

Brug af halm i biogasanlæg



Rapport udarbejdet for Energistyrelsen

Forfattere: Lars Villadgaard Toft, Thomas Andersen Juul, SEGES Innovation
Søren Ugilt Larsen, Kurt Hjort-Gregersen, Teknologisk Institut
Henrik B Møller, Aarhus Universitet

Dato: 6-10-2022

SEGES
INNOVATION

 AARHUS
UNIVERSITY



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Projekt navn:

Brug af halm i biogasanlæg

Slutrapport 6. oktober 2022

Forfattere: Denne rapport er udarbejdet af et konsortium bestående af:

- SEGES Innovation (projektleder). Lars Villadsgaard Toft, Thomas Andersen Juul
- Teknologisk Institut. Søren Ugilt Larsen, Kurt Hjort-Gregersen
- Aarhus Universitet (AU). Henrik B Møller

Aarhus Universitet har bidraget til projektet som underleverandør for SEGES Innovation. Henrik B Møller, Institut for Bio og Kemiteknologi, (AU) har været ansvarlig for kapitel 7 og 8 samt bistået med kemiske analyser af afgasset biomasse. Morten Ambye-Jensen, Institut for Bio- og Kemiteknologi AU) har været fagfællebedømmer på kapitel 7 og 8. Kvalitetssikring er udført af Johanna Höglund, Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, AU.

Rekvirent: Energistyrelsen

Finansiering: Energistyrelsen har med reference til Aftale om nye krav til anvendelsen af energiafgrøder til produktion af biogas af 30. juni 2021 igangsat denne analyse af de tekniske muligheder for at erstatte energiafgrøder med halm og andre restprodukter fra landbruget

Sideantal inkl. alt: 81

1. Indhold

| | |
|---|----|
| 1. Indhold | 3 |
| 2. Sammendrag..... | 5 |
| 3. Baggrund..... | 7 |
| 4. Den danske biogasproduktion | 8 |
| 5. Kortlægning af alternative biomasser som erstatning for energiafgrøder | 10 |
| Halm som alternativ til energiafgrøder | 10 |
| Majs kontra halm | 11 |
| Mellem- og efterafgrøder som alternativ til energiafgrøder | 13 |
| Tørstofproduktion og praktiske forhold | 13 |
| Muligheder | 15 |
| Mellemafgrøder til biogas | 15 |
| Samlet høst af halm og efterafgrøder | 15 |
| Frøgræshalm som alternativ til energiafgrøder..... | 17 |
| Biomasse fra lavbundsjarde som alternativ til energiafgrøder | 18 |
| Restprodukter fra grøn bioraffinering som alternativ til energiafgrøder | 20 |
| Roetop som alternativ til energiafgrøder | 22 |
| Dybstrøelse og gylle som alternativ til energiafgrøder..... | 23 |
| Teoretiske potentialer for ressourcer til biogasproduktion | 23 |
| 6. Ensilering/samensilering af halm som forbehandlingsmetode..... | 25 |
| Ensilering som lagrings- og forbehandlingsmetode | 25 |
| Ensilering af ren halm eller samensilering af halm og anden biomasse | 25 |
| Ensilering af halm alene..... | 26 |
| Samensilering af halm og roetop | 27 |
| Samensilering af halm og efterafgrøde | 28 |
| Samensilering af halm og græs fra naturpleje eller efterslæt etc. | 29 |
| Samensilering af halm og madaffald | 30 |
| Omkostninger til ensilering | 31 |
| Konklusion og anbefalinger vedr. ensilering af halm..... | 31 |
| 7. Teknologier til forbehandling, efterbehandling og in-line behandling | 32 |
| Hammermølle neddeling (Hüningen) | 33 |
| Ekstrudering..... | 33 |
| Brikettering | 34 |
| Selektiv opholdstid (Genudråkning af fiber) | 34 |
| Biogrinder BHS | 37 |

| | |
|--|----|
| Disruptor | 39 |
| Nøgletal for udvalgte teknologier | 41 |
| 8. Effekt af opholdstid og viskositet | 42 |
| Viskositet | 44 |
| 9. Levering af halm til biogasanlæg | 46 |
| Leveringsmetoder | 46 |
| HD-baller | 47 |
| Pelleteret halm..... | 47 |
| Neddelt halm..... | 48 |
| 10. Økonomi ved brug af halm og andre råvarer | 49 |
| Transportomkostninger for halm | 49 |
| Råvarepriser for halm og andre faste biomasser..... | 51 |
| Økonomien ved at erstatte halm med energiafgrøder | 53 |
| 11. Gødningskvalitet af afgasset biomasse | 56 |
| Separation af afgasset biomasse | 57 |
| Betydningen af klorindhold i kartoffelproduktion..... | 59 |
| 12. Biogasanlæggenes erfaringer med brug af halm | 60 |
| Erfaringer med brug af halm..... | 61 |
| Halmpiller | 61 |
| Dybstrøelse..... | 62 |
| Løs (snittet) halm | 62 |
| Samensilering..... | 64 |
| Halmballer..... | 65 |
| Neddelings- og blandemetoder | 66 |
| Opholdstider, tørstof%, temperatur og restgaspotentiale..... | 67 |
| Afgasset biomasse | 68 |
| 13. Perspektiver og anbefalinger..... | 73 |
| 14. Referencer | 75 |
| Bilag 1: Interviewguide | 78 |
| Bilag 2: Råvareomkostninger ind i biogasanlæg..... | 79 |

2. Sammendrag

Energistyrelsen har igangsat denne analyse af de tekniske muligheder for at erstatte energiafgrøder med halm og andre restprodukter fra landbruget. Formålet med analysen er at kortlægge mulige veje til at øge anvendelsen af halm i biogasanlæggene samt at undersøge hvilke andre biomasser, der kunne være mulige alternativer til energiafgrøder.

Halm er den biomasse, som har det største potentiale til at øge produktionen af biogas, men der ligger fortsat tekniske og økonomiske udfordringer i at bruge større mængder halm som alternativ til de mere let-omsættelige energiafgrøder.

Foruden anvendelsen af halm fra forskellige kornarter er der også et stort potentiale ved anvendelse af frøgræshalm, som er et overskudsprodukt fra produktionen af frøgræs. Græs har i modsætning til korn en stor kulstofopbygning gennem rodnettet. Det er derfor ikke så kritisk for jordens kulstofpulje, når man bjærger frøgræshalm, som når man bjærger kornhalm, og typisk vil landmændene også være mindre forbeholdne overfor at fjerne frøgræshalm.

Rent teknisk er der på biogasanlæggene fundet en lang række forbehandlings- og indfødningssystemer, der gør biogasanlæggene i stand til at håndtere betydelige mængder af halm, f.eks. forskellige typer af fysisk neddeling og forbehandling eller ensilering. Halmanvendelsen varierer fra anlæg til anlæg alt efter hvilke andre råvarer, de har adgang til, samt anlæggets opbygning og eksisterende forbehandlings- og indfødningssystemer. For nogle anlæg vil det ikke være muligt at øge anvendelsen af halm uden betydelige ændringer på anlægget.

Ensilering af halm er en relevant metode til at lagre fugtig halm med mindst muligt energitab, og hvor der samtidig kan opnås forbehandlingseffekter i form af mindre tendens til flydelagsdannelse og et øget metanpotentiale. Ensilering kan derfor udgøre et alternativ eller supplement til mekanisk forbehandling af halm. Halm kan ensileres i ren bestand ved tilstrækkelig opfugtning, og metanpotentialet vurderes i bedste fald at kunne øges med op til 20% pga. ensileringen men i praksis nok i størrelsesordenen 5-10%. Våd halm kan enten ensileres i stak med snittet halm eller i halmballer, der tildækkes. Der synes at være betydelige perspektiver i ensilering af våd halm som kombineret lagring og forbehandling, men den praktiske håndtering skal optimeres.

Halm kan også samensileres med forskellige typer af grøn biomasse. Forbehandlingseffekten af ensileringen varierer, men det vurderes, at metanpotentialet realistisk vil kunne øges med 5-15% i praksis. Ved samensilering med halm vil saftafløb fra den grønne biomasse kunne forhindres, hvis der er minimum 30% tørstof i biomasseblandingen. For samensilering af halm og efterafgrøde er der særlige perspektiver, idet de to biomasser under nogle forhold vil kunne høstes samlet. Samensilering er derfor en oplagt mulighed for at lagre og udnytte grønne biomasseressourcer og samtidig opnå et større metanudbytte af halmen. Det er dog vigtigt at optimere logistikken omkring bjærgning af den grønne biomasse og indlægning i silo sammen med halmen for at minimere omkostningerne.

Sammenlignet med de råvarer, som biogasanlæggene i dag anvender, er halm mere ressource- og energi-krævende at anvende. Derudover bør der med anvendelsen af store mængder halm også være mulighed for, at den afgassede biomasse kan blive separeret, så væskefraktionen kan leveres som et gødningsprodukt af acceptabel kvalitet. Hvis ikke det er tilfældet, vil konsekvensen være et øget ammoniaktab, større kvælstofudvaskning og en dårligere kvælstofudnyttelse end afgasset biomasse produceret uden brug af halm.

Hvis der alene ses på råvareomkostningerne, kan der i den nuværende situation findes konkurrencedygtige halmprodukter som alternativ til energiafgrøderne. Men alle biogasanlæg har en øvre grænse for hvor stor en tørstofmængde, der kan håndteres i anlægget. For anlæg der allerede kører på denne grænse, vil det ikke være muligt at erstatte energiafgrøder med halm uden at det medfører et betydeligt økonomisk tab. Det skyldes, at gasudbyttet fra halm er en del lavere end i de fleste energiafgrøder, og derfor vil der ved samme totalmængde af tørstof ske en betydelig nedgang i gasproduktionen. Det er ikke sådan, at biogasproduktion på basis af store mængder halm ikke økonomisk lader sig gøre, men der skal større behandlingskapacitet i anlægget til for at realisere den samme gasproduktion, som hvis majs og andre energiafgrøder fortsat var en mulighed. Erstatning af energiafgrøder som majs med halm vil derfor medføre, at enhedsomkostningerne pr. Nm³ CH₄ blive højere.

Derudover skal størstedelen af den afgassede biomasse sandsynligvis separeres i fremtiden, når der anvendes store mængder halm. Dette medfører øgede omkostninger for produktionen, ikke mindst fordi det traditionelt har været svært at få afsat fiberproduktet fra separationsprocessen. En løsning på denne udfordring kunne være pyrolyse af de afgassede gyllefibre, hvorved gyllefibrene bliver omdannet til energi og biochar. En anden mulighed er at introducere teknologier, der kan sænke viskositeten i den afgassede biomasse.

3. Baggrund

Energistyrelsen har med reference til Aftale om nye krav til anvendelsen af energiafgrøder til produktion af biogas af 30. juni 2021 igangsat denne analyse af de tekniske muligheder for at erstatte energiafgrøder med halm og andre restprodukter fra landbruget. En sådan erstatning vil kræve en betydelig omstilling af både forsyningskæder og biogasanlæggene. Analysen indeholder ikke en vurdering af de økonomiske konsekvenser ved at udfase energiafgrøder på det enkelte biogasanlæg.

Halm er den biomasse, som har det største potentiale til at øge produktionen af biogas, men der ligger tekniske og økonomiske udfordringer i at bruge større mængder halm som alternativ til de mere let-omsættelige energiafgrøder.

Formålet med denne analyse er at kortlægge mulige veje til at øge anvendelsen af halm i biogasanlæggene samt at undersøge hvilke andre biomasser, der kunne være mulige alternativer. Denne rapport samler resultaterne fra analysen. Indholdet i rapporten er baseret på tidligere analyser samt en række interviews med biogasanlæg, der har erfaringer med at bruge halm til biogasproduktion. Interviewene er suppleret af enkelte efterafgasningsforsøg og analyser af den afgassede biomasse fra biogasanlæg, der anvender halm.

Nærværende rapport indeholder en generel beskrivelse af udviklingen af den danske biogasproduktion. Herefter følger et afsnit om alternative biomasser, der potentielt kan erstatte majs og andre energiafgrøder. Der er lagt vægt på, at de alternative biomasser skal være energitætte, kunne leveres i betydelige mængder samt kunne styrke biogasanlæggenes forsyningsikkerhed og klimagevinsten ved biogasproduktion. Erfaringerne med at ensilere og forbehandling halm er beskrevet, og de økonomiske omkostninger ved at behandle de mest lovende alternative biomasser er vurderet. Som en del af rapporten er der også lavet en vurdering af gødningskvaliteten af afgasset biomasse fra halmbaserede biogasanlæg. Endelig indgår der i rapporten en opsummering af erfaringer fra biogasanlæg, som bruger meget halm.

Arbejdet er finansieret af Energistyrelsen og udført af SEGES Innovation, Teknologisk Institut og Aarhus Universitet i samarbejde. SEGES Innovation har haft hovedansvar for indsamling af de seneste erfaringer fra biogasanlæggene, samt analysen af gødningskvaliteten af den afgassede biomasse. Teknologisk Institut har haft hovedansvar for erfaringerne med ensilering og de økonomiske vurderinger.

Aarhus Universitet har i analysen stået for kemiske analyser samt udarbejdet afsnittene *Teknologier til forbehandling, efterbehandling og in-line behandling og Opholdstider, tørstof%, temperatur og restgaspotentiale*.

4. Den danske biogasproduktion

De første landmænd og pionerer begyndte at eksperimentere med udvinding af energi fra gylle i 1970'erne, og de opførte dermed de første gårdbiogasanlæg. Op gennem 1980'erne og -90'erne blev produktionen af biogas mere og mere udbredt, og flere både større og mindre biogasanlæg skød op i det danske landskab. Dengang blev et gårdanlæg betegnet som et anlæg, der var placeret på en gård og typisk kun behandlede biomasse fra besætningen på denne gård. I modsætning hertil modtog et fællesanlæg biomasser fra flere forskellige besætninger. I takt med at mange besætninger er blevet større siden 1970'erne, er gårdbiogasanlæggene på disse besætninger ligeledes blevet større, og størrelsesmæssigt er grænsen mellem gårdanlæg og fællesanlæg derfor blevet meget flydende. (Brønnum-Johansen, et al., 2014). I dag er det blevet sådan, at gårdanlæggene også modtager biomasse fra andre besætninger, på samme vis som fællesanlæggene. På de store gårdanlæg er der også sket en professionalisering af ledelsen og driften af anlæggene. Hvor gårdanlæggene tidligere havde en organisation, der også skulle fokusere på landbrugsbedriften, har de store gårdanlæg i dag en ledelse og driftspersonale dedikeret til driften af biogasanlægget.

Definitionerne af gård- og fællesanlæg er derfor ikke længere så beskrivende for driften af et biogasanlæg. Størrelsen på anlægget siger derimod markant mere; desto større anlæg desto flere ressourcer har man typisk til at stå for driften og udviklingen af anlægget. Derudover er der i Danmark kommet flere organisationer, som fx Nature Energy, Bigadan, Danish Bio Commodities og E.ON, som er medejere af flere biogasanlæg. I sådanne organisationer har man typisk fordel af vidensopsamling og -deling mellem anlæggene. Anlæggene kan også deles om administrative funktioner og have adgang til en central afdeling, hvor man samler viden om råvarer, med laboratorium samt biologisk og teknisk support. I de fælles organisationer har man typisk også fordel af at have en fælles biomasseindkøbsafdeling, der kan foretage storindkøb, og som har de nødvendige ressourcer allokeret til at handle optimalt. Ved at have en portefølje af flere anlæg har man typisk også bedre mulighed for at aftage og udnytte et attraktivt tilbud på en biomasse.

Den årlige danske biogasproduktion var i 2020 på 21,4 PJ (Danmarks Statistik, 2021), og det er Energi- styrelsens forventning, at den årlige biogasproduktion skal stige til 52 PJ i 2030. Dette vil således kunne dække 70% af Danmarks forventede samlede gasforbrug i 2030 (Biogas Danmark, 2021).

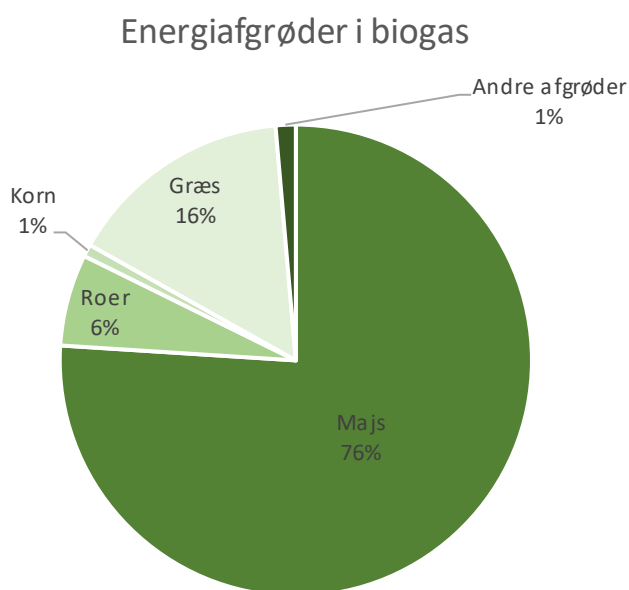
Biogasproduktionen er typisk baseret på en overvægt af kvæg- og svinegylle, der bliver afgasset sammen med andre mere koncentrerede produkter i form af fast husdyrgødning, industriaffald, husholdningsaffald, restprodukter, energiafgrøder og halm. Den præcise råvaresammensætning varierer ganske betydeligt fra anlæg til anlæg og afhænger af det enkelte anlægs placering, opbygning mm.

I forbindelse med Regeringens klimavision er det blevet besluttet, at andelen af energiafgrøder i biogasanlæggene gradvist skal reduceres fra de i dag tilladte 12 vægtprocent af råvaremængden til 4 vægtprocent fra 2024. For at understøtte de mindre gårdanlæg, der typisk er afhængige af energiafgrøder, introduceres et bundfradrag, som giver muligheder for fortsat at anvende 12% energiafgrøder af de første 36.000 tons biomasse. Derudover skal majs fuldstændig udfases som energiafgrøde i biogasproduktionen frem mod 2025. Grænserne for energiafgrødeandelen og bundfradraget er angivet i tabel Tabel 1 nedenfor (Klima- energi- og forsyningsministeriet, 2021).

Table 1: Grænse for energifgrøder og bundfradrag. I 22/23 blev grænsen ekstraordinært hævet til 12% pga. energikrisen i Europa.

| | 22/23 | 23/24 | 24/25 | 25/26 |
|-------------------------------|---------|--------|--------|--------|
| Energifgrødegrænse [%] | 8 (12%) | 6 | 4 | 4 |
| Bundfradrag [ton] | 65.000 | 50.000 | 50.000 | 36.000 |

Majs er den suverænt mest anvendte energifgrøde og udgjorde i 2019/2020 mere end ¾ af de anvendte energifgrøder (Figur 1). Knap 9% af den samlede biogasproduktion i 2019/2020 kom fra energifgrøder, og omkring 7% fra majs alene. Biogasanlæggene er derfor nødsaget til at finde en eller flere erstatninger for majs, hvis man skal opnå den ambitiøse målsætning for biogasproduktionen i 2030. Halm er den råvare i Danmark med det største uudnyttede potentiale, og der er derfor stor interesse efter at finde robuste og rentable metoder til at udnytte halm til biogasproduktion.



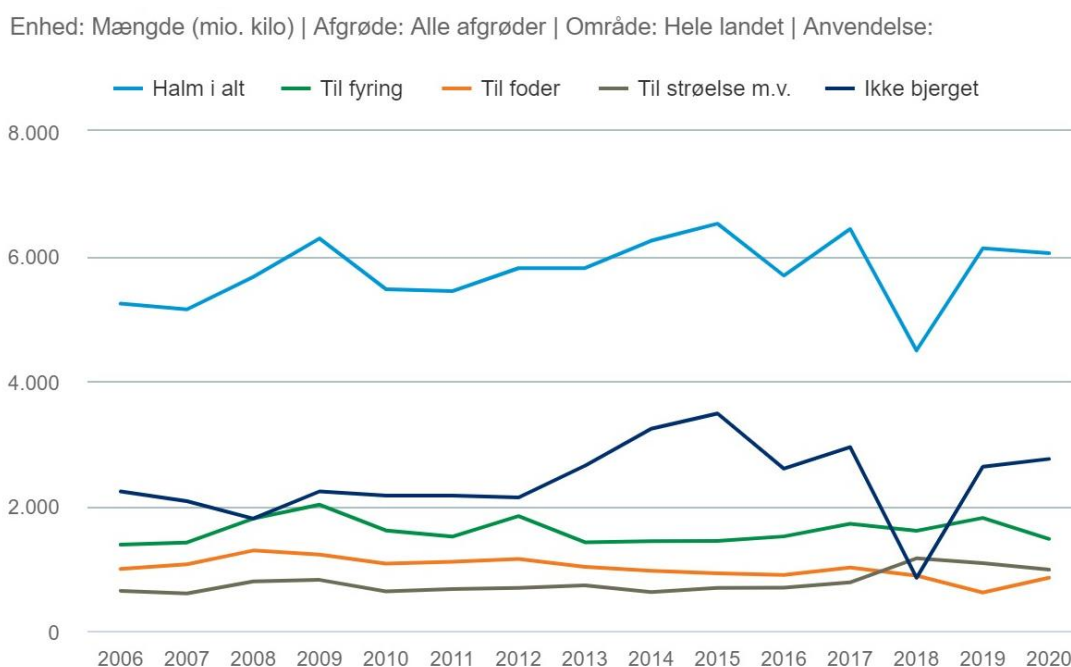
Figur 1: Vægtfordelingen af energifgrøder brugt til biogasproduktion. Kilde: (Energistyrelsen, 2020).

5. Kortlægning af alternative biomasser som erstatning for energiafgrøder

Halm som alternativ til energiafgrøder

Den årlige danske halmproduktion er på cirka 5,9 mio. tons, hvoraf der anvendes omkring 1,7 mio. tons til fodring og strøelse på især kvægbesætningerne. Desuden anvendes cirka 1,6 mio. tons til fyringsformål i forbindelse med bl.a. kraft-varme-værker (Danmarks Statistik, 2020). Det efterlader et overskud på omkring 2,5 mio. tons halm om året, som i dag bliver nedmuldet, men som i stedet potentielt kan anvendes til biogasproduktion. Hvis den ikke-bjærgede halmmængde kunne udnyttes i biogasproduktionen, ville det give anledning til en samlet energiproduktion på 15 PJ i 2030 (Wenzel, et al., 2020). I takt med at varmesektoren i Danmark bliver elektrificeret, vil en større del af halmen til fyring, blive frigjort til andre anvendelser.

På Figur 2 nedenfor ses fordelingen af halmens forskellige anvendelsesmuligheder igennem de seneste 15 år.



Figur 2: Mængden af halm anvendt til forskellige formål fra 2006 til 2020. Kilde: (Danmarks Statistik, 2020)

Som gennemsnit over årene 2011-2020 udgjorde den ikke-bjærgede halm ca. 1 mio. tons hvedehalm, 550.000 tons byghalm, 450.000 tons rapshalm, knap 200.000 tons rughalm samt mindre mængder halm fra flere forskellige afgrøder såsom frøgræs, havre, hestebønner og triticale. (Danmarks Statistik, 2022). Halm af vinterhvede og vårbyg udgør de store puljer svarende til hhv. 49% og 27% af de 2,065 mio. tons ikke-bjærget kornhalm. Mængden af uudnyttet halm varierer betragteligt mellem høstår, og i tørkeåret 2018 var der kun 0,60 mio. tons kornhalm og 0,22 tons rapshalm, som ikke blev bjærget. I langt de fleste år vil der dog være store mængder uudnyttet halm til rådighed.

Foruden de ovennævnte anvendelsesmuligheder er der indenfor de seneste år arbejdet i pyrolyse af halm, med henblik på at binde kulstof i svært nedbrydeligt biochar og efterfølgende sprede dette på markerne. Dermed undgår man, at store dele af den CO₂, som planten har optaget i løbet af vækstsæsonen, frigives ved nedbrydning af det organiske materiale.

Udover pyrolyse af den ”friske” halm har man ligeledes gode erfaringer med pyrolyse af den afgassede fiber fra biogasanlæg. Ved at udnytte denne teknologi kan halmen bruges flere gange gennem værdikæden. Først som strøelse til bl.a. kvæg- og fjerkræbesætninger, hvorefter strøelsen eller møget kan anvendes i et biogasanlæg til at producere grøn energi, og slutteligt kan den fraseparerede fiber sendes gennem et pyrolyseanlæg. Dermed får landbruget reduceret metanemission fra stald og lager, samtidig med at energien fra biogas kan erstatte fossile energikilder og store mængder kulstof bliver bundet i jorden.

Metanpotentialiet i halm varierer betragteligt mellem forskellige undersøgelser, f.eks. indenfor hvedehalm hvor det realiserede metanpotentiale udgør mellem 34-70% af det teoretiske potentiale på 432 m³ metan pr. ton VS (Larsen et al., 2017; Møller et al., 2004). Det er en stor udfordring at realisere en større andel af det teoretiske potentiale vha. mindst mulig energimæssig og økonomisk indsats. Som en gennemsnitsbetragtning kan man antage et metanpotentiale på ca. 230 m³ metan pr. ton VS for hvedehalm med moderat neddeling.

Da halm indeholder næringsstoffer, vil der ved anvendelse af halm til biogas ske en bortførelse af næringsstoffer fra marken og en tilførelse til biogasanlægget. Indholdet af N, P og K i hvedehalm er i størrelsesordenen 0,45-0,57 % N, 0,03-0,07 % P og 0,36-0,80 % K (Oversigt over Landsforsøgene, 2009). Ved et halmudbytte på 4 tons halm pr. ha vil der typisk fjernes i størrelsesordenen 18-23 kg N, 1,2-2,8 kg P og 14-32 kg K pr. ha (Oversigt over Landsforsøgene, 2009). Disse næringsstofmængder svarer til i størrelsesordenen 10% af et typisk gødningsbehov til mange afgrøder og udgør således både en økonomisk og dyrkningsmæssig værdi.

Hidtil har der været mulighed for at fratække fosfor, når halm blev anvendt til fyringsformål. I udkastet til den nye gødningsanvendelsesbekendtgørelse ligger Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri op til at udfase fradraget for at ligestille fyring med halm med andre anvendelser. Med ændringen vil afsætning af halm til biogas ikke længere være dårligere stillet i forhold til gødningsregnskabet end afsætning til fyringsformål.

MAJS KONTRA HALM

Halm er et markant anderledes produkt end majs, som det fremgår af Tabel 2 nedenfor. Det meget højere tørstofindhold i halm end majs betyder, at det på tørstofbasis ikke vil være nødvendigt at erstatte majs med halm i forholdet 1:1 men nærmere i forholdet 1 ton halm til 2 ton majs på råvarebasis. Halm har desuden også en markant lavere gasproduktion pr ton VS og en lavere omsætning af organisk indhold (VS-omsætning). Når man erstatter 1 tons majstørstof med 1 tons halmtørstof, vil man derfor opnå en lavere gasproduktion og en højere tørstofkoncentration i både reaktorer og i det afgassede produkt.

Tabel 2: Sammenligning af TS-, VS- og askeindhold samt gasproduktion og VS-omsætning for roer, kløvergræsensilage, majsensilage og halm. Kilde (Energinet.dk, faktaark om biogas, 2012) ¹Ved 60 dages opholdstid (Olesen, et al., 2020).

| | | Roer | Kløvergræsensilage | Majsensilage | Halm | Majs:halm forhold |
|---------------------------|-----------------------------|------|--------------------|--------------|------|-------------------|
| Tørstof (TS) | % af råvare | 25 | 35 | 31 | 80 | 39% |
| VS-indhold | % af TS | 95 | 88 | 95 | 95 | 100% |
| Askeindhold | % af TS | 5 | 12 | 5 | 5 | 100% |
| Gasproduktion | m ³ metan/tons | 85 | 93 | 89 | 174 | 51% |
| Gasproduktion | m ³ metan/ton VS | 357 | 302 | 305 | 230 | 133% |
| Gasproduktion | m ³ metan/ton TS | 339 | 266 | 290 | 219 | 133% |
| VS-omsætning ¹ | % af VS | 90 | 75 | 90 | 66 | 136% |
| Resttørstof | % af TS | 14,5 | 34 | 14,5 | 37,3 | 39% |

Forskellen mellem majs og halm kommer sig også til udtryk i forhold til den funktion råvaren har i biogasproduktion: Halm er en langsomt virkende råvare, som kan levere en basisproduktion, mens majs bliver brugt til at booste gasproduktionen.

Et øget forbrug af halm og andre tungtomsættelige produkter giver anledning til et øget tørstofindhold i reaktoren, hvilket kan betyde et øget energiforbrug til omrøring for at undgå dannelsen af flydelag (Møller, et al., 2020). Risikoen for flydelag forstærkes yderligere af, at halmstråene indeholder luft, som bidrager til en naturlig opdrift, og dermed en reduceret udrådning (Møller, et al., 2020).

Biogasanlæggene kan typisk maksimalt håndtere et tørstofindhold i reaktorerne på omkring 10-12%. Da resttørstof-mængden fra halm er markant højere end majs og andre råvarer, vil mængden af halm, der kan erstatte majs, afhænge af det tørstofniveau, som biogasanlægget bliver drevet ved. For anlæg, der allerede opererer med en tørstofkoncentration på 10-12%, vil det kun være muligt at erstatte majs med halm, hvis man samtidig justerer den samlede fødeplan. Hvis biogasanlæggene har tilstrækkelig opholdstid, kan man også reducere tørstofindholdet i reaktorerne ved enten at recirkulere væskefraktion eller tilsætte vand.

At halm er en svært omsættelig biomasse skyldes bl.a., at der uden på halmstrået er et beskyttende, hydrofobt vokslag, som nedbrydes langsomt, og som er med til at forringe halmens vandopløselighed. Dette er ligeledes med til at forringe udrådningen af biomassen, da det mindsker overfladearealet, som bakterienes enzymer kan "arbejde" på. Derfor kræver omsætningen af halm en markant længere opholdstid end de 25-40 døgn, der typisk anvendes i flere af biogasanlæggene i dag.

