



# LUND UNIVERSITY

## Förbehandling av lignocellulosarika råvaror vid biogasproduktion - Nyckelaspekter vid jämförande utvärdering

Björnsson, Lovisa; Maria del Pilar, Castillo; Carina, Gunnarsson; Sven-Erik, Svensson; Wallberg, Ola

2014

[Link to publication](#)

### *Citation for published version (APA):*

Björnsson, L., Maria del Pilar, C., Carina, G., Sven-Erik, S., & Wallberg, O. (2014). *Förbehandling av lignocellulosarika råvaror vid biogasproduktion - Nyckelaspekter vid jämförande utvärdering*. (Miljö- och Energisystem, Lunds Universitet; Vol. 92). Miljö- och energisystem, LTH, Lunds universitet.

### *Total number of authors:*

5

### **General rights**

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117  
221 00 Lund  
+46 46-222 00 00



# Förbehandling av lignocellulosarika råvaror vid biogasproduktion

## Nyckelaspekter vid jämförande utvärdering

---

RAPPORT NR 92 | MILJÖ- OCH ENERGISYSTEM

LOVISA BJÖRNSSON, MARIA DEL PILAR CASTILLO, CARINA GUNNARSSON,  
SVEN-ERIK SVENSSON, OLA WALLBERG  
INSTITUTIONEN FÖR TEKNIK OCH SAMHÄLLE | LUNDS UNIVERSITET 2014





# Förbehandling av lignocellulosarika råvaror för biogasproduktion

- Nyckelaspekter vid jämförande utvärdering

Lovisa Björnsson<sup>1</sup>, Maria del Pilar Castillo<sup>2</sup>, Carina  
Gunnarsson<sup>2</sup>, Sven-Erik Svensson<sup>3</sup>, Ola Wallberg<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Miljö- och energisystem, Institutionen för teknik och samhälle,  
Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet

<sup>2</sup> Institutet för jordbruks- och miljöteknik, JTI

<sup>3</sup> Institutionen för biosystem och teknologi, SLU Alnarp

<sup>4</sup> Institutionen för kemiteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet

Rapport nr. 92  
Miljö- och energisystem  
Institutionen för teknik och samhälle

December, 2014

Foto omslag: Mikael Risedal

Copyright © Björnsson, Castillo, Gunnarsson, Svensson, Wallberg 2014

Miljö och energisystem, Lunds universitet  
ISBN 978-91-86961-18-3  
ISSN 1102-3651  
ISRN LUTFD2/TFEM—14/3083-SE+(1-58)

# Förord

Biogas Syd och Region Skåne fick under hösten 2012 in ett antal ansökningar om stöd för projekt som rörde olika aspekter av förbehandling av lignocellulosrika råvaror inför biogasproduktion. Frågan om vilka krav man som finansiär bör ställa om man vill att olika aktörer ska genomföra projekt så att resultaten blir jämförbara kom då upp, och man tog initiativ till att samla en grupp för att diskutera frågan. Frågan om hur olika förbehandlingsmetoder kan utvärderas på ett systematiskt och samordnat sätt diskuterades sedan vid två möten under 2013 där följande företag/organisationer var inbjudna; Lunds Tekniska Högskola (LTH), Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU), Institutet för jordbruks- och miljöteknik (JTI), Kraftringen, Göteborg Energi, SBI, E.on, Grontmij, BioMil, Agroväst och Biogas Syd. Forskarna från LTH, SLU och JTI sökte och beviljades under 2014 medel för att genomföra denna förstudie med syftet att beskriva ett upplägg som kan möjliggöra jämförande utvärdering av förbehandlingsmetoder för lignocellulosrika biogasråvaror.

Författarna vill tacka alla aktörer som engagerat sig i frågan för värdefulla kommentarer och diskussioner. Vi tackar även Energimyndigheten för finansieringen som gjort det möjligt att genomföra denna förstudie.

December 2014

*Författarna*



# Sammanfattning

Syftet med denna förstudie är att beskriva ett upplägg som möjliggör jämförande utvärdering av förbehandlingsmetoder för lignocellulosarika biogasråvaror, och då specifikt peka ut nyckelaspekter som är viktiga att ta hänsyn till i en sådan utvärdering. Förstudien har genomförts av fyra svenska forskningsinstitutioner/institut i samverkan, och som bakgrundsfakta presenteras fakta samt sammanställningar kring;

- I vilken omfattning åkerbaserade lignocellulosarika restprodukter kan finnas tillgängliga för biogasproduktion.
- Vilka metoder som tillämpas idag för kemisk/biokemisk analys av denna typ av råvaror, med fokus på metanutbytesbestämningar.
- Vilka metoder som finns tillgängliga för att förbehandla lignocellulosa med syfte att öka den biologiska nedbrytbarheten.
- Exempel på aktuella förbehandlingsprojekt. Vi har även inkluderat exempel på hur jämförande utvärdering av förbehandling inför biogasproduktion framställs i aktuella rapporter.

Författarnas rekommendation är att frågan hanteras inom ett samordnat program som finansieras både genom statliga medel och med medfinansiering av relevanta aktörer, och arbetet med denna förstudie har lett till att vi identifierat ett antal nyckelaspekter för jämförande utvärdering;

1. **Val av råvara.** Eftersom en viss förbehandlingsmetod optimeras för en specifik råvara är en viktig del i en jämförande utvärdering att på ett tidigt stadium bestämma vilka råvaror som är relevanta. Det är därför viktigt att med ett samlat grepp identifiera och kvantifiera möjliga råvarualternativ, och tidigt integrera aspekter som energipotential och hållbarhetsaspekter kopplat till uttag och användning av själva råvaran.
2. **Harmonisering av mät- och beräkningsmetodik.** Det finns mycket intressanta fakta att hämta från redan genomförda eller pågående förbehandlingsstudier, men eftersom det saknas ett samlat grepp i frågan är jämförelser mellan studier oftast inte möjliga. Harmoniserade metoder för beräkningar och mätningar av insatser är nödvändigt om man vill kunna dra slutsatser om skillnader mellan olika metoder. På samma sätt måste analysmetoder för karaktärisering av råvaran harmoniseras.
3. **Urval av relevant förbehandlingsmetodik.** Det finns en stor mängd principer för förbehandling som kan vara intressanta, och ännu fler tekniska tillämpningar och utrustningsleverantörer. Här bör ett urval av relevant teknik ske baserat på de råvaror som definierats som intressanta, samt med nationell samordning där branschens intressen tas tillvara, och utvecklingsstadium och utvecklingspotential för olika metoder bedöms.
4. **Rangordning av förbehandlingsmetoder.** Att uppmäta och beräkna aspekter som kostnader, energiåtgång, tillsatser, emissioner etc. för olika förbehandlingsmetoder kan användas för att komma en bit på vägen i en jämförande utvärdering. Harmoniserad metodik för karaktärisering av råvaran kan här bidra med viktig information om beräknade eller laborativt framtagna maximala metanutbyten, vilket kan bidra med viktiga delsteg i bedömning och rangordning av olika förbehandlingsmetoder för en specifik råvara utan utvärderingar kopplat till en specifik biogasanläggning.



5. **Utvärdering i fullskalig anläggning.** Det är inte rimligt att genomföra jämförande utvärdering ända ut i fullskaliga anläggningar. Ett omfattande jämförande program med utvärdering av ett antal förbehandlingsmetoder för ett antal väl karakteriserade råvaror kan dock ge det underlag som krävs för att anläggningsägare ska kunna hitta ett relevant urval av metoder för just de råvaror och den anläggningsutformning som är aktuell. Det är alltså viktigt att utvärdera effekten av förbehandling i fullskala, men jämförelsen mellan metoder rekommenderar vi sker i forsknings- och utvecklingsled, där ett stort antal råvaror och metoder kan utvärderas till rimliga kostnader. Tester i fullskaliga anläggningar får istället karaktären av demonstration för en eller ett fåtal tekniker som i ett första urval bedömts som lämpliga.

Förstudien avslutas med ett förslag om hur ett jämförande utvärderingsprogram skulle kunna läggas upp, med avstamp i de nyckelaspekter som identifierats i förstudien. Det tillvägagångssätt vi vill rekommendera är en utvärdering som sker i två faser, där Fas I är ett övergripande utvärderingsprogram som är mer forsknings- och utvecklingsinriktat. Fas II genomförs sedan som "case by case"-demonstrationer för specifika biogasanläggningar.

# Summary

The purpose of this study is to describe an approach that allows for comparative evaluation of pretreatment methods for lignocellulosic biogas raw materials, specifically pointing out the key aspects to take into account in such an evaluation. The pilot study was conducted by four Swedish research institutions in collaboration. As background information, facts and compilations are presented regarding;

- The extent to which field-based lignocellulosic waste products may be available for biogas production.
- Which methods that are used today for chemical / biochemical analysis of this type of raw materials, focusing on methane yield determinations.
- Which methods that are available to pretreat lignocellulosic biomass with the aim of increasing the biodegradability.
- Examples of current pretreatment projects. We have also included examples of how comparative evaluation of pretreatment prior to the production of biogas is presented in recent reports.

The authors' recommendation is that the issue is handled in a coordinated program funded by both state funds and by co-financing of relevant stakeholders. The work with this study has led us to identify a number of key aspects of comparative evaluation;

1. **Selection of raw material.** Since a certain pretreatment method is optimized for a specific raw material, an important part of a comparative evaluation is to decide at an early stage which materials are appropriate. It is therefore important that optional raw materials are identified and quantified, including comprehensive studies of aspects like energy potential and sustainability aspects related to the withdrawal and use of the raw material itself.
2. **Coordination of measurement and calculation methodology.** There are a lot of interesting facts to pick from already completed pretreatment studies, or studies in progress, but in the absence of a comprehensive approach, comparisons between studies is usually not possible. Harmonized methods of calculation and measurement of inputs are necessary if one wants to draw conclusions about differences between different methods. Similarly, analytical methods for the characterization of the raw material must be harmonized.
3. **Selection of relevant pretreatment method.** There are many principles for pre-treatment that may be of interest, and even more technical applications and equipment suppliers. Here, a selection of relevant technology should be made, based on the raw materials that are defined as interesting. This should be done in a coordinated manner, where the industry's interests are safeguarded, and the stage of development and development potential of different methods is assessed.
4. **Ranking of pretreatment methods.** To measure and calculate aspects such as costs, energy consumption, additives, emissions etc for different pretreatment methods can get us part of the way to a comparative evaluation. Harmonized methodology for the characterization of the raw material can here provide important information about the calculated or experimentally determined maximum methane yields, which can help in the assessment and ranking of various pretreatment without connection to a specific biogas plant.

5. **Evaluation in full-scale biogas plants.** It is not reasonable to conduct comparative evaluation of a large number of pretreatment methods all the way to full-scale plants. A comprehensive comparative evaluation program including a number of pre-treatment methods for a number of well-characterized raw materials may, however, provide the input required for the plant owners to be able to find a relevant selection of methods for their kind of raw materials and facility design. It is important to evaluate the effect of pretreatment in full-scale, but we recommend that the comparison between the methods occurs in research scale, where a large number of raw materials and methods can be evaluated at a reasonable cost. Tests in full-scale plants will then provide demonstration of implementation of one or a few techniques that have been assessed as appropriate.

The pilot study concludes with a proposal on how a comparative evaluation program could be set up, with its starting point in the key aspects identified. The approach we would recommend is an evaluation that takes place in two phases, Phase I is a comprehensive evaluation program that is more research and development-oriented. Phase II is carried out as "case by case" demonstrations for specific biogas plants.

# Innehållsförteckning

|  |    |
|--|----|
| 1. Inledning   | 1  |
| 1.1 Syfte och mål                                      | 1  |
| 1.2 Metod och avgränsningar                            | 1  |
| 1.3 Bakgrund   | 2  |
| 1.4 Utmaningar   | 3  |
| 1.5 Hur hanteras dessa utmaningar?                     | 6  |
| 2. Lignocellulosarik råvara för biogasproduktion       | 9  |
| 2.1 Halm   | 9  |
| 2.2 Biomassa från marginalmark (träda och skyddszoner) | 10 |
| 2.3 Mellanrödor  | 11 |
| 2.4 Vall på överskottsareal                            | 11 |
| 2.5 Energipotential för biogasproduktion               | 12 |
| 2.6 Förklaring till beräknade potentialer              | 12 |
| Metanpotentialer                                       | 12 |
| Halmmängd  | 13 |
| Areal långliggande träda                               | 14 |
| Areal skyddszoner                                      | 14 |
| Areal och avkastning mellanröda                        | 14 |
| Vall på överskottsareal                                | 14 |
| 3. Råvaruanalys  | 15 |
| 3.1 Grundläggande aspekter                             | 15 |
| Massbalanser   | 15 |
| Gasvolym   | 15 |
| Statistisk analys                                      | 16 |
| 3.2 Fysikaliska egenskaper                             | 16 |
| 3.3 Kemisk karaktärisering                             | 16 |
| Torrs substans (TS)                                    | 17 |
| Aska   | 17 |
| Foderanalys  | 18 |
| Fiberanalys baserad på kolhydrat- och ligninanalys     | 19 |
| Andra metoder  | 19 |
| 3.4 Metanpotential                                     | 20 |
| Metanpotential baserad på kemisk karaktärisering       | 20 |
| Satsvisa utrottningsförsök                             | 22 |
| Kontinuerliga processer i laboratorieskala             | 23 |
| Biogasanläggningar i pilotskala                        | 24 |
| Biogasanläggningar i fullskala                         | 25 |

|  |    |
|--|----|
| 4. Förbehandling   | 27 |
| 4.1 Tillgängliga metoder   | 27 |
| Mekaniska metoder  | 28 |
| Kemiska metoder  | 28 |
| 4.2 Teknoekonomisk analys  | 30 |
| 4.3 Exempel på pågående projekt och aktörer                              | 31 |
| Mekaniska, kemiska och kombinerade förbehandlingsmetoder för halm        | 31 |
| Sönderdelning av torr halm via hammarkvarn och sönderdelande pump        | 32 |
| Pelleterad halm som biogassubstrat efter användning som strö till hästar | 32 |
| Våtextrudering av tvättad halm samt tillsats av NaOH                     | 33 |
| Ammoniakförbehandling av halm  | 33 |
| Extrudering av vallensilage  | 33 |
| Inmatningsteknik för vallensilage  | 34 |
| Mekanisk sönderdelning av kasserat och överblivet ensilage               | 34 |
| Mellangrödor finfördelas i kvarn före inmatning                          | 34 |
| 5. Diskussion  | 35 |
| 5.1 Valet av råvara  | 35 |
| 5.2 Harmonisering av mät- och beräkningsmetodik                          | 35 |
| 5.3 Urval av relevant förbehandlingsmetodik                              | 36 |
| 5.4 Rangordning av förbehandlingsmetoder                                 | 36 |
| 5.5 Utvärdering i fullskalig anläggning                                  | 36 |
| 6. Förslag till FUD-program för lignocellulosarika råvaror till biogas   | 39 |
| 6.1 Fas I: övergripande utvärderingsprogram                              | 39 |
| 6.2 Fas II: anläggningsunik utvärdering                                  | 41 |
| 7. Referenser  | 43 |

# 1. Inledning

I biogassektorn finns ett ökande behov av och en ökande konkurrens om råvaror, och med den rådande diskussionen om konkurrens mellan livsmedelsproduktion och energigrödor på åkermark ökar intresset för användning av odlingsrester, vall, mellangrödor etc. som biogasråvara. Halm eller olika typer av gräs är råvaror som ofta diskuteras och där energipotentialen är stor. Gemensamt för dessa råvaror är att de är fiberrika, d.v.s. har ett högt innehåll av lignocellulosa. Detta gör att den biologiska nedbrytningen sker långsamt, vilket gör att det är osannolikt att denna typ av råvaror skulle användas för biogasproduktion utan förbehandling. Ett antal förbehandlingstekniker har därför introducerats på marknaden under senare år, eller är i utvecklingsstadiet. Ett antal företagsdrivna projekt med utvärdering av en eller flera förbehandlingstekniker pågår, likaså ett antal forskningsprojekt. I pågående projekt, och i projekt som söks från olika finansiärer, saknas dock samordning rörande hur resultaten från olika försök skall utvärderas. Utvärderingarna läggs upp med olika synvinklar och metoder så att utkomster från olika projekt blir omöjliga att jämföra. Det dyker också hela tiden upp nya metoder för förbehandling som vi måste förhålla oss till på ett vetenskapligt sätt. Att grundligt utreda frågan om hur man utvärderar och jämför olika förbehandlingsmetoder ur teknik-, ekonomi-, energi- och miljöperspektiv är därför angeläget.

## 1.1 Syfte och mål

Syftet med denna förstudie är att beskriva ett upplägg för forskning, utveckling och demonstration som möjliggör jämförande utvärdering av förbehandlingsmetoder för lignocellulosarika biogasråvaror. Målet har därför varit att beskriva och peka ut nyckelaspekter och utmaningar man måste ta särskild hänsyn till vid utformningen av ett sådant upplägg. Om den jämförande aspekten står i fokus vid en utvärdering kan olika förbehandlings- och biogasprocesser ställas mot varandra, och både processmässiga, såväl som miljö- och teknoekonomiska aspekter tas i beaktande. Detta ger beslutsunderlag för de som står inför ett investeringsbeslut rörande en biogasanläggning, och kan underlätta steget mot biogasproduktion baserad på en lignocellulosarik råvara.

Författarnas målsättning är att förstudien också ska inspirera aktörer till att vilja medverka till att ta ett samlat grepp i frågan, samt utgöra ett faktaunderlag med fokus på;

- den energipotential i form av lignocellulosarika åkerbaserade biogasråvaror som kan göras tillgänglig för biogasproduktion med lämplig förbehandling
- vilka typer av förbehandlingsmetoder som finns tillgängliga och de principer de representerar
- exempel på projekt som pågår inom området

## 1.2 Metod och avgränsningar

Förstudien har genomförts i samarbete mellan forskare på fyra institutioner/institut och baseras på en genomgång av nationellt och internationellt publicerad litteratur, bearbetad statistik samt erfarenheter från författarnas deltagande vid seminarier, studiebesök och mässor.

Med förbehandling avses här metoder som syftar till att förändra struktur eller kemiska egenskaper för ett lignocellulosarikt material, så att den biologiska nedbrytbarheten för materialet i en biogasprocess ökar. I förstudien utreds vilka aspekter som är utmanande men viktiga att utvärdera och beskriva i en jämförande studie. I förstudien diskuteras inte kedjan odling, skörd och insamling. Gränsdragningen för beskrivningen av aspekter som påverkas av förbehandling är sedan olika från fall till fall, där det i vissa fall kan vara relevant att även inkludera t.ex. påverkan på rötresten.

## 1.3 Bakgrund

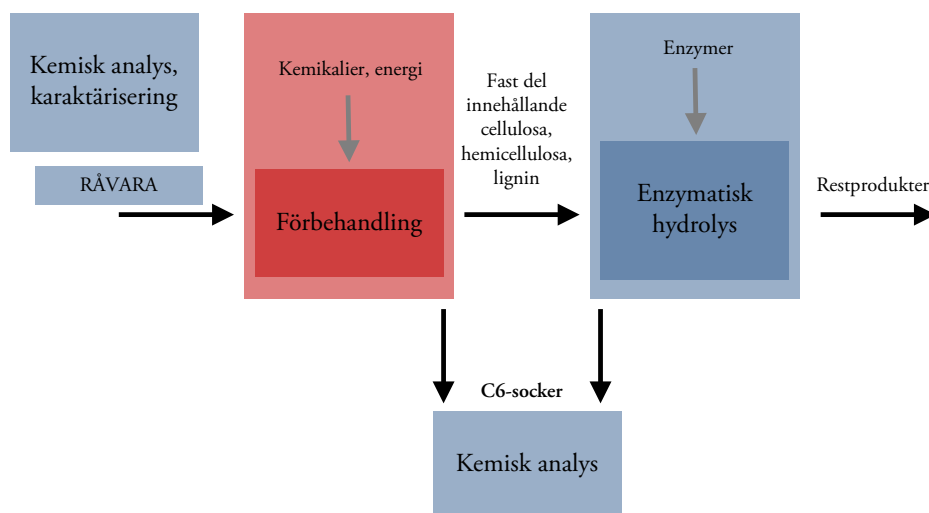
En viktig del av kunskapsunderlaget för föreliggande studie är den forskning och utveckling som skett på bioetanolnsidan, där sedan länge omfattande studier har bedrivits för att utveckla förbehandlingsmetoder för lignocellulosarika råvaror. Erfarenheter från ett amerikanskt forskningssamarbete har använts som inspiration i arbetet med att beskriva vad som är viktigt vid samordnad utvärdering av olika typer av förbehandlingsmetoder. CAFI (Consortium for Applied Fundamentals and Innovation) är ett amerikanskt forskningssamarbete som bedrevs 2000-2007 för att ta fram jämförbara fakta om förbehandling av lignocellulosarika biomassa inför etanolproduktion för ett antal ledande förbehandlingsmetoder. Det övergripande syftet med det program där CAFI utgjorde en del var att utveckla tekniska lösningar som gjorde tidigare outnyttjade biomassaresurser tillgängliga för bioenergi- och bioraffinaderitillämpningar. Man arbetade då med målformuleringar som var gemensamt utformade av Department of Energy (DOE) och Department of Agriculture (USDA) (DOE/USDA, 2005).

