivation of enteric bacterial pathogens in human night soil. *Water Science and Technology*, Vol 50, No 6, pp 103–108, (2004)

la Cour Jansen, J., Svärd, Å.. Kortlægning af driftserfaringer fra europæiske biogasanlæg til behandling af husholdningsaffald. Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet, Avdelningen för Vattenförsörjnings- och Avloppsteknik (2002)

Lidholm, O., Ossiansson, E. Modeling anaerobic digestion. Examensarbete, Lunds tekniska högskola (2008)

Liu, C., Yuan, X., Zeng, G., Li, W., Li, J. Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology* vol. 99, 882–888 (2008)

Liu, D., Liu, D., Zeng, R.J, Angelidaki, I. Hydrogen and methane production from household solid waste in the two-stage fermentation process. *Water Research*, vol 40, 2230–2236, (2006)

He, P.J, Lü, F., Shao, L.M., Pan,X.J., Lee, D.J. Enzymatic Hydrolysis of Polysaccharide-Rich Particulate Organic Waste. Published online 27 January 2006 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com)

Miron, Y., Zeeman, G., van Lier, J.B., Lettinga, G. The role of sludge retention time in the hydrolysis and acidification of lipids, carbohydrates and proteins during digestion of primary sludge in CSTR systems. *Water Research* 34, 1705-1713 (2000)

Mousa, L., Forster, C. F. The use of glucose as a growth factor to counteract inhibition in anaerobic digestion. *Institution of Chemical Engineers Trans IChemE*, Vol 77, Part B, (July 1999)

Myint, M., Nirmalakhandan, N. Evaluation of First-Order, Second-Order, and Surface-Limiting Reactions in Anaerobic Hydrolysis of Cattle Manure. *Environmental Engineering Science* Volume 23, Number 6, (2006)

Myint, M., Nirmalakhandan, N., Speece, R.E. Anaerobic fermentation of cattle manure: Modeling of hydrolysis and acidogenesis. *Water research* 41, 323 – 332 (2007)

Nielsen, H. B., Mladenovska, Z., Westermann, P., Ahring, B. K. Comparison of Two-Stage Thermophilic (68 °C/55 °C) Anaerobic Digestion With One-Stage Thermophilic (55 °C) Digestion of Cattle Manure. Published online 11 March 2004 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com)

Oechsner, H., Lemmer, A., Preißler D., Zielonka, S. Die Hydrolysephase bei der Vergärung nachwachsender Rohstoffe – Führt sie zu Effizienzsteigerung? *Biogas, Hydrolyse, Fermenterbiologie, mehrphasige Prozessführung*. Vorabdruck der „Gülzower Fachgespräche“ – Vortragsmanuskripte zum FNR/KTBL-Fachkongress „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“ 15./16. September in Weimar (2009)

Oles, J., Dichtl, N., Niehoff, J.H. Full scale experience of two stage thermophilic/mesophilic sludge digestion. *Water Science & Technology* vol. 36, no. 6-7, pp 449-456 (1997)

Panter, K., Auty, D. Thermal hydrolysis, anaerobic digestion and dewatering of sewage sludge as a best first step in sludge strategy: full scale examples in large projects in the UK and strategic study including cost and carbon footprint. IWA Sludge conference, Harbin, China, Augusti (2009)

Park, Y.J., Hong, F., Cheon, J.H., Hidaka, T., Tsuno, H. Comparison of Thermophilic Anaerobic Digestion Characteristics between Single-Phase and Two-Phase Systems for Kitchen Garbage Treatment. *Journal of Bioscience and bioengineering*, The Society for Biotechnology, Japan, Vol. 105, No. 1, s. 48–54, (2008)

Pavan, P., Battistoni, P., Cecchi, F., Mata- Alvarez, J. Two-phase anaerobic digestion of source sorted OFMSW (organic fraction of municipal solid waste): performance and kinetic study. *Water Science and Technology*, Vol 41, No 3, pp 111–118 (2000)

Pérez-Elvira, S. I., Nieto Diez, P., Fdz-Polanco, F. Sludge minimisation technologies. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 5:375–398, (2006)