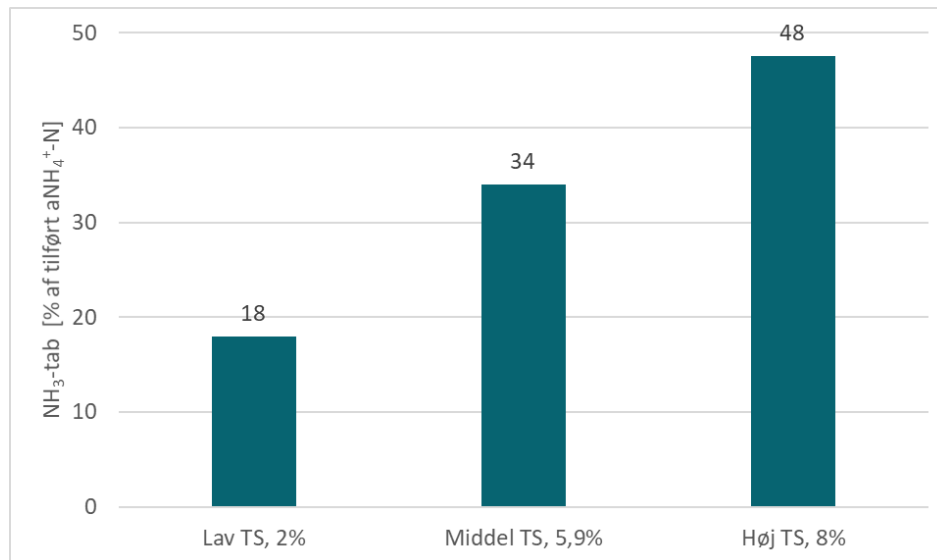
Det øgede tørstofindhold kan give udfordringer i forhold til gødningskvaliteten af den afgassede biomasse, hvor der vil være risiko for, at den udkørte gylle hænger i afgrøden i stedet for at infiltrere i jorden, som det fremgår af Figur 3 nedenfor.



Figur 3: Rester af afgasset biomasse i overfladen af græsmarker Th.: Slætgræs, tv: frisk græs. (Billede til venstre: Ida Ringgaard, Vestjysk Kvæg. Billede til højre: Anna-Sofie Kjærsgaard, Vestjysk Kvæg).

Medmindre der bliver introduceret nye for- og efterbehandlingsmetoder såsom separation, der kan øge infiltrationsevnen i jorden, vil konsekvensen være en øget ammoniakudledning og en dårligere

gødningsudnyttelse. På Figur 4 nedenfor er ammoniaktabet i forhold til tørstofprocenten i afgasset biomasse udbragt med slæbeslanger illustreret. Når tørstofkoncentrationen øges fra 5,9% til 8%, stiger ammoniaktabet med 41% (se Figur 4 nedenfor), og som det fremgår af afsnittet *Biogasanlæggenes erfaringer med brug af halm*, er der flere biogasanlæg, som producerer en afgasset biomasse med en tørstofprocent på helt op til 12%. Ved nedfældning forud for såning af f.eks. majs eller vårbyg, er risikoen for ammoniakfordampning beskeden.



Figur 4: Ammoniakfordampning i forhold til tørstofprocent i afgasset biomasse udbragt med slæbeslanger i f.eks. vintersæd. Beregninger er lavet i ALFAM2-modellen version 2.3. Tabet er angivet i procent af den udbragte ammoniummængde. Beregningsforudsætninger: Gylle-pH: 7,9, ammoniumindhold: 3,0 kg N pr. ton, 30 ton gylle pr. ha, lufttemperatur: 13 °C, vindhastighed: 2,7 m/s og ingen regn efter udbringning. Kilde: Anders Peter Adamsen, Aarhus Universitet.

Mellem- og efterafgrøder som alternativ til energiafgrøder

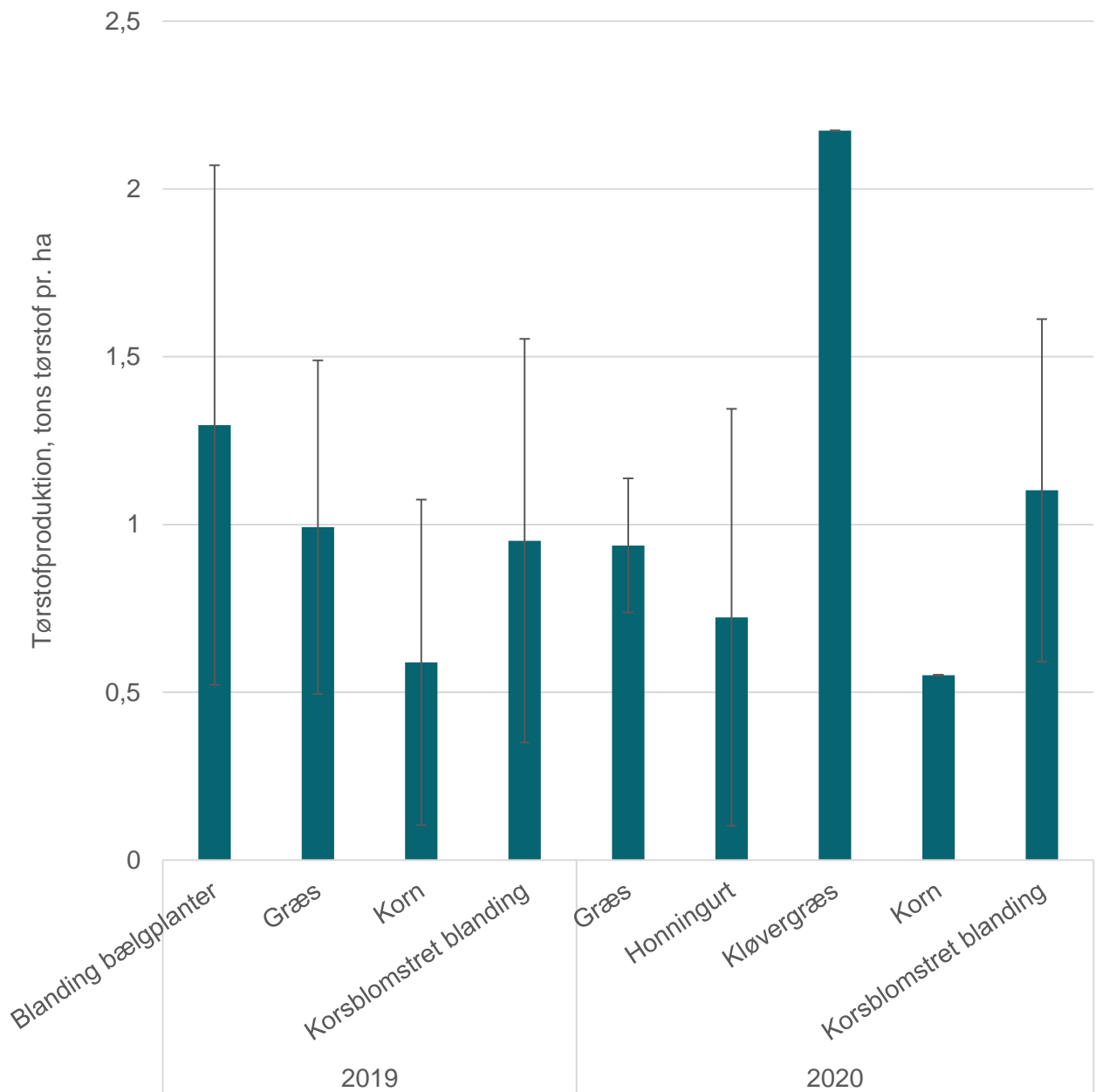
Efterafgrøder er lovpligtige hos næsten alle landbrug, og kun meget små brug er undtaget fra efterafgrødekrav. Efterafgrødekravet bevirker, at der årligt etableres omkring 550.000 ha efterafgrøder. Arealets størrelse er på niveau med de mest dyrkede afgrøder herhjemme.

Kravet om efterafgrøder er indført for at reducere udvaskningen af nitrat til vandmiljøet, men samtidig bidrager efterafgrøder med flere positive effekter på marken. For eksempel kan de næringsstoffer, som opsamles i planten, frigives til de efterfølgende afgrøder, og landmændene kan spare gødning. Derover bidrager efterafgrøderne med en øget kulstofopbygning i jorden. Ved høst af efterafgrøder til biogasproduktion vil næringsstofferne og en del af kulstoffet i den høstede biomasse blive returneret til jorden med den afgassede biomasse. Gødningsmæssigt vil det derfor kun være en fordel at høste og afgasse efterafgrøder, da man så kan udbringe næringsstofferne på rette tid i den efterfølgende vækstsæson. Efterafgrøderne vil i princippet bidrage mindre til jordens kulstofpulje, når noget af biomassen høstes, men da den tungest omsættelige del af kulstoffet vil blive returneret med den afgassede biomasse, forventes effekten at være begrænset.

TØRSTOFPRODUKTION OG PRAKTISKE FORHOLD

En meget stor udfordring er, at efterafgrøderne skal sås først på efteråret, hvor hovedafgrøden ikke altid er høstet. Derfor sås mange efterafgrøder relativt sent, hvilket kan medføre sparsom vækst. Det anbefales, at efterafgrøder sås før 20. august. I 2019 og 2020 målte SEGES Innovation som en del af projektet, Catch Crops for Carbon Capture (CatCap), der var finansieret af Miljø- og Fødevareministeriet, tørstofproduktion

i 90 marker i 2019 og 90 marker i 2020. Resultatet ses i Figur 5, og afspejler gennemsnitlige udbytter i spændet 0,5-2,2 tons tørstof pr. ha. Det relativt lave tørstofudbyttet på en stor del af efterafgrødemarkerne betyder, at det hidtil har været for dyrt at bjærge biomassen.



Figur 5: Biomasse af efterafgrøder målt i landmandens marker. Søjlerne viser gennemsnit og fejllinjerne spredningen. Kilde: SEGES Innovation.

Efterafgrødereglerne indeholder en dato, hvor man tidligst må destruere sine efterafgrøder. For de fleste efterafgrøder gælder at de ikke må destrueres før den 20. oktober, men i nogle tilfælde gælder, at destruktionsdatoen vil afhænge af såtidspunktet. Før destruktionsdatoen laver Landbrugsstyrelsen stikprøver, hvor det kontrolleres, at efterafgrøden har en tilstrækkelig dækning af jordoverfladen. I langt de fleste tilfælde vil der derfor ikke kunne høstes biomasse fra efterafgrøden før destruktionsfristen, da man efter høst af biomasse ikke ville kunne opnå en tilstrækkelig dækning af jordoverfladen.

Herudover kan der være en udfordring med at høste plantematerialet fra marken, fordi markerne ofte er våde i efteråret. Derfor er kørsel på marken i perioder ikke muligt og andre gange vil det forårsage struktur-skader.

MULIGHEDER

Figur 5 afspejler også en meget stor variation i tørstofproduktionen, og nogle steder kan man opnå over 3 tons tørstof pr. ha. Det vil typisk være, hvor efterafgrøderne er sået tidligt i august, og hvor der er overskud af kvælstof i jorden. På arealer, hvor der ikke tilføres husdyrgødning, vil der typisk være et mindre overskud af kvælstof, og her er det sværere at opnå en høj tørstofproduktion.

Landsforsøg fra 2018-2021 med efterafgrøder indikerer, at man nogle steder vil kunne øge tørstofproduktionen mellem 0,3-0,9 t tørstof pr. ha ved at så efterafgrødeblandinger med almindelige arter i blanding med arter som fikserer kvælstof fra luften. Udfordringen er at kun få landmænd bruger kvælstoffikserende arter i efterafgrøder, fordi der er mange krav til, hvordan landmænd må bruge dem for at opfylde de lovpligtige krav. For eksempel må der ikke være mere end 25% frø af de kvælstoffikserende arter i blandingen, og der må kun bruges færdigblandinger fra frøfirmaerne. Der er også krav til destruktionsstidspunktet, og hvor meget gødning der må tilføres til efterfølgende hovedafgrøde.

MELLEMAFGRØDER TIL BIOGAS

En efterafgrøde skal efterfølges af en forårssået afgrøde. Da udbyttet og indtjeningen for vårbyg normalt er langt mindre end for vinterhvede vil landmanden tabe penge, hvis han er tvunget til at så vårbyg efter en efterafgrøde fremfor vinterhvede. Efterafgrøderne blokerer altså for dyrkning af vinterhvede. Alternativt kan man opfylde en del af sit efterafgrødekraV med mellemafgrøder, som etableres mellem to vintersædsafgrøder. En mellemafgrøde skal sås tidligere, inden 20. juli, og kan først destrueres eller høstes efter 20. september. Mellemafgrøder sås typisk efter vinterbyg, som høstes tidligt, eller ved at frøene spredes ud i den etablerede hovedafgrøde inden høst i juli.

Ældre forsøg med mellemafgrøder viser, at der opnås tørstofudbytter i mellemafgrøder på alt fra 0,1–2,3 tons tørstof pr. ha. Der er altså et potentiale i også at bruge mellemafgrøder til biogas, men erfaringerne er typisk, at succesraten er lavere med mellemafgrøder end med efterafgrøder. Det skyldes, at det er mere usikkert at sprede frøene ud, fordi de ligger på jordoverfladen og tørrer nemt ud.

SAMLET HØST AF HALM OG EFTERAFGRØDER

Efterafgrøder kan høstes og bjærges ligesom ved høst af slætgræs og efterfølgende ensileres. Da tørstofindholdet i efterafgrøder typisk er lavt, er der risiko for stort saftafløb, hvis biomassen ikke blandes med f.eks. halm (se afsnit om ensilering). Alternativt vil efterafgrøderne skulle vejres på marken for at sænke vandindholdet, men dels vil det give noget tab af biomasse på marken, og dels er vejring typisk ikke særligt effektivt i oktober måned. Tørstofudbyttet af efterafgrøder kan som nævnt ofte være for lavt til at gøre det rentabelt at høste efterafgrøder til biogasproduktion.

Hvis man i stedet høster efterafgrøde sammen med halm/strå fra den foregående kornafgrøde, vil man dels få et større samlet biomasseudbytte pr. ha, og dels vil man få blandet halm og efterafgrøde allerede i forbindelse med høst. Halm og efterafgrøde kan høstes samlet, hvis den foregående kornafgrøde høstes med høj stub, så en del af strået bliver stående indtil den samlede høst i september eller oktober (Figur 6). Efterafgrøden vil kunne fortsætte væksten efter kornhøst, idet kornstrået/den høje stub kun vil skygge lidt for efterafgrøden. Stubbhøjden ved kornhøsten bør være så høj som mulig for at øge biomasseudbyttet men ikke højere end, at alle kornaks høstes af mejetærskerens skærebord.



Figur 6: Høst af vårhvede med høj stub på ca. 55 cm. Til højre ses forsøgsparcer med hhv. høj stub og almindelig stubhøjde og med rajgræs som efterafgrøde. (Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut).

Som alternativ til høst af korn med høj stub er det også muligt at høste korn med en mejetærsker eller finsnitter monteret med et ribbebord (se Figur 7). Ribbebordet river kornaksene af men efterlader det meste af strået stående tilbage, og der vil derfor kunne fås et lidt højere halmudbytte end ved mejetærskning med høj stub. Der findes dog kun få ribbeborde i Danmark.



Figur 7: Høst af vårbyg med finsnitter med ribbebord. Til højre ses kornstrå hhv. før og efter ribbehøst. Der var udsået efterafgrøder til senere høst sammen med kornstrået. (Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut).



Figur 8: Hvedemark efter ribbehøst og med alm. rajgræs i bunden. Stråene er tromlet ned i køresporene fra mejetærskeren. Ved samlet høst af strå og efterafgrøde, bliver de nedkørte strå ikke høstet med. (Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut).

Hvad enten kornet høstes med høj stub med alm. skærebord eller ribbehøstes med ribbebord, vil kornstrået blive nedtromlet i hjulsporene fra mejetærsker og frakørselsvogne m.m., og strået i sporene vil typisk ikke blive høstet med ved den senere høst af strå og efterafgrøder. Derfor vil halmudbyttet pr. ha være lavere end, hvis halmen blev bjærget på traditionel vis med presning af halm på skår. Forsøg har vist, at udbyttet af halmtørstof er ca. 1 ton lavere ved ribbehøst end ved traditionel høst og presning (Larsen, 2015). Jo større

arbejdsbredden er, og jo mindre kørsel med frakørselsvogn m.m. i marken, des mindre vil tabet af halmudbytte være.

Ved samlet høst af efterafgrøder og høj stub (45 cm) af vårhvede er der i forsøg opnået tørstofudbytter på 3,2-3,6 tons pr. ha og et tørstofindhold på 31-41% (Molinuevo-Salces et al., 2015). I forsøg med efterafgrøder efter ribbehøst af vårbyg er der opnået udbytter af efterafgrøder alene på 0,3-1,6 tons tørstof pr. ha, mens det samlede udbytte af efterafgrøde og halm udgjorde 3,0-5,3 tons tørstof pr. ha og et tørstofindhold på 34-67% (Larsen, 2015). Efterafgrøden udgjorde 25-50% af tørstoffet i blandingen. Ved den samlede høst af halm og efterafgrøde er der således opnået både højere tørstofudbytte og højere tørstofindhold i biomasseblandingen sammenlignet med kun at høste efterafgrøden.

Der er også lavet afprøvning i praksis med at lade kornhalmen ligge på skåret efter mejetærskningen, og hvor halmskår og efterafgrøder er høstet samlet senere. Erfaringen er dog, at dels hæmmer halmen væksten af efterafgrøderne under halmskåret, og dels sker der en begyndende nedbrydning af halmen, mens det ligger på skår.

Som nævnt er der en risiko for, at markerne er for våde til færdsel efter det tidspunkt, hvor efterafgrøderne må destrueres. Dette bidrager med en vis usikkerhed mht. forsyningen af efterafgrøde, hvad enten efterafgrøderne høstes alene eller sammen med halm. Der kan således være år, hvor høsten kan lykkes på mange marker, mens mulighederne kan være begrænset i våde efterår.

Frøgræshalm som alternativ til energifgrøder

Foruden anvendelsen af halm fra forskellige kornarter er der også et stort potentiale ved anvendelse af frøgræshalm, som er et overskudsprodukt fra produktionen af frøgræs. Den danske frøgræspanproduktion bliver udgjort af forskellige græsarter, som giver forskellige udbytter og kvaliteter af halm. I Jylland producerer man primært rajgræs, hvor der typisk kun høstes frø ét år. De giver et stort biomasseudbytte og dermed en stor halmmængde på op til 5 tons pr. hektar. Omvendt produceres der på øerne mange græstyper som rød- og strandsvingel, hundegræs samt engrapgræs, hvor der høstes frø i mere end ét år. Disse flerårige typer udgør omkring 40% af den samlede frøgræspanproduktion, mens de etårige græstyper udgør omkring 55%. Resten af produktionen udgøres af mindre mængder af både et- og flerårige græstyper. Alm. rajgræs og rødsvingel er de væsentligste frøgræsarter, og i 2021 var der i Danmark et areal på hhv. 43.279 ha og 22.630 ha af disse arter (Landbrugsstyrelsen, 2021).

Halmudbyttet fra rød- og strandsvingel, hundegræs og engrapgræs vil typisk være 2-4 tons/ha.

Vandindholdet i frøgræshalm varierer meget både afhængigt af vind og vejr, men især også afhængigt af den anvendte høstmetode. I Jylland har man tradition for at høste græsset direkte, hvilket typisk giver et vandindhold i frøgræshalmen på 30-35%, hvorved halmen vil kunne ensileres. På øerne har man i stedet større tradition for at skårlægge græsset inden høst, hvormed frøgræshalmen får lov at tørre op inden frøet høstes. Ved denne høstmetode har frøgræshalmen ved høst et vandindhold på 10-15%, og halmen vil kunne presses og lagres som tør frøgræshalm.

Ved de flerårige græstyper er landmændene meget interesseret i at få fjernet halmen fra marken efter høst, da marken skal afpuddes og gødes, så den er forberedt til næste års frøhøst. Denne halm anvendes i dag i flere tilfælde i varmeværker eller halmfyr. Der kunne fra landmandens side være interesse i at sende dette til biogasanlæg i stedet, da man her godt kan acceptere et højere vandindhold end varmeværkerne kan.

På markerne med etårige græstyper snittes halmen typisk, da det dermed bare kan pløjes ned, men denne type frøgræshalm vil også kunne udnyttes til biogasproduktion

Frøgræs sås typisk som udlæg i marker med forårsafgrøder som f.eks. vårbyg, hvilket betyder, at man i etableringsåret høster kornet, hvorefter frøgræsset får lys og luft til at gro. Da frøgræsset først skal høstes året efter, er man ofte nødsaget til at afpudse græsset om efteråret. Dette gøres for at frøgræsset får de bedste vækstbetingelser om efteråret og for at opnå en bedre vinterfasthed. Dette såkaldte efterslæt har landmanden i dag svært ved at afsætte, og typisk lader man det derfor ligge på markerne. For at det kan lade sig gøre, er man nødt til at afpudse markerne 2-3 gange i løbet af efteråret, så græsset ikke bliver for langt, og dermed udgør en risiko for græssets vækst. Ved at høste og bjærge græsset som efterslæt og anvende det i biogas-anlæggene kan landmanden nøjes med at afpudse græsset én gang. Dermed sparer landmanden 1-2 mark-operationer, hvilket reducerer omkostningerne til drift af maskiner.

Græs har i modsætning til korn en stor kulstofopbygning gennem rodnettet. Det er derfor ikke så kritisk for jordens kulstofpulje, når man bjærger frøgræshalm, som når man bjærger kornhalm, og typisk vil landmændene også være mindre forbeholdne overfor at fjerne frøgræshalm.

Biomasse fra lavbundslande som alternativ til energiforgrøder

Det samlede areal af lavbundslande i Danmark udgør over 1.000.000 ha, og som led i regeringens klimavision er der i klimaaftalen fra 2021 indlagt et mål om, at 100.000 af disse hektarer skal udtages og omlægges fra almindelig omdrift til oversvømmede arealer (Finansministeriet, 2021). Omlægningen har til formål at mindske drivhusgas-udledningen fra disse jorde, idet oversvømmelse vil resultere i en mindsket ilttilførsel og dermed en langsommere nedbrydning af organisk materiale i jorden (Miljøstyrelsen, 2021). Det vil imidlertid også have den konsekvens, at det ikke længere er muligt at dyrke traditionelle landbrugsafgrøder på disse arealer, og man vil derfor være nødsaget til at søge nye afgrøder, såfremt det stadig ønskes at kunne høste et betydeligt biomasseudbytte. Derudover er der fra regeringens side også et krav om, at en del af de udtagne lavbundslande skal holdes åbne for at øge biodiversiteten af blandt andet trækfugle, dvs. arealerne må ikke springe i skov. I den forbindelse ville det være en mulighed at samtænke biomasseproduktion og -udnyttelse med pleje af arealerne, således man kan opnå en indtjening ved vedligeholdelse af arealerne. Her vil dyrkning af de såkaldte paludikulturer som f.eks. dunhammer, rørgræs, strandsvingel og rajsvingel være en mulighed, da disse afgrøder er yderst velegnede til dyrkning på arealer med et højt vandspejl.

Dyrkning af dunhammer på de 100.000 ha. lavbundslande vil kunne give en biogas produktion på 2,3 PJ om året (Toft, 2022).

Paludikulturer er et forholdsvis nyt og uudforsket område, og der er derfor stadig stort behov for udvikling af udstyr, arbejdsgange, produktionsmetoder mm. Som konsekvens af den manglende viden og udbredelse er omkostningerne til produktion af paludikulturer meget høje, da det oftest kræver specielle maskiner for at kunne arbejde på de meget våde arealer samtidig med, at produktionen som oftest ikke er effektiviseret tilstrækkeligt i forhold til produktion af almindelige landbrugsafgrøder. Samtidig har de lokale forhold som infrastruktur og vandspejlets højde også stor indflydelse på omkostningerne i forbindelse med etablering og bjærgning af biomassen.

Etablering af paludikulturer er typisk en engangsomkostning, da afgrøderne er permanente, og for græsser, som kræver et vandspejl omkring 25 cm under terrænet kan disse sås som frø med en almindelige såmaskine. Dette kan evt. gøres inden arealet vandmættes til den ønskede vandspejlshøjde.

Omvendt har etableringen af f.eks. dunhammer, der kræver et meget højt vandspejl, indtil videre givet anledning til flere udfordringer. I den forbindelse har man i Holland de senere år undersøgt to forskellige etableringsmuligheder af dunhammer: Såning af frø eller udplantning af unge planter (Geurts & Fritz, 2018).

Her har udplantning af unge planter på 25-50 cm med 5.000-10.000 planter pr. ha. givet de bedste resultater, da disse giver den mest jævne og optimale beplantning af arealerne. Ifølge erfaringerne fra Holland er det angivet (Geurts & Fritz, 2018), at prisen pr. plante ligger på 2-6,5 DKK, hvilket giver en forventet omkostning til indkøb af planter på 10.000–65.000 DKK/ha.

Ved at så planterne som frø i stedet kan man reducere etableringsomkostningerne betragteligt, selvom det også vil give anledning til flere udfordringer som øgede krav til styring af vandstanden, større tab af planter samt problemer med spredning af de lette frø. Alt sammen noget der vil kunne betyde, at høstudbyttet sænkes betragteligt.

På trods af de store omkostninger i forbindelse med etablering af dunhammer er denne afgrøde meget interessant, da den potentielt kan give et tørstofudbytte, som er på niveau med det, der kan opnås ved marker i omdrift. Således har man i studier fra Holland (Geurts, et al., 2020) afrapporteret en årlig biomasseproduktion på 10-25 t TS/ha/år, og i et nyligt publiceret studie af biomasseproduktionen fra Holland, Tyskland og Danmark, er der beskrevet et gennemsnitligt udbytte på tværs af områderne på 12,4 t TS/ha/år. De største udbytter er opnået i områder med optimale hydrologiske forhold og store mængder tilgængelige næringsstoffer.

Idet muligheden for at tilføre gødning til arealerne hen over sæsonen fjernes ved omlægning til lavbunds-jorde, vil biomasseudbyttet blive reduceret markant over tid. Ved jorde med lave mængder kvælstof (37,5 kg N/ha/år) har man i de ovennævnte studier opnået en biomasseproduktion på omkring 10 t TS/ha/år.

Til sammenligning har man i en undersøgelse lavet for naturstyrelsen fundet et udbytte for gødet første slæt rørgræs på 7,1 t TS/ha. mens udbyttet for ugødet rørgræs var 1,7 t TS/ha.

Hos SEGES Innovation har man lavet udrådningsforsøg med dunhammer fra oversvømmede arealer for at fastslå gaspotentialet og sammenlignet dette med naturpleje. Resultaterne ses i Tabel 3 nedenfor.

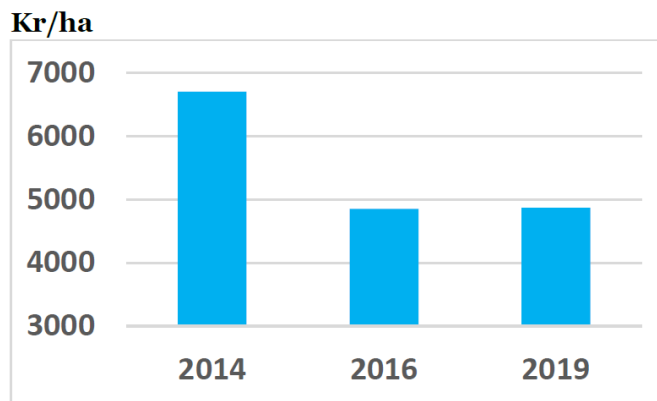
Tabel 3: Tørstof, glødetab og gasudbytte for dunhammer og naturpleje.

Kilder: ^A SEGES Innovations analyser og udrådningsforsøg. ^B Energinet.dks faktaark om biogas, 2012

| | Dunhammer ^A | Naturpleje ^B |
|--|------------------------|-------------------------|
| Tørstof [%] | 18 | 45 - 55 |
| Glødetab [% af TS] | 92 | 85 |
| Gasudbytte [Nm ³ CH ₄ /t VS] | 286 | 176 |
| Gasudbytte [Nm ³ CH ₄ /t TS] | 263 | 150 |

Høst og bjærgning af disse biomasser er ligesom etableringen forbundet med store omkostninger, idet udstyret og maskinerne, som kan køre på de meget våde jorde, stadig er under udvikling og optimering. På trods af dette er det allerede lykkedes at nedbringe høstomkostningerne markant i perioden fra 2014-2019, som det ses på figur 4 nedenfor.

Udvikling i høstudgifter 2014 - 2019



Figur 9: Høstudgifter i kr. pr. ha. Udgifterne dækker høst og transport af biomasse til bilfast vej. Kilde: Græs til Gas

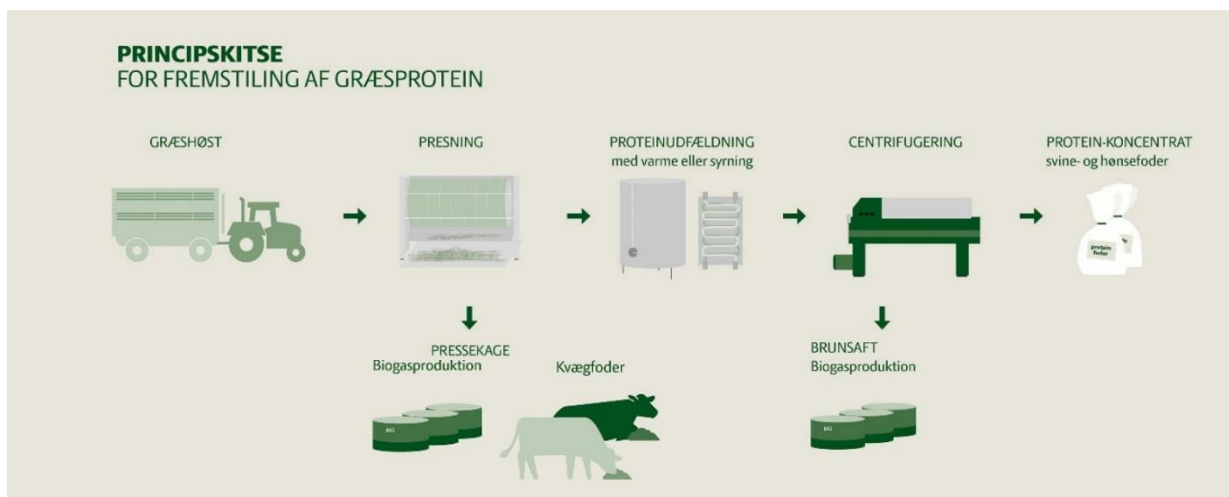
Her har danske Curru-Tek i samarbejde med ”Græs til gas”-projektet været med til at udvikle maskiner målrettet høst- og bjærgningsopgaverne. Man er i dag kommet frem til en metode, hvor biomassen snittes med en specialudviklet maskine og efterfølgende transporteres og samles i en stak ved bilfast vej, hvorfra biomassen opsamles af en lastbil og fragtes videre.