Inom CAFI låg fokus på råvarorna majshalm, rödhirs (switchgrass, *Panicum virgatum*) och hybridpoppel, och utkomsterna finns sammanfattade i ett flertal vetenskapliga publikationer (t.ex. Elander et al., 2009; Mosier et al., 2005; Wyman et al., 2009). CAFI finansierades inledningsvis med 1,2 miljoner USD av USDA inom programmet Initiative for future agriculture and food systems, och i projektets fas två även av DOE inom Office of Biomass med ytterligare 1,9 miljoner USD. Initiativet till CAFI kom från ett antal ledande amerikanska forskningsinstitutioner. Projektet hade tre tydligt formulerade delmål kopplade till utvecklingen av etanolproduktion från lignocellulosa;

- att ta fram fakta och grundläggande kunskap om förbehandling/hydrolys av biomassa för att underlätta kommersialisering,
- att påskynda utvecklingen av andra generationens teknik på ett sätt som reducerar kostnaden för etanolutvinning från lignocellulosarika biomassa,
- att utbilda framtida ingenjörer, forskare och ledare.

Upplägget inom CAFI var att utarbeta standardiserade och identiska analysmetoder för alla deltagare. Samma råvara skulle användas i varje omgång jämförande förbehandlingstester. Även gemensam metodologi för kemisk analys och karakterisering, materialberäkningar, kostnadsberäkningar och energibalansberäkningar utarbetades (Figur 1). Bioetanol skulle i detta fall produceras genom jäsning av C6-socker, dvs socker som är tillgängligt för ordinär bagerijäst. Detta socker föreligger i råvaran som cellulosa och även till viss del i hemicellulosan. Många råvaror, speciellt jordbruksbaserade, innehåller även en relativt hög andel socker med 5 kolatomer (C5-socker), som inte fermenteras till etanol av vanlig jäst. Mycket utveckling har gjorts för att genmodifera jäststammar för att introducera metabolism som gör att även denna del av råvaran blir tillgänglig för etanolproduktion (Hahn-Hägerdal et al., 2007; Olofsson et al., 2008). I CAFI-projektet låg dock fokus på tillgängligheten för C6-socker, och förbehandlingen syftar då till att förändra struktur eller kemiska egenskaper för det lignocellulosarika materialet, så att en enzymatisk hydrolys av cellulosa möjliggörs. Denna enzymatiska hydrolys standardiserades i CAFI-studien och genomfördes med identisk metodologi och samma enzymer (Figur 1). Utvärderingen av olika förbehandlingsmetoder som ställdes mot varandra baserades sedan på uppmätta skillnader i mängden frisatt C6-socker, vilket sattes mot insatser i material, kemikalier, energi

och kostnader för varje förbehandlingsmetod. Att utvärdera förbehandlingsens effektivitet kunde här alltså ske på ett mycket tydligt sätt genom harmoniserad metodik och kemisk analys av den väldefinierade produkten (Figur 1).



**Figur 1.** Illustration av upplägget i CAFI-studien, där blå rutor representerar delar som var definierade och gemensamma, och röd ruta det som var unikt för varje testad förbehandlingsmetod (modifierad från Wyman, 2005).

Även i Sverige har omfattande forskningsfinansiering satsats på att utreda förbehandling av lignocellulosarik råvara inför bioetanolproduktion genom olika former av forskningsstöd (finansierat genom Energimyndigheten) med en budget hittills på 500 miljoner kr sedan 1980. Detta har även innefattat byggandet av en pilotanläggning där alla ingående processteg kan studeras. Denna satsning på forskning, utveckling och demonstration har bland annat lett till att Sverige har intagit en ledande position när det gäller förbehandling av lignocellulosarika material för etanolproduktion (Galbe & Zacchi, 2002; 2007; Hahn-Hägerdal et al., 2006; Larsson et al., 1999; Wingren et al., 2003). Vad gäller förbehandling av lignocellulosarik råvara inför biogasproduktion finns i dagsläget ingen motsvarande satsning.

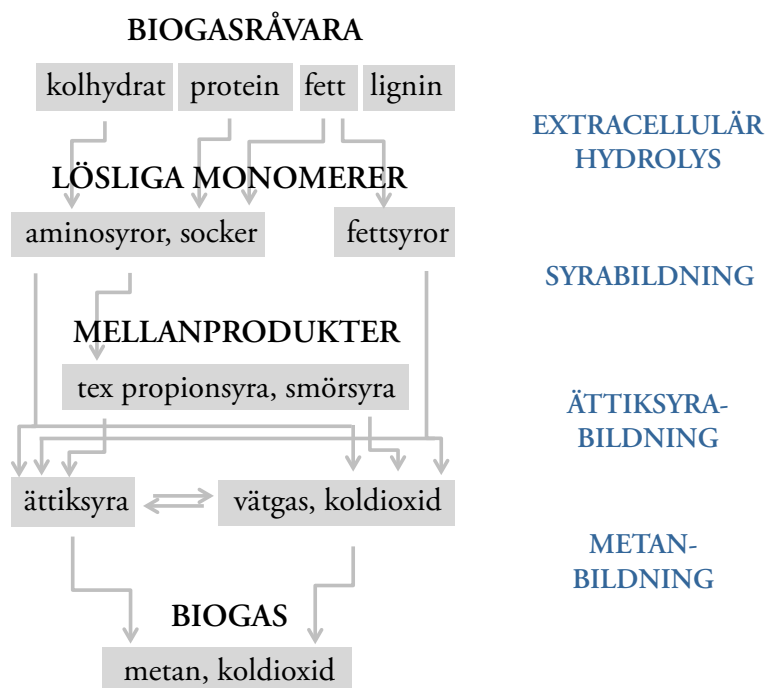
Att avgöra om förbehandling inför biogasproduktion har avsedd effekt innehåller ytterligare ett antal utmaningar jämfört med studier av förbehandling inför etanolproduktion. Som bakgrund till det vidare upplägget i rapporten presenteras dessa utmaningar i kapitel 1.4, samt exempel på hur frågan hanteras i några aktuella beskrivningar av jämförande utvärderingar av förbehandling inför biogasproduktion i kapitel 1.5.

## 1.4 Utmaningar

Att vid studier av förbehandling inför biogasproduktion använda harmoniserade metoder för utvärdering av insatser av material, kemikalier, energi och kostnader skulle inte vara väsentligen skilt från ett upplägg kopplat till etanolproduktion. En stor och viktig skillnad mellan utvärdering av förbehandling inför bioetanolproduktion och inför biogasproduktion är dock utvärderingen av den biologiska tillgängligheten för råvaran. De mikrobiologiska omvandlingsprocesserna man förlitar sig på för produktion av dessa två produkter är nämligen mycket olika. Efter förbehandling inför etanolproduktion kan råvarutillgängligheten kvantifieras genom att mäta tillgängligheten på vissa



sockerarter (Figur 1). Man har sedan god kännedom om hur stor andel av detta socker som kan omvandlas till etanol i fermentationsprocessen med hjälp av en väldefinierad mikrobiell kultur (jäst). Det räcker därför att standardisera den enzymatiska omvandlingen av cellulosa till socker samt analysmetoden för bestämning av socker. I denna studie avses med förbehandling en åtgärd som ökar den biologiska nedbrytbarheten, och därmed metanutbytet, för materialet i en efterföljande biogasprocess. Att utvärdera denna ökning innebär svårigheter av flera skilda slag. Vid förbehandling inför biogasproduktion är en av de stora utmaningarna just hur råvaran ska karaktäriseras, och hur effekten av förbehandling på det efterföljande metanutbytet i biogasprocessen ska kunna bestämmas. Den mikrobiella kulturen i en biogasprocess skiljer sig från anläggning till anläggning, och driftsättet och råvarumixen varierar. Det som hydrolyseras och vidare bryts ned av mikroorganismerna i en biogasprocess är bland annat C6-socker från cellulosa, men även många andra typer av organiska föreningar (Figur 2). Det exempel på anaerob nedbrytning av en biogasråvara som visas i Figur 2 visar på svårigheten att på samma sätt definiera en specifik förening att använda som indikator på tillgängligheten för råvaran för biogasproduktion. Den enzymatiska hydrolysen av biogasråvaran sker här heller inte genom tillsats av en väldefinierad enzymmix under kontrollerade former, som inför etanolproduktion, utan genom extracellulär hydrolys av enzymer som utsöndras av mikroorganismer i processen. Detta gör att det inte bara är råvarans sammansättning och struktur som påverkar utfallet, utan metanutbytet från en given råvara kan skilja från anläggning till anläggning beroende på vilka komponenter som görs tillgängliga för vidare bionedbrytning.



**Figur 2.** Exempel på nedbrytningsväg från biogasråvara till metan, och de mikrobiella delsteg som ingår.

Kopplat till de förutsättningar som är specifika just för biogasproduktion ser vi därför några aspekter som är speciellt utmanande.

### I. Metoden för att kvantifiera effekten av förbehandling på metanutbytet

Det vanligaste sättet att definiera om en förbehandling är framgångsrik är genom att i satsvisa försök i laboratorieskala bestämma den biokemiska metanpotentialen (BMP) för råvaran före och efter

förbehandling. En genomgång av metoder för bestämning av metanpotential följer i kapitel 3. Viktigt att beskriva redan här är dock några av de svårigheter som finns med den typen av metod. En satsvis bestämning av metanpotentialen sker för en enskild råvara, och genom en helt annan mikrobiologisk process än vad som kommer att vara fallet i en kontinuerlig, fullskalig biogasanläggning. Avsikten med en bestämning i laboratorieskala är att experimentellt bestämma det maximala metanutbyte som kan erhållas vid mikrobiell nedbrytning i just en sådan test och utan begränsande parametrar som näringstillgång eller närvaro av hämmande ämnen. Metanutbytet som kvantifieras genom en sådan test går alltså inte att likställa med det metanutbyte som kan förväntas i fullskalig rötning. Andra metoder som har tillämpats för att försöka bestämma effekten av förbehandling är kemisk karaktärisering, t.ex. genom att mäta hur stor andel av det organiska materialet som övergått från fast fas till löst i vätskefas. Problemet är att det inte finns en given koppling mellan t.ex. högre andel lösta ämnen och ökad metanpotential (t.ex. Carlsson et al., 2013). Inte heller behöver högre metanutbyte i en satsvis test innebära högre metanutbyte i en kontinuerlig biogasprocess (t.ex. Risberg et al., 2013).

## II. Den efterföljande biogasprocessen kan se ut på många sätt

Samröttningsanläggningar<sup>1</sup> är den typ av biogasanläggning där utbyggnadstakten är störst just nu i Sverige och där biogasproduktionen ökat från 163 till 580 GWh per år mellan 2005 och 2013 (Energimyndigheten, 2014). Det är sannolikt att en förbehandlad lignocellulosarik råvara kommer att blandas med andra biogasråvaror i den typen av anläggning. Man kan också tänka sig tillförsel av förbehandlad biogasråvara i gårdsbiogasanläggningar, vilka dock idag står för en liten del (5 %) av den svenska biogasproduktionen (Energimyndigheten, 2014). Vid tillförsel av förbehandlad lignocellulosarik råvara i en samröttningsanläggning kommer den metanproduktion som just denna råvara bidrar med att bero på dels den övriga råvarumixen, och dels på driftsättet vid anläggningen, där organisk belastning och hydraulisk uppehållstid är driftsparametrar med stor betydelse. En given förbehandlad råvara skulle därför kunna ge olika effekt på metanutbytet om den tillfördes två olika biogasanläggningar. Beroende på anläggningens nuvarande råvarumix och utformning kan det även vara av vikt att förbehandlingen gör att en råvara får en annan fysikalisk karaktär. Hackad halm skulle t.ex. vara svår att blanda med övriga flytande råvaror i en slurry, medan den efter förbehandling kan ha fått egenskaper som gör att den är lättare att blanda in (Figur 3). Förbehandlingen skulle alltså kunna göra att råvaran överhuvudtaget blir möjlig att använda för biogasproduktion, vilket för någon anläggning skulle kunna vara en viktigare aspekt än det absoluta metanutbytet. Man har även observerat att förbehandlad halm i jämförelse med hackad halm förutom att svämtäcke undviks även sänker viskositeten i biogasprocessen. Detta sänker behovet av omrörning, vilket i sin tur ger lägre energianvändningen (resultat från tysk projektrapport från Fraunhofer IKTS återgiven av Lehman & Friedrich, 2012).

## III. Allt som tillförs eller omvandlas vid förbehandling kommer att tillföras biogasprocessen.

Förbehandling inför biogasproduktion görs ofta på så sätt att alla ämnen som tillförs eller bildas under förbehandlingen kommer att hamna i biogasanläggningen. Vissa av dessa ämnen kan ha negativ effekt på den mikrobiologiska processen eftersom de är toxiska, eller ger upphov till toxiska ämnen vid anaerob nedbrytning. Man måste också tänka på att ämnen som tillsätts vid förbehandling kan hamna i restprodukten efter biogasproduktion, den så kallade rötresten eller biogödseln. Biogödsel från samröttningsanläggningar och gårdsbiogasanläggningar används till nästan 100 % för gödning på åkermark (Energimyndigheten, 2014). Här är det därför viktigt att ta hänsyn till kvalitetskrav för biogödseln. SPCR 120 är ett certifieringssystem som anger villkor för certifiering, tekniska krav och fortlöpande kontroll för certifierad biogödsel. I reglerna finns riktvärden för bland annat metallinnehåll

---

<sup>1</sup> Med samröttningsanläggning avses biogasproducerande anläggning som rötar olika typer av insamlat organiskt material som t. ex. källsorterat matavfall, slakteriavfall, gödsel och energigrödor tillsammans (Energimyndigheten, 2014).

i biogödseln samt en förteckning över godkända tillsats- och processhjälpmedel (SPCR, 2013). Man har också observerat förändringar i fysikaliska egenskaper för rötrest kopplat till förbehandling (Carlsson et al., 2012). Vid förbehandling av bioslam från reningsverk har man t.ex. observerat kopplingar mellan förbehandling och effektiviteten i avvattning av rötresten, både positiva och negativa (Bougrier et al., 2006). Utvärdering av förbehandlingens effekter handlar alltså inte bara om utvärdering av påverkan på biogasprocess och metanutbyte, utan bör också i vissa fall studeras ända ut till effekter på rötrest / biogödsel.



**Figur 3.** Exempel på struktur för hackad vetealm före och efter syrakatalyserad ångförbehandling (Foto: Christian Roslander).

## 1.5 Hur hanteras dessa utmaningar?

Svårigheterna med att avgöra om förbehandling av en råvara inför biogasproduktion har önskad effekt blir ännu mer uttalad i studier där avsikten är att göra jämförande utvärderingar av olika förbehandlingsmetoder. Det finns ett flertal publikationer som presenterar olika förbehandlingsmetoder inför biogasproduktion med det uttalade syftet att göra jämförande utvärderingar. Information om hur utvärderingen av förbehandlingen görs eller bör göras skiljer sig dock mycket. Här presenteras några exempel på studier med olika förhållningssätt.

International Energy Agency (IEA) publicerade nyligen en rapport på temat förbehandling av råvara för förbättrad biogasproduktion (Montgomery & Bochmann, 2014). Problematiken i jämförande utvärdering av olika förbehandlingsmetoder nämns där mycket kortfattat. Man slår fast att tester måste genomföras i fullskalig biogasproduktion för att kunna bevisa att en viss förbehandlingsmetod är effektiv, eftersom laboriemätningar eller teoretiska beräkningar av metanutbyten kan ge avvikande resultat. Man påpekar dock också att det i fullskala är svårt att avgöra om en viss förbehandlingsmetod

ökar metanutbytet eftersom man kan få stora variationer i resultat från olika biogasanläggningar. Vidare beskriver Montgomery & Bochmann (2014) att de viktigaste faktorerna att bedöma vid valet av förbehandlingsmetod är energibalans och kostnader, och man presenterar generella för- och nackdelar för olika förbehandlingstekniker. Man kopplar inte dessa för- och nackdelar för de olika metoderna till metanutbyten eller olika råvaror, men ger exempel på publikationer gällande metanutbyten och vissa råvarutyper för de olika förbehandlingsmetoderna.

I en svensk genomgång (Carlsson et al., 2013) utvärderas förbehandlingstekniker för vall och hästgödsel i jämförelse mellan två metoder. Rapporten innehåller experimentella resultat från kemisk och biokemisk analys före och efter förbehandling. Man visar t.ex. att halten löst organiskt material i vätskefas har ökat efter förbehandling, men presenterar även metanutbyten från BMP-bestämning som inte skiljer sig för råvaran före och efter förbehandling. Dessa experimentella resultat används heller inte vidare i den jämförande analysen. Istället används en teoretiskt beräknad metanpotential baserad på råvarans kemiska sammansättning ihop med antaganden om hur stor procentuell ökning av metanutbytet förbehandlingen skulle kunna ge. Med fokus på de utvärderade förbehandlingsmetodernas energiåtgång och emissioner beräknas sedan hur mycket metanutbytet skulle behöva öka för att förbehandling ska vara motiverat. Man går här alltså runt frågan kring hur experimentella resultat på eventuella öknings i metanutbyte ska bedömas och räknar istället fram hur stor metanutbytesökning som skulle krävas för att förbehandlingen ska vara motiverad ur energianvändnings- och klimatperspektiv.

En annan svensk genomgång av förbehandlingstekniker för cellulosa-haltig biogasråvara presenteras med fokus på teknoekonomisk utvärdering (Avfall Sverige, 2012). Rapporten innehåller en litteratursammanställning av ett antal laborativa resultat på metanpotential eller ökning av metanpotential som effekt av förbehandling för grenar och toppar (GROT), halm och papper. Vissa av de experimentella metanutbyten som återges är dock högre än vad som är teoretiskt möjligt för en lignocellulosabaserad råvara, vilket inte uppmärksammas eller problematiseras. Ett urval av värden på metanutbyte för de olika råvarorna efter förbehandling används sedan som bas för ett antagande av hur höga metanutbyten som kan erhållas vid fullskalig drift. Effekten av förbehandling med olika metoder utvärderas sedan ur kostnadsperspektiv, och här har man arbetat fram en modell för harmoniserade teknoekonomiska beräkningar. Utfallen blir dock kraftigt beroende av det antagna metanutbytet efter förbehandling.



## 2. Lignocellulosarik råvara för biogasproduktion

Eftersom de flesta förbehandlingsmetoder är råvaruspecifika är det viktigt att definiera vilka råvaror som är intressanta innan ett urval av förbehandlingsmetoder sker. Det är då också intressant att uppskatta energipotentialen för dessa råvaror. Halm, överskottsvall och mellangrödor är exempel på biomassa från åkermark som kan användas för energiändamål utan att konkurrera med produktion av livsmedel- och fodergrödor. Dessa lignocellulosarika biogasråvaror kan efter förbehandling antas komma att utgöra en viktig och ekonomiskt intressant bas för biogasproduktion. Jämfört med energigrödor som konkurrerar om åkermark, och där nya skärpta EU-direktiv sannolikt kan komma att förändra spelreglerna, kan dessa råvaror skapa en tryggare och mer långsiktig råvarubas. En stor potential för biogasproduktion kan också finnas i strö och gödsel från djurproduktion. I detta avsnitt vill vi kvantifiera den outnyttjade energipotential som finns i denna typ av råvaror och vi har valt att beskriva halm, biomassa från marginalmark, överskottsvall och mellangrödor.

### 2.1 Halm

Halm är en restprodukt vid odling av spannmål och oljeväxter, vilka tillsammans odlas på drygt 40 % av landet åkermark. Halm konkurrerar inte med matproduktion, tvärtom ger ökad spannmålsodling även mer halm. SCB (2013a) har undersökt användning av skörderester och kommit fram till att på 40 % av spannmålsarealen togs halmen tillvara och användes huvudsakligen till strö och foder medan halmen brukades ned på 54 % av arealen. Användningen för energi, främst uppvärmning, har ökat, särskilt i Götalands slättbygder. 9 % av tillvaratagen areal halm används till energi. En liten del av arealen tillvaratagen halm används till biogas och då framför allt halm från majs, raps/rybs och höstvetete.

Hur stor mängd halm som uppskattas vara tillgänglig för energiproduktion varierar mellan olika studier. Potentialen är beroende av framför allt hur mycket spannmål och vilken sorts spannmål som odlas samt vilka mängder som används som strö och foder. En annan faktor som påverkar mängden halm är strålängden där Nilsson & Bernesson (2009) tagit fram uppdaterade halm:kärna-kvoter baserad på de sorter som används idag. En annan viktig aspekt är hur ofta halmen kan skördas utan att få negativa effekter på markens bördighet (Mattsson, 2006). Detta är beroende av markens struktur och innehåll av mull samt om organiska gödselmedel tillförs. Med tanke på markens långsiktiga bördighet kan det finnas en tveksamhet hos lantbrukare till att bortföra halmen utan att återföra mullämnen.

Vid våta förhållanden under skörd kan halmbärgning påverka markpackning negativt och även leda till förseningar om en höstgröda ska etableras efter tröskningen. Om spannmålsgrödan är insädd med en vallgröda innebär skörd av halmen däremot en fördel för vallens etablering.