Ponsá, P., Ferrer, I, Vázquez, F., Font, X. Optimization of the hydrolytic–acidogenic anaerobic digestion stage (55 °C) of sewage sludge: Influence of pH and solid content. *Water Research*, vol. 42, s. 3972–3980, (2008)

Pavlostathis, S.G., Giraldo-Gomez, E. Kinetics of anaerobic treatment: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Control* 21 (5 and 6), 411–490. (1991)

Ramirez, I., Motteta, A., Carrèrea, H., Délériss, S., Vedrenne, F., Steyer, J-P. Modified ADM1 disintegration/hydrolysis structures for modeling batch thermophilic anaerobic digestion of thermally pretreated waste activated sludge. *Water research* vol.43, 3479-3492 (2009)

Sanders, W.T.M., Geerink, M., Zeeman, G., Lettinga G. Anaerobic hydrolysis kinetics of particulate substrates. *Water Science and Technology* 41 No 3, 17–24 (2000)

Shimp, G.F., Sandino, J. Seeking options to conventional anaerobic digestion. *Water Intelligence Online*, IWA Publishing, unikt id: 200206012 (2002).

Siegrist, H., Vogt, D., Garcia- Heras, J. L., Gujer, W. Mathematical Model for Meso- and Thermophilic Anaerobic Sewage Sludge Digestion. *Environ. Sci. Technol*, 36, (2002)

Sötemann, S.W., Van Rensburg P., Ristow N.E., Wentzel M.C., Loewenthal, R.E. och Ekama, G.A. Integrated chemical, physical and biological processes modelling Part 2 - Anaerobic digestion of sewage sludges. *Water SA* 31 (4) 545-568. (2005)

Ucisik, A.S., Henze, M. Biological hydrolysis and acidification of sludge under anaerobic conditions: The effect of sludge type and origin on the production and composition of volatile fatty acids. *Water Research*, vol., 42, s. 3729-3738, (2008)

Valentini A, Garuti G, Rozzi A, Tilche A. Anaerobic degradation kinetics of particulate organic matter: A new approach. *Water Science and Technology* 36(6–7):239–246. (1997)

Ward, A.J., Hobbs, P.J., Holliman, P.J., Jones, D.L. Review: Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, vol. 99, s. 7928–7940, (2008)

Watts, S., Hamilton, G., Keller, J. Two-stage thermophilic-mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge from a biological nutrient removal plant. *Water Science & Technology* Vol 53 No 8 pp 149–157 (2006)

Vavilin, V. A. Rytov, S. V., Ya Lokshina, L. A description of hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic matter. *Bioresource Technology* 56 229-237 (1996)

Vavilin, V.A., Rytov, S.V., Ya Lokshina, L., Rintala, J. A., Lyberatos, G.. Simplified hydrolysis models for the optimal design of two-stage anaerobic digestion. *Wat. Res.* Vol. 35, No. 17, pp. 4247–4251 (2001)

Veeken, A., Hamelers, B. Effect of temperature on hydrolysis rates of selected biowaste components. *Bioresource Technology*, vol. 69, s. 249-254, (1999)

Wen, Z., Frear, C., Chen, S. Anaerobic digestion of liquid dairy manure using a sequential continuous-stirred tank reactor system. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 82, s. 758–766, (2007)

Yang, K., Yu, Y., Hwang, S. Selective optimization in thermophilic acidogenesis of cheese-whey wastewater to acetic and butyric acids: partial acidification and methanation. *Water Research*, vol. 37, s. 2467–2477, (2003)

Yasui, A., Goel, R., Li, Y.Y., Noike, T. Modified ADM1 structure for modelling municipal primary sludge hydrolysis. *Water Research*, vol. 42, s. 249–259, (2008)

Yılmaz, V., Demirer, G.N. Enhancing the Performance of Anaerobic Digestion of Dairy Manure through Phase-Separation. *Clean*, 36 (9), s. 760–766, (2008)

Yılmaz, V., Demirer, G.N. Improved Anaerobic Acidification of Unscreened Dairy Manure. *Environmental Engineering Science*, Volume 25, Number 3, (2008)

Zhang, P., Chen, Y., Zhou, Q. Waste activated sludge hydrolysis and short-chain fatty acids accumulation under mesophilic and thermophilic conditions: Effect of pH. *Water research* 433735 – 33742 (2009)

10.2 ANDRA REFERENSER

Anna Schnürer, forskare vid Institutionen för mikrobiologi, Sveriges Lantbruksuniversitet, via e-post 2009-12-17.