Der er i tilskudsordningen ”ekstensivering med slæt” afsat midler til ekstensivering af 38.000 ha. Forventningen med ordningen er, at de fleste arealer som bliver ekstensiveret, fortsætter med at være drevet ekstensivt i fremtiden. Hvorvidt omdriftsarealer kan udlægges med ekstensivering med slæt afhænger af, om det er muligt at afsætte biomassen. På en mindre del af de udpegede arealer, er det vanskeligt at lave græs af en kvalitet, som matcher kravene til dyrefoder, og for en del arealers vedkommende er de beliggende for langt fra husdyrbrug som kunne være interesseret i at købe biomassen til foder. Konventionelt græs fra omdriftsarealer er defineret som energiafgrøder, mens græs fra permanente græsarealer ikke defineres som energiafgrøder. Da de fleste arealer, som ekstensiveres, formentlig ikke vil komme tilbage til intensiv drift igen, kan muligheden for afsætning af biomasse til biogasanlæg være en vigtig driver. Som det er nu, er biomasse produceret fra arealer, der er under tilskudsordningen ”ekstensivering med slæt” ikke undtaget fra at blive betragtet som energiafgrøder.

Restprodukter fra grøn bioraffinering som alternativ til energiafgrøder

Der importeres i dag store mængder soja fra bl.a. Kina og Sydamerika, som proteintilskud i bl.a. svine- og kyllingefoder, da korn alene ikke dækker aminosyrebehovet hos disse grupper af dyr. Produktionen af denne soja kan resultere i fældning af regnskov samt udledning af store mængder sprøjtemidler. Derudover er opdyrkningen af mere og mere landareal et tilbageslag for biodiversiteten rundt omkring på kloden. Sidst men ikke mindst er importen af især økologisk soja produceret i Kina en stor udgift for de danske landmænd, som dermed får en dårligere forretning i sidste ende. Derfor arbejder man i disse år på at finde en alternativ proteinkilde i form af græsprotein, som i første omgang skal erstatte soja i foderproduktionen til økologiske danske svin, kyllinger og æglæggere. Dette vil give anledning til en øget produktion af græs, som kan være med til at reducere kvælstofudvaskning.

Forarbejdningen af det friske græs og efterfølgende udvinding og opkoncentrering af protein foregår i dag på to prototypeanlæg, som er etableret med tilskud fra Grønt Udviklings- og Demonstrationsprogram. Formålet med disse anlæg er dermed først og fremmest at optimere processen og det anvendte udstyr, således at udvinding af protein fra græs på sigt kan blive et økonomisk eventyr nationalt såvel som internationalt. De overordnede principper i processen ses på figur 5.



Figur 10: Principskitse for fremstilling af græsprotein. Kilde: SEGES Innovation

Græsset høstes på omkringliggende marker og køres efterfølgende til et anlæg, hvor det snittes og presses. Herefter filtreres saften fra, inden denne renses for sand, småsten og fiberrester i en ryste-si. Dernæst bliver saften opvarmet i en varmeveksler, hvormed proteinerne udfælder, og dermed kan isoleres som en proteinpasta ved en centrifugering. Til sidst tørres den udvundne proteinpasta, hvormed man opnår et produkt bestående af mere end 50% protein i tørstoffet og et tørstofindhold på 95-98%.

Fra denne produktion produceres der foruden proteinproduktet også to restprodukter, som evt. kan anvendes til produktionen af biogas. Den ene af disse restprodukter er en pressekage (græspulp), som kommer når man presser græsset, mens det andet restprodukt er såkaldt brunsaft, der kommer fra centrifugeringen. Denne brunsaft består af en stor andel væske samt komponenter, som ikke udfældes ved varmfældningen bl.a. forskellige kulhydrater og næringsstoffer i form af kvælstof og kalium. Foruden anvendelse direkte i biogasanlægget kan brunsaften også anvendes til samensilering med bl.a. halm. Dette vil give anledning til et øget vandindhold i halmen samtidig med, at der tilføres flere sukkerstoffer, hvilket kan give en forbedret ensilering.

Hos SEGES Innovation har man gennem to udrådningsforsøg undersøgt biogaspotentialet i græs, græspulp og brunsaft. Det ses i tabel 3 nedenfor, at der er relativt stor variation i kvaliteten af de undersøgte biomasser. Dette skyldes først og fremmest sæsonvariationer i indholdsstofferne i græsset.

Tabel 4: Tørstofprocent, glødetab og askeindhold samt biogasproduktion fra hhv. frisk kløvergræs, pressekage og brunsaft fra produktionen af græsprotein. Det skal bemærkes, at metanproduktionen fra brunsaft overstiger det niveau, der er teoretisk opnåeligt for omsætning af organisk stof. Det skyldes, at brunsaften indeholder flygtige organiske forbindelser, der fordampes ved TS- og VS-analyser, der begge bliver underestimeret.

| | Frisk kløvergræs | Pressekage | Brunsaft |
|--------------------------------|------------------|-------------|-----------|
| % TS | 10,7 - 15,6 | 21,8 - 32,4 | 4,1 - 4,7 |
| % VS | 9,4 - 14,6 | 19,9 - 30,8 | 2,9 - 3,3 |
| % aske | 1,1 - 1,3 | 1,6 - 1,9 | 1,2 - 1,4 |
| Nm ³ metan / ton VS | 225 - 403 | 294 - 351 | 599 - 881 |
| Nm ³ metan / ton TS | 198 - 378 | 268 - 334 | 424 - 619 |
| Nm ³ metan / ton | 21 - 58 | 58 - 108 | 17 - 29 |

Udrådningsforsøgene viste en omsætning af både pressekage og brunsaft, der er på niveau med omsætningen af majs. Anvendelsen af græspulp og brunsaft fra græsproteinproduktionen kan derfor på sigt udvikle sig til at være en erstatning for majs og andre energifgrøder.

Ekstraktion af protein fra græs og dermed produktionen af pressekage vil typisk ske løbende fra maj til oktober, og pressekagen skal derfor konserveres, hvis den skal anvendes i vinterhalvåret. Det er både i forsøg og praksis vist, at pressekagen kan ensileres, men at det skal gøres relativt kort tid efter ekstraktionen (Larsen et al., 2019). Forsøg med to typer pressekage viste et metanpotentiale på 276-292 m³ metan pr. ton VS (50 dages udrådning) (Larsen et al., 2019). Efter 7-11 måneders ensilering var metanpotentialet øget med 16-25% og 5-10% efter hhv. 15 og 20 dages udrådning. Ved 25-50 dages udrådning så man ikke nogen signifikant forskel. Efter ensileringstab udgjorde metanpotentialet 98-116% af potentialet i den ikke-ensilerede pressekage, hvilket illustrerer, at ensilering er en effektiv måde til at konservere energipotentialt i pressekage.

I forhold til at vurdere, hvor meget pressekage, som potentielt kunne leveres til danske biogasanlæg, er der lavet en antagelse omkring en årlig produktion af 30.000 tons økologisk råprotein. Der er på nuværende tidspunkt to kommercielle grønne bioraffinaderier i drift. Landbrugsstyrelsen kommer desuden til at administrere to ordninger, der skal accelerere udbredelsen af grønne bioraffinaderier. Under ordningerne kan man søge tilskud til hhv. modning af projekter og etablering af bioraffineringsanlæg.

Der er gennemført en beregning af, hvor mange råvarer i form af pressekage og brunsaft, der vil kunne komme fra økologiske kløvergræsarealer, hvis der produceres 30.000 tons økologisk råprotein på danske grønne bioraffinaderier. Råproteinmængden svarer til den årlige import af økologisk foderbrug. Det antages, at 71% af tørstoffet i græsset efter processering forbliver i græsfiberen, mens 12% af tørstoffet ender i brunsaften.

En produktion på 30.000 tons økologisk råprotein kræver et kløvergræsareal på 56.500 ha. Udbyttet i økologisk kløvergræs er typisk 7,8 tons tørstof pr. ha. Derved produceres der hhv. 5,5 og 0,9 tons tørstof pr. ha fra græsfiber og brunsaft. Medtages der sæsonmæssige variationer i udbyttet vil det i alt fra de 56.500 ha give knap 311.000 tons tørstof fra pressekage og knap 51.000 tons tørstof fra brunsaft.

Ovenstående beregninger bygger på foreløbige resultater og erfaringer fra Aarhus Universitet og er baseret på et anlæg, hvor bioraffinaderiet giver grønt protein til foderbrug, en pressekage der kan anvendes enten til kvægfoder eller biogasproduktion, samt en brunsaft der ligeledes kan anvendes til biogasproduktion. Det er endnu uvist, om det er denne type anlæg, der vil blive den mest fremtrædende, eller om der i lige så høj grad vil blive bygget anlæg, hvor græsfiberen og brunsaften er tiltænkt andre formål. I så fald vil dette naturligvis influere ovenstående beregninger.

Roetop som alternativ til energiafgrøder

Roetop udgør en betydelig biomasseressource især i områder med sukkerroeproduktion i sydøstdanmark, mens roer dyrkes i mere begrænset omfang til kvægfoder. I 2021 blev der dyrket 33.297 og 3.587 ha med hhv. sukkerroer og foderroer (Landbrugsstyrelsen, 2021). Tørstofudbyttet af roer til foder og energi varierede i sortsforsøgene i 2021 mellem 4,5 og 7,4 tons pr. ha for topfraktionen og mellem 18,1 og 19,9 tons tørstof pr. ha for rodfraktionen (Frandsen, 2021), dvs. toppen udgør ca. 20-25% af det samlede tørstofudbytte af roeafgrøden. Udbytteerne i praksis er generelt lavere end i forsøgene, men det vurderes realistisk med et tørstofudbytte af roetop på 3-4 tons pr. ha.

Generelt udnyttes roetoppen kun i begrænset omfang, og normalt knuses og spredes biomassen på marken i forbindelse med optagning af roeroden. Den begrænsede udnyttelse skyldes især, at der er tale om en biomasse med relativt lavt tørstofindhold, og at roer primært dyrkes med henblik på udnyttelse af roden. Der er dog betydelige perspektiver i at bjærge og udnytte roetoppen; dels udnyttes biomassen til

energiformål fremfor nedbrydning i jorden, dels minimeres risikoen for udvaskning af næringsstoffer fra marken hen over vinteren, ligesom risikoen for dannelse af lattergas reduceres.

Roer optages typisk med selvkørende roeoptagere med integreret udstyr til aftopning. Ved bjærgning af roetop til biogas skal toppen derfor transporteres direkte over i en frakørselsvogn samtidig med optagning af roerne. Dette medfører, at der ikke samtidig er plads til en frakørselsvogn til at læsse roerne over i, og aflæsningen af roer må derfor ske ved enden af marken, når roeoptageren holder stille. Bjærgning af roetoppen nedsætter derfor udnyttelsen af roeoptagerens kapacitet. Der går ca. 5 min. hvor optageren står stille under aflæsning af roer, mellem 4 og 5 gange pr. time afhængigt af udbyttet.

Roetoppen skal ensileres umiddelbart efter bjærgningen, så den konserveres frem til anvendelsen. Tørstofindholdet i roetop varierede i sortsforsøgene i 2021 mellem 11,6 og 16,0%, mens tørstofindholdet i roden varierede mellem 17,0 og 22,9% (Frandsen, 2021). Med det relativt lave tørstofindhold i roetoppen vil der ved ensilering af ren roetop ske et stort saftafløb i ugerne efter ensileringens start, og det er nødvendigt at ensilere roetoppen sammen med en mere tør biomasse såsom halm (se afsnit om samensilering af halm og roetop).

Metanpotentialet i roer er generelt højt med et niveau på 313-433 m³ pr. ton VS i top af energiroer (Larsen et al., 2017), mens der er fundet værdier på 361 m³ pr. ton VS for en bladrig roetype (Gissén et al., 2014) og 355-391 m³ pr. ton VS for top af sukkerroer (Starke & Hoffmann, 2014; Undiandeye et al., 2022). Det er derfor realistisk at forvente et metanpotentiale på ca. 350 m³ pr. ton VS for roetop.

Dybstrøelse og gylle som alternativ til energiafgrøder

En stor mængde halm finder allerede i dag vej til biogasanlæggene i form af dybstrøelse. I planperioden 2020/2021 blev 32% af al kvægdybstrøelse i Danmark afgasset Landmændene er typisk glade for at bytte dybstrøelsen, og besværet med at holde dybstrøelsesstakken overdækket, til afgasset biomasse. Typisk betaler biogasanlægget kun et beskedent beløb for dybstrøelsen, hvilket sammen med et betydeligt biogaspotentiale (omkring 80 Nm³ CH₄/ton) gør dybstrøelsen til en attraktiv råvare på biogasanlæggene.

Man kunne introducere en ekstra halmmængde via dybstrøelsen gennem et øget strøelsesforbrug ved kvæg. Forbruget kan i mange tilfælde uden problemer hæves til 1000 g strøelse/ bås/dag, hvilket er det dobbelte af mængden, der anbefales i de *Danske anbefalinger for indretning af kvægstalde* (Anonym, 2018). I en besætning med 300 køer svarer det til ca. 55 tons ekstra halm om året (Toft, 2020).

Både dybstrøelse og et øget strøelsesforbrug er i mange tilfælde samtidig de mest effektive måder at få halm ind på biogasanlæggene, idet halmen her har gennemgået en effektiv og gratis forbehandling.

Med indførelsen af faste drænede gulve på kvægbedrifter – hvor gyllen bringes ud af staldene mekanisk med skraberanlæg eller skraberrobotter – er der nu ikke længere behov for at tage hensyn til mængden af anvendt strøelse i sengebåsene i forhold til at få gyllen ud af stalden. Dermed er der mulighed for at øge forbruget af strøelse og dermed mængden af tørstof, der leveres til biogasanlægget gennem gyllen.

Teoretiske potentialer for ressourcer til biogasproduktion

I tabellen nedenfor er de teoretiske potentialer opgjort for en række uudnyttede råvarer. Potentialet skal ses som et teoretisk maksimum, der forudsætter, at den samlede mængde af råvaren bruges til biogasproduktion.

Tabel 5: Oversigt over teoretiske danske potentialer for udvalgte ressourcer af restbiomasser, der i dag kun anvendes biogasproduktion i begrænset omfang. Energiproduktionen fra majs i 20/21 er indsat til sammenligning.

| Afgrøde/ bioressource | Udbytte [ton TS/ha] | Metanpotentiale [Nm ³ CH ₄ / ton TS] | Potentielle arealer [ha] | Potentielle mængder pr. år [tons friskvægt] | Energiproduktion pr. år - teoretisk potentiale, [mio. m ³ CH ₄] |
|---|------------------------|---|--------------------------------|---|---|
| Halm fra korn, i alt | 3,0 | 213 | 545.000 | 1.907.500 | 346 |
| Halm fra vinterhvede | 3,6 | 233 | 240.800 | 1.011.360 | 200 |
| Halm fra vårbyg | 2,6 | 233 | 171.690 | 532.239 | 105 |
| Frøgræshalm | 3,4 | 238 | 43.279 | 173.116 | 34,9 |
| Roetop fra sukker- roer | 3,5 | 298 | 33.297 | 971.163 | 34,7 |
| Roetop fra foderroer | 3,5 | 298 | 3.587 | 104.621 | 3,7 |
| Efter- og mellemaf- grøder | 1,5 | 261 | 550.000 | 5.500.000 | 215 |
| Pressekage fra prote- inekstraktion | 5,5 | 268 | 56.500 | 1.146.679 | 83,3 |
| Brunsaft fra protein- ekstraktion | 0,9 | 443 | 56.500 | 1.155.682 | 22,5 |
| Majs - anvendelse til biogas 2020/2021 | 13 | 313 | 15.865 | 624.995 | 64,6 |

6. Ensilering/samensilering af halm som forbehandlingsmetode

Ensilering som lagrings- og forbehandlingsmetode

Ensilering er en meget udbredt og velfungerende metode til at konservere våd plantebiomasse fra høst og frem til anvendelse, f.eks. til lagring af græs eller majs, der anvendes som kvægfoder hen over det følgende år. Princippet ved ensilering er at opbevare biomassen iltfrit (eller med minimal ilttilgang), hvorefter pH sænkes til et niveau omkring 4,0. Ved disse forhold vil der kun være en begrænset mikrobiel omsætning, og betingelserne for nedbrydende bakterier og svampe vil være ugunstige.

Ved ensilering sænkes pH i biomassen normalt vha. en fermentering med mælkesyrebakterier, der omsætter vandopløseligt sukker til flygtige organiske syrer som mælkesyre og eddikesyre. Udover iltfrie forhold kræver denne fermentering et passende vandindhold (typisk over 20-25% vand) og et vist indhold af sukker. Som alternativ eller supplement til fermenteringen kan pH sænkes vha. tilsætning af organiske eller uorganiske syrer.

Hvis vandindholdet i biomassen bliver for højt, er der risiko for saftafløb under ensileringen, hvilket både udgør et tab og et potentielt miljøproblem (Gebrehanna et al., 2014). Ofte vil der kun være begrænset risiko for saftafløb, hvis vandindholdet er under 70% (dvs. minimum 30% tørstof), men det varierer mellem biomasser.

Under optimale ensileringsforhold vil der kun ske et beskedent energitab under selve ensileringen af biomassen. Da fermenteringsprodukter som mælkesyre og eddikesyre m.fl. også kan omsættes til biogas, kan tabet af metanpotentiale i bedste fald stort set være 0% (Sun et al., 2021). Derimod kan der ved en 'dårlig ensilering' med dominans af f.eks. smørsyrebakterier (*Clostridia*) eller enterobakterier være et stort tab svarende til 16,7% tab af metanpotentiale (Sun et al., 2021). I forsøg med ensilering af våd rajgræs er der endda set tab af metanpotentiale på op til 52% (Pakarinen et al., 2008).

Udover selve fermenteringstab ved ensileringen skal der dog også påregnes et tab pga. aerob nedbrydning, dels fra høst og frem til, at ilten i ensilagestakken er forbrugt, og dels når ensilagestakken åbnes for at udtage biomasse.

For biomasse til biogasproduktion kan ensilering have to formål: Dels at minimere energitabet fra høst og frem til anvendelse i anlægget, og dels at give en forbehandlingseffekt, så ensilagen får et højere metanpotentiale end den oprindelige biomasse. Forbehandlingseffekten ved ensilering skyldes, at der kan ske en begyndende nedbrydning af cellulose og hemicellulose i biomassen, hvilket medfører en hurtigere og større omsætning i biogasanlægget (Abraham et al., 2020; Sun et al., 2021; Tabatabaei et al., 2020). Derudover kan ensileringen være med til at gøre biomassen mindre vandskyende og fremme nedbrydning af lignin i f.eks. halm (Tabatabaei et al., 2020). Begge dele reducerer tendens til dannelse af flydelag i biogasanlæg.

Ud fra et samlet energimæssigt synspunkt skal det øgede metanpotentiale holdes op imod energitabet under ensileringen, hvilket kræver måling af biomasse mængden før og efter ensilering. I nogle tilfælde overstiger forbehandlingseffekten energitabet, og der vil således kunne opnås en større samlet mængde metan af biomassen efter ensileringen (Sun et al., 2021). I andre tilfælde er energitabet større end forbehandlingseffekten, men selv trods et vist energitab kan ensileringen stadig medføre et øget metanpotentiale og dermed en øget metanproduktion pr. ton biomasse (Sun et al., 2021).

ENSILERING AF REN HALM ELLER SAMENSILERING AF HALM OG ANDEN BIOMASSE

Halm kan ensileres alene, hvis vandindholdet er tilstrækkeligt højt. Indholdet af vandopløseligt sukker er dog generelt lavt i halm, og ensileringsprocessen kan derfor forbedres ved iblanding af mere sukkerholdig

grøn biomasse, såsom roetop eller efterafgrøde. Vandindholdet i roetop og efterafgrøder er generelt så højt, at der vil ske et betydeligt saftafløb fra ensilage af ren grøn biomasse. Der er således to vigtige fordele ved at samensilere halm og grøn biomasse: Dels vil den grønne biomasse bidrage med sukker til ensileringsprocessen, og dels vil halmen absorbere saft fra den grønne biomasse og derved reducere risikoen for saftafløb.

I det efterfølgende beskrives forskellige eksempler på ensilering af halm alene og samensilering af halm med andre biomasser.

ENSILERING AF HALM ALENE

Ensilering af halm til biogas er en oplagt mulighed for halm, der er for våd til at kunne lagres uden indpakning, og afhængig af vejret i høsten vil der ofte være større eller mindre mængder våd halm til rådighed til dette formål. Dette gælder både kornhalm og frøgræshalm, hvor frøgræshalm i nogle tilfælde er relativt fugtig ved høst. Hvis der er tale om korte afstande (under ca. 10 km), vil den våde halm kunne opsamles direkte fra skår på marken med snittevogn og køres i stak på lagerpladsen. Her kan halmen køres sammen for at mindske iltindholdet, og der kan evt. tilføres mere vand. Stakken kan dækkes med plastic som ved ensilering af grovfoder. Alternativt kan den ligge uden overdækning, men da skal der påregnes et vist energitab pga. aerob nedbrydning i overfladen. I afsnittet vedr. biogasanlæggenes erfaringer med at bruge halm til biogas er der beskrevet konkrete eksempler på ensilering af halm fra både korn og frøgræs.

Hvis der er tale om længere afstande mellem mark og lagerplads, er det mere oplagt at transportere halmen i halmballer, da der kan fragtes betydeligt mere halm pr. læs, når halmen er presset. Ensilering af våd halm i baller undersøges i det igangværende EUDP-projekt [StrawSilage](#) (2020-2023). Grundtanken i projektet er, at der afhængig af halmens vandindhold kan presses baller med forskellige kvaliteter: Hvis halmen er tør, kan den lagres som den er og anvendes til strøelse, bioraffinering eller forbrænding. Hvis halmen er våd, kan ballerne wraps med et modificeret POMI-system, hvor lufttilgangen minimeres ved at pakke ballerne tæt sammen i lange stakke med 2*4 baller i tværsnit, og som lukkes i enderne. Halmen ensilerer så under lagringen. Stakkene kan placeres enten i marken, ved gården eller hos biogasanlægget. Hvis presning af våd halm til biogasproduktion kan fungere i praksis, vil dette også kunne øge udnyttelsen af halmpræsserne, sammenlignet med kun at kunne presse, når halmen er tør.

De foreløbige resultater fra StrawSilage-projektet viser en stigning i metanpotentialet på 1-12% efter 3 måneders ensilering (ved 90 dages batchudråkning) i forhold til ikke-ensileret halm. Især synes højt vandindhold under ensileringen at fremme forbehandlingseffekten, idet metanpotentialet stiger med øget vandindhold. Efter 6 måneders ensilering med 55% vand var metanpotentialet øget med ca. 20%.

I en tysk undersøgelse med hvedehalm med 20 mm partikelstørrelse blev metanpotentialet øget med 20 og 32% ved ensilering i 180 dage med hhv. 55 og 70% vandindhold, sammenlignet med ikke-ensileret halm (179 m³/ton VS) (Gallegos et al., 2017). Undersøgelsen viste dog også, at findeling til 2 mm partikelstørrelse i sig selv øgede metanpotentialet med 36% selv uden ensilering, og at der kun var en begrænset ekstra effekt af ensilering, når halmen var så findelt. Ensilering og findeling af halm synes således hver især at kunne give omtrent samme effekt på halmens metanpotentiale.

En foreløbig konklusion vedr. ensilering af halm er, at der skal tilstræbes et højt vandindhold i halmen for at øge metanpotentialet mest muligt under ensileringen, gerne væsentligt over 30% vand. I praksis kræver dette en betydelig mængde nedbør på halmen før presning, og det kan være vanskeligt at opnå så højt et vandindhold uden risiko for køreskader på marken i forbindelse med presning. Det kan også være en udfordring at få fjernet halmen fra marken tidligt nok i forhold til etablering af efterafgrøder eller tidligt sået vintersæd, hvis man må vente længe på tilstrækkelig nedbør. Derudover vil pressekapaciteten formodentlig blive reduceret ved så højt vandindhold, ligesom der vil blive tale om meget tunge halmballer. Disse

praktiske forhold og driftsøkonomi m.m. ved ensilering af våd halm i baller vil blive nærmere belyst senere i StrawSilage-projektet.

StrawSilage-projektet har også undersøgt betydningen af, at ballerne med våd halm pakkes ind. Uden wrapping skete der en varmeudvikling med temperaturer op til 43°C i vinterhvedehalm (18% vand) og op til 62°C i vårbygghalm med en del grøn biomasse (52% vand). Derimod skete der kun en begrænset varmeudvikling i tilsvarende halmballer, der var wrappet enkeltvis. Varmeudviklingen medfører energitab fra halmen, og der er fundet et gennemsnitligt tørstofstab i ikke-wrappede baller på 18%, mens det tilsvarende var 4,6% i wrappede, ensilerede baller. Dette understreger betydning af at få reduceret lufttilgangen til våd halm mest muligt for at få en ensileringsproces fremfor en komposteringsproces og derved reducere energitabet under lagringen.



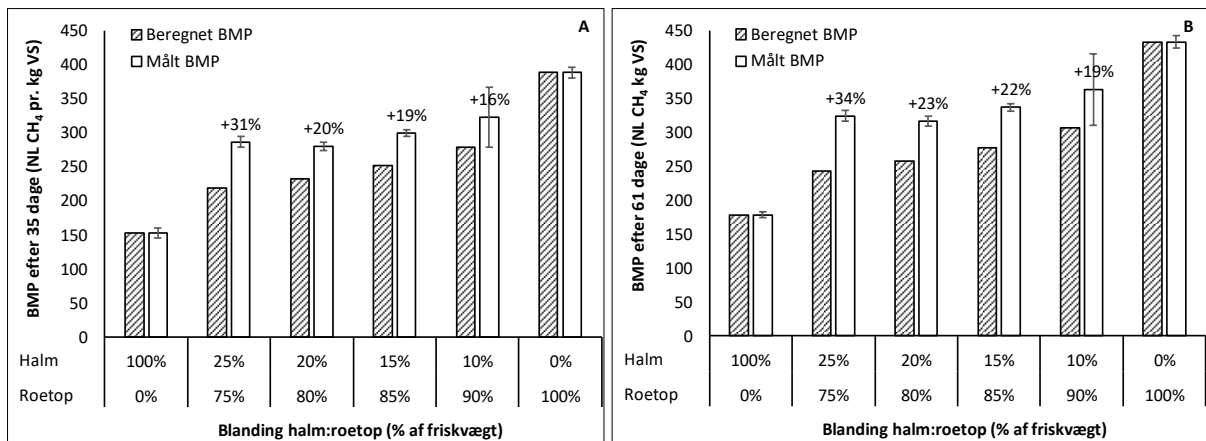
Figur 11: Presning af våd halm til biogasproduktion hos Skinnerup Maskinstation i EUDP-projektet StrawSilage. Til højre ses dyser, der udsprøjter ensileringsmiddel på halmskåret lige foran presserens pick-up. Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut.

Samensilering af halm og roetop

Roetop er en oplagt biomasse at anvende til samensilering med halm med henblik på biogasproduktion. Tørstofindholdet i roetop er lavt, så der er behov for opsamling af en stor mængde saftafløb i de første uger efter start af ensileringen. Alternativt kan der tilsættes saftabsorbende biomasse såsom halm. Halm og roetop kan enten opblandes ved indlægning i siloen, eller de to biomasser kan indlægges skiftevis i lag for at begrænse saftafløb.

Danske forsøg med samensilering af vinterhvedehalm og roetop har vist betydelige stigninger i metanpotentialitet efter ensileringen. I små-skalaforøg blev metanpotentialitet efter 9 måneders ensilering øget med 19-34% (61 dages udrådning) afhængig af blandingsforholdet, og den største effekt blev opnået for en blanding med 25% halm og 75% roetop (friskvægtbasis), svarende til et tørstofindhold på 32,5% (Larsen et al., 2017). I pilot-skalaforøg blev metanpotentialitet efter 6 måneders ensilering øget med 18-32% for en blanding med 24% halm og 76% roetop og med 29,2% tørstof i blandingen. Anvendelse af halm-roetopen-silage i biogasreaktorer på Aarhus Universitet har desuden vist, at der var mindre tendens til flydelagsdannelse efter ensileringen, og der kunne køres med et højere tørstofindhold sammenlignet med ikke-ensileret halm, hvilket er en anden væsentlig gevinst ved samensileringen.

Der synes således at være gode muligheder for opnå øget metanpotentialitet ved samensilering af halm og roetop og samtidig løse udfordringen med at minimere saftafløb under lagring af roetop med højt vandindhold.



Figur 12: Målt og beregnet metanpotentiale (BMP) for forskellige blandinger af hvedehalm og roetop efter ensilering i vakuumposer i 9 måneder. Figur A og B viser metanpotentialet efter hhv. 35 og 61 dages udrådning i batch-test. Tal over søjlerne angiver synergieffekten ved ensilering, dvs. hvor meget højere metanpotentialet er i ensileret biomasse sammenlignet med ikke-ensileret biomasse. (Data fra (Larsen et al., 2017)).