Nilsson & Bernesson (2009) uppskattade att det finns knappt 1 miljon ton bärgningsbar halm att använda för energiproduktion i Sverige, motsvarande ca 3-4 TWh/år baserat på halmens värmevärde. Egnell & Börjesson (2012) har reviderat en tidigare uppskattad halmpotential tillgänglig för energiändamål på 25 PJ/år till 15 PJ/år (4,2 TWh/år) pga ändrade halm:kärna-kvoter och med hänsyn till tekniska och odlingsmässiga begränsningar.

## 2.2 Biomassa från marginalmark (träda och skydds-zoner)

Marginalmark definieras vi som mark med låg ekonomiskt avkastning beroende på låg bördighet, dålig arrondering eller små fält. De arealer vi inkluderar är trädesmark och skydds-zoner mot vattendrag. Denna definition följer den som gjordes av Nilsson et al. (2014) i ett nyligen avslutat projekt som undersökt lönsamheten i att odla vall till biogas på marginalmark.

I Sverige har arealen träda minskat sedan mitten av 2000-talet och uppgår idag till 129 400 ha enligt statistik från SCB (2014). Enligt Johnsson (2008) är det troligen främst de större skiftena som tagits i produktion varför en stor andel av åkermarken som trädas idag är fält med låg bördighet eller fält som är små eller har oregelbunden form. En anledning till att marken ligger i träda är att lönsamheten i odlingen är dålig. Beräkningar gjorda av Nilsson & Rosenqvist (2014) visade dock att produktionskostnaderna var lägre när vall till biogas odlades på trädan jämfört med odling av vårkorn till foder. SCB:s senaste undersökning av odlingsåtgärder i jordbruket visade att den vanligaste trädan (62 %) är långliggande trädor oftast av gammal vall. För kortliggande trädor är stubbträda vanligast, dvs. ingen gröda etableras i spannmålsstubben efter skörd (SCB, 2013a). Som potential för biogasproduktion är den långliggande vallbevuxna trädan mest intressant. Vanligast är att putsa trädan en gång per säsong, i juli.

Skydds-zoner anläggs i remsor längs diken och vattendrag med det huvudsakliga syftet att förhindra att bekämpningsmedel och växtnäring från jordbruksmark når vattendraget via ytavrinning (Haldén, 2011). I det föregående Landsbygdsprogrammet fanns möjlighet att få ersättning för anläggande av skydds-zoner med syfte att minska växtnäringsförluster. Skydds-zonen skulle då vara 6-20 m bred, den fick inte gödslas och inga kemiska bekämpningsmedel fick användas. Vanligast är att skydds-zonen består av vallgräs. Enligt reglerna för skötsel av skydds-zoner i det föregående Landsbygdsprogrammet fanns inget krav på att skydds-zonen måste skördas och att materialet måste föras bort, men om den skördades fick det inte ske före 15 juli och den skördade biomassan fick inte användas till bioenergiproduktion. Den fick dock användas till foder eller betas. Även i det nya Landsbygdsprogrammet kommer miljöstödet för skydds-zoner att finnas, men det är ännu ej klart hur reglerna kommer att se ut. Enligt den halvtidsutvärdering som gjordes av det förra Landsbygdsprogrammet (Rabinowicz, 2010) är det möjligt att anlägga nästan 100 000 ha skydds-zoner i Sverige.

I det nya Landsbygdsprogrammet finns ett förgröningsstöd som innebär att lantbrukare med mer än 15 ha åkermark skall ha minst 5 % av åkermarken som så kallade ekologiska fokusarealer (EFA) enligt information på Jordbruksverkets hemsida (SJV, 2014). Detta gäller endast i slättbygder i Götaland och Svealand. Undantag för kravet på 5 % ekologisk fokusareal gäller bland annat för gårdar med ekologisk odling. Enligt de regler som är föreslagna, men ännu inte beslutade, kan den ekologiska fokusarealen vara träda, salix, samt baljväxter i renbestånd (ärter, konservärter, åkerbönor, alla sorters klöver och lucern). Även obrukade fältkanter på åkermark, det vill säga en remsa utmed åkerkanten där man inte har någon produktion, kan räknas som ekologisk fokusareal. Dock får de inte ligga där det finns ett åtagande för skydds-zoner längs vattendrag, eftersom man inte kan få miljöersättningar på ekologiska fokusarealer. Dessutom kan en insådd vall i huvudgrödan, höst alt. vår, räknas som EFA. Beroende på hur ”värdefulla” grödorna är kommer deras areal att viktas olika.

EFA är en intressant potentiell areal för produktion av grödor för biogasproduktion, men att räkna ut vilka arealer som skulle kunna vara tillgängliga är ännu för tidigt, eftersom de svenska reglerna för EFA kan komma att ändras efter att EU har granskat dem. Det är inte heller beslutat exakt vilka områden som kommer att omfattas av EFA. Den EFA som framför allt skulle kunna vara aktuell för odling av grödor till energi är baljväxtodlingarna. Även en insådd i huvudgrödan, vilket i praktiken blir som en fånggröda eller en mellangröda, är intressant att skörda för biogasproduktion. Jordbruksverket har inte gjort några uppskattningar av hur stora EFA-arealerna kan komma att bli.

## 2.3 Mellangrödor

Fånggrödor etableras vanligtvis med syfte att minska kväveläckaget. Den etableras antingen genom insådd tillsammans med eller i växande huvudgröda alternativt eftersådd efter skörd av huvudgrödan. Fånggrödan bryts sedan inför etablering av nästa huvudgröda, antingen på hösten eller på våren. Den får inte gödslas om ekonomiskt stöd för odlingen skall kunna erhållas enligt Landsbygdsprogrammet. Fånggrödan kan putsas men bortförs normalt inte från fältet. I Landsbygdsprogrammet finns möjlighet att få ersättning för minskade växtnäring förluster genom att odla fånggrödor. I Landsbygdsprogrammet 2006 var detta möjligt i Kalmar, Gotlands, Blekinge, Skåne, Hallands och Västra Götalands län och totala arealen fånggrödor uppgick då till 165 100 ha (Emmerman & Karlsson, 2010). År 2012 hade arealen fånggrödor minskat till drygt 110 000 ha enligt uppgifter från den svenska miljömålportalen (Naturvårdsverket, 2014).

En möjlighet som undersökts bland annat av SLU i Alnarp är att skörda fånggrödan för att använda den som substrat till biogasproduktion. Förutom att få en användning för biomassan är idén att risken för kväveförluster minskar i och med att grödan förs bort från fältet (Niemetz et al., 2012). Växtnäringen kan sedan återföras till en ny huvudgröda kommande säsong via rötrestspridning med ökat växtnäring utnyttjande som följd. Om fånggrödan ska skördas för biogasproduktion kan den gödslas med kväve för att få en högre avkastning. Fånggrödan byter då "namn" till mellangröda (Gunnarsson, 2014) och blir i dagsläget inte stödberättigad. Enligt Aronsson et al. (2012) har t.ex. rajgräs tillräckligt stor tillväxtkapacitet för att vara aktuell att gödsla.

Lönsamheten avgör vilken avkastning som krävs för att mellangrödor ska vara intressanta som biogassubstrat. Detta gör också att mellangrödor troligen endast är en potentiell biogasgröda i de södra delarna av landet där odlingssäsongen är tillräckligt lång för att mellangrödan ska hinna avkasta tillräckligt för att det ska vara lönsamt att odla och skörda den. I Skåne har under 2013 mellangrödorna oljerättika, vitsenap, bovete, honungört (*Phacelia*) och luddvicker etablerats efter konservärt, i odlingsförsök som genomförts av SLU i samarbete med SB3, Skånska Biobränslebolaget (Gunnarsson, 2014).

## 2.4 Vall på överskottsareal

Om arealen vall som odlas jämförs med behovet av grovfoder till de djur som produceras så finns ett överskott av vall, vilket brukar kallas för överskottsvall. Börjesson (2007) redovisar en överskottsareal på ca 250 000 ha. Johnsson (2008) har på samma sätt beräknat att mellan 100 000 och 200 000 ha mark som används till grovfoderproduktion skulle kunna frigöras för exempelvis energigrödor. Denna överskottsareal kan till en viss del bestå av betesmark. Ett exempel på överskottsvall är det ensilage som blir resultatet av att lantbrukarna försäkra sig om att fodret ska räcka hela utfodringssäsongen producerar ett visst överskott. Gunnarsson et al. (2014) har visat att kasserade och överblivna ensilagebalar är både ekonomiskt och tekniskt intressant att använda som substrat för biogasproduktion.

Enligt Börjesson (2007) motsvarar överskottsarealen av vall 9 % av totala åkerarealen eller 23 % av total vallareal i Sverige 2005. Om högavkastande energigrödor odlas på denna areal beräknar Börjesson (2007) att den totala produktionen av bioenergi på denna areal motsvarar 8 TWh per år. Även Dahlgren et al. (2013) gör antagandet att 10 % av den totala åkerarealen, 2,6 miljoner ha, enligt statistik från Jordbruksverket (SJV, 2013b), skulle kunna användas till energigrödor och motsvara en biogaspotential på 7,2 TWh per år. I dessa beräkningar antas energigrödorna utgöras av 30 % spannmål, 40 % vall, 20 % majs, och 10 % sockerbeter inklusive blast. Med de avkastningar som antagits följer att de räknat med metanutbyten på mellan 300 och 360 m<sup>3</sup> per ton torrsustans (TS).



## 2.5 Energipotential för biogasproduktion

Energipotentialen för biogasproduktion har beräknats på nationell nivå för de råvaror som inkluderats i studien enligt ovan, och uppgår till omkring 10 TWh per år (Tabell 1). I beräkningarna har antagits att vall odlas på arealerna träda och skyddszon och sammansättning och metanutbyte är då beroende på till exempel val av arter och skördetidpunkt. I beräkningarna av teoretiskt metanutbyte har därför angivits ett intervall (Tabell 2). Inga tekniska och ekonomiska restriktioner har gjorts som begränsar potentialen. Prisen förändras med efterfrågan och förbättrade skörde- och hanteringssystem har potential att sänka produktionskostnaderna för råvarorna.

**Tabell 1.** Uppskattad metanpotential på nationell nivå baserad på sammansättningen för de råvaror som ingår i förstudien.

| Gröda/areal                | Specifikation               | Område                            | Avkastning<br>(t TS/ha) | Beräknat metanutbyte, min-max<br>(m <sup>3</sup> /t TS) | (GWh/år)              |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------|---|-----------------------|
| Halm                       | 719 000 ton/år<br>(82 % TS) | Län med<br>överskott <sup>1</sup> |                         | 270   | 1 580                 |
| Långliggande<br>träda      | 93 900 ha                   | Hela landet                       | 5                       | 250-390   | 1 170-1 820           |
| Skyddszoner                | 11 500 ha                   | Hela landet                       | 5                       | 250-390   | 140-220               |
| Mellangrödor               | 112 000 ha                  | Södra Sverige <sup>2</sup>        | 4,5                     | 250-280   | 1 250-1 400           |
| Vall på<br>överskottsareal | 260 800 ha                  | Hela landet                       | 7,5                     | 250-390   | 4 870-7 590           |
| <b>Totalt</b>              |                             |                                   |                         |   | <b>9 010 - 12 610</b> |

<sup>1</sup> Skåne, Östergötland, Västra Götaland, Uppsala, Västmanland, Södermanland, Örebro och Stockholms län.

<sup>2</sup> Blekinge, Gotland, Halland, Kalmar, Skåne och Västra Götalands län.

## 2.6 Förklaring till beräknade potentialer

### Metanpotentialer

De metanpotentialer som anges i Tabell 1 är baserade på ett beräknat intervall för metanutbyte (Tabell 2). Detta metanutbyte har beräknats baserat på analyser av råvarusammansättning, och eftersom råvaran inte är så specifikt definierad anges intervall som spänner över många typer av råvara och ett flertal analyser från olika källor (Tabell 2). Endast råvaruanalyser där totalsumman av identifierade komponenter uppgått till över 80 % (i snitt 87 %) har tagits med. Lignin betraktas här som icke nedbrytbart medan teoretisk metanpotential för övriga komponenter är hämtad från Tabell 3 och 4. Det beräknade metanutbytet för halm blir baserat på detta 270 m<sup>3</sup>/t TS, för gräs 250 (ligninrikt) - 390 (proteinrikt) m<sup>3</sup>/t TS och för mellangrödor används värden för exempelgrödor på 250-280 m<sup>3</sup>/t TS. Observera att ett beräknat utbyte baserat på råvarusammansättning och teoretiska metanutbyten inte är det som kan uppnås vid biogasproduktion oavsett förbehandlingsmetod. Här är dock hänsyn tagen till sammansättningen, och lignin är undantaget, vilket inte gör värdet lika högt som om t.ex. en elementaranalys hade använts som utgångspunkt för den teoretiska beräkningen (se mer om detta i kapitel 3.4).

**Tabell 2.** Råvarusammansättning samt beräknat metanutbyte.

| Råvara | Aska | Lignin | Cellulosa | Hemicellulosa | Övr. kolhydr. <sup>1</sup> | Fett | Protein | Beräknat metanutbyte <sup>2</sup> | Referens <sup>3</sup>          | Beskrivning  |
|--------|------|--------|-----------|---------------|----------------------------|------|---------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------|
|        |      |        |           |               |                            |      |         | % av TS                           |                                |              |
| Halm   | 1,2  | 18,3   | 37,4      | 22,1          |                            |      | 3,6     | 0,27                              | Tamaki & Mazza, 2010           | Vetehalm     |
|        | 6    | 24     | 37        | 28            |                            |      |         | 0,27                              | ECN, 2014 [#1022]              | Vetehalm     |
| Gräs   | 8,8  | 5,3    | 26,9      | 21,7          | 17,1                       | 3    | 17      | 0,39                              | Koch et al., 2010              | Ensilage     |
|        | 9,9  | 18     | 15        | 13,1          | 25,7                       | 1,7  | 17      | 0,32                              | Carlsson et al., 2013          | Vallensilage |
|        |      | 20     | 32,5      | 37,5          |                            |      |         | 0,29                              | ECN, 2014 [#1043]              | Gräs         |
|        | 5    | 9      | 43        | 24            |                            |      |         | 0,28                              | ECN, 2014 [#1044]              | Gräs         |
|        | 1,2  | 24     | 31,5      | 27,5          |                            |      |         | 0,25                              | ECN, 2014 [#2911]              | Timotej      |
|        | 13   | 5,1    | 36,5      | 24,6          | 6,7                        |      |         | 0,28                              | ECN, 2014 [#2406]              | Rörflen      |
|        | 7    | 10     | 45        | 27            |                            |      |         | 0,30                              | ECN, 2014 [#1039]              | Switchgrass  |
|        | 7    | 4,7    | 36,6      | 31            | 8,2                        |      |         | 0,32                              | ECN, 2014 [#2404]              | Switchgrass  |
|        | 7,6  | 5,9    | 39,6      | 28,3          | 9,2                        |      | 2,1     | 0,33                              | ECN, 2014 [#1039]              | Switchgrass  |
| 25,8   |      | 32,9   | 23,6      |               |                            | 5,9  | 0,27    | ECN, 2014 [#2541]                 | Kantgräs                       |              |
| Övrigt | 7,6  | 21,3   | 45,5      | 13,7          |                            |      |         | 0,25                              | ECN, 2014 [#2268]              | Lucern       |
|        | 9,0  | 10,1   | 47,0      | 7,8           |                            |      | 8,8     | 0,27                              | Molinuevo-Salces et al., 2013a | Olje-rättika |
|        | 13   | 6,6    | 36,7      | 14,5          |                            |      | 12,8    | 0,28                              | Molinuevo-Salces et al., 2013a | Olje-rättika |
|        | 9    | 10     | 31        | 15            |                            |      | 16      | 0,27                              | ECN, 2014 [#2369]              | Rödklöver    |

<sup>1</sup> Det som anges som övriga kolhydrater antas i omräkningen till metanutbyte utgöras av stärkelse

<sup>2</sup> Gasvolymen anges vid 101 kPa och 0° C (se kap 3.1), vilket ger ett effektivt värmevärde på 9,95 kWh/m<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Nummer för poster från källan ECN, 2014 refererar till postens nummer i databasen

## Halmmängd

Halmmängden tillgänglig för biogasproduktion uppskattades till 719 000 ton/år (82 % TS) och beräknades från den mängd på 830 00 ton som Nilsson & Bernesson (2009) uppskattade som tillgänglig för energiproduktion med hänsyn till användning inom djurhållning, bärgningsbarhet med tanke på väder, nederbörd och bibehållen mullhalt. Enligt SCB (2013a) används 9 % av den bärgade halmen till uppvärmning, detta motsvarar 37 000 ha. Med en halmavkastning på 3 ton/ha (Nilsson & Bernesson, 2009) ger det en uppskattad mängd halm till förbränning på 111 000 ton/år vilket stämmer överens med tidigare uppskattningar (t.ex. Bernesson & Nilsson, 2005).

Enligt Lantz & Börjesson (2010) är det troligt att halm alltmer kommer att utnyttjas för värme- och kraftvärmeproduktion vilken skulle minska den beräknade biogaspotentialen från halm.

## **Areal långliggande träda**

Biogaspotentialen från vall på träda beräknades från arealen långliggande träda enligt statistik från 2012 (SCB, 2013a; SCB 2013b).

## **Areal skyddszoner**

Biogaspotentialen från skyddszoner beräknades från arealen skyddszoner för år 2012 enligt uppgifter från Jordbruksverkets databas DAWA som den presenteras på den svenska miljömålportalen (Naturvårdsverket, 2014).

## **Areal och avkastning mellangröda**

Mellangröda till biogas har under senhösten 2014 skördats i Skåne i större skala av SB3 i samarbete med SBI Jordberga Biogasanläggning. Avkastningen 3-6 ton TS/ha på mellangrödorna, beroende på förfrukt, gödslingsnivå och årsmån, uppskattades från de försök som genomförts av SLU i Alnarp i södra Skåne i samarbete med SB3 (Gunnarsson, 2014; Olanders, 2014). Experimentellt bestämd metanpotential för några olika mellangrödor i Danmark låg i intervallen 240-250 för vitsenap, 320-340 för italienskt rajgräs resp. 350-435 L CH<sub>4</sub> per kg VS (volatile solids, beräknas som TS minus aska) för oljerättika (Molinuevo-Salces et al., 2013b). Detta kan jämföras med beräknade metanutbyten för exempel på mellangrödor baserat på kemisk karaktärisering (Tabell 2) som omräknat per VS uppgår till 270-320 L CH<sub>4</sub> per kg VS.

Här har potentialen för mellangrödor uppskattats från arealen fånggrödor i landets södra delar; Blekinge, Gotland, Halland, Kalmar, Skåne och Västra Götalands län enligt uppgifter för 2012 från Jordbruksverkets databas DAWA som den presenteras på den svenska miljömålportalen (Naturvårdsverket, 2014). Största arealen finns i Västra Götalands län.

## **Vall på överskottsareal**

Biogaspotentialen från vall på överskottsareal beräknades från antagandet att 10 % av totala åkerarealen skulle kunna användas till energiproduktion utan att konkurrera med grovfoderproduktionen till landets djur. Detta är ett antagande som gjorts i andra studier (t.ex. Dahlgren et al., 2013; Lantz & Börjesson, 2010).

## 3. Råvaruanalys

En del i utmaningen består i svårigheter kopplade till harmonisering av metoder vid analys och karaktärisering av råvaran. Vi vill här lyfta aspekter som är viktiga i detta sammanhang, men även peka på brister, aspekter som ofta kan saknas i vetenskapligt publicerade arbeten.

### 3.1 Grundläggande aspekter

#### Massbalanser

För att analysresultat före och efter förbehandling ska gå att tolka är det viktigt att eventuella massförluster i hela råvaruhanteringskedjan redovisas. Massförluster i förbehandlingssteget har t.ex. visats kunna vara lika stora som eller större än den redovisade vinsten i ökat metanutbyte per råvarumängd (Bauer et al., 2014; Kreuger et al., 2011a). Ett ökat metanutbyte per råvarumängd eller TS efter förbehandling går alltså inte att tolka om inte samtidigt massflödet genom processen redovisas.

#### Gasvolym

En vanligt förekommande brist i samband med redovisning av gasvolym är att volymen anges utan att tryck och temperatur redovisas, vilket kan ge upphov till relativt stora feltolkningar. De beräkningsförutsättningar för metan i form av biogas som ska användas enligt EU:s hållbarhetskriterier (Energimyndigheten, 2011) är att:

"Bränslemängden ska anges som effektivt värmevärde, för biogas i gasform uttryckt i MJ/m<sup>3</sup> vid 0° C och 101,325 kilopascal"

Det är dessa tryck och temperaturförhållanden som, iallafall i Sverige, verkar vara vanligast förekommande i samband med att biogasvolym anges. Det effektiva värmevärdet för metan på gasvolymbasis vid dessa förhållanden är 9,95 kWh/m<sup>3</sup> (35,8 MJ/m<sup>3</sup>). Det är också viktigt att ange om det är det effektiva (lägre) värmevärdet (50 MJ/kg metan) som används då gasvolym omvandlas till energienheter eftersom det i vissa sammanhang är det högre värmevärdet (55,5 MJ/kg metan) som redovisas.