Cristina Cavinato, PhD student vid University Ca' Foscari of Venice, Department of Environmental Sciences, Treviso-Italy, via e-post 2010-01-05.

Diane L. Saber, Gas Technology Institute, Illinois, USA, via e-post 2010-02-11.

Driftansvarig Woodridge-Greenevalley avloppsreningsverk, Illinois, USA, via telefonsamtal 2010-02-04.

Günter Busch, professor vid Department of Waste Management, Brandenburg University of Technology, Cottbus, via e-post 2010-01-07.

Hans Oechsner, forskare vid Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie, Universität Hohenheim, Stuttgart, via e-post 2009-12-18.

Jes la Cour Jansen, professor vid Institutionen för kemiteknik, Lunds Tekniska Högskola, via e-post 2009-12-11.

Karin Jönsson, universitetslektor vid Institutionen för kemiteknik, Lunds Tekniska Högskola, via e-post 2009-12-14.

Keith Panter, Cambi A/S, via e-post 2009-12-11.

Mija Kanerot, processingenjör biogasanläggningen på Sobacken, Borås Energi och Miljö, via telefonsamtal och e-post 2009-12-17.

Nick Frankos, drift chef Back River avloppsreningsverk, Baltimore, USA, via e-post 2010-02-04.

Jürgen Oles, Oswald Schulze Umwelttechnik GmbH, Tyskland, telefonsamtal 2010-02-02.

Paal Jahre Nilsen, R&D Manager Cambi AS, telefonsamtal oktober 2009.

Peter Weiland, professor vid Johann Heinrich von Thünen-Institute (vTI)
Institute of Agricultural Technology and Biosystems Engineering, via e-post 2009-12-17.

Simon Zielonka, forskare vid Universität Hohenheim, Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie, Stuttgart, via e-post 2010-01-04.

Åke Nordberg, forskare vid Institutionen för energi och teknik, Sveriges Lantbruksuniversitet, via e-post 2009-12-17.

BILAGA 1 - Matris för läsning av publicerat material

- **Författare och publikationsår**

- **Syfte med undersökningen**
 - Jämföra rötning med och utan förhydrolys
 - Undersöka metanutbyte för rötning med biologisk förhydrolys
 - Optimera processförhållanden
 - Vätgasutvinning
 - Sammanställa information från flera källor
 - Modellering av processtegen
 - Producera intern kolkälla
 - Mikroorganism sammansättning
 - Patogenreduktion

- **Substrattyp**

- **Flöde**
 - Satsvis
 - Kontinuerlig-/semikontinuerlig

- **Skala**
 - Lab
 - Pilot
 - Fullskala

- **Processförhållanden**
 - Hydrolyssteg
 - Temperatur (°C)
 - Uppehållstid HRT (d)
 - Organisk belastning (g VS/L*d)
 - pH
 - pH-reglering (ja/nej)
 - Metanbildningssteg
 - Temperatur (°C)
 - Uppehållstid HRT (d)
 - Organisk belastning (g VS/L*d)
 - pH
 - pH-reglering (ja/nej)

- **Resultat**
 - Hydrolyssteg
 - Vätgasutbyte (ml H₂/g VS tillfört)
 - Metanutbyte (ml CH₄/g VS tillfört)
 - Metanutbyte (ml CH₄/g VS reducerat)
 - VS red (%)
 - Δ COD löst (%)
 - Δ VFA (%)
 - Metanbildningssteg
 - Metanutbyte (ml CH₄/g VS tillfört)
 - Metanutbyte (ml CH₄/g VS reducerat)
 - Metanutbyte, ökning jämfört med ej förhydrolys (%)
 - VS red (%)
 - COD red (%)
 - NH₄-N (mg/l)