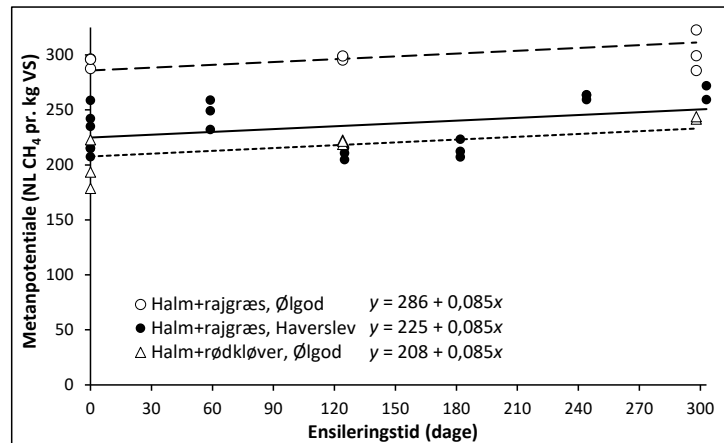


Figur 13: Sam-ensilering af halm og roetop i forsøg i 2015-2016. Til venstre ses den friske blanding, og til højre ses blandingen efter ensilering i 6 måneder i pilot-skala siloer. Ensilagen havde en god, syrlig lugt. Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut.

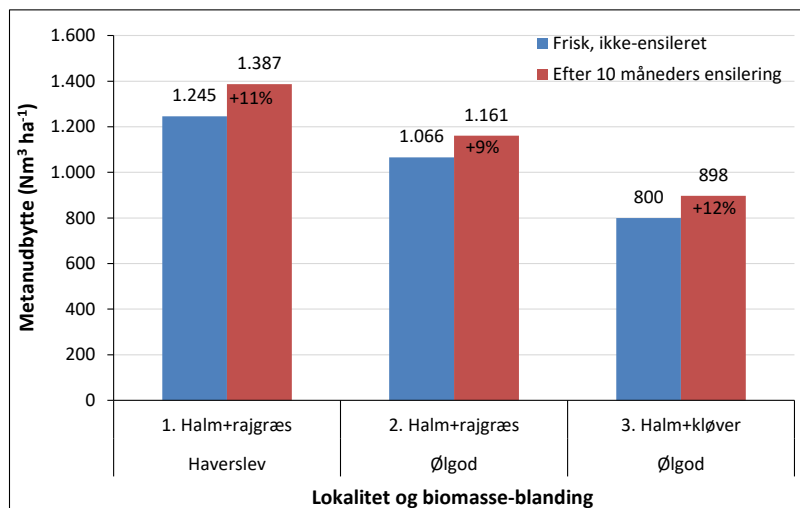
Samensilering af halm og efterafgrøde

Samensilering af halm og efterafgrøde er en oplagt mulighed for at lagre og forbehandle biomasse til biogasproduktion. Efterafgrøder kan omfatte mange forskellige plantearter, ligesom udviklingstrinet ved høst af biomassen kan variere betydeligt afhænge af etableringstidspunkt og høsttidspunkt. Generelt har efterafgrøder dog relativt lavt tørstofindhold, ofte mellem 10 og 15% men i nogle tilfælde over 20% (Molinuevo-Salces et al., 2013). Ved ensilering af biomasse med så lavt tørstofindhold er der risiko for et betydeligt saftafløb, og ligesom for roetop er det også muligt at undgå saftafløb ved samensilering af efterafgrøde med halm. Som tommelfingerregels bør man også her tilstræbe et tørstofindhold på minimum 30% i biomasseblandingen for at minimere risikoen for saftafløb.

Forsøg med samlet høst af vårbyghalm og efterafgrøder har vist, at metanpotentialet pr. kg VS for biomasseblandingen varierer meget afhængig af biomassesammensætningen, med højere metanpotentiale ved større andel af efterafgrøde (Figur 14) (Larsen et al., 2021). Desuden viste forsøget, at metanpotentialet generelt steg gradvist med ensileringstiden. Derved blev det potentielle metanudbytte pr. ha øget med 9-12% efter 10 måneders ensilering sammenlignet med ikke-ensileret biomasse (Figur 15).



Figur 14: Udvikling i metanpotentiale gennem 0 til 10 måneders samensilering af vårbyghalm sammen med efterafgrøde af enten italiensk rajgræs eller rødkløver. Metanpotentialet er angivet for 58 dages udrådningstid. (Fra Larsen et al., 2021)



Figur 15: Metanudbytte pr. ha ved samlet høst af kornstrå (vårbyg) og efterafgrøde (italiensk rajgræs eller rødkløver). Efterafgrøderne blev forårsudlagt, vårbyggen blev høstet ved ribbehøst i august, og strå+efterafgrøde blev høstet medio oktober. Metanudbyttet er angivet ved en udrådningstid på 58 dage for frisk høstede biomasseblandinger hhv. efter ensilering i 10 måneder. (Fra Larsen et al., 2021)

Forsøg med samensilering i 4 måneder af forskellige blandinger af vårbyghalm og efterafgrøde (primært rødkløver) viste 5-15% stigning i metanpotentialet efter 90 dages udrådning for de fleste blandinger men også et fald på 2% i blandingen med lavest tørstofindhold (Feng et al., 2019). Ved kortere udrådningstider på 30 eller 60 dage var der en større positiv effekt af ensileringen på metanpotentialet. I en anden undersøgelse af samensilering af halm og efterafgrøde var der dog enten samme eller lavere metanpotentiale efter ensilering (Molinuevo-Salces et al., 2015).

Der er således en varierende effekt af samensilering af halm og efterafgrøde på metanpotentialet, hvilket bl.a. kan skyldes variation i biomassesammensætning, ensileringstid og udrådningstid m.m., men generelt formodes der at kunne opnås i størrelsesordenen 5-10% stigning i metanpotentialet.

Samensilering af halm og græs fra naturpleje eller efterslæt etc.

Ved høst af andre grønne biomasser til biogasproduktion vil ensilering også være en naturlig opbevaring af biomassen fra høst til anvendelse. Hvis tørstofindholdet er over ca. 30%, vil biomassen kunne ensileres med meget begrænset risiko for saftfløb. Dette kan f.eks. dreje sig om græs fra ekstensive arealer, hvor der kun høstes f.eks. to slæt pr. år, og hvor tørstofindholdet derfor er relativt højt. I forsøg med

strandsvingel, rajsvingel og rørgræs på et drænet lavbundsareal, blev første slæt høstet i juni måned med 60-70% tørstof (Kristensen et al., 2016). Efter 10 måneders ensilering blev metanpotentialet øget med 0-26%.

Hvis der er tale om biomasser med tørstofindhold under 30%, bør biomassen ensileres sammen med f.eks. halm for at undgå saftafløb. Dette kan f.eks. dreje sig om efterslæt fra frøgræsmarker. Ligesom ved ensilering af roetop skal den grønne biomasse enten blandes med halm eller indlægges i siloen skiftevis med lag af halm og grøn biomasse. Også her er det sandsynligt, at samensileringen vil øge metanpotentialet i et vist omfang via en forbehandlingseffekt på halmen.

Samensilering af halm og madaffald

Køkken- og madaffald er kategori 3-affald og består primært af organisk affald fra private husholdninger, storkøkkener, catering m.m. Fra private husholdninger indsamles køkken- og madaffald som kildesorteret organisk dagrenovation (KOD), som indeholder organisk materiale og diverse emballager, og hvor emballage og fremmedlegemer fjernes i et forbehandlingsanlæg. Madaffald/KOD kan også omsættes til biopulp via en neddeling og tilsætning af vand undervejs for at gøre biomassen pumpbar med ca. 10-20% tørstofindhold (Slagelse Forsyning, 2017). Madaffald udgør en relevant ressource til biogasproduktion, bl.a. pga. et højt metanpotentiale, og fordi det sikrer recirkulering af næringsstoffer. Typiske specifikationer af madaffald ses i Tabel 6.

Tabel 6: Typiske specifikationer af madaffald

| Parameter | Indhold | Kilde |
|---|--|--|
| Tørstofindhold (%) | ~30 (lavere ved stort indhold af grønsager) | Energinet.dk, 2012; Hansen et al., 2017 |
| Askeindhold (% i tørstof) | ~15 (11-19) | Energinet.dk, 2012; Hansen et al., 2017 |
| Metanpotentiale (m ³ CH ₄ pr. ton VS) | ~ 400 | Energinet.dk, 2012 |
| Metanpotentiale (m ³ CH ₄ pr. ton TS) | ~ 340 | Energinet.dk, 2012 |

Som våd biomasse vil madaffald i teorien kunne ensileres enten alene eller sammen med halm. Der er ikke fundet undersøgelser vedr. effekten af samensilering af halm og madaffald, men det er sandsynligt, at ensileringsprocessen vil kunne medføre en vis forbehandlingseffekt på halmen i form af let øget metanpotentiale og nedsat tendens til at danne flydelag.

Der er dog flere væsentlig praktiske og lovgivningsmæssige udfordringer ved at samensilere halm og madaffald. Mens halm bjærges ved høst i en kort periode af året, vil madaffald produceres løbende over hele året. Derfor vil der løbende skulle ske en indlægning af mindre mængder biomasse i silo efterfulgt af tildækning, hvilket er mindre rationelt end ved indlægning af store mængder biomasse på én gang. Der kan muligvis også være lugtgener i forbindelse med den løbende håndtering af madaffald, ligesom der opstår problemer med rotter ved opbevaring af ensilage med stort indhold af madaffald.

Iflg. Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål (BEK nr. 1001 af 27/06/2018) skal organisk madaffald gennemgå kontrolleret hygiejniserings før anvendelse til jordbrugsformål for at undgå smittekilder (Miljø- og Fødevarerministeriet, 2018). Dette kan ske ved opvarmning til 70°C i en time eller ved hygiejniserings i forbindelse med udrådning i biogasanlæg ved minimum 52°C i minimum 10 timer. Ved håndtering af madaffald skal omlæsning ske på fast plads og helst indendørs eller fra container til container, ligesom madaffaldet skal være tildækket under opbevaring for at forhindre smittespredning via f.eks. fugle og rotter (Erik Vestergaard, Fødevarerstyrelsen, pers. medd., 15/3 2022). Det vurderes derfor ikke umiddelbart realistisk at samensilere halm og madaffald udendørs, og Fødevarerstyrelsen vil skulle give tilladelse til en sådan håndtering. Evt. krav til anlæg, der vil ensilere madaffald, vil skulle findes i EU-forordningerne

1069/2009 og 142/2011 vedr. animalske biprodukter (Erik Vestergaard, Fødevarestyrelsen, pers. medd., 15/3 2022).

Hvis madaffald eller biopulp i stedet hygiejniseres inden samensileringen med halm, vil det være formodentlig være lovgivningsmæssigt muligt at opbevare ensilagen udendørs som anden ensilage (Erik Vestergaard, Fødevarestyrelsen, pers. medd., 15/3 2022). I praksis vurderes dog ikke at være realistisk at lave en hygiejnisering af madaffaldet forud for ensilering af halm, da det vil være mere rationelt at anvende madaffaldet direkte i biogasproduktionen.

Omkostninger til ensilering

Omkostningerne til ensilering afhænger af en række forhold. Når materialet har et tørstofindhold på over 30% kan ensilagen lægges i en markstak. Er tørstofindholdet under 30% skal ensilagen etableres på fast underlag med opsamling af eventuelt saftafløb. I biogassammenhæng etableres typisk plansiloer til ensilagen i umiddelbar nærhed af biogasanlægget, så anvendelsen af ensilagen kan ske mest rationelt. Derfor vil de fleste anlæg der hidtil har anvendt energiafgrøder også råde over den fornødne lagerkapacitet.

Når ensilagestakken skal etableres, sker det som oftest ved at frakørselsvogne tipper biomassen af foran stakken hvor der så er en gummiged, der lægger biomassen op i stakken. Dette kaldes indlægning. I de tilfælde, hvor grøn biomasse skal blandes med halm til samensilering kan det foregå på to måder. Enten lægges et tykt lag halm i bunden og den grønne biomasse ovenpå, eller der læses halm i bunden af en møgspreader og derefter grøn biomasse ovenpå. Møgspreaderen bakkedes hen til stakken, og under aflæsning vil spreaderens roterende valser sikre en rimelig jævn opblanding af halm og grøn biomasse. Når stakken så er etableret, skal den overdækkes enten med plastik eller en fiberdug. Omkostningerne til ensilering kan derfor variere en del. En ensilageplads kan etableres for 300-600 kr. pr. m³, svarende til 20 kr./ton pr. år. En gummiged koster 600-800 kr. pr. time. Hvis der høstes 40 ton friskmasse pr. ha. svarer det til 15-20 kr. pr. ton frisk masse.

Konklusion og anbefalinger vedr. ensilering af halm

Ensilering af halm er en relevant metode til at lagre fugtig halm med mindst muligt energitab, og hvor der samtidig kan opnås forbehandlingseffekter i form af mindre tendens til flydelagsdannelse og et øget metanpotentiale. Ensilering kan derfor udgøre et alternativ eller supplement til mekanisk forbehandling af halm.

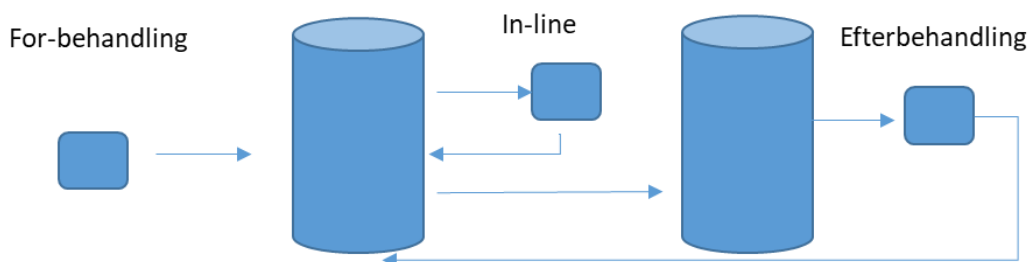
Halm kan ensileres i ren bestand ved tilstrækkelig opfugtning, og metanpotentialet vurderes i bedste fald at kunne øges med op til 20% pga. ensileringen men i praksis nok i størrelsesordenen 5-10%. Forbehandlingseffekten af ensileringen synes at være størst, hvis halmen er meget våd, gerne over 30% vand. Våd halm kan enten ensileres i stak med snittet halm eller i halmballer, der tildækkes. Der synes at være betydelige perspektiver i ensilering af våd halm som kombineret lagring og forbehandling, men den praktiske håndtering skal optimeres.

Halm kan også samensileres med forskellige typer af grøn biomasse. Samensilering af halm og roetop har i forsøg øget metanpotentialet med op til 18-34%, mens samensilering af halm og efterafgrøder har vist op til 5-15% ekstra metanpotentiale. Forbehandlingseffekten af ensileringen varierer, men det vurderes, at metanpotentialet realistisk vil kunne øges med 5-15% i praksis. Ved samensilering med halm vil saftafløb fra den grønne biomasse kunne forhindres, hvis der er minimum 30% tørstof i biomasseblandingen. For samensilering af halm og efterafgrøde er der særlige perspektiver, idet de to biomasser under nogle forhold vil kunne høstes samlet. Samensilering er derfor en oplagt mulighed for at lagre og udnytte grønne biomasseresressourcer og samtidig opnå et større metanudbytte af halmen. Det er dog vigtigt at optimere logistikken omkring bjærgning af den grønne biomasse og indlægning i silo sammen med halmen for at minimere omkostningerne. Samensilering af halm og KOD kan i princippet være en mulighed men vurderes ikke at være realistisk i praksis pga. krav til hygiejnisering.

7. Teknologier til forbehandling, efterbehandling og in-line behandling

Ved anvendelse af halm til biogas kan der med fordel anvendes en forbehandling, da halm er tungt omsætteligt og det er oftest kun muligt at udnytte 60-70% af halmens gasudbytte medmindre der sker en forbehandling. I den nuværende biogassektor i Danmark, vurderes det at det er nødvendigt med en forbehandling af halm, hvis denne ressource skal anvendes i større skala i de danske anlæg og det fulde gaspotentiale skal opnås. Gennem de senere år er der gjort en betydelig forsknings- og udviklingsindsats omkring forskellige forbehandlingsmetoder, og mange virksomheder bidrager med teknologiudvikling på området. Men endnu mangler en optimering af de enkle og robuste metoder, der på en økonomisk rentabel måde kan gøre halm rigtigt interessant for biogasanlæggene. Den traditionelle forbehandling dækker over teknologier der behandler biomasse inden det tilføres biogasprocessen med henblik på at øge gasudbyttet eller muliggøre anvendelsen af biomasser som halm, der vanskeligt kan anvendes i en traditionel biogas proces. Udtrykket ”forbehandling” kan imidlertid anvendes i en bredere forstand ved at inkludere teknologier, der senere i processen kan anvendes til at øge gasudbyttet og/eller sænke viskositeten i reaktoren således, at der kan behandles en større mængde af vanskeligt håndterbar biomasse som halm og dybstrøelse. ”Forbehandling” dækker således over en række teknologier hvoraf flere af metoderne ikke er placeret før selve tilsætningen til biogasreaktoren.

I nedenstående figur fremgår placeringen af de forskellige teknologier opdelt i forbehandling, in-line og efterbehandling.



Figur 16 Principskitse

I tidligere projekter har Aarhus Universitet undersøgt en række forbehandlings teknologier. I de kommende afsnit er præsenteret resultater af tidligere undersøgelser af forskellige forbehandlingsmetoder til faste biomasser med varierende tørstofindhold, såsom halm (højt tørstofindhold) og dybstrøelse (lavt til middel tørstofindhold). Forbehandlingsmetoderne omhandler primært neddeling (fx snitning, ekstrudering og brikettering mm.) da disse nemt kan implementeres på biogasanlæg. Fordelen ved neddeling er reduktionen af flydelag i reaktoren samt større overfladeareal af biomassen. Både reduceret flydelag og større overfladeareal sikrer bedre kontakt mellem biomasse og mikroorganismer, og sikrer dermed at mere af biomassen omsættes til biogas.

Hammermølle neddeling (Hüningen)



Figur 17: Hüningen hammermølle ved Thorsø Miljø- og Biogasanlæg a.m.b.a

Faste biomasser tilføres en container før de doseres til hammermøllen. Containeren har et "bevægeligt gulv", som transporterer biomassen til en snegl. For enden af containeren er der en opriver, der doserer materialet til et sneglesystem, der transporterer biomassen videre til hammermøllen. Containeren fyldes manuelt med en teleskoplæsser eller der aflæsses direkte deri. Tidligere forsøg har vist at der har været en stor udfordring med at behandle halm (Biogas Taskforce, 2015).

Forbruget af el er tidligere blevet kortlagt til 7.053 kWh pr. måned, hvor hammermøllen står for ca. 58 % af forbruget. Elforbruget hos Thorsø Biogas er kortlagt til ca. 12 kWh/ton. Behandling af dybstrøelse er kortlagt til 8 kr/ton, mens behandling af ren halm er kortlagt til 69 kr/ton – dette er i rent elforbrug, og ikke slitage (Energistyrelsens Biogas Taskforce, 2016). Slitagen udgør ca. 1700 kr. pr. måned. Gevinsten ved anvendelse er rapporteret til maksimalt 18 % efter 12 dage. Efter 20 dage er gevinsten reduceret til 6 %, og der er derfor begrænset gevinst for anlæg med over 20 dages opholdstid. Teknologien kan imidlertid være nødvendig for at kunne behandle store mængder dybstrøelse og halmrige biomasser i forhold til omrøring og pumpbarhed.

Ekstrudering



Figur 18: Ekstruder ved Forskningscenteret AU Foulum

Ved AU Foulums biogasforsøgsanlæg, er der etableret et forbehandlings- og indfødningsanlæg. Materialet tilføres biomikseren (venstre del). Efter opblanding føres biomassen til ekstruderen via transportbånd, hvor den behandles. Ved hjælp af to snegle presses biomassen sammen under højt tryk. Friktionen i ekstruderen gør, at biomassen også varmebehandles. Når biomassen forlader maskinen, lettes trykket pludseligt, hvilket medvirker til at sprænge plantecellerne. Biomassen 'åbnes' således og får en større overflade,

og modvirker flydelag yderst effektivt. Det gør også at reaktoren kan belastes yderligere, så længe de tekniske specifikationer (fx omrøring) kan holde til højere tørstofindhold.

El forbruget for systemet er ca. 20-120 kWh pr. ton afhængigt af hvilken type biomasse der anvendes. Der er typisk en sammenhæng mellem det anvendte forbrug og tørstofindholdet. Jo højere tørstofindhold, jo mere strøm skal der anvendes. Vedligeholdelse af ekstruderen er rapporteret til ca. 20 kr/ton biomasse, baseret på ca. 2 års drift hos AU Foulum (Energistyrelsens Biogas Taskforce, 2016). Gevinsten der vindes ved ekstrudering ligger mellem 1-27% ekstra metan afhængigt af opholdstid. For opholdstider ml. 20-30 dage er der rapporteret 15-27% ekstra metan. Langtidsudrådninger (> 60 dage) vinder ca. 1-10% ekstra metan ift. ubehandlet materiale. Investeringen ved ekstruderen ved AU Foulum er ca. 1.3 mio. DKK.

Brikettering



Figur 19; Briketteringsanlæg hos Forskningscenter AU Foulum

Briketterings anlægget hos AU Foulum består primært af en hammermølle til neddeling med efterfølgende briketpresse fra CF Nielsen A/S. Konfigurationen i Foulum har en kapacitet på 0,9 – 1,4 tons/time med briketter på 75mm i diameter. Briketteringsteknologien er udviklet af CF Nielsen, og består af en mekanisk induceret dampeksplønsionsmotor (55 kW) med gentagen kompression-dekompression cyklusser ved tryk mellem 1.500 og 2.000 bar og ved atmosfærisk.

Forbruget ved briketteringsanlægget ligger på omk. 118-135 kWh/ton, og afhænger af typen af hammermølle der anvendes til neddeling. Brikettering i sig selv anvender ca. 84,3 kWh/ton. Gevinsten ved neddeling og brikettering er gennem forsøg målt til ca. 10% ved en udrådningstid på 20-30 dage. Ved tilsætning af lud under brikettering kan der udvindes op til 20% mere metan. Dette gælder kun for korte opholdstider, hvor merudbyttet ved lange opholdstider er begrænset. AU Foulum har dog lavet forsøg med halmbriketter, hvor op til 14% tørstof i reaktoren (høj tank) blev opnået uden dannelse af flydelag. Forsøgene viste at tilførsel af halmbriketter kunne fordoble gasproduktionen ift. ren gylle. Briketteringsanlæg har en investering på 10. mill. DKK.

Selektiv opholdstid (Genudrådning af fiber)

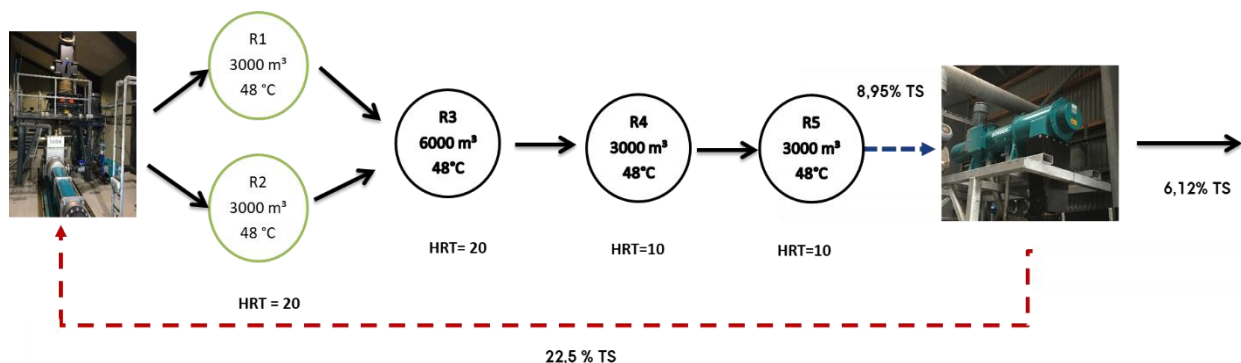
Selektiv opholdstid fungerer ved at opholdstiden af tungt nedbrydeligt organisk stof øges i forhold til den hydrauliske opholdstid. Metoden fungerer i praksis ved separation og recirkulering af fiberfraktionen hvorved opholdstiden af den tungt omsættelige del af biomassen forlænges. Separation og recirkulering af fiberfraktionen kan enten udføres i et åbent system med skruepresse eller ved en teknologi hvor fiberen recirkuleres i et lukket system. Metoden praktiseres bl.a. på Rybjerg biogas og ved Madsen Bioenergi.

På Rybjerg biogas er tørstofindholdet i reaktorerne op mod ca. 12%, mens tørstofindholdet i efterlager 3 er ca. 9%. Ca. 75% af den afgassede biomasse fra efterlager 3 separeres i en Börger skruepresse med en 0,5

mm si, og fiberfraktionen køres igennem biogasanlægget igen via indfødningsystemet til fast biomasse. Tørstofindholdet i væskefraktionen er ca. 6%, dvs. det er kun de største partikler fra den afgassede biomasse, der recirkuleres.



Figur 20. Börger skruepresse, der separerer ca. 75% af den afgassede gylle. Gyllefibren køres igennem biogasanlægget igen.



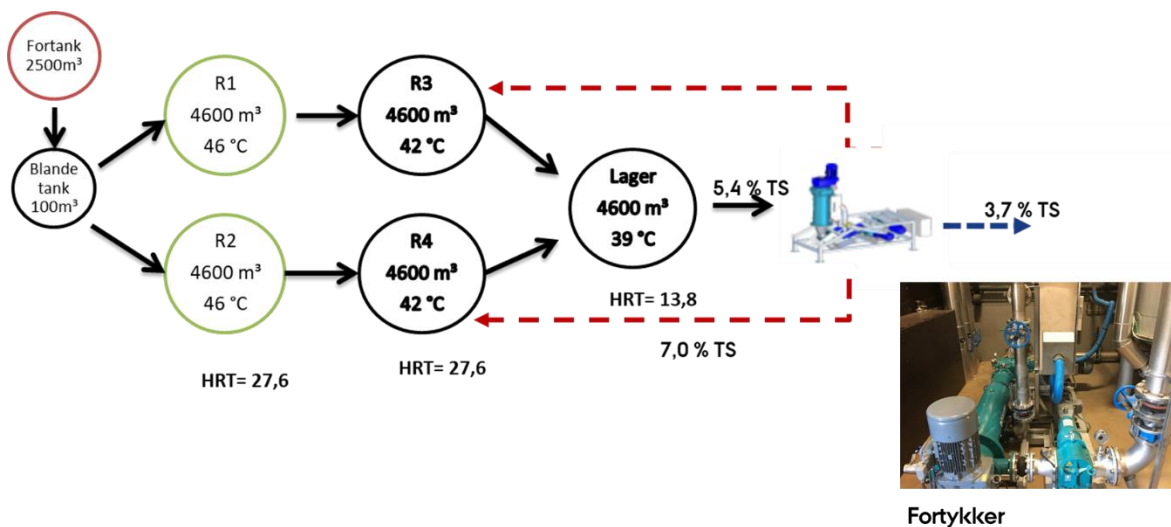
Figur 21: Principskitse for genudrødning af fibre på Rybjerg biogas

Investeringen i en separator på Rybjerg biogas har været 528.800 kr og de årlige omkostninger til drift af separatoren har været ca. 50.042 kr/år. I tabel 7 er økonomien for et anlæg med separation beregnet med udgangspunkt i Rybjerg biogasanlæg. Omregnet til metan opnås en produktions pris per m³ ekstra metan på hhv. 1,5 og 1,3 kr/m³ CH₄. Der er således en betydelig gevinst ved anvendelse af separation og genudrødnings teknologi på Rybjerg biogas.

Tabel 7: Beregninger for effekt og omkostninger ved anvendelse af genudråkning ved forskellige forudsætninger for levetiden med udgangspunkt i Rybjerg biogas. Forrentning er fastsat til 10%.

| Genudråkning fiber Rybjerg | | | | |
|------------------------------|---------------|--------------------------------------|---------|---------|
| Biomasse | | Type | Blandet | Blandet |
| Levetid | | år | 5 | 10 |
| Gasudbytte | | m ³ CH ₄ /ton | 30 | 30 |
| El | | kWh/ton | 5 | 5 |
| Varme | | kWh/ton | 0 | 0 |
| Investering | Forbehandling | kr. | 528.000 | 528.000 |
| Kapacitet | | ton/år | 95.813 | 95.813 |
| El | | kr./ton | 2,4 | 2,4 |
| Investering | Behandling | kr./ton | 5,51 | 5,51 |
| Investering | Infrastruktur | kr./ton/år | 0 | 0 |
| CAPEX | | kr./år | 139.285 | 85.930 |
| CAPEX | | kr./ton | 1,5 | 0,9 |
| OPEX | Sliddele | kr./ton | 0,6 | 0,6 |
| Samlede omkostninger | | kr./ton | 4,4 | 3,9 |
| Ekstra gasudbytte | | Nm ³ CH ₄ /ton | 3 | 3 |
| Produktionspris ekstra metan | | kr/m ³ CH ₄ | 1,483 | 1,297 |

Tørstofindholdet i reaktorerne ved Madsen BioEnergi er ca. 9%, mens tørstofindholdet i efterlager er ca. 5,5% i den periode hvor udstyret har kørt. Den afgassede biomasse fra lagertank ”fortykket” i en Börger bioselect som er et lukket system. Den specielt designede og patenterede snegl som er udformet med hulrum i selve snegle- vindingerne, bevirker at fibre fra gyllen klemmer sig fast i vindingerne og danner en blød og konstant udskiftende «fiberbørste» som renser det rustfrie spaltefilter, der omslutter sneglen. Tørstofindholdet i væskefraktionen der pumpes til slutlager, er ca. 3,7% medens den tykke fraktion der genudrækkes har et tørstofindhold på ca. 7% TS.