Ett uttryck som blivit vanligt att använda för att indikera att gasen är normaliserad är att skriva STP (betecknar "standard temperature and pressure") eller Nm<sup>3</sup>. Beteckningen "N" står dock i SI-systemet för Newton, enheten för kraft, vilket inte bidrar med tydlighet. STP betyder olika saker i olika standarder. IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) använder t.ex. STP för att beteckna gasvolym vid 100,0 kPa och 273,15 K. Det är alltså läge för förvirring, och därför viktigt att specifikt ange vad som avses gällande förhållanden för gasvolym och vilket värmevärde som används. En metanvolym uppmätt vid 25°C en dag med lågtryck (99 kPa) som antas vara normaliserad till 0°C och 101 kPa blir t.ex. överskattad med drygt 10 %. I denna studie används de kriterier som beskrivits ovan tagna från Energimyndighetens författningssamling gällande hållbarhetskriterierna (Energimyndigheten, 2011).

## Statistisk analys

Statistisk utvärdering och analys av experimentella resultat är viktigt vid jämförande utvärderingar. Om ingen statistisk analys genomförs kan tolkningen av resultaten landa helt fel, och det finns många exempel på detta i den vetenskapliga litteraturen. Yu et al. (2014) presenterar t.ex. laborativt bestämda metanutbyten från förbehandling av gräs utan statistisk analys och pekar på de små skillnaderna som stöd för att förbehandlingen ökar metanutbytet medan McEniry et al. (2014), som genomfört noggranna statistiska analyser, visar att en ökning i metanutbyte på 11 % efter förbehandling är icke signifikant skild från metanutbytet utan förbehandling. Det är också viktigt att komma ihåg att standardavvikelsen för det slutliga resultatet bör vara beräknat baserat på standardavvikelser för alla bakomliggande bestämningar/analyser, vilket kan vara massförluster i förbehandling, TS-bestämning, metanutbyte för provet, metanutbyte för ympen (se kap 3.4) o.s.v. (t.ex. Miller & Miller, 2005). Här kommer också viktiga frågor som provuttag och replikathantering in (t.ex. Prade et al., 2014).

## 3.2 Fysikaliska egenskaper

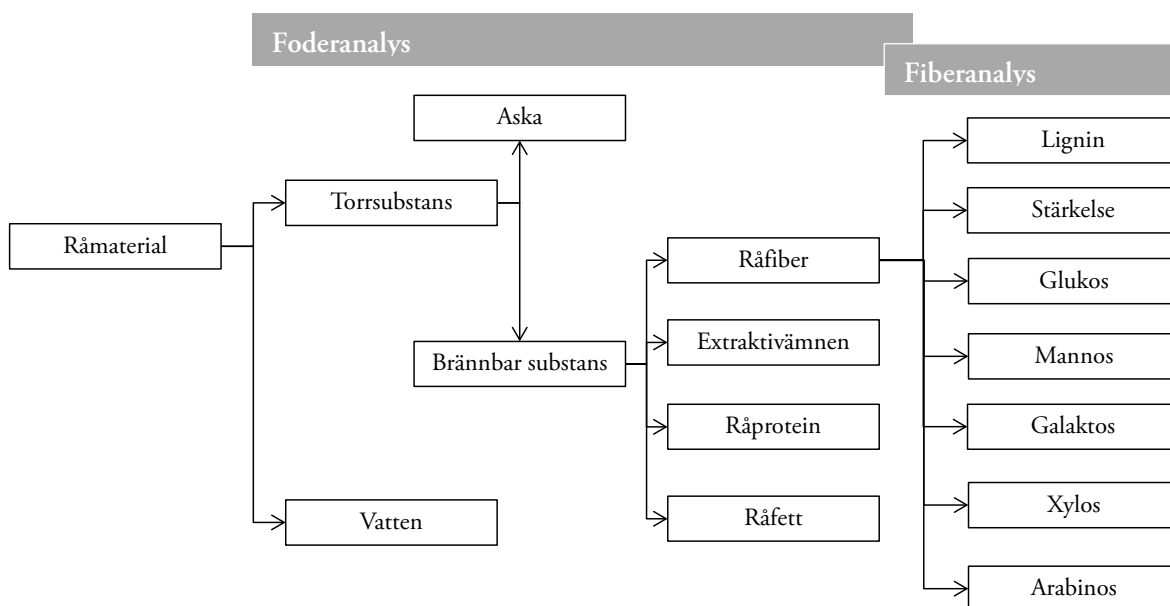
En beskrivning av råvarornas fysikaliska egenskaper är viktigt att inkludera i en analys eftersom dessa egenskaper kan vara direkt avgörande för råvarans hantering och användbarhet som biogassubstrat i en fullskaleanläggning. Till exempel är utformning och val av system för inmatning avgörande för vilken strållängd som kan accepteras på råvaran när den ska matas in i anläggningen. Ett exempel på en råvarubeskrivning ges av Mattsson (2006) för stråbränslen och innehåller parametrar som fysikaliska egenskaper, begränsningar och erfarenheter. För en råvara för biogasproduktion bör anges spannmåls- slag och sort, TS-halt, densitet, strållängd, hantering vid skörd och lagringsförhållanden.

## 3.3 Kemisk karaktärisering

En viktig aspekt i en studie som innefattar flera processsteg är att ha möjlighet att presentera tillförlitliga material- och energibalanser för systemet. Förbehandlingsmetoderna som diskuteras senare är nästan samtliga behäftade med någon form av inflöde av energi. Det är därför viktigt att den tillförda energin kan relateras till mängden energi som görs tillgänglig från lignocellulosan som biogas. På samma sätt är det viktigt att kunna redovisa materialbalansen för systemet eftersom allt som används som substrat till processen måste också lämna systemet. Om det inte lämnar i gasfas med biogasen måste det därför finnas i den utrötade lösningen eller i den fasta rötresten.

I jämförelser mellan olika processalternativ kan det också vara lämpligt att jämföra metanutbytet som erhålls med det som är teoretiskt möjligt baserat på råvaran till processen. Detta möjliggör jämförelser av processalternativ och strategier för olika råvaror utan att nödvändigtvis diskutera utbytena i absoluta termer. Motsvarande jämförelser är vanliga inom etanolforskningen och även om dessa jämförelser är något mindre komplicerade i det fallet, eftersom endast socker är kolkälla för jäst (1 g socker ger 0.51 g etanol teoretiskt). För biogasprocessen är jämförelsen mer komplicerad och något mer osäker eftersom mikroorganismerna har en större palett av substanser som substrat.

Figur 4 illustrerar möjliga analysvägar som leder fram till olika informationer om råmaterialet. Foderanalysen representerar analysmetoder som visserligen är enkla i sin natur, men som kan ge viktig information om råvaran, speciellt om analyser kompletteras med ytterligare metoder för fördjupad fiberanalys.



Figur 4. Analysvägar för bestämning av råvarusammansättning.

### Torrsbstans (TS)

Torrsbstans (TS)-halt, vilket ibland även benämns DM (dry matter) bestäms vanligen genom att torka provet vid 105°C tills det inte sker någon förändring i vikt vid två påföljande mätningar (APHA, 2005). Om materialet är hygroskopiskt bör det svalna i exsickator innan vägningen för att vatten från luften inte skall adsorberas på materialet. Det finns även vågar med inbyggd värmekälla som automatiserar analysen. Dessa snabbmetoder ger dock något större osäkerheter framförallt eftersom provmängderna vanligtvis är mindre. Om råvaran innehåller en stor andel flyktiga komponenter kan det vara lämpligt att utföra TS-bestämningen vid lägre temperatur (45°-85°C) för att minska förlusterna (DIN, 1986; Sluiter et al., 2008a). Sänkt torkningstemperatur påverkar dock inte flyktigheten för alkoholer (Porter & Murray, 2001). TS-bestämning för vissa typer av råvaror bör därför göras med korrigering för flyktiga ämnen, något som sedan länge gjorts i samband med analys av ensilage för foderändamål (Huida et al., 1986; Porter and Murray, 2001), men som inte blivit rutin i samband med bestämningar för t.ex. etanol- eller biogasproduktion (Kreuger et al., 2011b).

### Aska

Askhalten bestäms genom att hetta upp materialet i en muffelugn till en temperatur där det organiska materialet oxideras till koldioxid och vatten. Olika temperaturer från 550°C och uppåt är vanliga, med en tyngdpunkt mellan 550°C och 650°C. Temperaturen har viss betydelse för den kemiska sammansättningen av askäterstoden. Om t.ex. materialet innehåller mycket NaCO<sub>3</sub> återfinns denna i karbonatform vid lägre temperaturer men som oxid om inaskningstemperaturen är högre. Det är därför viktigt att ange temperaturen vid askbestämningen. Stora provmängder, alternativt noggranna vågar med god reproducerbarhet, behövs vid askhaltsbestämningen, speciellt vid låga askhalter för att erhålla data med hög kvalitet (Sluiter et al., 2008b; Obernberger & Thek, 2004).

I utvärdering av biogasprocesser är VS (Volatile Solids = flyktigt fast material) ett vanligt begrepp. Med detta menas den brännbara delen av råvaran, den del av materialet som förbränns vid askhaltsbestämningen, vilket används som en uppskattning av mängden organiskt material. Begreppet flyktigt används i de här sammanhangen lite slarvigt eftersom flyktighet vanligtvis används för att beskriva att en substans förångas och inte att den oxideras vid höga temperaturer i närvaro av syre. För ett lignocellulosamaterial där mellan 10 % och 30 % av det organiska materialet utgörs av lignin, kan det vara missvisande när VS likställs med biologiskt nedbrytbart organiskt material eftersom lignin anses vara inert för mikroorganismerna.

## **Foderanalys**

I biogassammanhang är det vanligt att råvaran karakteriseras med metoder som traditionellt har använts för foder- och livsmedelsanalys. Efter bestämning av halten vatten och aska delas det organiska materialet upp i råprotein, råfett och en rest som benämns fiber. Denna kan i sin tur delas upp i råfiber (kallas även växttråd) samt kvävefria extraktivämnen (Cherney, 2000; Pond et al., 2005) (Figur 4). Dessa analyser innebär inte absoluta bestämningar av ämnen eller ämnesgrupper, utan kallas på engelska proximate analyses, vilket kan översättas som näraliggande, ungefärliga (t.ex. Eurofins, 2014).

### ***Råprotein***

Proteinhalten uppskattas genom att kvävehalten i materialet bestäms. Totalkvävehalten bestäms då som Kjeldahlkväve (TKN), och om kväve föreligger i betydande mängder även i icke-organisk form bestäms även dessa halter. Baserat på antaganden om proteinsammansättning i aktuell råvara beräknas sedan proteinmängden från mängden organiskt bundet kväve med en omvandlingsfaktor (t.ex. Hames et al., 2008). Den genomsnittliga kvävehalten i alla aminosyror är 16 %, vilket gör att faktorn 6,25 ofta används. Har man kännedom om typisk proteinsammansättning i en viss råvarugrupp kan andra omvandlingsfaktorer användas (t.ex. används 5,8 för spannmålskärna).

### ***Råfett***

En bestämning av provets fetthalt görs genom eterextraktion, och för växtmaterial skulle denna fraktion förutom lipider också kunna innehålla pigment som klorofyll och karoten (t.ex. Cherney, 2000).

### ***Fiber***

Vid enklast möjliga foder/livsmedelsanalys benämns allt som inte definierats som vatten, aska, råprotein och råfett som fiber. Man gör alltså ingen fördjupad analys. Dock kan resten delas upp i det som kallas råfiber, och innehåller cellulosa och delar av ligninet, och en restfraktion som kallas kvävefria extraktivämnen. Denna kan innehålla socker, organiska syror, hemicellulosa och resterade ligninfraktioner. Denna bestäms som resten efter att övriga fraktioner drags av, mängden blir alltså beroende av alla övriga analyser (Pond et al., 2005).

Som komplement i foderanalysen används ibland en något mer detaljerad karakterisering i grupperna Acid Detergent Fiber (ADF) och Neutral Detergent Fiber (NDF). Metoderna bygger på uppslutning av materialet under sura alternativt neutrala förhållanden med tillsatser av komponenter som hjälper till att lösliggöra de önskade komponenterna. Återstoden vägs som ett mått på ADF och NDF (Van Soest & Wine, 1967). Grovt uttryckt ger ADF ett mått på cellulosa och lignin medan NDF även inkluderar hemicellulosa.

## Fiberanalys baserad på kolhydrat- och ligninanalys

Vid analys av lignocellulosarika råvaror för etanolproduktion tillämpas en fiberanalys där fokus ligger på att bestämma kolhydrater och lignin i detalj (Figur 4). Mängden kolhydrater och lignin ger värdefull information om råvaran som kan användas för att bestämma teoretiskt utbyte från ett material. Metoden bygger på uppslutning i stark svavelsyra vid 45°C följt av en svagsyrahydrolys vid 120°C. Metoden finns bl.a. beskriven av NREL i USA (Sluiter & Sluiter, 2005; Sluiter et al., 2008c), men det finns även andra metoder på samma tema som används inom massa- och pappersindustrin. Efter svagsyrahydrolysen kan den fasta återstoden torkas och askas in för att bestämma lignin (även kallat klasonlignin) och askhalt. Vätskan innehåller monomert socker samt den lilla del av ligninet som är syralösligt. Monomersocker i lösningen kan bestämmas med HPLC eller annan lämplig metod och det syralösliga ligninet genom att mäta UV-absorptionen med en spektrofotometer.

Eftersom metoden innefattar en sur hydrolys finns det en risk att en del av det frigjorda monomersockeret bryts ner under denna del av analysproceduren. Det är därför vanligt att mäta den nedbrytningen i ett separat prov med monomersocker som genomgår samma sura hydrolys. Därefter justeras analysresultaten efter hur mycket av monomersockeret som degraderades. I normala fall bör man räkna med en korrektionsfaktor på ungefär 0,88-0,90 men den kan vid ogynnsamma förhållanden bli betydligt lägre. Eftersom felkällorna i analysen divideras med denna faktor bör man vara försiktig vid tolkningen av resultaten om den har varit väldigt låg vid analysen.

I vissa fall, med råvaror som innehåller stora mängder extraktivämnen, kan det vara av intresse att bestämma dessa mängder. Bestämningen ökar analysnoggrannheten på övriga analyser genom att en större mängd av materialets ingående komponenter kvantifieras. Mängden extraktivämnen bestäms genom att återlopps-koka en viss mängd råmaterial med vanligtvis vatten och etanol som lösningsmedel och efter indunstning väga återstoden (Sluiter et al., 2005).

## Andra metoder

### *Elementaranalys*

Som ett alternativ till bestämning av ingående ämnesgrupper i råvaran kan en bestämning av de vanligast förekommande grundämnena (C, O, H, N, S) i råvaran göras. En sådan analys av grundämnena, element, sker genom en förbränningsteknisk analys (t.ex. Kirsten, 1953; Obernberger & Thek, 2004)

### *COD*

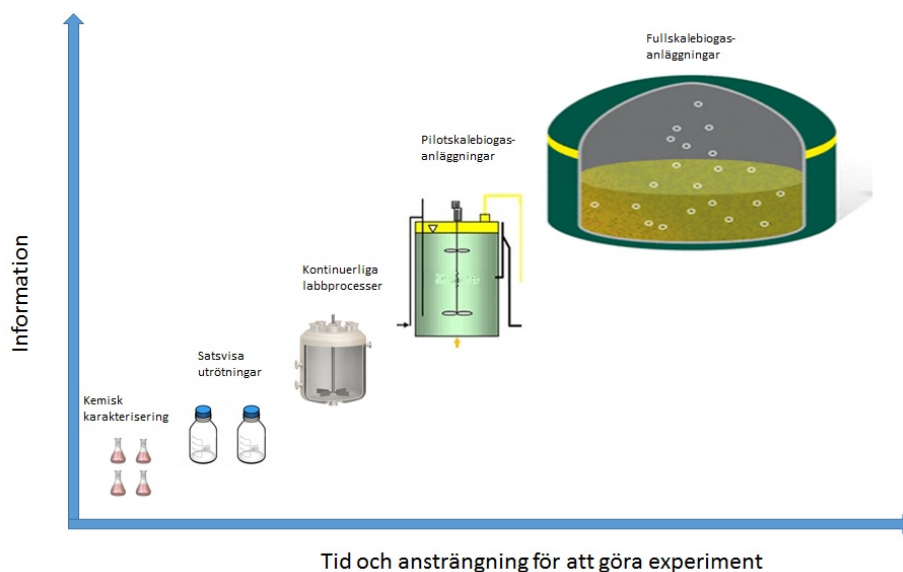
En metod som är vanlig för att kvantifiera mängden organiskt material i vattenprover är att bestämma den kemiska syreförbrukningen (chemical oxygen demand, COD). Man kvantifierar då indirekt mängden organiskt material i substratet genom att mäta syreförbrukningen vid kemisk oxidation med användning av en stark kemiskt oxidationsmedel i ett surt medium, och anger vikt syre som åtgår per vikt av det material som oxideras (g COD/g råvara). Metoden kan även tillämpas för fasta prover.



### 3.4 Metanpotential

För att kvantifiera förbehandlings effektivitet är det vanligt att på olika sätt försöka kvantifiera materialets metanbildningspotential före och efter själva behandlingen. Det finns ett flertal olika metoder att ta fram metanpotentialen för en biogasråvara (Figur 5), där både insatsen i tid och kostnader och den information som kan erhållas varierar;

- genom att beräkna den teoretiska metanproduktionen baserat på kemisk karakterisering
- med satsvisa utröttningsförsök i laboratorieskala (s.k. BMP, biochemical methane potential)
- i kontinuerliga processer i laboratorieskala
- i biogasanläggningar i pilot- eller fullskala



**Figur 5.** Översikt av metoder som kan användas för att bestämma metanproduktion från förbehandlade och obehandlade substrat (anpassad från Montgomery & Bochmann, 2014).

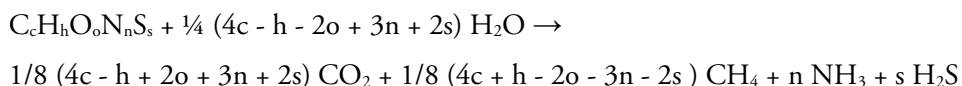
#### Metanpotential baserad på kemisk karakterisering

Metanpotentialen för en biogasråvara kan beräknas baserat på olika typer av kemisk karakterisering. Här kan karakteriseringen vara gjord med olika analysmetoder (kapitel 3.3), och metanpotentialen beräknas sedan som funktion av t.ex. provets innehåll av olika grundämnen, syreförbrukningen vid kemisk oxidering av provet (COD) eller i förhållande till mängd av stora grupper, såsom kolhydrater, lipider och proteiner.

Metanpotential baserat på elementaranalys bygger på att den teoretiska metanpotentialen beräknas med användning av en stökiometrisk ekvation (ekvation 1, Buswell & Hatfield, 1936; Symons & Buswell, 1933). Ekvationen är baserad på den kemiska sammansättningen av materialet med avseende på grundämnena C, H, O, N och S. Det värde som erhålls är den teoretiskt maximala mängden metan som kan produceras om allt material omvandlas till metan. Det görs emellertid med denna metod

ingen skillnad mellan biologiskt nedbrytbart och icke-nedbrytbart material. Dessutom använder mikroorganismerna en del av det omsatta organiska materialet för celluppbyggnad. Ett faktiskt metanutbyte kan alltså aldrig bli så högt som det teoretiskt beräknade metanutbytet baserat på elementaranalys.

Ekvation 1



Ett annat sätt att beräkna metanpotentialen är med hjälp av den kemiska syreförbrukningen (COD). Det teoretiska metanutbytet är 0,35 l per g COD (när metanvolymen anges vid det tryck och den temperatur som anges i kap 3.1). Precis som vid en metanpotentialberäkning baserat på elementaranalys ger denna uppskattning ett överskattat värde eftersom metoden inte skiljer på biologiskt nedbrytbart och icke-nedbrytbart material, och inte tar hänsyn till den del av det omsatta organiska materialet som mikroorganismerna använder för celluppbyggnad.

Ett sätt att skilja mellan biologiskt nedbrytbart och icke nedbrytbart material är att kvantifiera grupper såsom kolhydrater, proteiner och fibrer för att sedan beräkna metanpotentialen via matematiska regressionsmodeller (Lesteur et al., 2010). Alternativt kan metanpotentialen beräknas utifrån en enklare karakterisering av materialet där bestämning enligt de metoder som används inom foderanalys (Figur 4) ger underlag för uppskattningar av fett-, protein- och fiberinnehåll. För lignocellulosarik råvara, där kolhydrater och lignin utgör en stor del av råvaran, är dock komplettering med en fördjupad analys av kolhydrater och lignin relevant (Figur 4). Genom att man känner till den kemiska sammansättningen för ingående ämnen (Tabell 3), eller gör antaganden om en typisk kemisk sammansättning för grupper av ämnen (Tabell 4) får man sedan underlag för beräkning av metanpotentialen vid fullständig anaerob nedbrytning av dessa fraktioner (Angelidaki & Sanders, 2004; Carlsson & Uldal, 2009). Man kan med denna metod undanta grupper som inte bryts ned i en biogasprocess, t.ex. lignin, och som därför inte bidrar till metanutbytet trots att de utgörs av organiska föreningar.