- **Ev. kommentar kvalitet på artikel**

- **Ev. definition steady state**

- **Ev. sammanfattande resultat**

- **Övrig info**

BILAGA 2 – Använda processförhållanden för studier av optimering av hydrolysis

Huvudförfattare och publikationsår	Substrat typ	Processförhållanden hydrolysissteg				
		Temperatur (°C)	Uppehållstid HRT (d)	Organisk belastning (g VS/L*d)	pH	pH-reglering
Bhattacharya, 1996	Avloppsslam-ÖS + PS	35	2–2,7			nej
Blumensaat, 2005	Avloppsslam – ÖS + PS	55	1,33/2/4	10/21/32 g COD/L*d		nej
Blumensaat, 2005	Avloppsslam – ÖS	35	2–2,7			nej
Bouzas, 2007	Avloppsslam-PS	20/30	4–10		7,5	nej
Cha 1997	Stärkelse	30/25/20/15	6 h	36 g COD/L*d		nej
Chang, 2002	Avloppsslam-ÖS	25	10 h	0,5-2 % TS		
Chen, 2007	Avloppsslam-ÖS	21	Satsvis 20 d		4/5/6/7/8/9/ 10/11	ja
De la Rubia, 2009	Solros oljekaka	35	8/10/12/15	4–9	5,1–5,4	ja/nej
Demirer, 2004	Nötgödsel	35	1,25–4	4–30		nej
Demirer, 2008	Avloppsslam-ÖS	60	2–4	0,98–3,93		nej
Dinamarca, 2003	Organisktavfall- hushålls-avfall	37	Satsvis 30 d		6/7/8/okontrollerad	ja/nej
Donoso-Bravo, 2009	Stärkelse, glukos, acetat	12/22/30/37/45		1– 3 g/L		ja
Ge, 2010	Avloppsslam – PS	35/50/60/65	2		4,5/okontrollerad	ja/nej
Ghosh, 1995	Avloppsslam-ÖS	37–50	2–4	12–26	5,3–6,3	nej
He 2007	Potatis, enzymer från slam	37	6		5/6/7/8/9	ja
Hutnan, 2000	Socketbets massa (sugar beet pulp)	35	2/3/4/5/6	9,7–19,4	4/4,5/5/5,5/6/6,5/okontrollerad	ja
Huyard, 2000	Avloppsslam-60 % PS och 40 % ÖS	55/60	2	10,7–15,7		nej
Miron, 2000	Avloppsslam – PS	25	3–15			
Nges, 2009	Avloppsslam – ÖS + PS	25/50/70	2	31	5,8–6,6	nej
Park, 2008	Organiskt avfall	55	1–4,5	8,5– 25,6 g COD/L *d	Okontrollerad/6	ja/nej

Pavan, 2000	Organiskt avfall – frukt o grönsaker	35/55	1–6,6	4,1–36,2		nej
Ponsa, 2008	Avloppsslam– ¼ PS + ¾ ÖS	55/65	1–4	13-21 g VS/L och 25-30 g VS/L	6,2–7,1	ja/nej
Sanders, 2000	Stärkelse, ymp från UASB	30	2			ja
Siegrist, 2002	Avloppsslam	35/55				nej
Usicik, 2008	Avloppsslam– ÖS + PS	37	5	5–30	6–7	nej
Veeken, 1999	Organiskt avfall	20/30/40	Satsvis 60 d			
Watts, 2006	Avloppsslam – ÖS	47/54/60	2	7,2–8		nej
Wen ,2007	Nötgödsel – flyt	35	1–15			
Yang, 2003	Mesost avloppsvatten	48–62	0,1–0,7	10000 mg COD/L	5,3–6,7	ja
Yilmaz 1, 2008	Nötgödsel	25/35	2	15	6,5– 6,8 (35 grader) 7-7,2 (25 grader)	nej
Yilmaz 2, 2008	Nötgödsel	35	1,25/2/4	5/10/15	Okontrollerad/5/5,5	ja/nej
Zhang, P., 2009	Avloppsslam– ÖS	35/55	17	19 g COD/L	Okontrollerad /4/5/6/7/8/9/ 10/11	ja/nej



Scheelegatan 3, 212 28 Malmö • Tel 040-680 07 60 • Fax 040-680 07 69
www.sgc.se • info@sgc.se