Figur 22: Principskitse for genudråkning af fibre ved Madsen Bioenergi.

Økonomien ved genudråkning af fiber ved Madsen BioEnergi fremgår af tabel 8. Omregnet til metan opnås en produktions pris per m³ ekstra metan på hhv. 3,0 og 2,5 kr/m³ CH₄. Der er således en betydelig gevinst ved anvendelse af genudråkningsteknologi på Madsen Bioenergi.

Tabel 8: Beregninger for effekt og omkostninger ved anvendelse af genudråkning ved forskellige forudsætninger for levetiden med udgangspunkt i Madsen BioEnergi. Forrentning er fastsat til 10%.

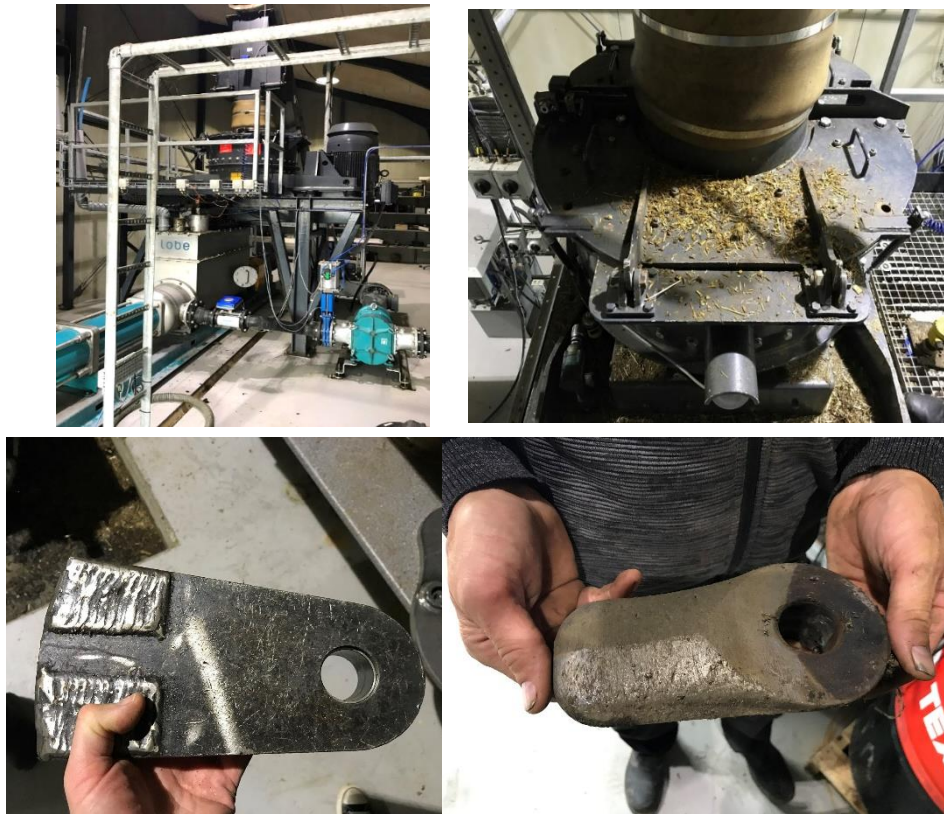
| | | Genudråkning fiber Madsen BioEnergi | | |
|------------------------------|---------------|--|---------|---------|
| Biomasse | | Type | Blandet | Blandet |
| Levetid | | år | 5 | 10 |
| Gasudbytte | | m ³ CH ₄ /ton | 30 | 30 |
| El | | kWh/ton | 5 | 5 |
| Varme | | kWh/ton | 0 | 0 |
| Investering | Forbehandling | kr. | 900.000 | 900.000 |
| Kapacitet | | ton/år | 120.000 | 120.000 |
| El | | kr./ton | 2 | 2 |
| Investering | Behandling | kr./ton | 7,50 | 7,50 |
| Investering | Infrastruktur | kr./ton/år | 0 | 0 |
| CAPEX | | kr./år | 237418 | 146471 |
| CAPEX | | kr./ton | 2,0 | 1,2 |
| OPEX | Sliddele | kr./ton | 0,5 | 0,5 |
| Samlede omkostninger | | kr./ton | 4,9 | 4,1 |
| Ekstra gasudbytte | | Nm ³ CH ₄ /ton | 1,6 | 1,6 |
| Produktionspris ekstra metan | | kr/m ³ CH ₄ | 3,036 | 2,562 |

Biogrinder BHS

Biogrinderen er velegnet til de fleste faste biomasser og neddelingsgraden kan tilpasses de enkelte biomasser. For at opnå størst mulig fleksibilitet kan hamrene monteres i to niveauer. Biogrinderen leveres i to størrelser med hhv. 55 og 75 kW motorer for kapaciteter op til 12 t/h. Maskinen er opbygget med en kraftig hurtiggående rotor, hvorpå der er monteret op til 4 udskiftelige hamre. En stor specialhærdet topplade med påsvejset hårdmetal sikrer at biomassen ledes ud til hamrene. Hamrene er designet således at der opnås optimal neddeling med mindst muligt effektforbrug.

En justerbar vibrationscensor sikrer at maskinen stoppes såfremt der kommer et fremmedlegeme. herved sikres det at eventuelle fremmedlegemer ikke ledes videre til efterfølgende pumper m.m.

Rybjerg biogas anvender biogrinder til forbehandling af fast biomasse. Opstillingen af biogrinder på Rybjerg biogas er vist i nedenstående billeder.



Figur 23: Biogrinder ved Rybjerg biogas. BHS-Sonthofen biogrinder/hammermølle samt slagler før og efter slitage.

Alle faste produkter der udgør ca. 25% af biomassen der anvendes på anlægget forbehandles i BHS biogrinder. Til vedligehold bliver der brugt 1558 kr. pr dag set som et gennem snit over to år. Omkostningen dækker vedligehold på Biogrinder, Sydex fødepumpe samt Børger pumpe som pumper blanding til reaktor. Der er målt elforbrug på biogrinder, infødningspumpe og Børger pumpe over en længere periode. Det samlede elforbrug er 70 kW og med en driftstid på 22,5 time pr døgn er det samlede elforbrug 1.575 kWh pr. døgn eller ca. 30 kwh/tons biomasse i testperioden fra 15/5 2019-26/7 2019. Investeringen i Biogrinder er ca 2,5 mil. kr for hele setuppet.

Der er målt gasudbytte på den faste biomasse før og efter Biogrinding på Rybjerg biogas. Det fremgår at der er en betydelig ekstra gevinst på gaspotentiallet. På anlæg med mere en 60 dages opholdstid viser undersøgelsen at der kan opnås et merudbytte på ca. 7 m³ metan per ton svarende til ca. 8% ekstra gas per ton fast biomasse. På Rybjerg biogas anvendes der ca. 20.000 tons fast materiale per år og der kan således opnås et ekstra gasudbytte på ca. 140.000 m³ CH₄/år.

I Tabel 9 er økonomien ved anvendelse af biogrinder på den faste biomasse beregnet med udgangspunkt i anlægget i Rybjerg. Der forventes en forholdsvis kort levetid på forbehandlingsudstyr og der er som udgangspunkt regnet med 5 år men der er regnet følsomhed på en levetid på 10 år. En del af investeringen vedrører udstyr der sikrer en dosering af halmrig biomasse og denne del er ikke inkluderet i investeringen. Omregnet til metan opnås en produktions pris per m³ ekstra metan på hhv. 4,0 og 3,6 kr/m³ CH₄. Der er således en gevinst ved anvendelse af teknologien ved Rybjerg biogas.

Det vurderes at teknologien kan bidrage positivt til den samlede økonomi ved at muliggøre større dosering af fast materiale og i form af øget gasproduktion. Samtidigt sikres at fast biomasse der har en lav indkøbspris kan tilføres i store mængder hvilket formodes ikke at være muligt i samme grad uden forbehandlingen.

Endvidere forventes det at viskositeten sænkes i reaktoren hvorved en større mængde fast materiale vil kunne behandles.

Tabel 9: Beregninger for effekt og omkostninger ved anvendelse af BHS-Sonthofen biogrinder/hammermølle ved forskellige forudsætninger for levetiden med udgangspunkt i Rybjerg biogas. Forrentning er fastsat til 10%.

| | | Biogrinder Rybjerg | | |
|---------------------------|---------------|--------------------------------------|--------------|--------------|
| Biomasse | | Type | Blandet fast | Blandet fast |
| Levetid | | år | 5 | 10 |
| Gasudbytte | | m ³ CH ₄ /ton | 85 | 85 |
| El | | kWh/ton | 23 | 23 |
| Varme | | kWh/ton | 0 | 0 |
| Investering | Forbehandling | kr. | 1.200.000 | 1.200.000 |
| Kapacitet | | ton/år | 43.200 | 43.200 |
| El | | kr./ton | 11 | 11 |
| Investering | | kr./ton | 27,78 | 27,78 |
| Investering | Infrastruktur | kr./ton/år | 0 | 0 |
| CAPEX | | kr./år | 316.557 | 195.294 |
| CAPEX | | kr./ton | 7,3 | 4,5 |
| OPEX | Sliddele | kr./ton | 10,0 | 10,0 |
| Samlede omkostninger | | kr./ton | 28,5 | 25,7 |
| Ekstra gasudbytte | | Nm ³ CH ₄ /ton | 7 | 7 |
| Gevinst ved forbehandling | | kr/m ³ CH ₄ | 4,066 | 3,665 |

Disruptor

Fomålet med en Disruptor teknologien er at sænke viskositet og øge overfladearealet ved en kraftig mekanisk behandling der ”grinder” og neddelere fibre. Disruptor teknologien er udviklet og markedsføres af firmaet Vogelsang.

Der er kørt forsøg med disruptor i perioden 15/11 2019 til 1/5-2020 på Foulum biogasanlæg. Disruptoren er monteret på et recirkuleringsloop på reaktoren (Figur 24). Disruptoren har kørt med ca. 4 m³/time svarende til ca. 96 m³/døgn. Med en daglig tilførsel til anlægget på ca. 90 m³/time betyder dette at al biomasse i gennemsnit bliver behandlet mere end 1 gang. Anlægget har fungeret stabilt uden væsentlige drifts problemer men med enkelte stop pga. fremmedlegemer. I en periode blev det forsøgt at by passe ekstruderer således at disruptor fungerede som eneste forbehandling. Dette gav nogle udfordringer med fremmedlegemer og der blev efterfølgende monteret en Rotacut foran Disruptor, hvilket sikrede at der ikke blev tilført større fremmedlegemer.



Figur 24: Disruptor fra Vogelsang (venstre) og skæreenhed (højre).

I forbindelse med driften blev gasudbytter registreret og der blev taget prøver ud før og efter behandlingen. Materiale der er behandlet med disruptor er sammenlignet med ubehandlet materiale i en BMP test over 100 dage.

Testene er udført på det materiale der allerede er afgasset med en opholdstid på 13,5 dage i reaktoren i Foulum. Det fremgår, at der ikke er et øget gasudbytte de første 10 dage men herefter er der et ekstra gasudbytte på ca. $0,55 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}$. Materialet der behandles i disruptoren er allerede behandlet i en ekstruder og på anlæg hvor der ikke er en kraftig forbehandling må effekten af disruptoren forventes at være større. Endvidere har materialet før disruptoren allerede været delvist behandlet med disruptor, da det kører som et recirkuleringsloop. De $0,55 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}$ der er målt må således formodes at være mindre end den reelle effekt og for anlæg uden forbehandling forventes effekten at være større.

Elforbruget i disruptoren er ca. $8,5 \text{ kWh}$ med en dosering på ca. $4 \text{ m}^3/\text{h}$. Kapaciteten er imidlertid langt større og der vil kunne behandles ca. $30 \text{ m}^3/\text{h}$ uden at elforbruget i disruptoren forventes af stige væsentligt. Energiforbruget ved et flow på $4 \text{ m}^3/\text{h}$ svarer til ca. $3,5 \text{ kWh}/\text{ton}$ og ved en kapacitet på $30 \text{ m}^3/\text{h}$ vurderes at være ca. $4 \text{ kWh}/\text{ton}$. Investeringen i disruptoren er 175.000 kr. hvortil kommer installationer, ventiler mm. og det skønnes at den samlede investering er ca. 300.000 kr.

Omregnet til metan opnås en produktions pris per m^3 ekstra metan på hhv. $4,8$ og $4,2 \text{ kr}/\text{m}^3 \text{ CH}_4$. Der er således en gevinst ved anvendelse af teknologien under de undersøgte forudsætninger.

Tabel 10: Beregninger for effekt og omkostninger ved anvendelse af Disruptor og en kapacitet på 10 m³/time ved forskellige forudsætninger for levetiden med udgangspunkt. Forrentning er fastsat til 10%.

| | | Disruptor Foulum | | |
|------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|----------|----------|
| Biomasse | | Type | Afgasset | Afgasset |
| Levetid | | år | 5 | 10 |
| Gasudbytte | | m ³ CH ₄ /ton | 11,2 | 11,2 |
| El | | kWh/ton | 3 | 3 |
| Varme | | kWh/ton | 0 | 0 |
| Investering | Forbehandling | kr | 175.000 | 175.000 |
| Kapacitet | | ton/år | 87.600 | 87.600 |
| El | | kr/ton | 1,5 | 1,5 |
| Investering | Forbehandling | kr/ton | 2,00 | 2,00 |
| Investering | Infrastruktur on biogas | kr/ton/år | 125.000 | 125.000 |
| CAPEX | | kr/år | 79.139 | 48.824 |
| CAPEX | | kr/ton | 0,9 | 0,6 |
| OPEX | Sliddele | kr/ton | 0,3 | 0,3 |
| Samlede omkostninger | | kr/ton | 2,7 | 2,3 |
| Produktionspris ekstra metan | | kr/m ³ CH ₄ | 4,828 | 4,199 |

Nøgletal for udvalgte teknologier

I Tabel 11 er nøgletal for udvalgte teknologier beregnet. Forbehandling i form af biogrinder vil kun have en effekt på den faste biomasse, der tilføres anlægget, medens selektiv opholdstid og Disruptor har effekt på den samlede mængde biomasse, der behandles.

Tabel 11: Nøgletal for udvalgte teknologier ved 5års afskrivningsperiode

| Teknologi | Enhed | Selektiv opholdstid ² | Disruptor | Biogrinder |
|-------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-----------|---------------|
| Behandlingstype | | Efterbehandling | In-line | Forbehandling |
| Biomasse | | 100% | 100% | Fast |
| Samlede omkostninger | kr/ton | 4,65 | 2,66 | 28,46 |
| Ekstra gasudbytte | Nm ³ CH ₄ /ton | 2,30 | 0,55 | 7,00 |
| Produktions pris ekstra metan | kr/Nm ³ CH ₄ | 2,26 | 4,83 | 4,07 |

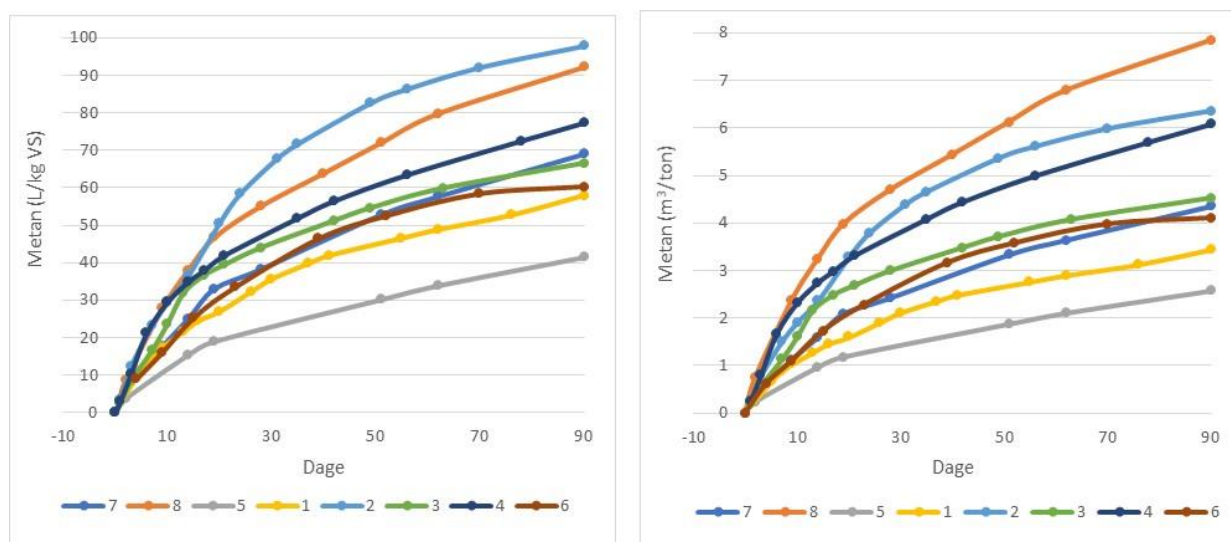
Det fremgår af Tabel 11, at alle teknologier giver en besparelse når der forudsættes en metan pris på 6 kr/m³. Prisen for at producere en ekstra Nm³ metan spænder fra 2,3 til 4,8 kr/Nm³ CH₄ og hvis et biogas-anlæg behandler råvarer, der har en højere råvarepris end disse priser vil det være økonomisk fordelagtigt at fortrænge de dyreste råvarer og anvende forbehandling i stedet. Det vurderes at resultaterne fra de enkelte teknologier i et vist omfang kan adderes. Det forventes således at disruptoren vil have den beregnede effekt selv om der er installeret en biogrinder eller et AST anlæg. Til gengæld vil det ikke give effekt at have 2 traditionelle forbehandling som Biogrinder og AST sammen.

Selektiv opholdstid forventes ligeledes at have den beregnede effekt, selv om der er installeret forbehandling i form af disruptor og Biogrinder eller AST.

8. Effekt af opholdstid og viskositet

Opholdstiden er en afgørende driftsparameter i forhold til omsætning af biomassen. Til vurdering af om opholdstiden med fordel kan forlænges er en analyse af restgaspotentialet en væsentlig parameter. Restgaspotentialet er det største opnåelige gasudbytte, der kan opnås ved efter-udrådning, hvis opholdstiden i sidste trin forlænges, så den samlede opholdstid i anlægget udvides op til >90 dage.

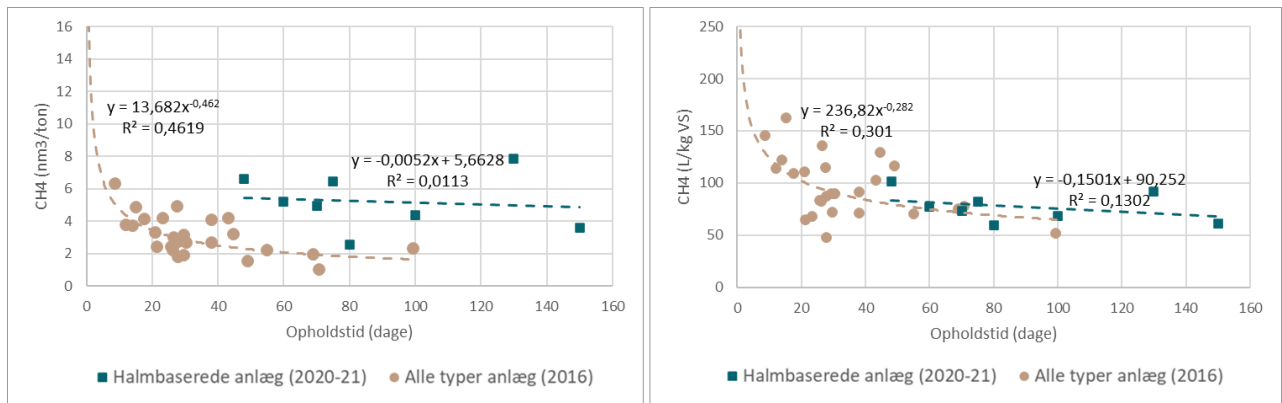
Hvorvidt et anlæg vil kunne drage fordel af at øge opholdstiden, afhænger af en række faktorer som eksisterende opholdstid og afgasningsprofil for den biomasse anlægget behandler. Der kan i den forbindelse tages udgangspunkt i kurven for gasudbyttet i den afgassede biomasse i det sidste udrådningstrin med gasopsamling. I Figur 25 er restgas udbyttet som funktion af supplerende opholdstid for de undersøgte halm-anlæg illustreret. Figuren viser hvor meget gas der kan opnås ved at øge opholdstiden udover den opholdstid anlægget har i forvejen og hvor det antages at de 90 dage er det maksimale gasudbytte det enkelte anlæg vil kunne opnå ved at øge reaktor volumen. Hvor mange dages ekstra opholdstid det rent økonomisk kan svare sig at udvide opholdstiden med vil afhænge af investeringen i ekstra reaktorvolumen og den pris anlægget kan sælge gassen til. Det skal i den forbindelse understreges, at tallene repræsenterer et ”øjebliksbillede” af, hvordan det ser ud på prøvetagningstidspunktet, og afhænger derfor af den biomasse, der har været kørt med i de foregående måneder. Endvidere er selve forsøgene udført i batch ved den temperatur, der i anlæggets sidste reaktortrin, medens processen i virkeligheden er en kontinuert proces. Det er antaget, at udbyttet over tid, er det samme for begge systemer, og at batch og kontinuerte resultater korrelerer, hvilket ikke kan gøres entydigt, selvom der forventeligt vil være en stærk korrelation. Det kan således ikke entydigt konkluderes, om man under- eller overestimerer, hvad der kan opnås i en kontinuert proces, men umiddelbart må forventes en mindre overestimering, da der ikke sker tab af friskt materiale, som under udpumpning fra en kontinuert proces. I figur 25 er restgaspotentialet angivet i hhv. $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{ton}$ og $\text{L CH}_4/\text{kg VS}$. Restgaspotentialet angivet i $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{ton}$ er påvirket af både indholdet af tilbageværende organisk tørstof og omsætteligheden af tørstoffet medens restgaspotentialet angivet i $\text{L CH}_4/\text{kg VS}$ udelukkende siger noget om omsætteligheden af det tilbageværende tørstof. Ved en evaluering af hvor godt et anlæg har omsat biogassen er det omsætteligheden af det tilbageværende tørstof der er den væsentligste parameter.



Figur 25: Restgas profil af det afgassede produkt- Der er udtaget prøver fra sidste reaktortrin der er analyseret i laboratorie forsøg ved den samme proces temperatur som det enkelte anlæg anvender-

Der er tidligere udført analyser af restgaspotentialet af Møller og Nielsen (2016) og for at vurdere om udvikling med mere halm og længere opholdstid har en indflydelse på restgaspotentialer er resultater af

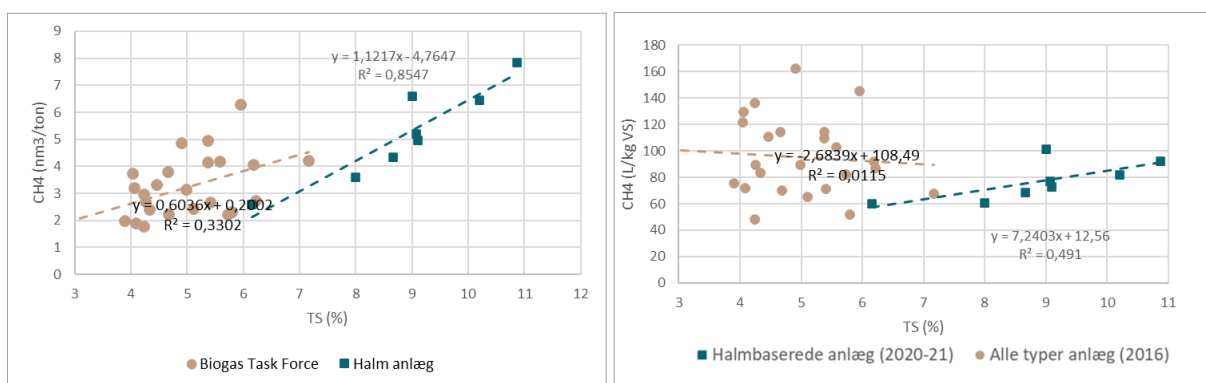
denne undersøgelse sammenlignet med resultaterne fra de halmbaserede anlæg. I Figur 26 er restgas i m³ CH₄/ton og L CH₄/kg VS vist som funktion af opholdstiden. Det fremgår at opholdstiden er væsentligt længere i halmanlæggene og at restgaspotentialer er højere end i det tidligere studie i m³ CH₄/ton hvilket primært er et udtryk for et væsentligt højere organisk tørstofindhold i det afgassede medens det ser ud til at omsætteligheden af det organiske tørstof følger den samme trend som tidligere studie med en bedre udrådningegrad af det organiske stof ved stigende opholdstid. Det observeres imidlertid kun et meget svagt fald ved øget opholdstid når opholdstiden er over 60 dage.



Figur 26: Restgas i det afgassede produkt efter 90 dages efterafgasning som funktion af opholdstiden i anlæggene

Da både tørstofindholdet og omsætteligheden af det organiske tørstof spiller en afgørende rolle for restgaspotentialer er denne sammenhæng undersøgt og det fremgår af figur 27 at der er stigende udbytte i restgaspotentialer i m³ CH₄/ton med stigende tørstofindhold i begge undersøgelser.

Restgaspotentialer i L CH₄/kg VS er imidlertid i det tidligere studie meget lidt afhængigt af tørstofindholdet medens det i nærværende studie er en tendens til stigende restgaspotentialer med stigende tørstofindhold. Det tyder således på at meget høje tørstofindhold i processen sker på bekostning af omsætning af organisk stof og at for anlæg med høje tørstofindhold, kan det være fordelagtigt at øge opholdstiden yderligere i forhold til at øge gasudbyttet. Dette vil samtidigt kunne optimere klimagevinsten ved anvendelse af halm til biogas. Ved anvendelse af halm til biogas er det ekstra vigtigt at reducere metanemissioner ved oplagring af den afgassede biomasse eftersom der ved alternative anvendelser som afbrænding eller nedmuldning ikke finder metanemissioner sted (Møller et al., 2020).



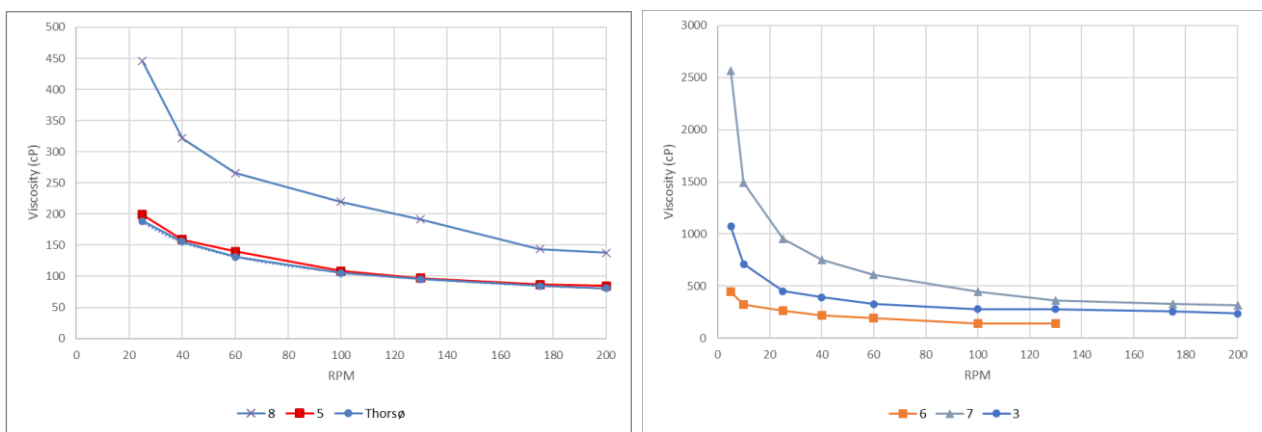
Figur 27: Restgas i det afgassede produkt som funktion af tørstofindholdet.

Viskositet

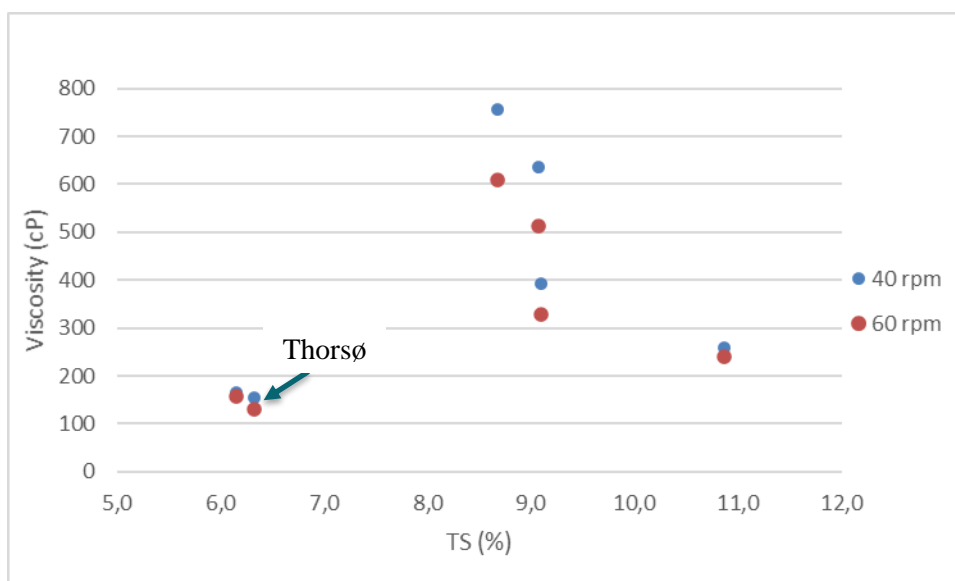
Viskositet beskriver strømningsegenskaberne for en væske og er en af de væsentligste fysiske egenskaber ved en væske, og er en vigtig parameter for den afgassede biomasse i forhold til omrøring og pumpe egenskaber. Væskens viskositet kan måles ved hjælp af et viskosimeter. En **ikke-Newtonsk væske** er en [væske](#), der ikke følger [Newtons viskositetslov](#), dvs. konstant viskositet uafhængig af stress. Afgasset biomasse kan betragtes som en ikke-newtonsk væske, hvor viskositeten ændrer sig, når den sættes under kraft, og bliver mere let flydende. Viskositeten bestemmer i høj grad transportprocesserne af partikler og har dermed stor indflydelse på biogasprocessen samt omrørings- og pumpeegenskaber. Dette betyder at det ofte vil være viskositeten der er afgørende for hvor stor halm mængde der kan anvendes i et biogasanlæg.