Tabell 3. Exempel på teoretiska metanutbyten baserat på Ekvation 1 för komponenter med känd kemisk sammansättning.

| Substrat  | Metanutbyte<br>L/g |
|---|--------------------|
| Glukos (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> )                 | 0,374              |
| Mannos (C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>6</sub> )                 | 0,364              |
| Xylos (C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> )                  | 0,374              |
| Cellulosa (C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>n</sub> | 0,415              |
| Stärkelse (C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>n</sub> | 0,415              |

Tabell 4. Teoretiska biogas- och metanutbyten från grupper av ämnen baserat på antagande om typisk sammansättning.

| Substrat      | Metanutbyte<br>L/g | Källa                      |
|---------------|--------------------|----------------------------|
| Fett          | 1,01               | Angelidaki & Sanders, 2004 |
| Protein       | 0,50               | Angelidaki & Sanders, 2004 |
| Hemicellulosa | 0,42               | Tillman, 1991              |

Utifrån en kemisk karakterisering kan man få viktig information om materialet som biogasråvara, men det är svårt att förutsäga den slutliga metanproduktionen om man inte kan mäta t.ex.:

- effekter av högt fettinnehåll, särskilt av långkedjiga fettsyror (Long chain fatty acids, LCFA), som kan ha en hämmande effekt på den biologiska processen eller påverka biotillgängligheten genom att bilda en fysisk barriär runt de andra komponenterna (t.ex. Cirne et al., 2007),
- effekter av proteinnedbrytning, som kan leda till giftiga nivåer av ammoniak och som kan störa den biologiska processen genom att ge ett för högt pH,
- effekter av närvaro av svårnedbrytbara komponenter som t.ex. hemicellulosa och lignin, eftersom det rapporterats om ett omvänt förhållande mellan ligninhalt och effektiviteten av enzymatisk hydrolys (Lesteur et al., 2010).

Metanutbyte beräknat baserat på substratkarakterisering har alltså många felkällor förutom de analysfel som mätmetoderna kan innefatta. Ett säkert värde på metanpotentialen hos ett specifikt substrat och under specifika förhållanden kan därför endast erhållas med experimentella utrottningsförsök. Det beräknade metanutbytet har dock den viktiga rollen att beräkningen visar på ett tak för det metanutbyte som kan erhållas. Kännedom om teoretiskt maximala värden ökar insikten om vad som är rimligt vid en bedömning av experimentella värden, och vid litteraturstudier av experimentella värden går det att identifiera värden som är uppenbarligen felaktiga. En kolhydratbaserad råvara kan alltså i allra bästa fall ge metanutbyten kring 0,4 L metan per g organiskt material, och närvaron av icke-nedbrytbara ämnen som lignin minskar utbytet ytterligare. För högre metanutbyten krävs närvaro av andra ämnen som fett eller protein. Man bör alltså förhålla sig kritisk till experimentella värden för lignocellulosarika råvara som t.ex. 0,47 L metan per g organiskt material för förbehandlad björk (Avfall Sverige, 2012) eller 0,45 L metan per g organiskt material för oförbehandlat vallensilage (Carlsson et al., 2013). Ingen av nämnda studier använder heller dessa experimentella värden vidare, utan de teknoekonomiska utvärderingarna i studien om förbehandlad träråvara till biogas använder ett antaget värde på 0,2 L metan per g organiskt material efter förbehandling (Avfall Sverige, 2012), och för vall beräknas som utgångspunkt ett värde baserat på kemisk karakterisering på 0,32 L metan per g organiskt material före förbehandling (Carlsson et al., 2013).

### Satsvisa utrottningsförsök

Metoden för bestämning av biokemisk metanpotential (biochemical methane potential, BMP) utvecklades på 1970-talet och är ett relativt enkelt analytiskt test baserat på mikrobiell nedbrytning som kan användas för att bestämma metanpotential och metanbildningshastighet hos ett organiskt material. Många ansträngningar har gjorts för att beskriva och standardisera metoden (t.ex. Angelidaki et al., 2009; Guwy, 2004; Hansen et al., 2004; Liu et al., 1999; Müller et al., 2004; Raposo et al., 2011). De satsvisa utrotningarna utförs i en flaska fylld med ymp och ett substrat som inkuberas under syrefria förhållanden vid önskad temperatur. Gas- och metanproduktionen mäts över tiden med olika metoder och uttrycks ofta som volym producerad gas per gram VS eller TS.

Metoden används i Sverige och internationellt och det finns i litteraturen riktlinjer och protokoll för hur BMP bör genomföras, men trots detta erhålls stora variationer i resultaten. I en omfattande rapport publicerad av Carlsson & Schnürer (2011) ges allmänna kriterier för att utföra BMP-analys. Rapporten rekommenderas för en mer detaljerad och omfattande information om parametrar som har betydelse för testresultatet. Här återges några parametrar från rapporten som vi anser vara relevanta för BMP-bestämning kopplad till förbehandling av lignocellulosarika råvaror för biogasproduktion;

- Valet av ymp är kritiskt och förklarar ofta varför BMP-analyser inte alltid är reproducerbara. Ympen är också viktig för metanbildningshastigheten. Ofta är det olika mikrobiella populationer i olika biogasanläggningar och ymparnas sammansättning som förklarar skillnader i biogasproduktion från samma substrat. Ympen bör helst anpassas till ett substrat som liknar det som ska analyseras och till den processtemperatur som är relevant. Ympens

kvalitet bör också kontrolleras genom att använda ett substrat (t.ex. cellulosa) där det förväntade metanutbytet är känt som en så kallad positiv kontroll.

- Provtagningsmetod, förvaring (t.ex., kyl- eller frysförvaring) och eventuell homogenisering (sönderdelning, partikelstorlek, etc.) av prover måste beskrivas för att underlätta diskussion av eventuella likheter eller skillnader i resultaten.
- Analys och karakterisering av substratet är särskilt viktig för att utvärdera materialet som biogasråvara, men också för att kunna bedöma rimligheten i det experimentellt bestämda metanutbytet.
- En viktig aspekt är om substratet innehåller flyktiga komponenter såsom t.ex. flyktiga fettsyror och alkoholer (vilket kan vara fallet för t.ex. ensilage). Om metanutbytet ska presenteras per VS eller TS måste en korrigerig av TS- och VS-bestämningarna göras pga av förlust av flyktiga ämnen under torkningen (Kreuger et al., 2011b; Vahlberg et al., 2013).
- Användning av en buffertlösning som spädningsmedium måste beaktas när ett förbehandlat substrat (särskilt efter kemisk förbehandling) får ett lågt eller högt pH som kan hämma biogasprocessen. Detta gäller också om ympen har en låg alkalinitet.
- En graf över metanproduktionen bör alltid presenteras för att kunna bestämma den totalt ackumulerade metanproduktionen över tid och metanbildningshastigheten. Det är också viktigt för att kunna göra en korrekt tolkning av resultaten beroende på när testet avslutas (Fig. 2). Metanproduktionen ges oftast i volym gas relaterat till tillfört organiskt material i form av TS, VS eller COD (exempelvis mL CH<sub>4</sub>/g VS).

Satsvisa utrottningsförsök ger en bild av olika substrats nedbrytbarhet och kan visa på skillnader mellan behandlingar och i förhållande till obehandlade substrat. Metoden har dock begränsningar, och Carlsson & Schnürer (2011) ger även exempel på vad man *inte* kan utläsa ur ett BMP-resultat. Eftersom substratet blandas med en stor mängd ymp som innehåller en väl fungerande mikrobiell population, alla viktiga näringsämnen och dessutom fungerar som ett spädningsmedium, kommer alla eventuella toxiska ämnen från substratet också att spädas ut och kan därmed undgå upptäckt. Resultatet visar heller inte det metanutbyte som skulle erhållas i en kontinuerlig process, d.v.s. en process där råvara kontinuerligt matas in eller flödar ut. En förbehandling som resulterar i ökad nedbrytbarhet kan ge två olika effekter på metanproduktionen i en BMP-test; dels att en större andel av det organiska materialet blir tillgängligt för metanproduktion, dels att metanproduktionen går snabbare. Att utifrån BMP-resultaten göra tolkningar gällande metanutbyte i fullskalig produktion eller angående effekten av en viss förbehandling kan vara mycket missvisande, se exempel i Figur 6. Detta gör det svårt att utvärdera om förbehandling av en biogasråvara har önskad effekt enbart genom en standardiserad laborativ bedömning av typen BMP.

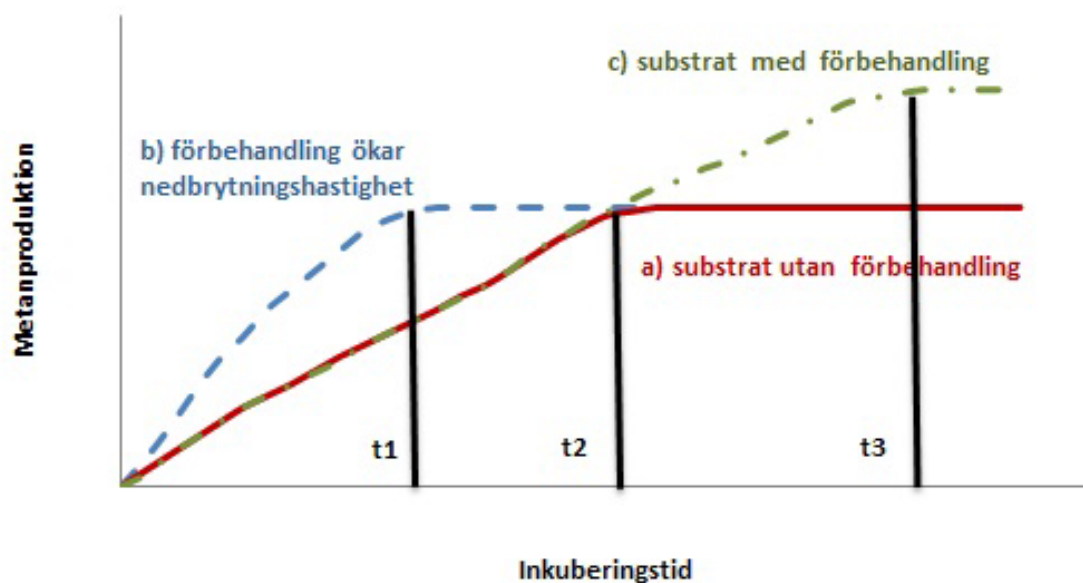
## Kontinuerliga processer i laboratorieskala

Kontinuerliga processer i laboratorieskala kan ge resultat som påminner mer om de fullskaliga biogasprocesserna. I en kontinuerlig biogasprocess sätts substratet kontinuerligt till en totalomblandad reaktor samtidigt som rötresten tas ut. En viktig parameter i de här processerna är substratets uppehållstid som beräknas genom att dividera reaktorvolymen med utflödet. På grund av de stora mängderna ymp i början av försöken kommer eventuell hämning/begränsning/stimulering inte att upptäckas förrän reaktorvolymen hunnit bytas ut minst en gång, d.v.s. efter en uppehållstid. Det kan dock ta ännu längre tid och därför är ett riktmärke att en process ska drivas under minst tre uppehållstider innan mätvärden tas för en given förändring (Carlsson & Schnürer 2011). Eftersom uppehållstiden kan ligga på minst 20 och upp till över 50 dygn gör detta att försöken tar lång tid. Det kan även vara problematiskt att mata in små mängder substrat på ett reproducerbart sätt, vilket kan ge resultat med stor variation (t.ex. Nges et al., 2012). Detta i sin tur kan göra att skillnader mellan

metanutbyte i perioder med inblandning av t.ex. en oförbehandlad och förbehandlad råvara inte blir statistiskt signifikanta.

Kontinuerliga processer i laboratorieskala är bra för att validera resultaten från satsvis utrötning, men lägre metanpotentialer brukar uppnås. Metanutbytet i ett kontinuerligt system blir aldrig 100 % av resultatet från en BMP-test eftersom material kontinuerligt tillförs och tas ut. En del av materialet kommer därför att uppehålla sig en kortare tid i reaktorn, medan en del kommer att finnas där längre. För en kontinuerlig process med 20 dygns medeluppehållstid kortsluts t.ex. i genomsnitt 5 % av materialet, dvs det åker rakt igenom den totalomblandade processen och bidrar inte till metanutbytet. En del av energin i substratet används också för produktion av ny biomassa (5-10%).

Metanpotentialen som uppnås i olika kontinuerliga system kan därför vara från 10 % och ned till så mycket som 65 % lägre än resultatet från BMP-tester (Carlsson & Schnürer, 2011).



**Figur 6.** Exempel på möjliga tolkningar av resultat från BMP-test. Förbehandling kan öka rötningshastighet (b) och metanutbyte (c) jämfört med obehandlad råvara (a). Men med hänsyn till hur resultaten från BMP-testet används blir olika tolkningar möjliga, vilket här illustreras med tre exempel.; t1 - förbehandling b) fördubblar metanutbytet; t2 - ingen förbehandlingsmetod ökar metanutbytet; t3 - förbehandling c) ökar metanutbytet med 25 %, men förbehandling b) har ingen effekt (modifierad från Montgomery & Bochmann, 2014).

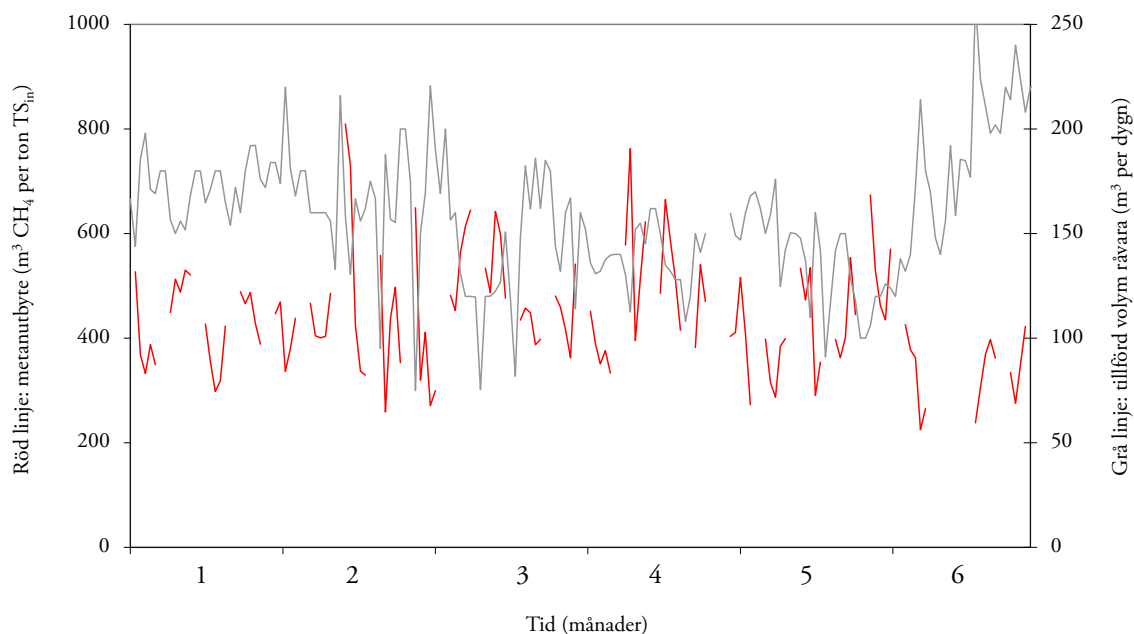
## Biogasanläggningar i pilotskala

Information från laboratorieskaleförsök bevisar inte om en förbehandlingsmetod är effektiv under verkliga förhållanden, främst eftersom den utrustning som används för förbehandling i stor skala inte är samma som den utrustning som används i laboratorieskala. I pilotskala går också att testa substratets och rötrestens fysikaliska egenskaper, som påverkar t.ex. pumpning, omrörning, värmeväxling, sedimentation och svämtäckesbildning, samt testa olika teknikers funktion och kapacitet med avseenden på förbehandling och efterbehandling. Det är också möjligt att pumpa in råvara med samma typ av inmatningsanordning som används i fullskala samtidigt som noggrann övervakning kan ske utan

hänsyn till samtidig fullskalig drift. Underlaget används huvudsakligen för teknisk dimensionering av utrustning för produktionskala.

### Biogasanläggningar i fullskala

Montgomery & Bochmann (2014) slår fast att tester av hur effektiv en förbehandlingsmetod är måste genomföras i fullskalig biogasproduktion. Vissa aspekter, som omrörning, sedimentation, svämtäckesbildning, effekter på rötrestens egenskaper mm kan vara svåra att få en fullständig bild av utan tester i fullskala. Samtidigt är det mycket svårt att vid fullskalig drift kunna avgöra om tillförseln av en specifik råvara, förbehandlad eller ej, bidrar till metanutbytet, särskilt om den förbehandlade råvaran utgör en av många råvaror i en samröttningsanläggning. I Figur 7 visas exempel på daglig tillförseln av substrat samt metanutbytet per ton TS för en fullskalig samröttningsanläggning för att illustrera hur denna typ av data kan variera vid normal drift. Många aspekter är relevanta att utvärdera i fullskalig produktion, men som redskap för att analysera metanpotential är detta en tveksam metod, och speciellt om syftet är att utvärdera olika råvaror och förbehandlingsmetoder i jämförelse.



**Figur 7.** Exempel på mängd tillförd råvara och den stora variationen i metanutbyte från storskalig samröttningsanläggning.



## 4. Förbehandling

Det finns en uppsjö olika metoder för att förbehandla lignocellulosa med syfte att öka den biologiska nedbrytbarheten. Vissa av dessa metoder har sitt ursprung i massa- och pappersindustrin och vissa är metoder som började utvecklas under krisperioder (världskrig och liknande) för att öka råvarutillgången för den kemitekniska industrin. Under krisperioder har olika förbehandlingsmetoder också använts för att möjliggöra bränsleproduktion (etanol och andra alkoholer) från lignocellulosa för att täcka upp drivmedelsbrister.

Lignocellulosa är benämningen på kombinationen av lignin och cellulosa vilka tillsammans med hemicellulosa är de strukturskapande komponenterna i allt växtmaterial. Lignocellulosa är i grunden ett svårnedbrytbart material med biologiska metoder. Biologiska metoder innebär i det här fallet att lignocellulosamaterialet skall vara tillgängligt för enzymatisk nedbrytning, men eftersom de tre komponenterna bildar en komposit som rent steriskt hindrar enzymerna att binda in till materialet. Det är lätt att inse den inbyggda motståndskraften i lignocellulosamaterial mot nedbrytning om man tänker på hur länge en trädstam kan ligga i naturen utan att ”ruttna bort”. Eftersom lignocellulosa är ett väldigt vitt begrepp måste man också komma ihåg att inom gruppen finns det material som är mer eller mindre svårnedbrytbara, vedartade fleråriga växter blir svårare att bryta ned än de mindre kompakta strukturerna i ettåriga växter.

När det gäller förbehandling inför biogasproduktion kan den ha olika syften. Ett syfte kan vara som beskrivits ovan att öka den biologiska nedbrytbarheten vilket kan användas för att öka metanutbytet från råvaran alternativt för att minska uppehållstiden i reaktorn och därmed intensifiera processen. Förbehandlingen kan också syfta till att öka processbarheten av substratet, t.ex. genom att förenkla inmatningen av material i reaktorn eller minska risken för att materialet separerar i reaktorn då vissa lignocellulosamaterial har tydliga flytegenskaper (låg bulkdensitet).

### 4.1 Tillgängliga metoder

Här följer en litteraturgenomgång av tillgängliga metoder vad gäller förbehandling av lignocellulosarika råvaror till biogasproduktion. Utgångspunkten är att genomlysna bredden av förbehandlingsmetoder som finns tillgänglig på den befintliga marknaden, samt tillföra de metoder som idag studeras inom etanolforskningen.

Som nämnts tidigare finns det ett stort antal metoder tillgängliga för att förbehandla lignocellulosa. En fullständig genomlysning av alla dessa metoder är i princip omöjlig och därför har avgränsningen gjorts att enbart beskriva metoder som är tillgängliga i kommersiella processer i dagsläget eller där sådana kan tänkas konstrueras om det finns ett kommersiellt intresse för dem. Detta exkluderar då bl.a. processer som bygger på gamma eller mikrovågsstrålning, ultraljud samt joniska vätskor eftersom dessa inte ses som kommersiellt tillgängliga, eller ekonomiska, i medelstor till stor skala i en nära framtid. För en utförligare genomgång av metoder som har exkluderats i denna rapport hänvisas till andra vetenskapliga publikationer (Zacchi & Galbe, 2007; Taherzadeh & Karimi, 2008).

Existerande förbehandlingsmetoder kan grovt klassificeras i fysikaliska (mekaniska) eller kemiska metoder. De kemiska metoderna kan i sin tur delas in i sura, alkaliska eller lösningsmedelsbaserade.