Endvidere forventes viskositeten at påvirke gyllens evne til at infiltrere jorden, og det forventes at en lavere viskositet kan reducere potentialet for ammoniak fordampning ved udbringning. I figur 28 er viskositeten for 5 anlæg med stor andel halm og et mere traditionelt anlæg (Thorsø) illustreret. Der er anvendt 2 typer spindler, da det ikke er muligt at bruge den samme spindeltype for alle afgassede biomasser. Det er ikke muligt at sammenligne resultaterne fra forskellige spindler fuldstændigt, men niveauet af kurverne i figur 28 giver et billede af viskositeten når der tilføres forskellig kraft til væsken, hvor de højeste niveauer er et udtryk for den højeste viskositet.

Der har indtil videre kun været udført få analyser med viskositet i afgasset gylle og den generelle forventning har været, at tørstofindholdet spiller en afgørende rolle for viskositet. I figur 29 er sammenhængen med viskositet ved 40 og 60 rpm for spindlen og tørstofindhold illustreret. Det fremgår af figur 29 at der ikke er entydig sammenhæng mellem tørstofindholdet og viskositeten og at der er andre parametre der har betydning. Det fremgår således af figuren at det anlæg der har det højeste tørstofindhold (10,9%) har en forholdsvis lav viskositet i forhold til anlæg med tørstofindhold i intervallet 8,7-9,1%. Anlægget med det højeste tørstofindhold har en kraftigere forbehandling end de øvrige anlæg da der anvendes 3 metoder, der supplerer hinanden herunder haybuster, ensilering og hammermølle.



Figur 28: Viskositet for 5 anlæg (nummereret: 3, 5, 6, 7 og 8) med stor halmandel og et traditionelt anlæg (Thorsø) som funktion af hastighed på spindel. Den afgassede biomasse fra anlæg 3, 6 og 7 er analyseret ved anvendelse af spindel LV3 medens de øvrige er analyseret med spindel LV2, resultaterne herfra kan ikke sammenlignes direkte og præsenteres derfor i to grafer.



Figur 29: Viskositet som funktion af tørstofindhold ved 2 hastigheder på spindlen for 5 anlæg med stor halmandel som og et anlæg med lav halmandel (Thorsø).

9. Levering af halm til biogasanlæg

For at anvendelsen af halm i biogasanlæg skal kunne være økonomisk rentabel i forhold til øvrige biomasser, er det vigtigt, at omkostningerne til transport og levering af halmen bliver reduceret så meget som muligt. Dette gælder både i forhold til transportafstand, samt om halmen leveres i baller, løst eller pelleteret. Disse parametre afhænger typisk af hinanden, og man vælger således ofte forskellige leveringsmetoder afhængigt af afstanden fra marken til biogasanlægget.

Leveringsmetoder

Ved transportafstande på op til 10 km anvendes typisk et traktorvogn tog til transport af halmen, om end denne transportmetode er dyrere og mere energitung end lastbiltransport. Omvendt medfører metoden oftest mindre håndtering, da traktorvogn toget kan læsses direkte i marken før hjemtransport, og samtidig giver det mulighed for at transportere halmen både i baller eller opsamle denne løst med en snitter eller en opsamlervogn (Figur 30).



Figur 30: Opsamlervogn (tv) og eksaktsnitter (th).

Opsamling af løs halm er de senere år blevet mere populær blandt biogasanlæggene, selvom massefylden af den løse halm er væsentlig lavere end i ballerne, men ved kort transportafstand har det ikke den store betydning. Omvendt giver anvendelsen af løs halm ikke udgifter til presning samt efterfølgende oprivning og neddeling af halmballerne. Samtidig er man ikke afhængig af, at vandindholdet i halmen skal ned på et bestemt niveau før presning – oftest ønsker man faktisk et markant højere vandindhold, da den løse halm typisk ensileres. Dette er beskrevet yderligere i afsnittet om anlæggenes erfaringer.

Når halm skal transporteres over større afstande (over 10 km), er komprimeringsgrad og lavt vandindhold essentielt for at kunne transportere så mange kg ad gangen som muligt med lastbil, og dermed opnå mindst mulige transportomkostninger og miljøbelastning.

SEGES Innovation har i den forbindelse undersøgt markedet, indsamlet data og beskrevet tre af de mest effektive løsninger:

- 1) Opsamling og hjemkørsel med opsamlervogn
- 2) HD-baller
- 3) Pelleteret halm
- 4) Neddelt halm

Halm leveret i traditionelle bigballer behandles ikke i denne rapport, da HD-baller er på vej til at blive den nye standard på grund af lavere omkostninger til håndtering, transport og lagring.

Fælles for alle tre metoder er, at halmen presses i baller i marken, indsamles og transporteres til et mellem-lager eller en fabrik, der yderligere forarbejder halmen til neddelte eller pelleteret halm. Pelletering øger

densiteten (Tabel 12), hvorved der kan transporteres større mængder på samme plads, og dermed mindskes transportomkostningerne pr. kg.

Tabel 12. Densiteten af halm ved forskellige forarbejdningsmetoder.

| Halmprodukt | Densitet, kg pr. m ³ |
|------------------------------|---------------------------------|
| Bigballe, 120 x 130 x 240 cm | 145 |
| HD-balle, 120 x 90 x 240 cm | 210 |
| Pelleteret halm | 425 |
| Neddelt halm | 190 |

HD-BALLER

High Density halmballer er de senere år blev mere og mere anvendte, da de komprimeres hårdere og dermed opnår samme vægt med målene 120 x 90 x 240 cm, som traditionelle bigballe med målene 120 x 130 x 240 cm. Herved kan et lastbilvogntog medbringe 19-20 ton halm pr. læs – ca. 50% mere end traditionelle bigballe.

Mængden af halm i HD-ballerne kan øges med yderligere 15-40 kg pr. balle ved at snitte halmen groft inden presning. I moderne pressere er der indbygget en snitter, hvorfor snitningen foretages i direkte forbindelse med presningen (Figur 31). Snitning af halmen har desuden den fordel, at dette er lettere at omsætte i biogasreaktoren eller lettere at anvende i den videre forarbejdning.

Halmen presses typisk med et vandindhold på 13-15%, hvilket betyder, at man i tilfælde af ustadigt vejr er nødsaget til at vende halmen i marken inden presning, for at denne kan blive tør. Det giver derfor en ekstra udgift i den samlede prisberegning.

Efter presning læsses halmballerne på traktorvogn eller lastbil og transporteres til et mellemlager – enten i en hal eller i en markstak, som pakkes ind i plastik (Figur 31). Lagring i markstak er 1-2 øre billigere pr. kg end indendørs lagring. Men hvis spildet i en markstak, på grund af kondens eller beskadiget plastic, medregnes, er omkostningen til lagring i en markstak og i en bygning ca. den samme.



Figur 31: Tv. HD-presser med opsamlervogn. Foto: Brøns Group. Th. Markstak lavet efter Pomi Wrap 12-princippet Foto: Pomi Industri.

PELLETERET HALM

Pelleteret halm fabrikeres ved formaling af den grove halm i halmballerne til 10-12 mm halmstykker før presning i piller.

Halmpillerne kan enten anvendes direkte i biogasanlægget uden forbehandling, eller som strøelse i bl.a. sengebåsene på kvægbesætninger, hvormed halmen kommer ud sammen med gyllen, som efterfølgende anvendes i biogasanlægget.

Ved anvendelse som strøelse på en gård leveres halmpillerne typisk i 12-15 kg sække eller i bigbags, mens halmpillerne ved direkte anvendelse i biogasanlægget leveres med lastbiltrailer, der typisk rummer ca. 90 m³, hvilket muliggør en nyttelast på ca. 38 ton.

NEDDELT HALM

Biogasanlæg har fordel af at modtage forarbejdet halm, da det er væsentligt lettere at indføde halm, der allerede er neddelt. På flere af biogasanlæggene er der ikke plads til opbevaring af biomassen, og tilførslen sker ved at levere biomassen direkte i et påslag. På sådanne biogasanlæg er det nødvendigt, at der sker en neddeling inden halmen leveres.

Snittet halm laves ved forarbejdning af halmballerne hentet fra mellemlageret. Halmen neddeles i en fuld-foderblander udstyret med knive, eller med en Haybuster eller I-Grind'er

Neddelt halm leveres i løs vægt med walking floor lastbiltrailer med et volumen på 90 m³, der muliggør en nyttelast på 17 ton.

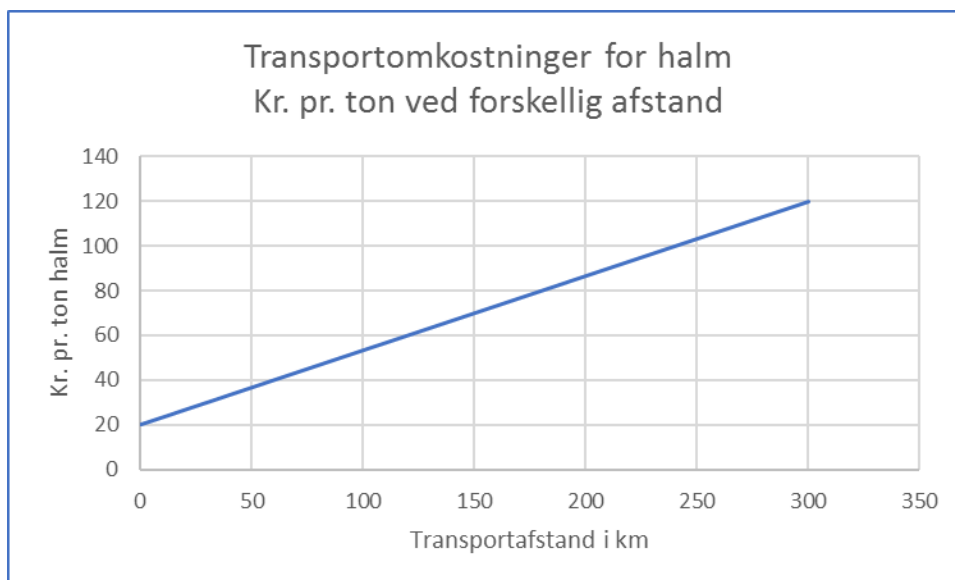
10. Økonomi ved brug af halm og andre råvarer

Transportomkostninger for halm

Prisen på råhalm på mark inden presning varierer meget fra år til år, men et prisspænd på 200-300 kr. pr. ton halm vurderes realistisk. Heri skal medregnes, at prisen på halm forventes at stige i takt med, at en større del af halmen bliver anvendt.

Halm er en almindelig handelsvare, der kan leveres til biogasanlæg, ligesom det sker til fjernvarmeværker, hvor halmen leveres med lastbil som big- eller HD-baller. Samme metode forventes også at blive anvendt på store biogasanlæg, der anvender store mængder halm leveret over relativt store afstande. Omkostningen til halmen afhænger bl.a., hvor langt halmen skal transporteres. I analyserne for nutidssceneriet har Teknologisk Institut anvendt en samlet pris på 700 kr. pr. ton prima halm inklusiv bjærgning og transport (Lars Sørensen, Sønderjysk Halmindustri) som udtryk for markedsprisen for halm før krigen i Ukraine sendte energi- og afgrødepriserne på himmelflugt.

Transportomkostningerne til halm ved langtransport er illustreret i Figur 32 nedenfor.



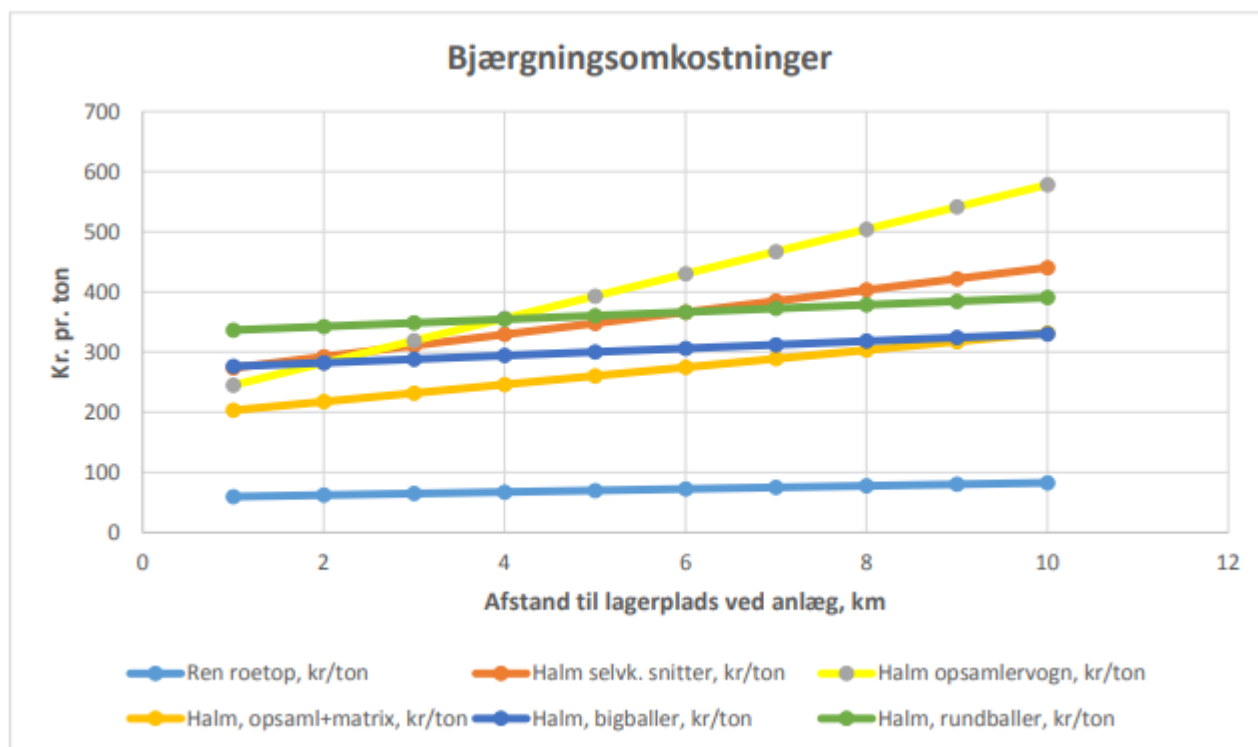
Figur 32: Transportomkostninger for halm. Forudsætninger: Hastighed: 60 km/time, timepris for vogntog, 800 kr, læsning og aflæsning a 30 min, læsstørrelse 40 tons. Kilde: Teknologisk Institut, egne beregninger

Kurven viser transportomkostninger fra 20 kr. pr. ton til hjemtransport, hvis marken ligger lige ved anlægget og op til 120 kr. pr. ton ved en afstand på 300 km. Transportomkostningen stiger med 3,33 kr. pr. ton halm, hver gang transportafstanden øges med 10 km.

I forbindelse med projektet *Fleksibel kraft-varmeproduktion fra biogas baseret på restbiomasser fra landbruget* foretog Teknologisk Institut en analyse af omkostningerne til bjærgning af halm ved anvendelse af forskellige teknologier til samensilering med roetop (Hjort-Gregersen et. al 2017). Analysen omfattede bjærgning af halm fra 0-10 km ved anvendelse af selvkørende snitter og frakørselsvogne, opsamlervogn med og uden kompakteringsmulighed, bigballer og rundballer samt bjærgning af roetop.

Analysen viste, at bigballer er det billigste alternativ så snart afstanden bliver over 8 km (Figur 33). Ved kortere afstande kan opsamlervogne fint have deres berettigelse, især hvis de har kompakteringsmulighed i form af en matrice, der skubber halmen sammen. Selvkørende snittere er dyrere men klarer til gengæld

en del af forbehandlingen af halmen, idet den, som navnet fortæller, snitter halmen. Der findes imidlertid også varianter af de andre maskiner, hvor der kan monteres snittere, men det nedsætter kapaciteten og gør bjærgningen dyrere. Til gengæld kan der så spares på forbehandlingen inde på anlægget.



Figur 33: Bjærgningsomkostninger for halm ved forskellige transportafstande og transportmetoder. Kilde: Hjort-Gregersen et. al 2017.

Omkostninger til at forbehandle halm og andre faste biomasser

Selvom grundprincipperne i biogasanlæg er det samme, er der alligevel ret stor forskel på, hvordan de teknisk er indrettet og dermed også deres evne til at håndtere mere faste biomasser end gylle og pumpbare restprodukter. De ”gamle” biogASFællesanlæg var indrettet til kun flydende biomasser, og eftersom de fleste var tilknyttet en varmforsyning, blev der gjort meget ud af varmeveksling for at genvinde varmen fra den afgassede gylle. Sådanne anlæg vil slet ikke kunne håndtere ubehandlet halm. Alle anlæg vil givet foretrække, at halmen som minimum er snittet, men der er faktisk nogle få, der også kan håndtere ubehandlet halm. Det er anlæg, der kan snegle halmen ind, og som har særligt egnede omrørersystemer, og hvor opvarmningen foregår i reaktortanken og ikke i varmevekslere.

Mange anlæg bruger i dag systemer, hvor fast biomasse snegles ind i en pumpestrøm af gylle, så blandingen kan pumpes ind i reaktortanken. Der findes en række systemer til dette, herunder Powerfeed fra Börger og PreMix fra Vogelsang. Også tyske Wangen har et Bio-Mix koncept, som kan være på vej. Disse kan håndtere snittet halm. Generelt kan man sige, at helt tør halm er vanskelig at håndtere i disse systemer og kræver typisk en forudgående oprivning. Jo grovere halmen er, og jo mere der er af den, des vanskeligere er det at håndtere den. Derfor er der en lang række anlæg, der foretager en ret hårdhændet forbehandling af halmrige fraktioner, som oftest en form for hammermølle. I 2015 gennemførte Teknologisk Institut i samarbejde med Aarhus Universitet et analysearbejde, der bl.a. tog sigte på at fastlægge omkostninger til forbehandling. Meget afhænger af kapacitet og kapacitetsudnyttelse, men resultaterne fra dengang viste omkostninger mellem 50 og 100 kr. pr. ton ved hammermøller (Hjort-Gregersen et al, 2015). Firmaet AB Skovservice tager

for eksempel 50 kr. pr. ton for neddeling af dybstrøelse, som er den forbehandlingsomkostning, der er lagt ind i beregningerne

Derfor kan man sige, at biogasanlæggets konstruktion og evne til at håndtere halmfraktioner i forskellige afskygninger er definerende for den forbehandling, der er nødvendig.

Derfor er det ikke muligt at udpege en enkelt forbehandling, der vil være universelt optimal. Man må se på det konkrete tilfælde. Der findes også ret forskellige indfødningsmetoder rundt omkring. Det ligger uden for dette projekts formål at analysere disse, som derfor metodemæssigt ses som en del af selve biogasanlægget.

Råvarepriser for halm og andre faste biomasser

Teknologisk Institut gennemførte i 2015 i samarbejde med SEGES et analysearbejde for Naturstyrelsen i rapporten *Kortlægning af hensigtsmæssig lokalisering af nye biogasanlæg i Danmark* (Teknologisk Institut, 2015), hvori der bl.a. blev analyseret omkostninger til fremskaffelse af biomasser til biogasanlæg. Samme model til analyse af råvareomkostningerne er anvendt i nærværende rapport.

En del af beregningerne er opdaterede, idet der siden er foretaget nye analyser i forskellige projekter, og kun de mest relevante biomasser for formålet i rapporten er belyst. De anvendte gasudbytter er i de fleste tilfælde oplyst af Henrik B. Møller, Aarhus Universitet. Enkelte er imidlertid fundet i nyere F&U projekter gennemført hos Teknologisk Institut. Priser på råvarer og behandlings- og transportomkostninger er vurderet af Teknologisk Institut.

Beregningerne er udført i et regneark, der gennem en række mellemregninger for hver biomassetype beregner en råvarepris pr. m³ metan. Det vil sige, at modellen tager højde for biomassetypernes forskellige egenskaber, der giver forskellige omkostninger i forskellige led i håndteringskæden. Derved opnås den størst mulige grad af sammenlignelighed mellem biomasserne.

Hovedresultatet af beregningerne er således en råvarepris pr. Nm³ CH₄ beregnet an biogasanlæggets indfødningsystem.

Der er i alle tilfælde taget udgangspunkt i en samlet opholdstid på 60 dage, hvilket har betydning for den forudsatte gasproduktion

Det kan i fremtiden blive aktuelt at separere den afgassede gylle for at gøre gyllen mere letflydende, og dermed til en bedre gødning. Dette er imidlertid ikke inkluderet i beregningerne i første omgang, eftersom det ikke er en udbredt praksis endnu. Omkostningerne til separering vil øge omkostningerne med 10-20 kr. pr. ton afgasset biomasse. Beregningsforudsætningerne er i videst muligt omfang specifikke for de enkelte biomasser.

I nedenstående tabel er råvarepriserne pr Nm³ CH₄ listet i prioriteret rækkefølge fra lavest til højest i venstre kolonne. I den højre kolonne er indsat de tilsvarende omkostninger svarende til et scenarie, hvor halmanvendelsen medfører at al den afgassede gylle skal separeres, hvilket er en meget betydende ekstraomkostning.

En central forudsætning er naturligvis til hvilken pris halmen skal indgå. Prisen for halm af primakvalitet er fastlagt til 700 kr. pr. ton, som tidligere nævnt, og sekundahalm til 500 kr. pr. ton.

Der er tre hovedproblemer med at erstatte energiafgrøder med halm. *For det første* er det vanskeligt at opnå samme gasudbytte pr. kg organisk tørstof, hvorved anlægget alt andet lige risikerer at få en nedgang i den

samlede gasproduktion. *For det andet* kræver halm enten en form for forbehandling, hvilket øger omkostningerne, eller at anlægget mht. pumpesystem, omrørersystem og opvarmningssystem er indrettet på at håndtere halm. *Endelig* vil en stor halmandel medføre en meget tyk afgasset biomasse, som gør det svært for landmændene at udnytte kvælstoffet optimalt og give anledning til øget ammoniaktab. En høj halmandel vil derfor øge behovet for separering af den afgassede gylle, hvilket også giver anledning til øgede omkostninger.

Tabel 13: Råvarepris an biogasanlæg i DKK pr Nm³ CH₄ ved hhv. høj halmpriis (1000 kr/ton for prima kvalitet, sekundahalm 800 kr/ton), lav halmpriis (2021, 700 kr/ton prima kvalitet, sekundahalm 500 kr/ton) samt ved behov for separation. Hvis halmanvendelsen kræver separation af hele mængden af afgasset biomasse, vil det koste 20 kr/ton afgasset biomasse i ekstraomkostninger til separation. Værdierne i kolonnen + separation er de samlede omkostninger ved en høj halmpriis og behov for separation.

| | Lav halmpriis | Høj halmpriis | +Separation |
|------------------------------------|---------------|---------------|-------------|
| Frøgræshalm ubehandlet | 0,44 | | |
| Frøgræshalm forbehandlet | 0,64 | | |
| Dybstrøelse direkte indfødte | 0,71 | | |
| Frøgræshalm snittet og ensileret | 0,97 | | |
| Dybstrøelse forbehandlet | 1,48 | | |
| Naturarealer sen 60 % | 1,98 | | |
| Efterafgrøder + halmstub | 2,02 | | |
| Frøgræsudlæg + halmstub | 2,10 | | |
| halmpiller som strøelse | 2,34 | 4,59 | 11,07 |
| Roetopensilage | 2,70 | | |
| Naturarealer tidlig 25 % | 3,21 | | |
| Halm, tør, forbehandlet | 3,46 | 4,81 | 11,29 |
| Halm, tør, direkte indfødte | 3,51 | 4,97 | 11,99 |
| Sekundahalm, våd, direkte indfødte | 3,55 | 5,60 | 15,45 |
| Sekundahalm, våd, forbehandlet | 3,57 | 5,45 | 14,47 |
| Majsensilage | 3,73 | | |
| Kløvergræs | 4,07 | | |
| Græsfiber fra proteinproduktion | 4,49 | | |
| Efterafgrøder | 5,65 | | |
| Halmpiller direkte indfødte. | 6,84 | 9,09 | 15,56 |

Analyserne viser, at der findes metoder til anvendelse af halm, der alt andet lige er konkurrencedygtig med majsensilage. I hvert fald i grundscenariet (lav). Det billigste er i sagens natur at anvende de våde og mindre værdifulde halmtyper. Frøgræshalm falder ud som det gunstigste alternativ, men det skal understreges, at det er en begrænset ressource. Selv tør halm, som er den mest værdifulde, og som der er langt mest af, kan ifølge analyserne måle sig med majsensilage, men den er også den vanskeligste at håndtere. Det er interessant, at halmpiller anvendt forudgående som strøelse let kan konkurrere med majsensilage. Det fungerer på den måde, at biogasanlægget betaler landmændene 50 øre pr. kg. halmpiller de anvender som strøelse, og derved får biogasanlægget halmen ind med gyllen Ved denne metode skifter halmen også klassificering fra at være halm til at være husdyrgødning, der har en mere attraktiv profil på oprindelsesgarantierne.

Direkte indfødning af halmpiller er i den dyre ende, med de gasudbytter, der opnås med den nuværende teknologi.

Økonomien ved at erstatte halm med energiafgrøder

Den begrænsende faktor for anvendelse af halm i biogasanlægget er den mængde tørstof som anlægget kan håndtere. Så når majstørstof med et relativt højt gasudbytte erstattes af halm med et relativt lavt gasudbytte, vil den samlede gasproduktion falde. Dette er eksemplificeret i Tabel 14, 15 og 16 nedenfor.

Hvis man forudsætter, at et stort anlæg kan håndtere 10% tørstof i reaktoren, og allerede i dag ligger på denne grænse, kan biomasseforsyningen og gasproduktionen se ud som følger

Tabel 14: Økonomiske konsekvenser ved udskiftning af majsensilage med halm.

| Andel majsensilage | | 12% | 4% | 2% | 0% |
|---|--|--------|--------|--------|--------|
| Majsensilageforbrug | tons/dag | 120 | 40 | 20 | 0 |
| Halmforbrug | tons/dag | 0 | 20 | 25 | 30 |
| Gasproduktion | Nm ³ CH ₄ /dag | 26.080 | 23.230 | 22.518 | 21.805 |
| Gasproduktionstab i forhold til 12% majs | Nm ³ CH ₄ /dag | | 2.850 | 3.563 | 4.275 |
| Gasproduktionstab | mio. Nm ³ CH ₄ /år | | 1,0 | 1,3 | 1,6 |
| Tab ved gaspris på 8 kr/Nm ³ CH ₄ | mio. kr./år | | 8,3 | 10,4 | 12,5 |
| Besparelse i råvareomkostning | mio. kr./år | | 3,7 | 4,6 | 5,5 |
| Nettotab | mio. kr./år | | 4,7 | 5,8 | 7,0 |

Der tages udgangspunkt i et stort anlæg, der i udgangspunktet behandler 1000 ton biomasse pr. dag i form af kvæg- og svinegylle, 12% majsensilage og diverse industriaffald. Herefter er majsandelen reduceret til 4%, 2% og 0%. Den gennemsnitlige tørstofprocent i reaktoren er i alle scenarier fastholdt på omkring 10% (Tabel 15.). Denne biomassesammensætning giver i udgangspunktet et gennemsnitligt gasudbytte på godt 26 Nm³ CH₄ pr. ton biomasse faldende til 24 Nm³ CH₄ pr. ton biomasse ved 0% majs.

Der skal imidlertid også tages hensyn til at halm som råvare er noget billigere pr. kg. Tørstof end majsensilage, roer og græsensilage. Det betyder at en ændring i råvaresammensætningen også påvirker råvareomkostningerne.

I Tabel 14, 15 og 16, er der regnet med 300 kr. pr. ton majsensilage, roer og græs, hvor halm er indregnet med 700 kr. pr. ton, men hvor tørstofindholdet er omkring 3 gange så højt.

Tørstofgrænsen på 10% nås ved tilsætning af hhv. 20, 25 og 30 ton halm til erstatning for majsensilagen. Nedgangen i gasproduktionen har betydelige økonomiske konsekvenser for anlægget.

Denne analyse viser, at et stort anlæg, der har baseret sin økonomi på tilførsel af 12 % energiafgrøder vil opleve en produktionsnedgang på 4,3 mio. Nm³ CH₄ hvis majs helt udfases og erstattes med halm, svarende til en nedgang i salget på 12,5 mio. kr. ved en gaspris på 8 kr. pr. Nm³ CH₄. Den opnåede besparelse i råvareomkostningerne, som omlægningen vil medføre, reducerer tabet til 7 mio. kr. på årsbasis.

Tilsvarende beregninger er udført for erstatning af roer og græsensilage med halm.

Tabel 15: Økonomiske konsekvenser ved udskiftning af roer med halm.

| Andel roer | | 12% | 4% | 2% | 0% |
|---|--|--------|------------|------------|------------|
| Roeforbrug | tons/dag | 120 | 40 | 20 | 0 |
| Halmforbrug | tons/dag | 0 | 11 | 14 | 17 |
| Gasproduktion | Nm ³ CH ₄ /dag | 23.572 | 20.393 | 19.654 | 18.915 |
| Gasproduktionstab i forhold til 12% roer | Nm ³ CH ₄ /dag | | 3.179 | 3.918 | 4.657 |
| Gasproduktionstab | mio. Nm ³ CH ₄ /år | | 1,2 | 1,4 | 1,7 |
| Tab ved gaspris på 8 kr/Nm ³ CH ₄ | mio. kr./år | | 9,3 | 11,4 | 13,6 |
| Besparelse i råvareomkostning | mio. kr./år | | 5,9 | 7,4 | 8,8 |
| Nettotab | mio. kr./år | | 3,3 | 4,1 | 4,8 |

Her er tabet mindre end i Tabel 14 fordi udgangsproduktionen er lavere. Det skyldes, at tørstofindholdet i roer er lavere end i majs.