## Mekaniska metoder

Mekaniska metoder ökar tillgängligheten av lignocellulosamaterialet genom att den specifika ytan ökar. Detta gör att enzymerna som är viktiga för nedbrytningen lättare kan binda in till substratet vilket ökar reaktionshastigheten och även kan leda till ett ökat utbyte. Mekaniska förbehandlingsmetoder med syfte att öka metanutbyte skall inte förväxlas med mekaniska metoder som används för att möjliggöra industriell hantering av råvaran, som flisning av ved eller hackning av jordbruksbiprodukter. Graden av bearbetning, och därför också energiinsatsen är många gånger högre för förbehandlingsmetoderna i jämförelse med flisning och hackning. Till de mekaniska metoderna räknas malning och extrudering och båda dessa metoder är kommersiellt tillgängliga. Utrustning för malning av substrat kan vara kulkvarnar, hammarkvarnar och kolliodkvarnar. Extrudering av substrat används redan idag som ett förbehandlingssteg inför biogasproduktion. Extrudering bygger på att substratet pressas genom en matris, antingen med hjälp av skruvar eller med hydraulik. När substratet pressas genom matrisen utsätts det för stora skjuvkrafter som finfördelar materialet. Energianvändningen för de mekaniska metoderna är relativt hög och den mekaniska bearbetningen leder till att materialet värms upp under processen. Temperaturen blir dock inte så hög att man kan räkna med någon större effekt från den ensam. Om man jämför utbytesökningar i biologiska processer som man får efter en rent mekanisk förbehandling är dessa lägre än de utbytesökningar som fås med mer kraftfulla kemiska metoder. Dock kan tex extrudering leda till ökad processbarhet av lignocellulosamaterial i storskaliga anläggningar genom att substratet blir enklare att mata in i reaktorn, flytegenskaperna minskar och eventuell omrörning av biogasreaktorn blir enklare att utforma. Vid teknisk, ekonomisk och miljömässig utvärdering av förbehandlingsmetoder ska man komma ihåg att energin som används för de mekaniska metoderna uteslutande är elektricitet.

## Kemiska metoder

### *Syrakatalyserade metoder*

Det finns många exempel på syrakatalyserade förbehandlingsmetoder i den vetenskapliga litteraturen. Generellt för dessa metoder är att hemicellulosa, och i vissa fall även delar av cellulosa, hydrolyseras till monomert och oligomert socker. Genom att en av komponenterna i hemicellulosastrukturen tas bort blir de övriga komponenterna, cellulosa och hemicellulosa, tillgängliga för enzymer som kan fortsätta nedbrytningen. I princip vilken syra som helst leder till hydrolys av hemicellulosa förutsatt att processen körs vid lämplig temperatur. Både oorganiska syror som svavelsyra, saltsyra, fosforsyra samt organiska syror som myrsyra, ättiksyra och mjölksyra är tänkbare kandidater. Likaså kan gasformiga syror som svaveldioxid och koldioxid användas för att impregnera substratet före förbehandlingen. Temperaturen vid denna typ av förbehandling är oftast mellan 170°C och 240°C. Högre temperaturer och höga koncentrationer av starka syror förkortar reaktionstiden som typiskt kan vara mellan 1 minut och 20 minuter. Förbehandling resulterar i en "slurry" som har ett pH värde mellan 1.5 och 5 och som är mer mottaglig för nedbrytning med biologiska metoder.

Jämfört med mer traditionella massakokningsmetoder är temperaturen högre och reaktionstiden kortare. Detta ställer krav på processen att temperaturökningen, som startar hydrolysreaktionerna och temperatursänkningen som får hydrolysen att avstanna, kan ske på ett snabbt och kontrollerat sätt. En vanlig metod är så kallad "steam explosion" (STEX) vilket innebär att temperaturen ökas snabbt med injektion av högtryckångor. Temperatursänkningen åstadkoms genom att hastigt sänka trycket till atmosfärstryck varvid en del av vattnet i reaktorn förångas samtidigt som materialet skjuts ut i ett uppsamlingskärl. Förångningen leder till en momentan temperatursänkning för materialet. Motsvarande process kan även göras kontinuerlig och liknande utrustningar finns tillgängliga för användning inom massa- och pappersindustrin. Den syrakatalyserade nedbrytningen kan även utföras i mer traditionella indirekt uppvärmda och nedkylda reaktorer, men för att kompensera för den längre

uppvärmnings- och nedkylningstiden behöver övriga parametrar som påverkar graden av förbehandling, framförallt syramängd och temperatur, justeras till lägre nivåer.

Metoden med en snabb trycksänkning med tillhörande förångning av vätskan, både runt och inuti lignocellulosan, kan också leda till en fysikalisk påverkan på substratet vilket hjälper till att öka hydrolyserbarheten av materialet. Huruvida denna effekt faktisk är ett reellt faktum har dock både bevisats och motbevisats i olika studier och eftersom många av dessa studier utförs i laboratorie- och bänkskala i relativt specialiserad utrustning kan man anta att en del påvisade effekter (eller brist på dem) är utrustningsspecifika.

Syrakatalyserad förbehandling har använts under många år inom etanolforskningen baserad på lignocellulosaråvara. En stor mängd olika råvaror har undersökts och metoden har visats sig vara lämplig i dessa sammanhang. Framgångsfaktorerna i det fallet är att processen är robust, råvaruflexibel, ger höga utbyten i efterföljande biologiska steg samt är kommersiellt tillgänglig. Andra fördelar är att den lätt kan energiintegreras med andra energikrävande enheter, eftersom sekundärårgan som bildas vid trycksänkningen kan användas för att värma andra enheter.

Den största nackdelen med de syrakatalyserade processerna är att det bildas, i varierande grad, sekundära nedbrytningsprodukter från sockermolekylerna. Dessa är framförallt furfural, hydroximetylfurfural, myrsyra och leuvelinsyra. Dessa nedbrytningsprodukter är toxiska för mikroorganismer och koncentrationerna behöver hållas låga för att erhålla en bra produktivitet och utbyte. Jäst som används inom etanolproduktion är väldigt tolerant mot många av dessa inhibitorer jämfört med många andra mikroorganismer och det är en viktig anledning till att höga produktiviteter och energiutbyten kan nås i den processen.

Att anpassa den syrakatalyserade förbehandlingen till att vara lämplig för biogasproduktion kräver en del eftertanke. Framförallt gäller detta val av syra då detta kan ha en stor inverkan på biogasprocessen. Vid förbehandling inför etanolproduktion är det vanligt att använda svavelsyra eller svaveldioxid (som i vattenlösning blir svavelsyrighet). Dessa syror är antagligen olämpliga i biogassammanhang eftersom det kan leda till en större produktion av svavelväte i biogasprocessen, vilket kan sänka metanutbytet och försvåra gasuppreningen. Fosforsyra är ett attraktivt alternativ eftersom det tillför fosfor till processen som behövs för mikroorganismernas celluppyggnad. Fosforsyra av teknisk kvalitet innehåller dock relativt stora mängder orenheter (bl.a. flourvätesyra) vilket leder till att materialvalen blir komplicerade och att investeringskostnaden för utrustningen blir alltför hög. Ett annat alternativ är att använda organiska syror, exempelvis myrsyra eller ättiksyra. Dessa skulle katalysera nedbrytningen av hemicellulosa och det har visat sig möjligt att nå höga grader av enzymatisk nedbrytning av vete- och majshalm som har förbehandlats med organiska syror som katalysator. De organiska syrorerna har också fördelen att vara nedbrytbara i biogasprocessen. Dock är priset för de organiska syrorerna högre och en ekonomisk utvärdering behöver utföras för att avgöra ifall den högre kostnaden (jämfört med andra syror) kan leda till bättre processekonomi.

Organiska syror kan även produceras från många av de möjliga råvarorna under lagring genom att ensilera materialet. Mikroorganismer som naturligt finns på växtmaterialet eller tillförs producerar då vid lufttät lagring organiska syror genom att fermentera lättillgängligt socker i råmaterialet. Processen avstannar när pH-värdet i materialet sjunker. Den bildade syran är väl distribuerad i materialet vilket är en fördel och energiförlusterna är försumbara. Metoden lämpar sig dock inte för väldigt torra material eller för material som innehåller för små mängder lättillgängligt socker, som t.ex. halm. För vall och fånggrödor kan det dock vara ett attraktivt alternativ.

### *Alkaliska metoder*

I litteraturen finns många exempel på alkaliska förbehandlingsmetoder av lignocellulosa. Syftet med en alkalisk förbehandling av materialet är att helt eller delvis lösliggöra ligninet från materialet samt att delvis lösliggöra hemicellulosan. En stor skillnad mellan de sura och alkaliska metoderna är att vid alkaliska förhållanden bryts inte hemicellulosan ner till monomersocker utan resultatet blir kedjor av

oligomer, hemicellulosa, som är lösliga i alkali. Ligninet bryts under förbehandlingen ner genom alkalikatalyserade reaktioner som bryter kovalenta bindningar i ligninstrukturen och gör ligninet vattenlösligt dels genom minskad molekylvikt och dels genom att hydrofila grupper på ligninet skapas. Massaindustrin har fulländat processen genom att med rätt val av temperatur, reaktionstid och kemikaliekoncentration lösliggöra merparten av ligninet med en väldigt liten påverkan på cellulosan.

Även vid relativt låga temperaturer fås en påverkan på materialet genom en svällningseffekt. Detta är inte i sig kopplat till att hemicellulosa och ligninet reagerar utan är snarare en följd av att materialet i sig, bl.a. cellulosa har en viss (väldigt låg) löslighet i alkali. Materialets ökande volym gör dock att porstorlekarna i materialet förändras, vilket leder till att de enzymer som behöver binda in till cellulosa har lättare att göra detta.

Vanligt förekommande kemikalier är NaOH, KOH,  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{NaCO}_3$ ,  $\text{NH}_3$  m.fl. Beroende på val av kemikalie och koncentration samt på vad som önskas uppnås i förbehandlingen (allt emellan svällning av materialet till nästan fullständig delignifiering) varierar temperaturen från ca 70°C till över 200°C. På samma sätt varierar uppehållstiden för reaktionerna från några få minuter upp till en dag.

Bland katalysatorer som kan tänkas ge ett mervärde förutom som källa för hydroxidjoner kan nämnas KOH,  $\text{Ca(OH)}_2$  och  $\text{NH}_3$ . Precis som fosfor är ammoniumkväve viktigt för mikroorganismerna och förbehandling med ammoniak vid ”lagom” koncentration kan därför vara ett sätt att ställa in råvaran på rätt mängd ammonium i förhållande till övriga komponenter. För ett kväverikt substrat är det dock en nackdel. Kalcium är i många fall en problemsubstans om man låter koncentrationerna nå för höga nivåer. I det här fallet kan den dock tillföra en liten del kalcium till fälten, när rötresten används som gödselmedel.

## 4.2 Teknoekonomisk analys

För att bedöma ifall en process eller processlösning är lämplig behöver en jämförande analys mellan olika fall göras (Wingren et al., 2003). Oftast utser man ett fall till basfall, i det här sammanhanget lämpligtvis ett fall utan förbehandling som sedan ställs mot ett antal olika fall där förbehandling av råvaran ingår. Som grund till en sådan jämförelse ligger mass- och energibalanser. För att göra energibalanserna jämförbara är det viktigt att strömmarna in och ut från modellen har samma tillstånd (temperatur och tryck) i alla fall eftersom energiflödet i en ström i temperaturberoende (1 kg vattenångor har högre entalpi än 1 kg vatten). Massbalanserna i en sådan utvärdering är beroende på tillförlitliga data avseende sammansättning i de olika ingående strömmarna vilket betyder att det är synnerligen viktigt att analysmetoderna är relevanta och att det som mäts faktiskt kan användas för att beskriva massflödena i systemet. Det finns olika hjälpmedel som kan användas för att systematisera arbetet med material och energibalanser. I grunden handlar det dock om att ställa upp ett ekvationssystem för alla ingående komponenter, reaktioner och enhetsoperationer i processen. Detta kan sedan lösas antingen iterativt eller som ett linjärt ekvationssystem. Det finns också särskilda programvaror för så kallad flowsheeting som är uppbyggda för att lösa material- och energibalanser som i vissa lägen förenklar uppgiften genom att de innehåller modeller för olika enhetsoperationer och reaktorer samt en databas för fysikaliska data (som densitet, entalpi, värmekapacitet osv) för ingående komponenter.

Mass- och energibalanserna kan därefter ligga till grund för en kostnadsuppskattning av produktionskostnaden. Produktionskostnaden beror på rörliga kostnader som t.ex. el, värme, insatskemikalier och kyla samt fasta kostnader som framförallt är relaterade till kapitalkostnaden för utrustningen. För att uppskatta investeringskostnaden för utrustning finns flera olika metoder som sträcker sig från uppskattning baserat på erfarenhetsmått och tumregler, via programvaror som dock till viss del ofta är baserade på liknande tumregler, dock mer förfinat till offerter ifrån utrustningsleverantörer. För en jämförande studie kan enkla tumregler ge en uppskattning som kan

användas enbart för jämförelse med resultat från samma studie. Detta beror på att dessa metoder leder till en väldigt stor osäkerhet vad gäller de absoluta kostnaderna, men kan likväl fånga upp variationerna mellan två fall på ett rättvisande sätt. Bäst noggrannhet fås om kostnadsuppskattningarna baseras på offerter från utrustningstillverkare och dessa kan i vissa fall även användas för jämförelser mellan olika studier.

Det är också viktigt att påpeka att investeringskostnaderna vanligtvis inte ökar i proportion till anläggningsstorleken. En anläggning med dubbel kapacitet är följaktligen inte dubbelt så dyr. En grov uppskattning kan fås med 6/10 regeln (Ekvation 2) som dock skall användas med stor försiktighet.

Ekvation 2

$$\frac{\text{kostnad2}}{\text{kostnad1}} = \left(\frac{\text{skala2}}{\text{skala1}}\right)^{\frac{6}{10}}$$

Den ekonomiska analysen är också beroende på vilka investeringsparametrar, som t.ex. internränta, ekonomisk livslängd och skattesatser, som används. Sammantaget gör komplexiteten i den ekonomiska analysen det mycket svårt att jämföra produktionskostnader från olika studier med varandra eftersom det inte finns någon universell utarbetad metod för att säkerställa att resultaten blir jämförbara. Detta är något som ganska ofta inte tas i beaktande i den vetenskapliga litteraturen där resultat ganska ofta jämförs mellan olika studier baserade på olika förutsättningar och skala.

### 4.3 Exempel på pågående projekt och aktörer

För att understryka intresset av förbehandlingsstudier ges här några exempel på aktuella projekt. Valda exempel visar på bredden vad gäller aktörer, råvaror och intressenter. Vi har också velat visa exempel på hur resultaten rapporteras och kvantifieras på olika sätt.

#### Mekaniska, kemiska och kombinerade förbehandlingsmetoder för halm

På Foulum, vid Århus Universitet i Danmark, forskas i en fullskalanläggning på möjligheten att öka biogasutbytet från halm och våtmarksvegetation med mekanisk förbehandling via extrudering av fuktigt material, brikettering av torrt material och macerering via rundpumpning av vätskan i röt-kammaren. Kemisk förbehandling av lignocellulosarika material med syror (ättiksyra och svavelsyra) samt baser (kalium- och natriumhydroxid) har också studerats. Vid 30 dagars uppehållstid i röt-kammaren uppskattas biogasutbytet öka för mekaniskt förbehandlat substrat med ca 10 % jämfört med obehandlad råvara. Om man vid briketteringen tillsätter någon av de två baserna till de lignocellulosarika råvarorna anges biogaspotentialen öka med ytterligare ca 10 %. Energibalansen anges vara positiv efter extrudering av t.ex. vete-halm, eftersom 3-4 ggr mer energi, i form av metangas, erhålls jämfört med energiinsatsen i form av el vid extruderingen. Resultat från satsvisa utrottningsförsök presenteras, där ymp från olika biogasanläggningar testats, och metanpotentialen varierade från ca 150-300 L CH<sub>4</sub>/kg VS. Brikettering ger möjlighet att tillsätta stora mängder halm i biogasanläggningar som rötter flytgödsel, vilket kan leda till en fördubblad biogasproduktion per reaktorvolym vid sådana anläggningar (Møller, 2012; Møller & Møller Hansen, 2014).

## Sönderdelning av torr halm via hammarkvarn och sönderdelande pump

På södra Jylland planerar E.ON en biogasanläggning, Sønderjysk Biogasproduktion I/S, där man har tillstånd att röta ca 600 000 ton material per år. Anläggningen uppförs tillsammans med Sønderjysk Biogas a.m.b.a. Förutom huvudsubstratet gödsel, ca 450 000 ton, ska 50 000 ton halm, 15 000 ton majs och 50 000 ton betor rötas per år. Halmen sönderdelas med en hammarkvarn och tillförs röt-kammaren via en blandningstank där den hackade halmen ”avluftas” och matas därefter in i rötning-processen med sönderdelande pumpar (Eriksson, 2014). Bland annat Landia, i Danmark (Landia, 2014), har både pumpar för inmatning av långhalm, t.ex. från djupströbäddar, från en pumpbrunn in i biogasreaktorn och speciella knivpumpar som vid rundpumpning i reaktorn finfördelar det inmatade materialet.

## Pelleterad halm som biogassubstrat efter användning som strö till hästar

Enligt Wennerberg och Dahlander (2013) kan hästgödsel användas som substrat vid biogasproduktion. Det som avgör kvaliteten på hästgödsel som biogassubstrat är vilka strömedel som används. Strömedel baserat på trä, såsom såg- och kutterspån, samt torv är inte lämpade då det tar för lång tid för att röta dessa och med ett för lågt metanutbyte.

Wennerberg och Dahlander (2013) skriver att ”Långstråig halm måste sönderdelas i någon form av hack eller kvarn till max 10 mm för att inte bilda svämtäcke eller störa omblandningen i röt-kammaren. Halmpellets är det bästa strömedlet för biogasproduktion eftersom halmen i pelletsen är finfördelad och därmed blir mer lättrotad med ett bättre gasutbyte. Vid biogasproduktion vill man ha en så färsk gödsel som möjligt för att inte förlora energi i en spontan kompostering vid lagring.”

Wennerberg och Dahlander (2014) anger att metangasutbytet för hästgödsel med halmpellets uppskattas till ca 200 Nm<sup>3</sup> metan/kg VS, vilket motsvarar ca 48 Nm<sup>3</sup> metan/kg gödsel. För hästgödsel med trä- eller papperspellets uppskattas metangasutbyte till endast hälften, d.v.s. ca 100 Nm<sup>3</sup> metan/kg VS, vilket motsvarar ca 24 Nm<sup>3</sup> metan/kg gödsel. Wennerberg och Dahlander (2014) citerar flera referenser som menar att förbehandlad halm kan generera stora mängder biogas, speciellt vid samrötning med andra substrat, även om variationen i metanpotential varierar starkt mellan olika referenser.

Wennerberg och Dahlander (2014) beskriver att halm har en stor potential som substrat vid biogasproduktion. Många olika förbehandlingsmetoder för halm har prövats och de flesta har visat sig vara för dyra för att kunna motiveras vid biogasproduktion. Problemet är att halm har låg energidensitet och att den är dyr att hantera och transportera, men om halmen pelleteras fås en produkt med hög densitet, som ger billigare transport och hantering. Sönderdelningen av halmen vid pelletsproduktionen leder dessutom till snabbare rötning som bättre motsvarar övriga substrats nedbrytning i biogasprocessen.

Wennerberg och Dahlander (2014) beskriver att om halmpellets används som strömedel till djur och därefter som biogassubstrat så bör följande fördelar erhållas:

- Den sönderdelade och torra halmen i pelletsen är ett utmärkt strömedel
- Värmebehandlingen vid pelleteringen hygieniserar halmen
- Pelleteringen underlättar biogasproduktionen genom den fina strukturen i halmen
- Kväverik gödsel, från t.ex. fjäderfå, får med halmpellets en högre kol/kväve-kvot och fungerar bättre vid biogasproduktion jämfört med torv och träspån som strömedel

## Våtextrudering av tvättad halm samt tillsats av NaOH

Lehmann (Jocketa, Tyskland) har utvecklat ett system för förbehandling av halm, naturmarksvegetation, etc. inför biogasproduktion. Först "tvättas" råvaran i kallt (ca 10 °C) eller varmt vatten (ca 70 °C) där sand, grus och andra föroreningar avskiljs, med eller utan tillsats av en bas, t.ex. NaOH. Råvaran tvättas under 1-3 timmar beroende på vattentemperaturen. Därefter sönderdelas materialet mekaniskt via s.k. Bioextrusion®. Extrudern är anpassad för råvaror med varierande TS-halter, från ca 15 % TS – ca 90 % TS. Under extruderingen uppvärms materialet av friktionen, vilket medför att förbehandlingsmetoden kan beskrivas som en termo-mekanisk metod. Halm som extruderats uppges i kontinuerliga röttningsförsök ha gett upp till 20 % mer metangas jämfört med ej extruderad halm (Lehmann och Eberhard, 2012; Lehmann, 2014).

## Ammoniakförbehandling av halm

I projektet "Ammoniakförbehandling av halm och våtmarksmassa för biogasproduktion", som genomförs av BioMil i Lund, har halm och halmliknande substrat, ammoniakförbehandlats innan rötning. Syftet var att undersöka huruvida ammoniakförbehandling kan underlätta nedbrytningen av halm och leda till ökat metanutbyte. Halmen som användes i försöken var vete-halm. Ammoniakförbehandlingen genomfördes med en så kallad spjutinjektion och halmen som användes i försöken doserades med 3 % ammoniak. Tekniken spjutinjektion valdes på grund av att inga krav ställs på substratets fukthalt samt att det är en vedertagen metod i lantbruket som används för att öka fodervärdet på halmen. Genom satsvisa utröttningsförsök uppmättes metanpotentialen i obehandlad och ammoniakbehandlad halm till 305-320 respektive 248-257 L CH<sub>4</sub>/kg TS. Angivna intervall anges bero på att inverkan av olika ympar undersöktes i de satsvisa försöken. I de kontinuerliga försök som genomfördes senare märktes dock ingen skillnad mellan obehandlad och ammoniakbehandlad halm. I de kontinuerliga försöken var den hydrauliska uppehållstiden ca 26 dygn och den organiska belastningen var ungefär 3,8 g TS/L och dygn. Av tillförd mängd TS utgjordes ca 25 % av halm, resterande mängd utgjordes av svingödsel. I de kontinuerliga försöken uppmättes ett sammanlagt metanutbyte på ca 220 L CH<sub>4</sub>/kg TS med både obehandlad och ammoniakbehandlad halm (Bigelius, 2014).