Tabel 16: Økonomiske konsekvenser ved udskiftning af græs med halm.

| Andel græs | | 12% | 4% | 2% | 0% |
|---|--|--------|------------|------------|------------|
| Græsforbrug | tons/dag | 120 | 40 | 20 | 0 |
| Halmforbrug | tons/dag | 0 | 20 | 25 | 30 |
| Gasproduktion | Nm ³ CH ₄ /dag | 25.504 | 23.038 | 22.422 | 21.805 |
| Gasproduktionstab i forhold til 12% græs | Nm ³ CH ₄ /dag | | 2.466 | 3.083 | 3.699 |
| Gasproduktionstab | mio. Nm ³ CH ₄ /år | | 0,9 | 1,1 | 1,4 |
| Tab ved gaspris på 8 kr/Nm ³ CH ₄ | mio. kr./år | | 7,2 | 9,0 | 10,8 |
| Besparelse i råvareomkostning | mio. kr./år | | 3,7 | 4,6 | 5,5 |
| Nettotab | mio. kr./år | | 3,6 | 4,4 | 5,3 |

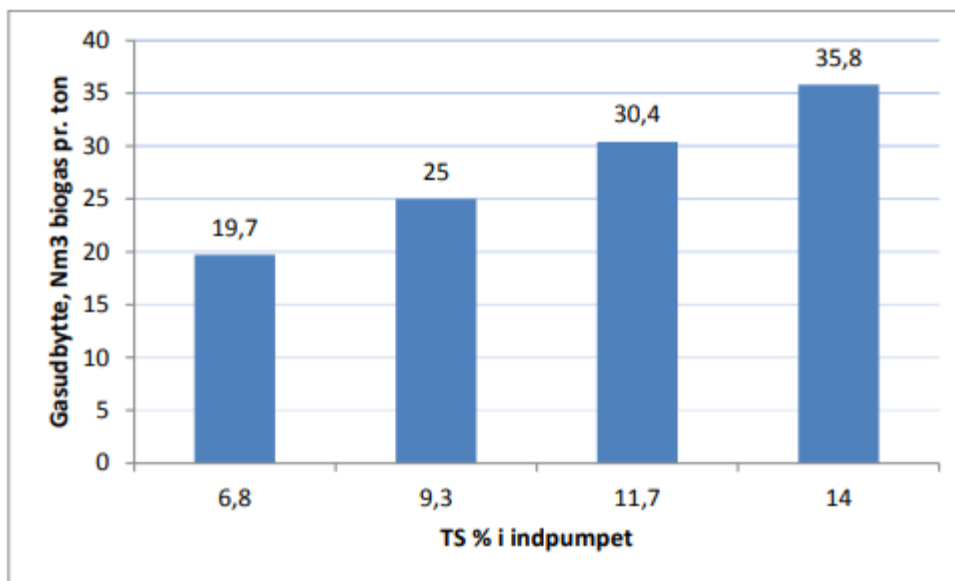
Nettotabet ved udfasning af græsensilage og erstatning med halm beløber sig til 5,3 mio. kr. på årsbasis for et anlæg, der i udgangspunktet anvender 1000 ton biomasse pr. dag med 12 % græsensilage.

Det skal understreges, at denne analyse er baseret på en erstatning af energiafgrøder med halm. Det betyder således *ikke*, at biogasproduktion ikke langt hen ad vejen kan baseres på halm, men produktionsomkostningerne pr. Nm³ CH₄ vil være højere end hidtil på anlæg, hvor energiafgrøder har spillet en afgørende rolle. For at opnå samme gasproduktion som tidligere, vil anlæggene enten skulle købe ekstra letomsætteligt affald eller udvide reaktorkapaciteten for at håndtere mere tørstof.

Der er stor forskel på hvordan anlæggene er indrettet, og hvilken strategi for biomasseforsyning de derfor har mulighed for at forfølge. Derfor vil nogle anlæg have lettere ved at erstatte majsensilagen end andre.

Selv en hårdhændet forbehandling synes at have en ret marginal effekt på råvareprisen udtrykt pr. Nm³ CH₄ an reaktor. Men forbehandlingen kan let have ganske positive afledte effekter i form af lavere viskositet i den samlede biomasseblanding. Dette er omtalt i rapportens afsnit om viskositet. Når viskositeten falder, som følge af forbehandling, vil omkostninger til pumpning og omrøring falde. Men det der for alvor kan flytte noget er, hvis der totalt set kan håndteres et højere tørstofindhold i reaktoren fordi gasudbyttet derved øges.

En sådan beregning blev foretaget i rapporten *Udvikling og effektivisering af biogasproduktionen i Danmark*, som Teknologisk Institut udarbejdede for Energistyrelsens Biogas Taskforce. (Hjort-Gregersen, K, et al, 2015)



Figur 34: Gasudbytter ved stigende tørstofindhold i biogasreaktor

Figuren viser, at gasudbyttet pr. ton indført biomasse kan øges særdeles markant, såfremt forbehandling muliggør håndtering af højere tørstofindhold i reaktorerne. Dette uanset om der er tale om egentlig forbehandling eller in-line behandling som beskrevet i afsnittet herom. Det økonomiske potentiale herfor er enormt.

Alt dette peger på at se på anlægskoncepter, der kan håndtere højere tørstofmængder end det, der traditionelt har været set i Danmark. Det peger også på teknologier, der kan sænke viskositeten, jvf. forsøgene med in-line behandling. Desuden giver det god mening at arbejde med teknologier, der kan øge gasudbyttet fra halm.

Endelig bør der arbejdes mere med, hvordan der kan bjærges grønne restbiomasser fra den almindelige landbrugsproduktion til samensilering med halm. Her er der et betydeligt potentiale i målrettet dyrkning af efterafgrøder til bjærgning til biogas, roetoppe er en fremragende løsning i visse dele af landet, kartoffeltoppe har et stort potentiale i andre dele af landet, og selv rapsblade afpudset fra vinterraps i efteråret synes at have et vist potentiale.

11. Gødningskvalitet af afgasset biomasse

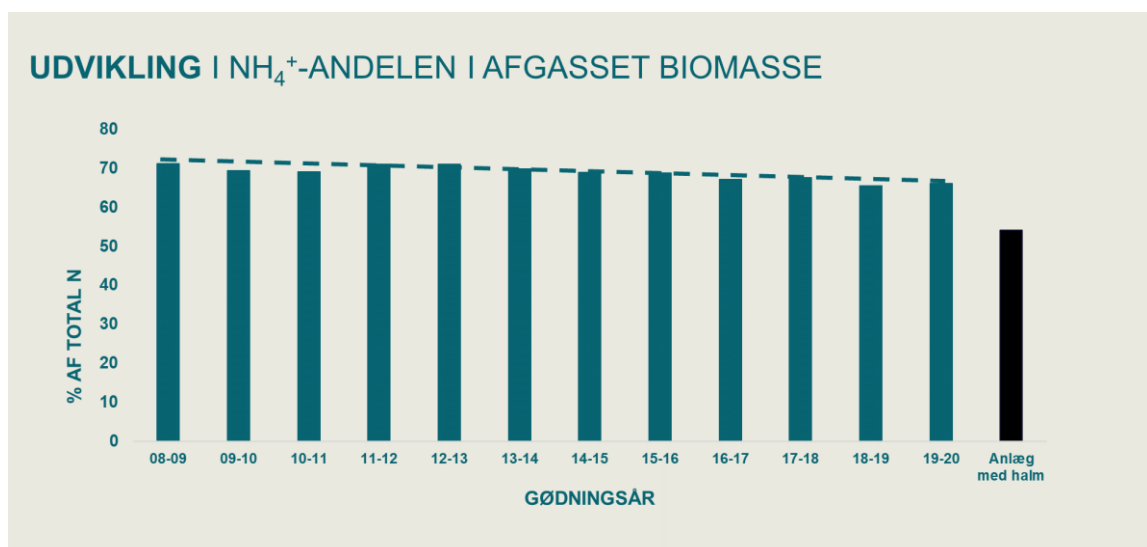
Udviklingen i biogasproduktionen betyder, at afgasset biomasse fylder mere og mere i planteproduktionen, og i planperioden 2019/20 blev 23% af al gylle i Danmark afgasset (Birkmose, 2021). Landbruget har derfor stor opmærksomhed på, hvordan afgasningen påvirker gødningskvaliteten.

Råvaregrundlaget til biogasanlæggene har ændret sig markant indenfor de sidste 10 år: Hvor anlæggene tidligere var baseret på gylle og let omsættelige affaldsprodukter, anvender mange biogasanlæg nu i stigende omfang faste tørstofrige biomasser som f.eks. dybstrøelse og halm. Ved afgasning af gylle omdannes en del af gyllens organisk bundne kvælstof til ammoniumkvælstof. Tidligere undersøgelser har vist, at afgasset biomasse generelt har et højere indhold af plantetilgængeligt kvælstof, samt at næringsstofsammensætningen i afgasset biomasse er mere optimal end sammensætningen i ikke-afgasset biomasse (Pedersen, 2005). Dette har været et helt centralt incitament for mange landmænd til at levere gylle og modtage afgasset biomasse fra biogasanlæggene. For landmænd er det vigtigt, at så høj en andel af gyllens kvælstof findes som plantetilgængeligt kvælstof (ammoniumkvælstof ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)) (Hansen, 2020).

SEGES Innovation lavede i 2020 en kortlægning af hvordan gødningskvaliteten fra de danske biogasanlæg har udviklet sig de sidste 10 år (Hansen, 2020). Kortlægningen var baseret på data fra gødningsregnskaberne fra de enkelte bedrifter, som modtager afgasset biomasse.

Kortlægningen viste, at det gennemsnitlige indhold af totalkvælstof i afgasset biomasse har været stigende siden 2008. Omvendt er der observeret et svagt fald i indholdet af ammoniumkvælstof. Samlet set har det medført et fald i det relative indhold af ammoniumkvælstof, der siden 2008 er faldet med ca. et halvt procentpoint årligt fra 72% i gødningsåret 2008-2009 til 67% i gødningsåret 2019-2020 (Figur 35). Samlet set betyder det, at bedrifternes gødningsmæssige fordele ved at levere og modtage gylle fra et biogasanlæg som gennemsnit har været faldende.

I forbindelse med nærværende analyse er der udført gødningsanalyser fra biogasanlæg, der bruger en stor andel af halm. Anlæggene med et højt halmforbrug har et ammoniumindhold, der ligger 15%-point under gennemsnittet for alle biogasanlæg i Danmark (Figur 35).



Figur 35: Udvikling i NH_4^+ -andelen i afgasset biomasse (gennemsnit af 32 anlæg) (blå søjler) sammenlignet med indholdet i afgasset biomasse fra biogasanlæg, der bruger en høj andel af halm (gennemsnit af 8 anlæg) (sort søjle). Kilder: (Hansen, 2020) og (Møller, et al., 2020).

Det kan derfor vise sig at være nødvendigt, at biogasanlæggene i øget omfang introducerer efterbehandlingsmetoder såsom separation, der kan forbedre gødningsudnyttelsen og reducere ammoniaktabet.

Separation af afgasset biomasse

SEGES Innovation har i den forbindelse lavet en analyse (Birkmose, et al., 2019) af flere forskellige separeringsteknologier, som alle har til formål at opkoncentrere tørstof og næringsstoffer i én eller flere fraktioner. Ved separering af gylle sker især en opkoncentrering af fosfor i den faste fraktion, mens en større mængde kvælstof typisk forbliver i den flydende fraktion. Således øges N/P-forholdet i væskefraktionen, mens N/P-forholdet i den faste fraktion mindskes i forhold til udgangspunktet. Det bliver dermed muligt at ændre på N/P-forholdet, således at gødsning med den flydende fraktion kan dække både kvælstof- og fosforbehovet uden at overskride grænsen for tilførslen af disse næringsstoffer. Samtidig betyder opkoncentreringen af fosfor, at dette kan transportere over længere afstande til en lavere pris.

De anvendte separeringsteknologier er typisk meget simple anlæg bestående af en enkelt proces. Dette skyldes, at mere kompliceret teknologier oftest ikke kan fungere i praksis, da den afgassede gylle for det meste ikke er tilstrækkelig homogen, hvilket kan give anledninger til driftsforstyrrelser i avanceret anlæg. Derfor anvendes i praksis ofte teknologier som skruepresse eller dekanter-centrifuge, hvortil driftsomkostningerne ligeledes er relativt beskedne, såfremt kapaciteten udnyttes fuldt ud (Birkmose, et al., 2019).

I skruepressen presses væskefraktionen ud af fiberfraktionen og gennem et filter. Hermed tilbageholdes grove partikler, mens mindre partikler presses ud i væskefraktionen. Da hovedparten af næringsstofferne oftest er placeret i de mindre partikler, giver denne teknologi ikke anledning til en markant opkoncentrering af fosfor.

Dekanter-centrifugen er omvendt velegnet til at fraseparere mindre partikler i en homogen blanding. Dette gøres ved, at partiklerne under høje omdrejninger slynges ud mod kanten af centrifugen og danner således en fiberfraktion, som efterfølgende kan fjernes. Fiberfraktionen vil have et forøget fosfor-indhold, idet store dele af de mindre og næringsstofrige partikler separeres ud i fiberfraktionen.

Skruepresse-teknologien anvendes oftest på gårde til behandling af rågylle, hvor andelen af grove partikler er væsentlig højere end i afgasset biomasse, og derudover er der også installeret skruepresser på en række gårdbiogasanlæg. Maabjerg Biogas og Nature Energy Videbæk er indtil videre de to eneste landbrugsbaserede biogasanlæg i Danmark, der har installeret en dekanter.

I den nye gødningsanvendelsesbekendtgørelse 2022 er der som noget nyt åbnet op for, at væskefraktion fra afgasset biomasse må udbringes med slæbeslanger uden forsuring, hvis tørstofindholdet er 3,6% eller lavere. Langt de fleste biogasanlæg vil dog ikke være i stand til at levere en væskefraktion med et tilstrækkeligt lavt tørstofindhold. Der er ellers stort behov for at finde alternativer til forsuring af afgasset biomasse, som følge af at der i 2021 blev der indført et krav til syreforbrug ved afgasset biomasse blev i 2021 hævet til 11 kg svovlsyre pr ton afgasset biomasse. Omkostningen hertil er så høj, at det reelt ikke længere er økonomisk relevant at forsure afgasset biomasse og landmændene er derfor nødsaget til at nedfælde den afgassede biomasse i stedet. Forhåbentlig kan man på sigt opnå nogle mere nuancerede grænser, som tager højde for viskositeten og mængden af suspenderet tørstof i stedet for total tørstof (TS) alene.

Foruden de ovennævnte separationsteknologier er der lavet forsøg med kemisk udfældning, hvor der til sættes f.eks. jernklorid eller polymerer til gyllen, hvilket får tørstoffet til at aggregere, hvormed dette lettere kan frasepareres. Investeringen i denne teknologi er relativt billig, men omvendt er driftsomkostningerne til især indkøb af kemikalier forholdsvis høje. Samtidig kan fiberen ikke anvendes af økologer grundet anvendelsen af kemi.

Ved anvendelse af forskellige separationsteknologier vil man typisk opnå et tørstofindhold i fiberfraktion på mellem 10-15% og 35-40% afhængigt af den anvendte teknologi (Birkmose, et al., 2019). Det betyder, at størstedelen af fiberfraktionen udgøres af vand, hvilket er med til at øge transportomkostningerne pr. kg næringsstof. Disse omkostninger kan således reduceres ved at tørre fiberen og efterfølgende pelletere denne for at øge densiteten (Figur 36).



Figur 36: Tv. Uforarbejdet fiber af dekanter-centrifugeret fiber. Th. Tørret og pelleteret fiber. Fotos: Torkild Birkmose, SEGES Innovation. Kilde: (Birkmose, et al., 2019).

Selve tørringsprocessen er meget energikrævende, da man typisk ønsker at øge tørstofindholdet fra 30 til 90%, hvormed store mængder vand skal fordampes. Dette er dermed forbundet med store omkostninger til både drift og vedligehold. For at forbedre økonomien kan en del af den anvendte energi genindvindes og anvendes til f.eks. fjernvarme eller rumopvarmning.

Tørring af fiberen til et tørstofindhold på 90% resulterer i, at fosfor, kalium og organisk kvælstof opkoncentreres med omkring en faktor 3, mens stort set alt ammoniumkvælstof fordampes som ammoniak. Ammoniakken kan efterfølgende opsamles med en syreskrubber, og det dannede ammoniumsulfat kan anvendes som gødning.

De producerede fiberpiller indeholder 60-70% af fosforen fra den afgassede biomasse, og næringsstofindholdet svarer til et NPK-forhold på 2-3-1, hvoraf 80% af kvælstoffet er ikke-plantetilgængeligt organisk kvælstof (Birkmose, et al., 2019). Næringsstofindholdet er således væsentligt lavere end i traditionel handelsgødning. Til gengæld sker der ikke nogen nedbrydning eller kemisk ændring af fosfor i forbindelse med tørrings- og pelleteringsprocessen, og tilgængeligheden af dette er således den samme som i ubehandlet gylle.

Tørring af separeret fiber er endnu ikke taget i brug på danske biogasanlæg, og man har derfor ikke nogen praktiske erfaringer med de egentlige omkostninger til denne proces. Virksomheden GRAINAS har imidlertid opsat et forsøgsanlæg og ud fra dette regnet på omkostningerne til tørring og pelletering af afgasset og separeret fiber i to scenarier, hvor der anvendes hhv. gas og tørret fiberfraktion som energikilde til tørringsprocessen. I begge scenarier er der taget udgangspunkt i tørring af 35.000 ton fiber (Birkmose, et al., 2019).

Ved anvendelse af gas som energikilde blev der beregnet en omkostning på 293 kr. pr. ton fiber, og en produceret mængde fiberpiller på 13.320 ton. Omkostningen ved tørring med tørret fiberfraktion blev

beregnet til 138 kr. pr. ton fiber, mens der blev produceret 6.811 ton fiberpiller. Beregningsforudsætninger samt yderligere beregninger på bl.a. transportomkostninger findes i (Birkmose, et al., 2019).

Betydningen af klorindhold i kartoffelproduktion

Indhold af klor i halm kan potentielt også vise sig at være en udfordring for biogasanlæg, der afsætter afgasset biomasse til landmænd, som dyrker kartofler, eftersom klor har en negativ påvirkning på stivelsesprocenten i kartoflerne. SEGES Innovation anbefaler derfor, at man ikke anvender afgasset biomasse til kartofler, medmindre der kan dokumenteres et klorindhold på niveau med det gennemsnitlige indhold i svinegylle (1,6 kg klor/tons gylle) (Bødker & Toft, 2020). Afgasset biomasse indeholder typisk omkring 2 kg klor/ton, men det varierer meget fra anlæg til anlæg. Den største kilde til klor er typisk jernklorid (FeCl_3), som bruges til at fælde svovl og begrænse svovlkoncentrationen i biogassen. Tør halm af god kvalitet (+85%TS) har typisk et klor-indhold på omkring 0,5% af tørstof. Hvis halmen vaskes af regnen inden indsamling, vil klorindholdet blive reduceret.

Hvis et anlæg eksempelvis introducerer halm som erstatning for tørstofmængden fra 12% majsforbrug, der typisk indeholder 1,8 g klor/kg TS (Kjeldsen, 2021), vil man opnå en forøgelse af klor-indholdet i den afgassede biomasse på omkring 0,2 kg klor/ton. KMC Agro angiver, at tilførsel af 100 kg klor/ha vil reducere stivelsesprocenten med 0,5-1% point i forhold til sammenligningsgrundlaget. Udkørsel af 40 tons afgasset biomasse/ha med et klor-indhold på 2 kg klor pr. ton vil give en tilførsel på 80 kg klor pr. ha. (KMC Agro, 2021). Kartoffler bliver afregnet efter stivelsesindhold, og kartoffelavlere kan derfor ikke forventes at modtage afgasset biomasse, medmindre biogasanlægget kan dokumentere et tilstrækkeligt lavt Cl-indhold i den afgassede biomasse.

12. Biogasanlæggenes erfaringer med brug af halm

SEGES Innovation lavede i 2018 en spørgeskemaundersøgelse, som blev sendt ud til 89 gård- og fællesanlæg, hvor biogasanlæggene vurderede en række koncentrerede produkter herunder halm. Her svarede 58% af anlæggene, at de kunne håndtere halm, men kun 29% anså halm som økonomisk rentabelt. Overordnet set er den største udfordring med halm, derfor ikke, om det kan håndteres, men derimod om det kan implementeres på en rentabel måde. (Wenzel, et al., 2020). Der er inden for de seneste par år sket en markant udvikling og innovation omkring brugen af halm på biogasanlæggene, og flere anlæg har fået erfaringer med, hvordan halm kan håndteres.

For at belyse hvordan halm kan indgå som en fast bestanddel af biomassen i biogasproduktionen, har SEGES Innovation, Teknologisk Institut og Aarhus Universitet interviewet ni forskellige anlæg, som alle i større eller mindre omfang allerede anvender halm i produktionen. De udvalgte anlæg er geografisk placeret i fem forskellige landsdele af Danmark og repræsenterer en bred vifte af både gård- og fællesanlæg, anlægsstørrelser samt ejerforhold og kan således belyse succeser og udfordringer fra forskellige vinkler afhængigt af det enkelte anlægs situation.

Karakteristika for de ni aktører, der blev interviewet, er angivet i tabellen nedenfor. De ni aktører er, efter ønske fra flere af anlæggene, anonymiserede.

Tabel 17: Beskrivelse af de ni aktører, der er interviewet i forbindelse med indeværende rapport.

| Biogas-anlæg | Størrelse [tons biomasse/år] | En del af en organisation | Halmforbrug [af råvareforbrug] | Tørstof fra halm og dybstrøelse [% af råvareforbrug] |
|--------------|------------------------------|---------------------------|--|--|
| 1 | 36.500 | Nej | Kornhalm = 7,5% Dybstrøelse = 4% | 7,8 |
| 2 | 130.000 | Nej | Kornhalm = 1,9% Dybstrøelse = 13,6% | 6,4 |
| 3 | 73.000 | Nej | Kornhalm = 1,8% Dybstrøelse = 8,8% | 4,6 |
| 4 | 73.000 | Nej | Kornhalm = 3,5% Dybstrøelse = 13,6% | 6,7 |
| 5 | 200.000 | Nej | Kornhalm = 6,5% Rapshalm = 2% Frøgræshalm = 4% | 10,8 |
| 6 | 1.000.000 | Ja | Halm og halmpiller = 11,6% | Ikke oplyst |
| 7 | 36.500 | Nej | Frøgræshalm = 2,2% Rapshalm = 0,8% Dybstrøelse = 20% | 9,6 |
| 8 | 36.500 | Nej | Ikke oplyst | Ikke oplyst |
| 9 | > 250.000 | Ja | Variierende mængder | Variierende mængder |

De besøgte anlæg er opbygget på forskellige måder både med hensyn til, hvilke biomasser de anvender, neddelings- og indfødningsystem samt reaktoropbygning og -størrelse, og de bidrager dermed alle med forskellige erfaringer til håndtering af halm i biogasanlæg. De repræsenterer et bredt spænd af anlægsstørrelser, -typer, ejerforhold og anvender forskellige andele og typer af halm. Desuden har anlæggene forskellige situationer mht. biomassegrundlag på egen bedrift og i oplandet, hvilket har direkte betydning for, hvilke biomasser der bruges og i hvilke mængder.

Besøgene på de enkelte anlæg har typisk indbefattet et interview – som har taget udgangspunkt i interview-guiden i bilag 1 – og en efterfølgende rundvisning, hvor der er blevet taget billeder af de forskellige systemer på anlæggene.

Erfaringer med brug af halm

På de besøgte anlæg har man arbejdet med forskellige halmtyper og -produkter til biogasproduktionen alt efter, hvordan det enkelte anlæg er opbygget med neddeling, opholdstid, kapacitet mm. Således har man gjort sig erfaringer med ensileret halm, snittet halm, halmballer, halmpiller, dybstrøelse og samensilering med forskellige afgrøder. Den anvendte halm består hos langt de fleste anlæg af både hvede-, byg-, raps- og frøgræshalm. På flere af anlæggene har over en løbende periode introduceret en større andel af halm som erstatning for andre mere letomsættelige råvarer, som enten er blevet for dyre eller som de ikke længere kan få adgang til. Anlæggende fortæller samstæmmende, at et øget halmforbrug har medført en afgasset biomasse med et højere tørstof og flere steder har man været nødt til at separere den afgassede biomasse. Håndteringen af halm er typisk mere mandskabs- og energikrævende og den generelle opfattelse er, at et øget halmforbrug har medført øgede produktionsomkostninger på biogasanlægget.

I de følgende afsnit er de praktiske erfaringer med en række forskellige halmprodukter gennemgået.

HALMPILLER

På et af anlæggene anvender man i dag omkring 100 tons halm om dagen primært i form af halmpiller (Figur 37) og løs halm, men der leveres også halm af god kvalitet i baller. Her oplevede man ikke nogen problemer med håndtering af halmpillerne, bortset fra at det støver en del. På anlægget forventes det, at halmpillerne har et gaspotentiale på 220 m³ metan pr. ton. Selvom der er mange fordele ved halmpillerne, og de er nemme at håndtere, så er de for dyre i anskaffelse med en pris på 1.000-1.400 DKK pr. ton. Der har derfor på anlægget været overvejelser om at bruge halmpiller som strøelse, således landmændene kan være med til at betale for den del af indkøbsprisen. I den forbindelse er der nogle usikkerheder omkring gaspotentialet i produktet, efter det har været brugt som strøelse, og derfor også hvad udbyttet for biogasanlægget bliver.



Figur 37: Halmpiller til anvendelse i biogasanlæg. Foto: Lars V. Toft, SEGES Innovation

Denne opfattelse, af at halmpillerne er nemme at håndtere, men for dyre i anskaffelse, går igen hos andre anlæg, som også har erfaringer med brug af halmpiller. Hos Blåbjerg Biogas har man løst denne udfordring med prisen ved at indgå en aftale med landmændene om, at de bruger halmpillerne som strøelse i sengebåsene, og dermed får integreret halmen i gyllen, som leveres til anlægget. For hvert indkøbt kilo halmpilleprodukt får landmanden et tilskud på 0,5 kr. fra biogasanlægget, og samtidig er der mulighed for, at landmanden kan få en bonus for det øgede tørstofindhold i den leverede gylle (Møller, et al., 2020).

Denne metode med at få halmpillerne ind sammen med gyllen betyder samtidig, at man kan få store mængder halm ind i biogasanlægget uden at skulle bruge penge på at investere i et neddelingssystem til forbehandling af halmen.

DYBSTRØELSE

Anvendelsen af dybstrøelse er meget udbredt på de danske biogasanlæg, og 10 ud af de 11 adspurgte anlæg anvender dybstrøelse i større eller mindre omfang. Dette skyldes, at dybstrøelsen typisk er en meget billig biomasse, som anlægget ofte kan få for at hente det. På den måde slipper landmanden for at skulle bruge tid og kræfter på at overdække stakke med dybstrøelse.

Den anvendte dybstrøelse kommer fra både kvæg, svin, fjerkræ og heste, og har derfor et meget varierende indhold af halm og dermed også tørstof. Det betyder ligeledes, at anlæggene har svært ved at vurdere gasudbyttet fra dybstrøelsen alene, men det er erfaringen fra et af anlæggene, at gaspotentialet er betydeligt større i halm end i dybstrøelse, hvilket hænger godt sammen med det højere tørstofindhold i den rene halm.

Den suverænt største udfordring ved brug af dybstrøelse skyldes indhold af fremmedlegemer, som giver et højt slid på forbehandlingsudstyr og frekvente maskinstop.

LØS (SNITTET) HALM

Lagring og anvendelse af løs, snittet halm er meget udbredt hos de adspurgte anlæg, om end disse anvender forskellige metoder.

Ét anlæg anvender et simpelt system, hvor halmen snittes af mejetærskeren i forbindelse med høst, og derefter opsamles med en vogn med pickup. Herefter bliver halmen læsset af i en markstak (Figur 38), hvor den får lov at ligge løst og uden overdækning, indtil den skal bruges i anlægget. Dette betyder, at den øverste del af stakken går i forrådnelse, mens der ikke ses store ændringer i kvaliteten af resten af stakken, som er fint ensileret. Halmen har typisk et tørstofindhold på 80%, og der er på anlægget ikke oplevet problemer med, at stakken udvikler varme, og dermed giver energitab og udgør en risiko for at selvantænde. Denne metode anvendes, da der er kort afstand mellem biogasanlægget og markerne, hvor halmen bjærges (omkring 5 km), og man slipper derfor for at presse halmen i baller. Hele hensigten med systemet har været at finde den absolut billigste måde, hvorpå man kan få halmen ind i biogasanlægget. Desuden er man fra landmandens side interesseret i at fjerne halmen så hurtigt som muligt fra marken i forhold til at give optimale vækstbetingelser for det udlæg, som er sået ud under kornet.



Figur 38: Udækket halmstak af løs snittet halm samlet direkte fra marken og lagt i løs stak uden overdækning. Fotos: Lars V. Toft, SEGES Innovation

Et andet anlæg har gode erfaringer med at lade halmen ligge på marken og blive våd, inden den efterfølgende snittes med en finsnitter og ensileres i en stak (Figur 39). For at undgå brandrisiko og for at sikre en ordentlig kompression af halmen ønskes det, at denne er så våd som mulig – gerne helt ned til 60-70% tørstof. Derfor snittes og samles halmen typisk i eller lige efter regnvejr. Her forventes halmen at give en gasproduktion på 160 m³ metan pr. ton.



Figur 39: Stak af snittet og komprimeret fugtig halm. Fotos: Lars V. Toft, SEGES Innovation



Figur 40: En ca. 3 år gammel stak med ensileret sekunda-halm hos Brdr. Thorsen Biogas I/S. Halmen blev snittet, tilført ekstra vand og kørt lagvis sammen med en gummiged. Stakken har ikke været dækket. Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut.