## Extrudering av vallensilage

Biogasbolaget i Karlskoga, där även Örebro och Kumla kommuner är delägare, har under 2014 startat en biogasanläggning med en planerad produktion av ca 5 miljoner m<sup>3</sup> metangas per år, huvudsakligen baserat på matavfall, flytgödsel och vall. Biogasbolaget (f.d. Karlskoga biogas) har fått investeringsstöd från Energimyndigheten för att installera och utvärdera en bioextruder från Lehmann i Tyskland för förbehandling av vallensilage. Enligt tillverkaren (Lehmann, 2014) åtgår 6-14 kWh/ton material som håller 25-30 % TS-halt och enligt Hjort et al. (2011) åtgår 4-10 kWh/ton material vid TS-halter mellan 20 och 91 %.

Erfarenheterna så här långt tyder på att extrudering av vallensilage har en positiv påverkan på gasproduktionen, men hösten 2014 är biogasanläggningen fortfarande i uppstartsfasen. Vissa problem har funnits med att få en jämn inmatning av vallensilage till extrudern. Kvaliteten på ensilaget vad gäller TS-halt och snittlängd är avgörande för stabil drift. Dessa problem har inte varit direkt kopplade till själva extruderingens funktion, utan mer handlat om att få till en jämn och stabil inmatning till extrudern (Styhr, 2014).

## Inmatningsteknik för vallensilage

SBI (Swedish Biogas International) har flera biogasanläggningar helt eller delvis baserade på grödor. I deras anläggning i Örebro matas ensilerad vall in i röt-kammaren med följande teknik. Ensilaget och ev. andra fasta råvarorna blandas i en fodermixervagn innan det tippas i mottagningsfickan. Syftet med mixervagnen är att få en homogen och lättinmatad vara. Ensilaget skruvas sedan från mottagningsfickan till en blandningstank på ca 5 m<sup>3</sup>. Ensilaget blandas med vätska från röt-kammaren i blandningstanken där omrörning sker. Blandningen av vallensilage och röt-vätska pumpas via en slangpump in röt-kammaren. SBI har även en biogasanläggning i Lidköping med liknade inmatningssystem. Biogasanläggningen i Jordberga har ett mer avancerat inmatningssystem där ensilaget sönderdelas med en kvarn från BHS-Biogriinder, levererad av Lobe, innan det matas in i röt-kammaren (Sjösvärd, 2014).

## Mekanisk sönderdelning av kasserat och överblivet ensilage

JTI har i samarbete med Agroväst studerat om torr mekanisk sönderdelning av långsträigt ensilage kan sönderdelas så att strå-längden blir max 1 cm på 90 % av materialet. De metoder som undersöktes var bland annat fälthack, kross samt exakthack. Ingen av metoderna nådde målet 1 cm, men med kross och exakthack sönderdelades ca 75 % av ensilaget till 4,5 cm eller kortare (Gunnarsson et al., 2014)

## Mellangrödor finfördelas i kvarn före inmatning

SBI Jordberga Biogasanläggning, utanför Trelleborg, har i samarbete med SB3 under hösten 2014 skördat mellangrödor, huvudsakligen oljerättika och vitsenap, på ca 15 ha vid St. Markie, Kronoslätt och Lilla Isie. Två principiellt olika skördesystem testades: 1) *strängläggning* med 9 m rotorslättermaskin och därefter *uppsamling* av mellangrödan med en självlastarvagn alt. en exakthack som var utrustad med pickup och 2) *direktskörd* med exakthack utrustad med majsbord alt. helsädesbord. Här fungerade strängläggning i kombination med självlastarvagn resp. direktskörd med majsbord på exakthacken någorlunda bra (Olanders, 2014).

Mellangrödorna matades in färska i biogasanläggningen via det ordinarie inmatningssystemet för majs- och helsädesensilage (Sjösvärd, 2014).

## 5. Diskussion

Syftet med denna förstudie är att beskriva ett upplägg som möjliggör jämförande utvärdering av förbehandlingsmetoder för lignocellulosarika biogasråvaror, och då specifikt peka ut nyckelaspekter som är viktiga att ta hänsyn till i en sådan utvärdering.

### 5.1 Valet av råvara

Vi har i denna förstudie velat peka på den stora drivmedelspotential som finns tillgänglig i form av lignocellulosarika restprodukter om de görs tillgängliga för biogasproduktion, kring 10 TWh med de exempelråvaror som redovisas i kapitel 2, vilket är 10 gånger mer än den biogas som används som fordonsgas idag.

Man kan här dra paralleller till den forskning och utveckling som skett för att göra lignocellulosarik råvara tillgänglig för etanolproduktion. Där har i både det amerikanska CAFI-projektet och i det svenska etanolprogrammet stora satsningar gjorts för att utveckla teknik för förbehandling av lignocellulosarik råvara för bioetanolproduktion. Drivkraften är att tekniskt och ekonomiskt möjliggöra etanolproduktion från s.k. andra generationens råvaror som kan ersätta de råvaror som idag är ekonomiskt gångbara, som t.ex. majs, sockerrör och spannmål. På samma sätt är det på biogassidan viktigt att ta fram tekniska lösningar som ger en bättre kostnadseffektivitet i att använda lignocellulosarika restprodukter.

Eftersom en viss förbehandlingsmetod optimeras för en specifik råvara är det dock en viktig del i en jämförande utvärdering av förbehandlingsmetoder att på ett tidigt stadium bestämma vilka råvaror som är relevanta. Förbehandling är alltså inte möjligt att bedöma generellt utan koppling till en viss specifik råvara. Det är därför viktigt att med ett samlat grepp identifiera och kvantifiera möjliga råvarualternativ, och tidigt integrera aspekter som energipotential och hållbarhetsaspekter kopplat till uttag och användning av själva råvaran. En annan viktig aspekt när olika förbehandlingsmetoder ska jämföras med varandra är att samma sats av råvaran används i varje serie jämförelser.

### 5.2 Harmonisering av mät- och beräkningsmetodik

Det finns mycket intressanta fakta att hämta från redan genomförda eller pågående förbehandlingsstudier, men det saknas ett samlat grepp i frågan, och finns samtidigt mycket att vinna för alla aktörer om projekt genomförs på ett sätt som möjliggör jämförelser. För att kunna ta ett samlat grepp är harmoniserade metoder för teknoekonomiska beräkningar ett viktigt steg. Viktigt är även att harmonisera hur insatser av material, tillsatser och energi ska mätas. Det är även viktigt att förhålla sig till uppskalningseffekter i det fall metoder tidigt i utvecklingskedjan ska bedömas. Andra aspekter som sällan nämns i jämförande utvärderingar är bestämningar av massflöden, vilket är viktigt i de fall förbehandling kan ge upphov till massförluster, och statistiska utvärderingar av experimentellt uppmätta storheter. Det senare är mycket viktigt om man vill kunna dra slutsatser om skillnader mellan olika metoder.



För kemisk karaktärisering av en råvara före och efter förbehandling används idag också en mängd olika metoder, vilket gör jämförelser svåra. Här vill vi understryka vikten av att tillämpa de befintliga metoderna för fiberanalys, där man bestämmer kolhydrater och lignin vilket är huvudkomponenterna i de aktuella råvarorna. Detta tillsammans med teoretiska beräkningar kan ge taket för metanutbyte för en viss råvara. Metanutbytesbestämning i BMP-test är något som nästan alltid förekommer i detta sammanhang. Detta är intressant att bibehålla, och kan vara särskilt intressant om man vill publicera vetenskapligt, men det är här viktigt med förståelse för det resultat som presenteras och vad det kan användas till.

### 5.3 Urval av relevant förbehandlingsmetodik

Det finns en stor mängd principer för förbehandling som kan vara intressanta, och ännu fler tekniska tillämpningar och utrustningsleverantörer. Här är det mycket viktigt att ett urval av relevant teknik sker baserat på de råvaror som definierats som intressanta. Detta är speciellt viktigt för råvarukategorier som kanske inte är så homogena, som t.ex. gräs av olika arter som vuxit på olika marktyper och skördats vid olika tidpunkter. Här finns också mycket att vinna med ett samlat grepp och nationell samordning där branschens intressen tas tillvara, och utvecklingsstadium och utvecklingspotential för olika metoder bedöms.

### 5.4 Rangordning av förbehandlingsmetoder

Att uppmäta och beräkna aspekter som kostnader, energiåtgång, tillsatser, emissioner etc. för olika förbehandlingsmetoder är ett viktigt steg som kan användas för att komma en bit på vägen i en jämförande utvärdering (Avfall Sverige, 2012; Montgomery och Bochmann, 2014). Men hur långt kan man komma utan att ta ställning till den utmanande frågan om hur mycket en viss förbehandlingsmetod skulle påverka metanutbytet för en specifik råvara i en fullskalig anläggning? En viss energiinsats eller kostnad som anges som låg för en förbehandlingsmetod relativt en annan metod kan inte fullständigt bedömas om man inte samtidigt vet om förbehandlingen ger en obetydlig eller stor ökning av metanutbytet för den behandlade råvaran. En "baklängesräkning" som den som presenteras av Carlsson et al. (2013) är här intressant, där de insatser som krävs för en viss förbehandlingsmetod räknas om till hur mycket förbehandlingen måste öka metanutbytet för att vara gångbar ut energi- och klimatperspektiv. Harmoniserad metodik för karaktärisering av råvaran kan här bidra med viktig information om beräknade eller laborativt framtagna maximala metanutbyten, vilket kan bidra med viktiga delsteg i bedömning och rangordning av olika förbehandlingsmetoder för en specifik råvara utan fullständiga tekoekonomiska utvärderingar kopplat till en specifik biogasanläggning.

### 5.5 Utvärdering i fullskalig anläggning

Att effekten av förbehandling måste utvärderas i fullskala (Montgomery och Bochmann, 2014) kan vara en vettig rekommendation. Men hur skulle ett sådant tillvägagångssätt kunna användas för jämförande utvärdering av olika förbehandlingsmetoder? Den dagliga variationen i råvarutillförsel i en samrötningsanläggning ger en hög bakgrundsvariation i metanutbyte. Om förbehandlad råvara utgör en mindre del av en råvarumix i en samrötningsanläggning, vilket är ett sannolikt scenario i Sverige, är det osannolikt att man skulle kunna fastslå skillnader i metanutbyte kopplat till olika råvaror, och olika

förbehandlingsmetoder. Det är därför inte rimligt att genomföra jämförande utvärdering ända ut i fullskaliga anläggningar. Ett omfattande jämförande program med utvärdering av ett antal förbehandlingsmetoder för ett antal väl karakteriserade råvaror kan dock ge det underlag som krävs för att anläggningsägare ska kunna hitta ett relevant urval av metoder för just de råvaror och den anläggningsutformning som är aktuell. Det är alltså viktigt att utvärdera effekten av förbehandling i fullskala, men jämförelsen mellan metoder rekommenderar vi sker i forsknings- och utvecklingsled, där ett stort antal råvaror och metoder kan utvärderas till rimliga kostnader. Tester i fullskaliga anläggningar får istället karaktären av demonstration för en eller några få tekniker som i ett första urval bedömts som lämpliga.



## 6. Förslag till FUD-program för lignocellulosarika råvaror till biogas

Vi vill avsluta med att presentera ett förslag på upplägg för en svensk satsning som innehåller forskning, utveckling och demonstration kring förbehandlingsmetoder för lignocellulosarika råvaror/substrat inför biogasproduktion. Den typ av forskningssamarbete som skedde i det amerikanska CAFI-projektet kräver samordning och långsiktig finansiering, och inget likande förekommer idag i Sverige. Författarnas rekommendation är att frågan hanteras inom ett samordnat program som finansieras både genom statliga medel och med medfinansiering av relevanta aktörer, och arbetet med denna förstudie har lett till att vi identifierat nyckelaspekter som vi tycker är viktiga vid jämförande utvärdering. Vi vill därför avsluta med ett konkret förslag om hur ett jämförande utvärderingsprogram skulle kunna läggas upp, med avstamp i de nyckelaspekter som identifierats i förstudien. Det tillvägagångssätt vi vill rekommendera är en utvärdering som sker i två faser, där Fas I är ett övergripande utvärderingsprogram som är mer forsknings- och utvecklingsinriktat. Fas II genomförs sedan som "case by case"-demonstrationer för specifika biogasanläggningar.

### 6.1 Fas I: övergripande utvärderingsprogram

Fas I i den jämförande utvärderingen innehåller de delmoment som illustreras i Figur 8. Denna fas genomförs med bas i forskning och förslagsvis i huvudsak genom statlig finansiering. Det är dock viktigt att redan här ha identifierat en referensgrupp av intressenter där branschen aktivt medverkar och definierar vilka metoder som är intressanta att inkludera. Viktiga aspekter i Fas I är att skapa en bred kunskapsbas, ta fram faktaunderlag av god vetenskaplig kvalitet och utbilda deltagande aktörer. Utkomsten av Fas I ska sedan utgöra underlag för val av metoder i Fas II.

#### 1. Inventering av råvarubas

För ett antal relevanta råvaror utvärderas *mängdpotential* och *hållbarhetsaspekter* kopplat till användning av denna råvara för biogasproduktion jämfört med nuvarande användning. Även regler och befintliga eller potentiella styrmedel kopplat till uttaget och användningen för just biogasproduktion utvärderas. Med detta som bas väljs ett antal relevanta råvaror ut för vidare studier. Aspekter som är viktiga vid val av insamlings-, lagrings- och logistikkedjor identifieras.

#### 2. Kemisk karaktärisering

Samma omgång råvara ska användas för alla förbehandlingar som ingår i programmet. För de utvalda råvarorna genomförs kemisk karaktärisering centralt med harmoniserad metodik som innehåller fördjupad analys av ingående komponenter som lignin, kolhydrater mm.

#### 3. Inventering av förbehandlingsmetoder

Här väljs de metoder ut som ska utvärderas inom programmet baserat på valda råvaror, branschens intresse samt utvecklingsstadium och utvecklingspotential för olika metoder.

#### 4. Förbehandling

Förbehandling genomförs med ett antal metoder anpassade till specifika råvaror. Detta moment sker med samfinansiering från intressenter, som kan representera t.ex. biogasanläggningsägare,

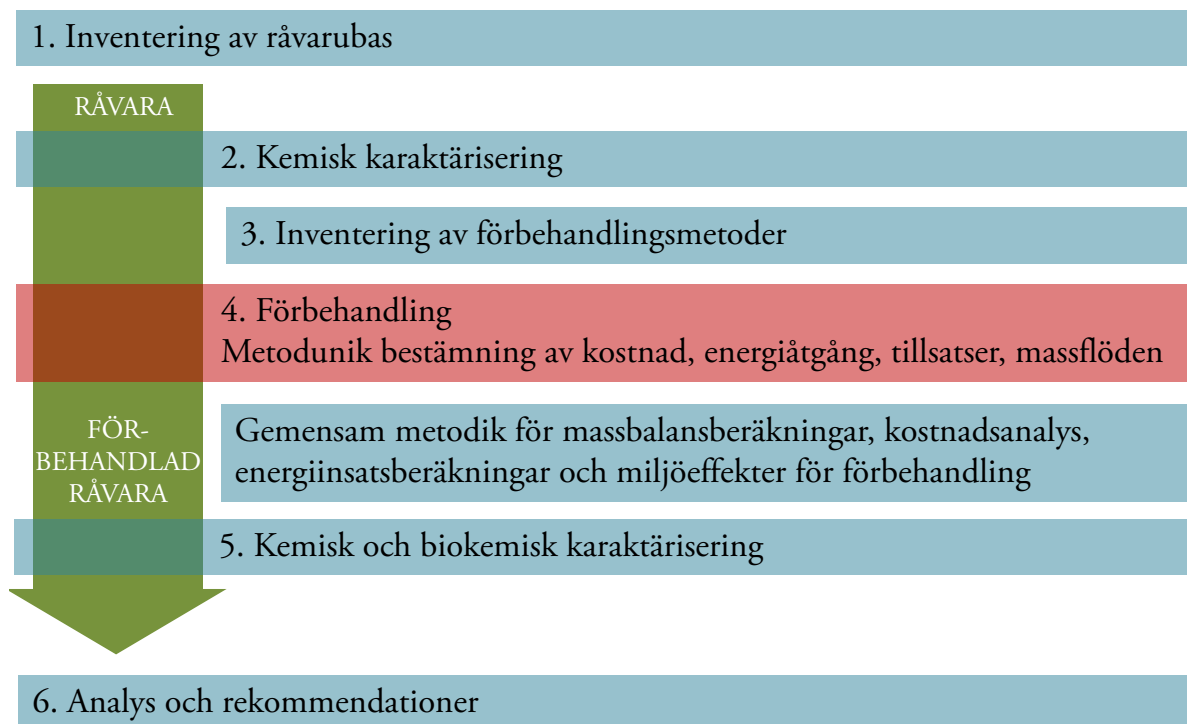
råvaruleverantörer och företag som arbetar med kommersialisering av förbehandlingsmetoder. Metodunika bestämningar av kostnader, energiåtgång, tillsatser, massflöden mm genomförs med gemensam metodik för massbalansberäkningar, kostnadsanalys, energiinsatsberäkningar och miljöeffekter.

#### 5. Kemisk och biokemisk karaktärisering

Analys av den förbehandlade råvaran görs centralt med harmoniserade metoder. Här ingår även satsvisa utrotningsförsök (BMP-tester) för att bestämma metanpotential för både förbehandlad och oförbehandlad råvara. Parametrar som påverkar de fysikaliska egenskaperna såsom vattenhalt, partikelstorlek, risk för föroreningar, volymvikt mm bestäms.

#### 6. Analys och rekommendationer

Utan att genomföra anläggningsspecifika utvärderingar kan man här sammanställa grundläggande fakta kring varje kombination av specifik råvara och förbehandlingsmetod som är framtagen med jämförbar metodik. De metanutbytesbestämningar som sker här i BMP-tester används inte för att spekulera i metanutbyten i fullskala, och utvärderingen av Fas I sker inte baserat på de metanutbytesresultat som erhålls. Istället används kemisk karaktärisering för att ta fram viktiga nyckeltal för möjliga metanutbytesnivåer kopplat till varje råvara. Fakta för individuella förbehandlingsmetoder gällande energiinsatser, kostnader, emissioner mm ska sedan användas för att sälla fram metoder som är relevanta att gå vidare med för specifika fullskaliga biogasanläggningar.



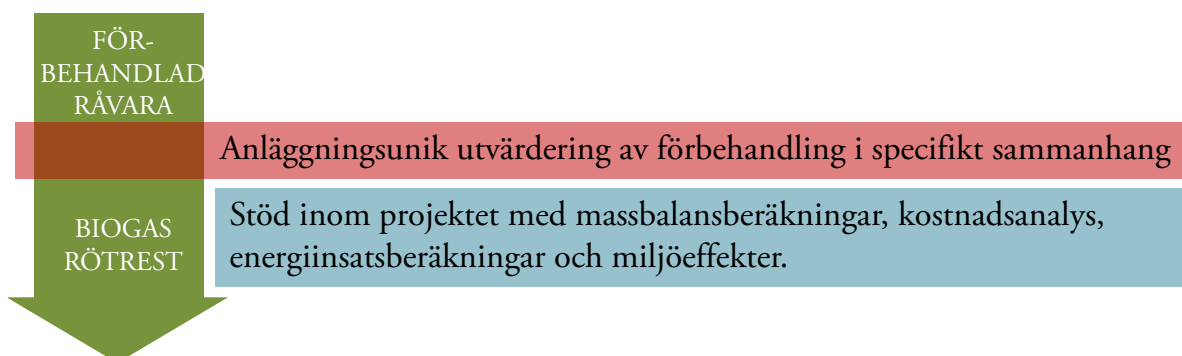
Figur 8. Fas I. Delmoment i ett övergripande utvärderingsprogram.

## 6.2 Fas II: anläggningsunik utvärdering

Fördjupade teknoekonomiska och miljömässiga utvärderingar kan genomföras först i Fas II, och sker genom så kallade "case by case" studier i demonstrationsprojekt kopplade till specifika biogasanläggningar (Figur 9). Finansieringen sker förslagsvis här i huvudsak genom intressenter. Målet är utvärdering i fullskalig anläggning, men här kan även laborativa studier eller pilotstudier ingå, men då kopplade till råvarumix och driftsätt för en specifik anläggning. Systemgränser utformas av intressenter från fall till fall med stöd inom det samordnande projektet. Förbehandlingen utvärderas först nu som integrerad del i en specifik process, och aspekter som processintegrering, nyttjande av spillvärme, hygieniseringseffekter mm kan utvärderas till fullo. Först i denna fas blir det därför relevant med fördjupade teknoekonomiska utvärderingar.

Forskare knutna till det övergripande utvärderingsprogrammet medverkar för att diskutera och harmonisera metodik. Utvärdering av hanteringskedjor för råvaran (insamling, lagring, transport, miljö- och klimatnytta, kostnader mm) sker också med stöd inom projektet.

Vissa kategorier av mätdata som är kopplade specifikt till råvaran och förbehandlingsmetodens prestanda ska här göras offentliga och publiceras inom programmet. Andra anläggningsspecifika data, t.ex. fakta som är kopplade till driftskostnader, ska dock kunna sekretessbeläggas så att inte anläggningsintegritet utgör ett hinder för deltagande.



Figur 9. Fas II. Anläggningsunik utvärdering.



## 7. Referenser

- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P. & van Lier, J. B. (2009) Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology* 59 (5): 927-934.
- Angelidaki, I. & Sanders, W. (2004) Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 3(2), 117-129.
- APHA (2005) 2540 G. Total, fixed, and volatile solids in solid and semisolid samples. In: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st edition. Ed: Eaton AD, Clesceri LS, Rice EW, Greenberg AE, Franson MA, Baltimore MD Washington: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation.
- Avfall Sverige (2102) Biogas from lignocellulosic biomass. Rapport U2012:07. Avfall Sverige, Malmö.
- Bauer, A., Lizasoain, J., Theuretzbacher, F., Agger, J. W. et al. (2014). Steam explosion pretreatment for enhancing biogas production of late harvested hay. *Bioresource Technology* 166: 403-410.
- Bigelius, J. (2014) BioMil AB. Personlig kommunikation december 2014
- Bougrier C., Delgenes J. P. & Carrère H. (2006) Combination of thermal treatments and anaerobic digestion to reduce sewage sludge quantity and improve biogas yield. *Process Safety and Environmental Protection*, 84:280-284.
- Buswell, A. M. & Hatfield, W. D. (1936) Anaerobic fermentations, Bulletin No 32, State Illinois, Department of Registration and Education.
- Carlsson, M., Holmström, D., Lagerkvist, A. & Bisailon, M. (2013) Förbehandling av biogassubstrat i systemanalys. Rapport Projektnummer WR-49. Waste refinery, SP Sveriges tekniska forskningsinstitut, Borås.
- Carlsson, M., Lagerkvist, A., Morgan-Sagastume, F. (2012) The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: A review. *Waste Management* 32: 1634–1650.
- Carlsson, M. & Schnürer, A. (2011) Handbok Metanpotential; Rapport SGC 237, Svenskt Gastekniskt Center, Malmö.
- Carlsson, M. & Uldal, M. (2009) Substrathandbok för biogasproduktion. Rapport SGC 200. Svenskt Gastekniskt Center, Malmö.
- Cherney, D. J. R. (2000) Characterization of forages by chemical analysis. In: Forage Evaluation in Ruminant Nutrition. Ed. Givens, D. I., Owen, E., Axford, R. F. E., Omed, H. M., CABI Publishing, Oxon UK.
- Cirne, D. G. Paloumet, X., Björnsson, L., Alves, M. M. & Mattiasson, B. (2007) Anaerobic digestion of lipid-rich waste—Effects of lipid concentration. *Renewable Energy* 32: 965-975.
- DIN (Deutsches Institut für Normung) (1986) DIN 38414-8, German Standard Methods for the Examination of Water, Waste Water and Sludge; Sludge and sediments (group S); determination of the amenability to anaerobic digestion (S8). Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin



- DOE/USDA (2005) Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: The technical feasibility of a billion-ton annual supply. Rapport, The U.S. Department of Energy (DOE) and the U.S. Department of Agriculture (USDA).
- ECN (2014) Databasen Phyllis2: Biomass and waste, <https://www.ecn.nl/phyllis2>. Energy research Centre of the Netherlands. Data hämtade december 2014.
- Egnell, G. & Börjesson, P. (2012) Theoretical versus market available supply of biomass for energy from long- rotation forestry and agriculture – Swedish experiences. IEA Bioenergy: task 43: 2012:02.
- Elander, R. T., Dale, B. E., Holtzapple, M., Landisch, M. R., Lee, Y. Y., Mitchinson, C., Saddler, J. N. & Wyman, C. E. (2009) Summary of findings from the Biomass refining consortium for applied fundamentals and innovation (CAFI): corn stover pretreatment. *Cellulose* 16: 649-659.
- Emmerman, A. & Karlsson, A-M. (2010) Miljöersättningen odling av fånggröda. Rapport 2010:28, Jordbruksverket, Jönköping.
- Energimyndigheten (2011) Statens energimyndighets föreskrifter om hållbarhetskriterier för biodrivmedel och flytande biobränslen. STEMFS 2011:2. Statens Energimyndighet, Eskilstuna, Stockholm
- Energimyndigheten (2014) Produktion och användning av biogas och rötresten år 2013. Rapport ES 2014:xx. Statens energimyndighet, Eskilstuna.
- Eriksson, H. (2014) Eon AB. Personlig kommunikation december 2014.
- Eurofins (2014) <http://www.eurofinsus.com/food-testing/testing-services/nutritional/proximate-testing/>. Fakta hämtade december 2014.
- Galbe, M., & Zacchi, G. (2002) A review of the production of ethanol from softwood. *Applied microbiology and biotechnology*, 59(6), 618-628.
- Galbe, M., & Zacchi, G. (2007) Pretreatment of lignocellulosic materials for efficient bioethanol production. In *Biofuels* (pp. 41-65). Springer Berlin Heidelberg.
- Gunnarsson, C., Gustavsson, A., Norberg, I. & Olsson, J. (2014) Kasserat och överblivet ensilage, en outnyttjad resurs med fokus på biogas, Rapporter lantbruk och industri Nr 422, JTI, Uppsala.
- Gunnarsson, M. (2014) Gödslade eller ogödslade mellangrödor som biogassubstrat? Kandidatarbete i trädgårdsvetenskap, SLU, Institutionen för biosystem och teknologi, Alnarp.
- Guwy, A. J. (2004) Equipments used for testing anaerobic biodegradability and activity. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 3, 131-139.
- Hahn-Hägerdal, B., Galbe, M., Gorwa-Grauslund, M. F., Lidén, G., & Zacchi, G. (2006) Bioethanol—the fuel of tomorrow from the residues of today. *Trends in biotechnology*, 24(12), 549-556.
- Hahn-Hägerdal, B., Karhumaa, K., Fonseca, C., Spencer-Martins, I., & Gorwa-Grauslund, M. F. (2007) Towards industrial pentose-fermenting yeast strains. *Applied microbiology and biotechnology*, 74(5), 937-953.
- Haldén, P. (2011) Biologisk mångfald på skyddszoner. Utvärdering av skyddszoner i slättlandskapet. Rapport 2011:6, Jordbruksverket, Jönköping.
- Hames, B., Scarlata, C., & Sluiter, A. (2008) Determination of protein content in biomass. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA.

- Hansen, T. L., Schmidt, J. E., Angelidaki, I., Marca, E., Jansen, J. I. C., Mosbæk, H. & Christensen, T. H. (2004) Method for determination of methane potentials of solid organic waste. *Waste Management*, 24, 393-400.
- Hjorth M, Gränitz K, Adamsen A.P.S, Möller H.B (2011) Extrusion as a pre-treatment to increase biogas production. *Bioresource Technology* 102, 4989-4994.
- Huida, L., Vaatainen, H. & Lampila, M. (1986) Comparison of dry-matter contents in grass silages as determined by oven drying and gas-chromatographic water analysis. *Annales Agriculturae Fenniae*. 25:215-230.
- Johnsson, B. (2008) Kartläggning av mark som tagits ur produktion, Rapport 2008:7m Jordbruksverket, Jönköping.
- Kirsten, W. (1953) High Temperature Furnaces for Organic Elementary Analysis. *Anal. Chem.* 25 (5): 805-806
- Koch, K., Lübken, M., Gehring, T., Wichern, M. & Horn, H. (2010) Biogas from grass silage – Measurements and modeling with ADM1. *Bioresource Technology* 101: 8158–8165
- Kreuger, E., Sipos, B., Zacchi, G, Svensson, S-E. & Björnsson, L. (2011a) Bioconversion of industrial hemp to methane and ethanol; the benefits of steam pretreatment and co-production *Bioresource Technology* 102: 3457 – 3465.
- Kreuger, E., Nges, I. A. & Björnsson, L. (2011b) Ensiling of crops for biogas production: Effects on methane yield and total solids determination. *Biotechnology for Biofuels* 4:44
- Landia (2014) <http://www.landia.dk/>. Information hämtad november 2014.
- Lantz, M. & Börjesson, P. (2010) Kostnader och potential för biogas i Sverige. Reviderad version, maj 2010. Energimyndigheten rapport ER2010:08, Energimyndigheten, Eskilstuna.
- Larsson, S., Palmqvist, E., Hahn-Hägerdal, B., Tengborg, C., Stenberg, K., Zacchi, G., & Nilvebrant, N. O. (1999) The generation of fermentation inhibitors during dilute acid hydrolysis of softwood. *Enzyme and Microbial Technology*, 24(3), 151-159.
- Lehmann, T. (2014) Lehmann Maschinenbau GmbH. Personlig kommunikation december 2014
- Lehmann, T. & Eberhard, F. (2012) Straw instead of field crops. *Landtechnik* 67 (5) 358-360.
- Lehman, T. & Friedrich, E. (2012) Lignocellulosic substrates – (not) a problem for biogas plants. *Landtechnik* 2: 114-117.
- Lesteur, M., Bellon-Maurel, V., Gonzalez, C., Latrille, E., Roger, J. M., Junqua, G. & Steyer, J. P. (2010) Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: A review. *Process Biochem.* 45, 431-440.
- Liu, J. G., Ma, Y. S., Chao, A. C. & Huang, C. L. (1999) BMP test on chemically pretreated sludge. *Bioresour. Technol.* 68, 187-192.
- Mattsson, J.E. (2006) Affärsutveckling – Närodlande stråbränslen till kraftvärmeverk. SLU-rapport 2006:8, Institutionen för landskaps- och trädgårdsteknik, SLU Alnarp.
- McEniry, J., Allen, E., Murphy, J. D. & O’Kiely, P. O. (2014) Grass for biogas production: The impact of silage fermentation characteristics on methane yield in two contrasting biomethane potential test systems. *Renewable Energy* 63: 524-530.
- Miller, J. N. & Miller, J. C. (2005) 2.11 Propagation of random errors. *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry*. Harlow, UK: Pearson Education Limited.
- Molinuevo-Salces, B., Larsen, S. U., Ahring, B. K. & Uellendahl, H. (2013a) Biogas production from catch crops: Evaluation of biomass yield and methane potential of catch crops in organic crop rotations. *Biomass & Bioenergy* 59:295-282

- Molinuevo-Salces, B., Ahring, B. K. & Uellendahl, H. (2013b). Factors influencing the feasibility of using catch crops for biogas production. In: Recovering (bio) resources for the world: Proceedings of the 13th World Congress on Anaerobic Digestion. IWA Publishing Company <http://www.redbiogas.cl/wordpress/wp-content/uploads/2013/07/IWA-11497.pdf>
- Montgomery, L. F. R. & Bochmann, G. (2014) Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production. Report IEA Bioenergy Task 37: Energy from biogas, International Energy Agency.
- Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y. Y., Holtzapple, M & Landisch, M. (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 96(6): 673-686.
- Møller, H. B. (2012) Halm till biogas, Presentation från Plantekongress 2012, Danmark. Tillgänglig på [https://www.landbrugsinfo.dk/Planteavl/Plantekongres/Sider/pl\\_plk\\_2012\\_resume\\_L6-2\\_Henrik\\_B\\_Moeller.pdf?download=true](https://www.landbrugsinfo.dk/Planteavl/Plantekongres/Sider/pl_plk_2012_resume_L6-2_Henrik_B_Moeller.pdf?download=true)
- Møller, H. B. & Möller Hansen, M., (2014) Briketter af halm og tørt graes kan fordoble gasproduktionen, FiB nr.47. <http://www.biopress.dk/PDF/briketter-af-halm-og-tort-graes-kan-fordoble-gasproduktionen>
- Muller, W. R., Frommert, I. & Jörg, R. (2004) Standardized methods for anaerobic biodegradability testing. *Environmental Science and Biotechnology* 3, 141-158.
- Naturvårdsverket (2014) Miljömålsportalens hemsida. <http://www.miljomal.se/> Utgiven av Naturvårdsverket, Stockholm. Data hämtade oktober 2014.
- Nges, I. A., Escobar, F., Fu, X. & Björnsson, L. (2012) Benefits of supplementing an industrial waste anaerobic digester with energy crops for increased biogas production *Waste Management* 32(1):53-59.
- Niemetz, N., Kettl, K.-H., Szerencsits, M. & Narodoslowsky, M. (2012) Economic and Ecological Potential Assessment for Biogas Production Based on Intercrops. Graz University of Technology, Austria.
- Nilsson, D. och Bernesson, S. (2009) Halm som bränsle - Del 1: Tillgångar och skördetidpunkter. Rapport 011, Institutionen för energi och teknik, SLU.
- Nilsson, D. och Rosenqvist, H. (2014) Costs and revenues of energy production on marginal agricultural land in Sweden. World Bioenergy 2014 Conference and Exhibition on Biomass for Energy, 3-5 juni 2014, Jönköping.
- Nilsson, D., Rosenqvist, H. och Bernesson, S. (2014) Odling av energigräs på marginell jordbruksmark- kostnader och miljöpåverkan. Slutrapport till SLF.
- Obernberger, I., & Thek, G. (2004) Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and bioenergy*, 27(6), 653-669.
- Olanders, J., SB3 AB, Personlig kommunikation oktober 2014.
- Olofsson, K., Bertilsson, M., & Lidén, G. (2008) A short review on SSF-an interesting process option for ethanol production from lignocellulosic feedstocks. *Biotechnol Biofuels*, 1(7), 1-14.
- Pond, W. G., Church, D. C., Pond, K. R. & Schoknecht, P. A. (2005). Basic Animal Nutrition & Feeding. 5th Edition, John Wiley & Sons. Hoboken, US.
- Porter, M. G., & Murray, R. S. (2001) The volatility of components of grass silage on oven drying and the inter-relationship between dry-matter content estimated by different analytical methods. *Grass and Forage Science*, 56(4), 405-411.

- Prade, T., Svensson, S.-E. & Englund, J. E. (2014) Ett samlingsprov eller många delprov när vall skall utvärderas som biogassubstrat? LTV-fakultetens faktablad 2014:5. Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap / Partnerskap Alnarp, Alnarp.
- Rabinowicz, E. (2010) Redovisning av uppdraget om halvtidsutvärdering av Landsbyggsprogram för Sverige 2007-2013. NL-fakulteten och Institutionen för ekonomi, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Raposo, F., De la Rubia, M. A., Fernández-Cegri, V. & Borja, R. (2011) Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: an overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renew Sustain Energy Rev.* 16(1):861–877.
- Risberg, K., Sun, L., Levén, L., Horn, S. J. & Schnürer, A. (2013) Biogas production from wheat straw and manure – Impact of pretreatment and process operating parameters. *Bioresource Technology* 149: 232-237.
- SCB (2008) Energianvändning inom jordbruket 2007. Statistiska centralbyrån, Stockholm.
- SCB (2013a) Odlingsåtgärder i jordbruket 2012. Träda, slättervall, vårkorn, havre, höstspannmål samt användning av halm och blast. Statistiska meddelanden MI 30 SM 1302, Statistiska centralbyrån, Stockholm.
- SCB (2013b) Jordbruksmarkens användning 2012. Statistiska meddelanden JO 10 SM 1301, Jordbruksverket, Jönköping.
- SCB (2014) Jordbruksmarkens användning 2014. Statistiska meddelanden JO 10 SM 1402, Jordbruksverket, Jönköping.
- SJV (2014) Förgröningsstöd 2015. <http://www.jordbruksverket.se/amnesomraden/stod/jordbrukarstod2015/forgroningsstod2015.4.53b6e8e714255ed1fcc726f.html>
- Sjösvärd, L. (2014) Swedish Biogas International AB. Personlig kommunikation december 2014.
- Sluiter, A. & Sluiter, J. (2005) Determination of starch in solid biomass samples by HPLC. NREL Laboratory Analytical Procedure (LAP) 9360.
- Sluiter, A., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., & Templeton, D. (2005) Determination of extractives in biomass. NREL Laboratory Analytical Procedure (LAP), 1617.
- Sluiter, A., Hames, B., Hyman, D., Payne, C., Ruiz, R., Scarlata, C. & Wolfe, J. (2008a) Determination of total solids in biomass and total dissolved solids in liquid process samples. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, NREL Technical Report No. NREL/TP-510-42621.
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., & Templeton, D. (2008b) Determination of ash in biomass. National Renewable Energy Laboratory, 1-5.
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., & Crocker, D. (2008c) Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. Laboratory analytical procedure.
- SPCR (2013) Certifieringsregler för biogödsel. SPCR 120. SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås.
- Styhr, F. (2014) Biogasbolaget AB, personlig kommunikation december 2014.
- Symons, G.E. & Buswell, A. M. (1933) The methane fermentation of carbohydrates. *Journal of the American Chemical Society* 55, 2028-2036.
- Taherzadeh, M. J., & Karimi, K. (2008) Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. *International journal of molecular sciences*, 9(9), 1621-1651.

- Tamaki, Y. & Mazza, G. (2010) Measurement of structural carbohydrates, lignins, and micro-components of straw and shives: Effects of extractives, particle size and crop species. *Industrial Crops and Products* 31: 534–541.
- Tillman, D. A. (1991) The combustion of solid fuels and wastes. Academic press, San Diego, CA.
- Vahlberg, C., Nordell, E., Wiberg, L. & Schnürer, A. (2013) Method for correction of VFA loss in determination of dry matter in biomass (Metod för korrigering av VFA-förlust vid bestämning av torrhalt i biomassa); SGC Rapport 2013:273.
- Van Soest, J. P. & Wine, R. H. (1967) Use of detergents in analysis of fibrous feeds - Determination of plant cell wall constituents. *J Am Oil Chem Soc.* 50e5.
- Wennerberg, P. & Dahlander, C. (2013) Hästgödsel som en resurs. En förstudie om olika hanteringskedjor för hästgödsel. TecnoFarm Lantbruks & Miljöteknik, Källby.
- Wennerberg, P. & Dahlander, C. (2014) Halmpelletsens möjligheter att öka värdet och biogasutbytet i fastgödsel. Rapport nr 1:2014, Program: markvård, Agroväst.
- Wingren, A., Galbe, M., & Zacchi, G. (2003) Techno-Economic Evaluation of Producing Ethanol from Softwood: Comparison of SSF and SHF and Identification of Bottlenecks. *Biotechnology progress*, 19(4), 1109-1117.
- Wyman, C. E., Dale, B. E., Elander, R. T., Holtzapple, M. et al. (2009). Comparative sugar recovery and fermentation data following pretreatment of poplar wood by leading technologies. *Biotechnology Progress* 25(2): 333-339.
- Wyman, C. E. (2005) Integration of Leading Biomass Pretreatment Technologies with Enzymatic Digestion and Hydrolyzate Fermentation. Presentation från DOE OBP Pretreatment Core R&D Gate Review Meeting June 9-10, 2005. Hämtad september 2014 från <http://www.productstagegate.biomass.govtools.us>
- Yu, L., Bule, M., Ma, J., Zhao, Q., Frear, C. & Chen, S. (2014) Enhancing volatile fatty acid (VFA) and bio-methane production from lawn grass with pretreatment. *Bioresource Technology* 162: 243-249.
- Zacchi, G. & Galbe, M. (2007) Pretreatment of lignocellulosic materials for efficient bioethanol production. *In Biofuels* (pp. 41-65). Springer Berlin Heidelberg.



# Förbehandling av lignocellulosarika råvaror vid biogasproduktion

## Nyckelaspekter vid jämförande utvärdering

---

I biogassektorn finns ett ökande behov av och en ökande konkurrens om råvaror, och intresset för användning av odlingsrester, vall, mellangrödor mm som biogasaråvara ökar. Gemensamt för dessa råvaror är att de är fiberrika, dvs. har ett högt innehåll av lignocellulosa, vilket gör att det är osannolikt att de skulle användas för biogasproduktion utan förbehandling. Ett antal förbehandlingstekniker har introducerats på marknaden under senare år, och både företagsdrivna projekt och forskningsprojekt kring utvärdering av en eller flera förbehandlingstekniker pågår. Utvärderingarna läggs dock upp med olika utgångspunkter och metoder så att utkomster från olika projekt blir omöjliga att jämföra. Att utreda frågan om hur man utvärderar och jämför olika förbehandlingsmetoder ur teknik-, ekonomi-, energi- och miljöperspektiv är därför angeläget. Syftet med denna förstudie är att peka ut nyckelaspekter som är viktiga för att möjliggöra jämförande utvärdering av olika förbehandlingsmetoder samt att inspirera aktörer till att vilja medverka till att ta ett samlat grepp i frågan. Ett förslag till upplägg för vidare forskning, utveckling och demonstration presenteras. Arbetet med förstudien har finansierats genom Energimyndigheten.