Flere af de interviewede anlæg havde oplevet brand i stakke med halm, og som det kan læses, er der hos de ovennævnte anlæg – naturligvis – stort fokus på at mindske brandrisikoen i den lagrede halm. Bekymring for brandudvikling deles af flere af anlæggene – især større anlæg – og disse har derfor indtil videre valgt ikke at gøre brug af denne opbevaringsmetode. Dette på trods af, at mange af anlæggene har kapacitetsproblemer i forhold til opbevaring af halm, og derfor i dag får leveret dette løbende. På sigt kan opbevaring af halm i stakke derfor være en løsning på kapacitetsproblemerne, såfremt man finder en metode, som holder brandrisikoen på et minimum.

SAMENSILERING

Udover ensilering af den rene halm for sig selv har flere anlæg også undersøgt og gjort sig erfaringer med samensilering af halm og forskellige andre afgrøder. Et af anlæggene samensilerer således løv halm, sukkerroer og solsikkepilller (Figur 41), mens et andet anlæg har gode erfaringer med halmpiller og kartoffelpulp (Figur 41). Et tredje anlæg har gjort brug af halm-roeensilage (Figur 42).

Selvom anlæggene anvender forskellige afgrøder til samensilering er det overordnede formål hos alle anlæggene, at halmen optager det safttab, der er fra den/de øvrige afgrøder i stakken, hvilket bringer vandindholdet i halmen op, og dermed forbedrer ensileringssevnen. Samtidig reducerer man safttabet fra stakken, hvormed man får en bedre udnyttelse af hele biomassen i biogasanlægget.

Desuden har Teknologisk Institut i et forsøg vist, at samensilering af halmstubbe og græsudlæg øger gasudbyttet med 17% i forhold til friskt frossent materiale (Hjort-Gregersen, 2020). Samensilering af halm og roetop har øget metanpotentialitet i størrelsesordenen 18-32% (Larsen, et al., 2017).



Figur 41: Tv. samensilering af halm, sukkerroer og solsikkepilller. Th. samensilering af halmpiller og kartoffelpulp. Fotos: Lars V. Toft, SEGES Innovation



Figur 42: Tv. Samensilering af halm og roer. Kilde: (Møller, et al., 2020).

HALMBALLER

Indhentning og ensilering af løs halm benyttes typisk kun, når afstanden fra biogasanlægget til marken ikke er for stor (typisk under 10 km), da omkostningerne til transporten af halmen ellers bliver for store. Derfor modtager flere af anlæggene halmen i baller, som giver mulighed for at transportere større mængder halm over længere afstande, og dermed bliver transportomkostningerne pr. ton reduceret i forhold til løs halm. Til gengæld opstår der en ekstra omkostning til presning, åbning og oprivning af ballerne, inden halmen kan blandes med de øvrige biomasser. Udgiften til oprivning og åbning er typisk ikke opgjort alene, men ofte som en samlet udgift til forbehandling af halmen fra det kommer ind på anlægget, til det ender i reaktoren. Derfor afhænger udgiften også meget af, hvilken kvalitet af halm man får ind, samt hvilket forbehandlingssystem man benytter sig af. Omkostningserfaringerne til håndtering af halm i baller på anlæggene varierer derfor også mellem 50 og 150 kr. pr. ton.

Derudover har enkelte anlæg oplevet, at halmballerne ofte indeholder overraskende mange fremmedlegemer og især større og mindre sten fra markerne. Derfor er disse anlæg påpasselige med at modtage halmballer, da fremmedlegemerne heri slider ekstra meget på neddelingsenhederne, hvorfor omkostningen til vedligeholdelse bliver for stor.

Som nævnt er der stor forskel i kvaliteten af den leverede halm, og mange anlæg foretrækker at modtage såkaldt sekunda halm (Figur 43), hvor vandindholdet typisk er for højt til, at kraft-varme-værkerne kan bruge det. Dette skyldes først og fremmest, at halm af ringere kvalitet er billigere i indkøbspris, og samtidig har den vådere halm også ofte brug for mindre forbehandling, da der allerede er begyndt at ske en naturlig nedbrydning. Mængden af sekunda halm er dog typisk begrænset og varierer ganske betydeligt fra år til år, og sekunda halm udgør typisk også en mindre andel af den samlede halmmængde, som biogasanlæggene bruger.



Figur 43: Oprevne baller af sekunda halm. Foto: Lars V. Toft, SEGES Innovation

Neddelings- og blandemetoder

Anvendelsen af både forskellige halmprodukter, men også biomasser generelt samt opbygningen af det enkelte anlæg, betyder, at der stort set er lige så mange forbehandlingsmetoder, som der er biogasanlæg. Alligevel ses en tendens blandt de adspurgte anlæg til, at ensileret halm typisk kun har brug for én forbehandling på anlægget i modsætning til halm (både prima og sekunda kvalitet) modtaget i baller, som ofte kræver to forbehandlinger, inden det kommer ind i reaktoren.

På anlæg, hvor den ensilerede halm er snittet i marken, kræves der kun en begrænset neddeling, hvorfor det anvendte udstyr – hhv. Bigmixer og foderblander – ikke har som primært formål at neddele biomassen, men i stedet at sikre en homogen blanding af de forskellige faste biomasser.

Andre anlæg har gode erfaringer med at anvende hhv. en premix-enhed eller en hammermølle, mens et enkelt anlæg anvender begge dele til forbehandling af ensileret halm eller dybstrøelse.

Hammermøllen anvendes til at give en kraftig neddeling af de faste biomasser, inden disse efterfølgende i en separat enhed blandes med de flydende biomasser. Disse to behandlinger er samlet i Premix-enheden, som er opbygget således, at den modtager en strøm af gylle og en strøm af fast biomasse, der herefter passerer gennem en macerator, som både giver en kraftig neddeling af biomassen og sikrer en homogen blanding af den samlede biomasse, som efterfølgende pumpes ind i reaktoren.

Hammermøllen og premixeren anvendes også på anlæg, hvor halmen modtages i baller, og disse suppleres ofte af andre blande- og neddelingsenheder afhængigt af kvaliteten af halmen. Af den grund har man på ét af anlæggene to forskellige systemer til indfødning af hhv. tør og våd halm. Den tørre halm neddeles i en hammermølle, mens den vådere halm først neddeles og blandes med andre biomasser i en foderblander, hvorefter denne blanding sendes gennem en pillepresse, som findeler biomassen.

På et andet anlæg mixes og neddeles halmen fra halmballerne med dybstrøelse i en LOBE Big-Mix'er, som blander og neddele biomasser og sikrer en ensartet homogen indfødning. Herefter bliver biomassen sendt gennem en premix-enhed.

Endelig anvender et anlæg en knuser (Figur 44), der normalt bruges til at håndtere have- og træaffald, til at forbehandle halm inden indfødning i en Big-mix.



Figur 44: Tv: knuser til neddeling af halm. Th: knust halm. Fotos: Lars V. Toft, SEGES Innovation

Anlæggene sigter efter at holde sig under et tørstofindhold i reaktorerne på 10-12%, og så længe reaktorerne bliver holdt godt omrørt, oplever anlæggene ikke væsentlige problemer med flydelag.

Selvom man har erfaringer med mange forskellige neddelingsmetoder til halm, så kan det være svært at sammenligne disse, og udpege om nogen metoder er bedre end andre. Dette skyldes, at mange af anlæggene kun har erfaringer med ét neddelingssystem, og man kan ikke umiddelbart sammenligne systemerne på tværs af anlæggene, da der er mange faktorer, som har indflydelse på, hvorvidt systemet fungerer optimalt. Således kan et system fungere rigtig godt på et anlæg, mens det på et andet anlæg kan være svært at få integreret på en optimal måde.

Biogasanlæggene anvender desuden en lang række forskellige produkter i meget varierende mængder og forhold. Anlæggene har derfor svært ved at kvantificere præcis, hvor meget biogas halmen bidrager med. Generelt forventer biogasanlæggene, at man kan opnå et biogasudbytte på omkring 200 Nm³ CH₄/ton ved halm med omkring 85% TS ved de mekaniske forbehandling.

Opholdstider, tørstof%, temperatur og restgaspotentiale

I Tabel 18 nedenfor er opholdstiden, tørstofindholdet og temperaturen i de primære reaktorer angivet for de besøgte anlæg. Ser man på opholdstiden (Tabel 18), så ligger denne mellem 48 og 130 dage for syv af anlæggene, mens et enkelt anlæg har et system med en opholdstid på 150 dage. Disse otte anlæg har dermed alle en markant længere opholdstid end de 25-40 døgn, som stadig anvendes på en stor del af biogasanlæggene i dag. Som tommelfingerregel udgør omkostningen til tanke typisk 15% af den samlede investering. Hvis opholdstiden, og dermed også tankapaciteten skal forøges med 67% fra 30 dage til 50 dage, vil den samlede investering til biogasanlægget stige med 10%.

Temperaturen i den/de primære reaktorer ligger – som det ses i Tabel 18 – på 50-53°C, mens et enkelt anlæg anvender en temperatur på 46°C. Dette temperaturspænd svarer til den almindelige udrådningstemperatur i landbrugsbaserede biogasanlæg.

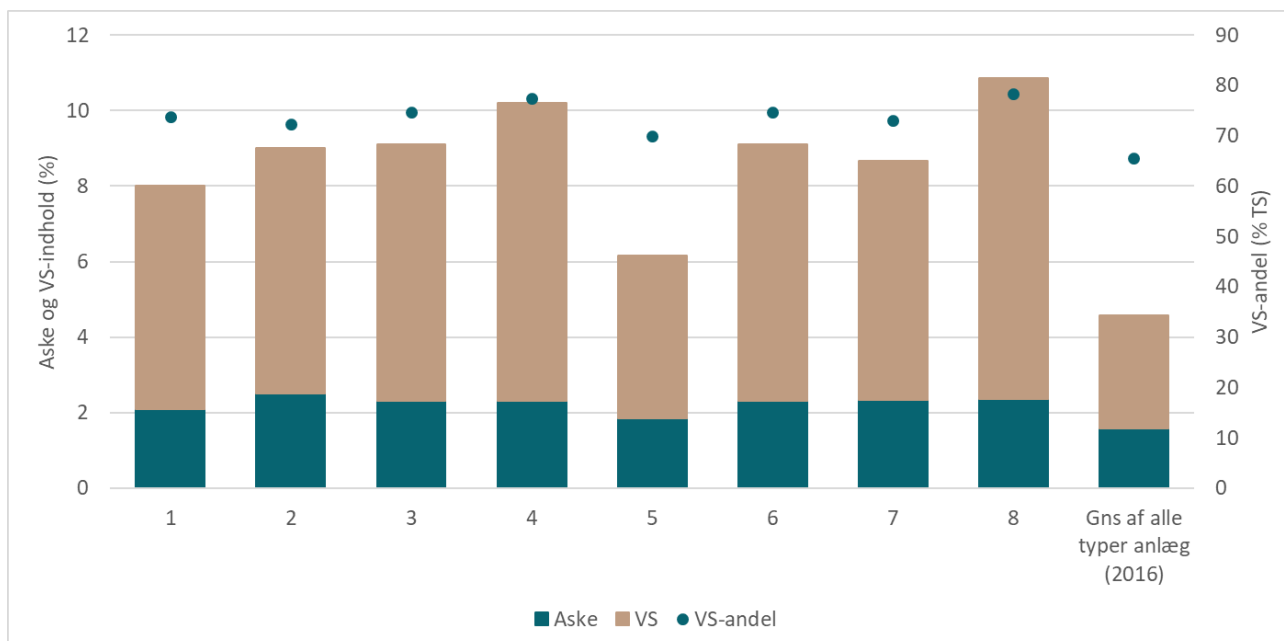
Tabel 18: Opholdstider, tørstof%, temperatur og restgaspotentiale for de interviewede anlæg. Aktør 9 er ikke listet i tabellen, da de har flere anlæg med varierende tørstof.

| | Tørstofindhold | | Samlet opholdstid i reaktorer | Temperatur i primær reaktor | Restgaspotentiale (90dage) (Nm ³ CH ₄ /ton) |
|---|----------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------------------|---|
| 1 | 8% i reaktorer | | 150 dage | 46 °C | 3,4 |
| 2 | 12% i reaktorer | 7% i efterlager | 48 dage (inkl. efterlager) | 50 °C | 6,4 |
| 3 | 9% i reaktorer | | 70 dage (inkl. efterlager) | 51 °C | 4,5 |
| 4 | 10-10,5% i reaktorer | | 70-80 dage | 51,6 °C | 6,1 |
| 5 | 10% i reaktorer | 7% i efterlager | 80 dage | 53 °C | 2,6 |
| 6 | 10,5% i reaktorer | 8% i efterlager | 55-60 dage (inkl. efterlager) | 52 °C | 5,2 |
| 7 | 11% i reaktorer | 9,7% i efterlager | 100 dage (inkl. efterlager) | 50 °C | 4,4 |
| 8 | 11,6% i reaktorer | 10% i efterlager | 130 dage (inkl. efterlager) | 50,5 °C | 7,8 |

Afgasset biomasse

Fra flere af de interviewede anlæg er der udtaget prøver af afgasset biomasse, der er blevet analyseret for indhold af Total N, P, Ammonium-N, TS og aske.

På Figur 45 nedenfor er tørstof, aske og andelen af organisk indhold (VS) i den afgassede biomasse illustreret for de interviewede anlæg sammen med gennemsnittet for de 15 biogasanlæg, der indgik i Biogas Taskforce undersøgelsen fra 2016 (Møller & Nielsen, 2016). Det ses, at anlæggene, der bruger en stor andel af halm, har et markant højere samlet tørstofindhold (summen af aske og VS) og en højere VS-andel end gennemsnittet for anlæggene i Møller & Nielsen, 2016. I forhold til de analyser der er blevet udført i Biogas Taskforce undersøgelsen fra 2016 (Møller & Nielsen, 2016), findes der i dag anlæg med mere end 10% tørstof, hvilket ikke har været tilfældet tidligere. Tidligere var man som landmand sikker på at modtage en afgasse biomasse med et lavere tørstofindhold og med en højere kvælstofudnyttelse end den gylle man leverede, hvilket har været et af hovedargumenterne for landmænd i at bytte gylle med et biogasanlæg. Det øgede tørstofindhold vil give udfordringer med forøget ammoniaktab og dårligere kvælstofudnyttelse.



Figur 45: Aske og VS-indhold (venstre akse) og VS-andel (højre akse) for de halmbaserede anlæg og gennemsnit af alle typer anlæg. Kilde: (Møller & Nielsen, 2016).

For at nedbringe tørstofindholdet og dermed forbedre gødningskvaliteten er flere biogasanlæg begyndt at separere den afgassede biomasse.

Flere af de besøgte anlæg bruger en skruepresse, der producerer en fiberdel (Figur 46), som efterfølgende skal afsættes. Skruepressen er især udbredt på de mindre gårdanlæg, som typisk har en begrænsning på, hvor mange tons råvare de må bruge pr. år. Anlæggene prioriterer derfor at anvende mere koncentrerede produkter og bruger recirkuleret væskefraktion fra skruepressen til at fortynde koncentrerede produkter. Sammenlignet med dekantere, der kun er installeret på to danske landbrugsbaserede biogasanlæg, er skruepressen markant billigere i investering og drift. Skruepressen er dog – i modsætning til dekanteren – ikke i stand til at ændre væsentligt på N:P-forholdet i den afgassede biomasse.

Indførelsen af en generel regulering af anvendelsen af fosfor (kaldet fosforreguleringen) har medført, at man nu skal tage højde for, hvilket N:P-forhold og P-loft, biogasanlægget leverer. For mange landmænd, som modtager afgasset biomasse, er det vigtigt at forholdet mellem indholdet af kvælstof og fosfor (N:P) er så optimalt som muligt i forhold til bedriftens specifikke kvælstof- og fosforlofter, da det betyder, at de kan dække så høj en andel af planteproduktionens gødningsbehov via næringsstofindholdet i den afgassede biomasse. Lofterne afhænger af bedriftstypen, der producerer gyllen. Kvælstofloftet er 170 kg kvælstof pr. ha for alle bedriftstyper, bortset fra kvægundtagelsesbrugene, der har et kvælstofloft på 230 kg kvælstof pr. ha. Fosforloftet afhænger derimod både af gødningstypen og om bedriften er beliggende i eller udenfor områder med skærpede krav til kvælstofudledningen. SEGES Innovation lavede i 2020 en kortlægning af N:P-forholdet fra 39 biogasanlæg, som viste, at de fleste biogasanlæg leverer afgasset biomasse med et N:P forhold, der er for lavt i forhold til det optimale for kvægundtagelsesbrug (Hansen, 2020). Ved at separere den afgasse biomasse får biogasanlæggene mulighed for at levere et gødningsprodukt, der er optimalt for kvægundtagelsesbrug.

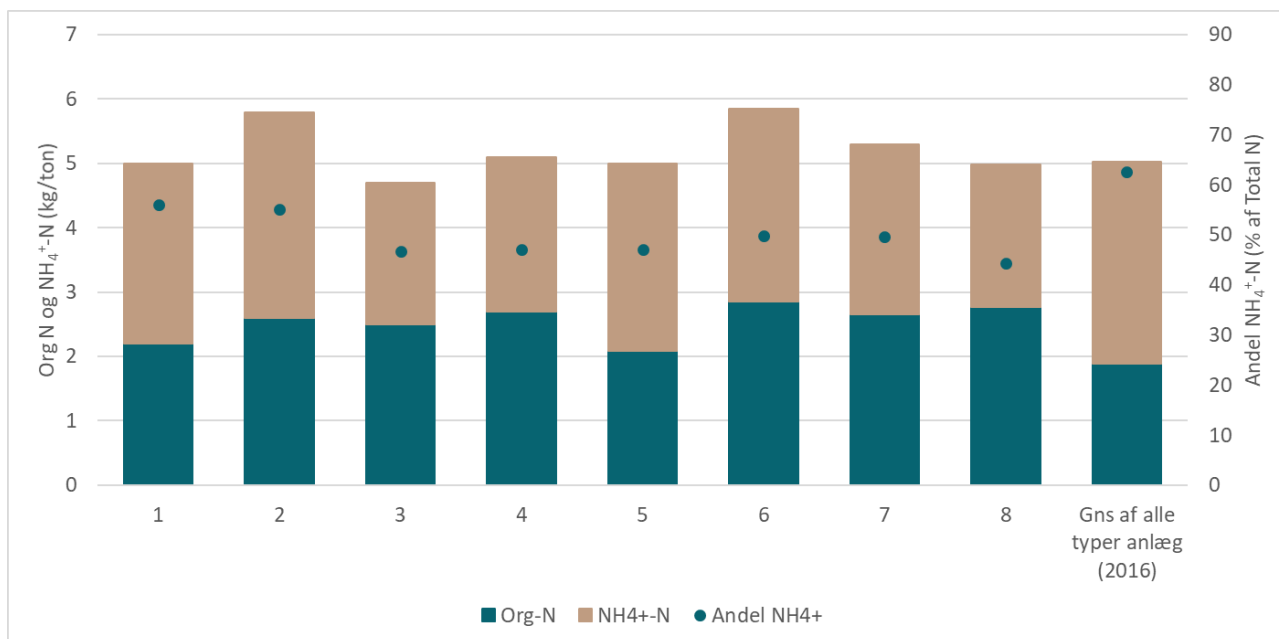


Figur 46: Fiberfraktion efter separation af afgasset biomasse med en skruepresse og en dekantercentrifuge. Foto: Torkild Birkmose, SEGES Innovation

Fibren har traditionelt været bekostelig at få afsat, og biogasanlæggene forsøger derfor så vidt muligt at undgå at separere den afgassede biomasse. De forhøjede gødningspriser har dog medført, at biogasanlæggene i dag har let ved at få afsat fibren. Fibren er også en særdeles velegnet råvare til pyrolyseprocessen. Succesfuld implementering af pyrolyseteknologien ville give yderligere incitament til at begynde at separere den afgassede biomasse, hvilket både vil løse udfordringerne med den forringede gødningskvalitet samtidig med at man kan binde store mængder kulstof i jorden.

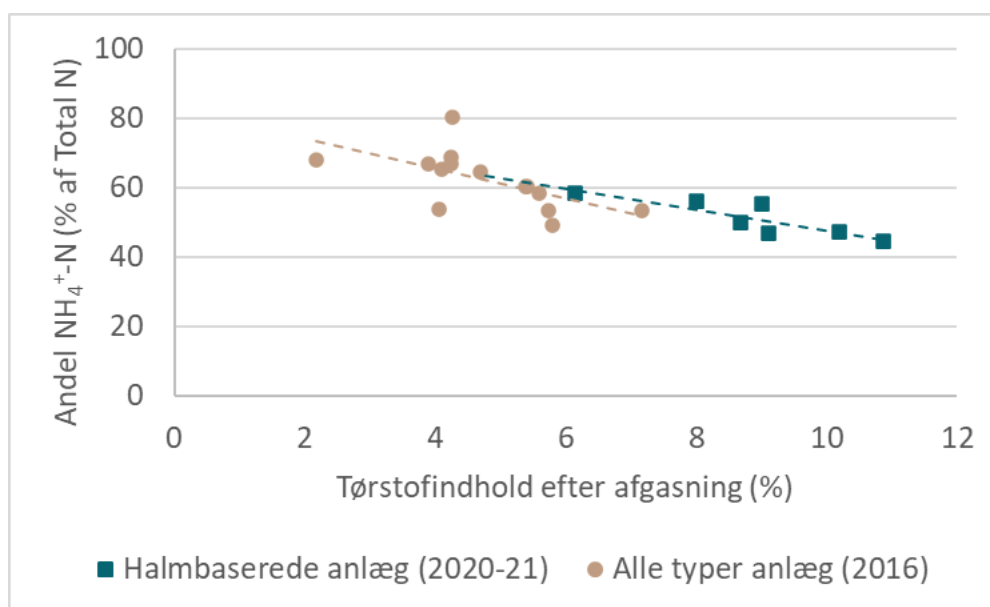
På Figur 47 nedenfor er indhold af organisk-N, ammonium-N og ammoniumandelen for de interviewede anlæg sammenlignet med gennemsnittet af 15 anlæg, der indgik i Biogas Taskforce undersøgelsen fra 2016 (Møller & Nielsen, 2016). Det ses, at anlæggene, som bruger en stor andel af halm, har en markant lavere ammoniumandel end gennemsnittet for anlæggene i Møller & Nielsen, 2016. Ammoniumandelen er et direkte udtryk for mængden af plantetilnægeligt kvæstof, og desto højere ammoniumandelen er, desto mere kvælstof kan planterne optage og desto lavere bliver kvælstofudvaskningen.

Den kommende udbygning af biogasbranchen vil fortsat hovedsageligt være baseret på husdyrgødning og halm, og forventningen er, at vi indenfor få år får afgasset 80 pct. af husdyrgødningen i Danmark. Vi ser altså ind i en fremtid, hvor afgasset biomasse bliver den suverænt største gødningstype, der bliver udbragt på de danske marker. Det er derfor meget centralt, om den afgassede biomasse er bedre eller dårligere end den ubehandlede husdyrgødning.



Figur 47: Indhold af organisk-N (blå søjle, venstre akse) og NH_4^+ -N (venstre akse), samt andel af NH_4^+ -N (punkter, højre akse). Prøverne for de halmbaserede anlæg er sammenlignet med gennemsnittet for de 15 anlæg, der blev analyseret i forbindelse med (Møller & Nielsen, 2016). Anlæg 7 oplyser, at de siden august 2021 har lavet mere end 70 analyser af afgasset biomasse, og at den gennemsnitlige ammoniumandel ligger på 64%.

På Figur 48 fremgår det, at et øget tørstofindhold i den afgassede biomasse giver anledning til en lavere ammoniumandel. Ved anvendelse af en stigende andel halm i biogasanlæggene vil tørstofindholdet gradvist øges, da omsætteligheden i halm er lavere end i andre råvarer. Andelen af Amm-N falder med knap 3% for hver procentpoint tørstofindholdet stiger.



Figur 48: Sammenhæng mellem ammoniumandelen og tørstofindholdet i den afgassede biomasse. Data for de halmbaserede anlæg (blå firkanter) er indsamlet i forbindelse med denne analyse og Møller, et al., 2020. Data for alle typer anlæg (brune cirkler) er analyseret i forbindelse med (Møller & Nielsen, 2016).

Samlet set er det tydeligt, at et øget halmforbrug har påvirket gødningskvaliteten i negativ retning. Det forøgede tørstofniveau og den reducerede ammoniumandel medfører en forøget ammoniakudledning og en dårligere gødningsudnyttelse.

Hvis afgasset biomasse med en høj andel af halm og dybstrøelse kommer retur til landbruget, vil biomassen sandsynligvis kun have en begrænset og måske skuffende kvælstofeffekt. Især, hvis biomassen overfladeudbringes på f.eks. vintersæd. Det skyldes, at man kan få en ekstrem ugunstig kombination af lav ammoniumandel, højt tørstofindhold og højt pH. Den plantetilgængelige kvælstofmængde er derfor relativ lav, og der er en høj risiko for at tabe den som ammoniakfordampning, fordi biomassen ikke kan trænge hurtigt i jorden, hvor den er beskyttet. Resultatet kan blive en kvælstofudnyttelse på blot 30-50 pct. Knap så slemt kan det gå, hvis biomassen nedfældes, da den beskyttes mod ammoniakfordampning i jorden.

Hvor meget tørstofindholdet betyder for ammoniakfordampningen kan illustreres med resultater af beregninger, som Aarhus Universitet har lavet på baggrund af et meget stort antal forskningsforsøg. I figur 1 er illustreret ammoniakfordampningen ved tre forskellige tørstofindhold. En tørstofprocent på 8 er højt, men ikke ekstremt højt. Hvis der f.eks. anvendes halm i biogasanlægget, kan man se tørstofindhold på op til 12 pct. Ved 8 pct. risikerer man at tabe op mod halvdelen af den plantetilgængelige kvælstofmængde.

Et regneeksempel: En landmand modtager afgasset biomasse med en ammoniumandel på 50 og et tørstofindhold på 8 pct. Han vil udsprede den til vinterhvede i april under normale udbringningsforhold. Som udgangspunkt er kun halvdelen af totalkvælstoffet plantetilgængeligt og 45 pct. af den tabes ved ammoniakfordampning. Så er der 28 pct. tilbage, som planterne udnytter. Dertil kommer en vis udnyttelse af organisk kvælstof (12-15 pct. første år), hvilket bidrager med 7-8 procentenheder til udnyttelsen. Samlet set bliver kvælstofudnyttelsen første år på blot ca. 35 pct. Dertil kommer en eftervirkning på ca. 10-15 pct. I forhold til at anvende svinegylle, vil kvælstofeffekten være utilfredsstillende. At det lovgivningsmæssige krav til udnyttelsen måske også er lavt er kun en ringe trøst, fordi det jo blot giver én lov til at indkøbe det manglede kvælstof i form af handelsgødning, og det skal der jo betales for.

13. Perspektiver og anbefalinger

Den danske biogasbranche har indenfor de seneste 10 år gennemgået en massiv udvikling, og i dag bliver mere end 30 pct. af husdyrgødningen afgasset. En yderligere udbygning af biogasbranchen kan sammen med en reduktion af gasforbruget sikre, at Danmark bliver uafhængig af fossil naturgas fra Rusland indenfor en kort årrække.

Tidligere var de landbrugsbaserede biogasanlæg udelukkende baseret på gylle, energiafgrøder og let omsættelige affaldsprodukter. I dag anvendes også tungt omsættelige produkter som f.eks. dybstrøelse og halm. Denne udvikling har betydet, at landmanden i modsætning til tidligere kan forvente at modtage et gødningsprodukt med en lavere 1. årsvirkning og højere eftervirkning end rå afgasset svinegylle. Analyser af afgasset biomasse indikerer, at 1. årsvirkningen falder med stigende tørstofindhold, og at 1. årsvirkningen derfor vil blive mindre i takt med øget brug af tungt omsættelige biomasser. Der er også stor variation i, hvor gode biogasanlæggene er til at omsætte de tungt omsættelige produkter og dermed opnå en forbedret 1. årsvirkning af den afgassede biomasse.

Den kommende udbygning af biogasbranchen vil fortsat hovedsageligt være baseret på husdyrgødning og forventningen er, at vi indenfor få år får afgasset 60-70 pct. af husdyrgødningen i Danmark. Afgasset biomasse forventes derfor at blive den suverænt største gødningstype, der bliver udbragt på de danske marker. Det er derfor helt centralt, om den afgassede biomasse har en bedre gødningsvirkning og en lavere drivhusgasemission end den ubehandlede husdyrgødning.

Halm er den råvare, som repræsenterer det suverænt største uudnyttede potentiale, og hvis de ambitiøse målsætninger om øget biogasproduktion skal indfries samtidig med at forbruget af energiafgrøder bliver reduceret, så skal en stor del af halmen anvendes til biogasproduktion.

Rent teknisk er der på biogasanlæggene fundet en lang række forbehandlings- og indfødningssystemer, der gør biogasanlæggene i stand til at håndtere betydelige mængder af halm, f.eks. forskellige typer fysisk neddeling og forbehandling eller ensilering. Halmanvendelsen varierer fra anlæg til anlæg alt efter hvilke andre råvarer, de har adgang til, samt anlæggets opbygning og eksisterende forbehandlings- og indfødningssystemer. For nogle anlæg vil det ikke være muligt at øge anvendelsen af halm uden betydelige ændringer på anlægget.

Sammenlignet med de råvarer, som biogasanlæggene i dag anvender, er halm mere ressource- og energi-krævende at anvende. Derudover bør der med anvendelsen af store mængder halm også være mulighed for at den afgassede biomasse kan blive separeret, så væskefraktionen kan leveres som et gødningsprodukt af acceptabel kvalitet. Hvis ikke det er tilfældet, vil konsekvensen være et øget ammoniaktab, større kvælstofudvaskning og en dårligere kvælstofudnyttelse end afgasset biomasse uden dybstrøelse og halm.

Hvis biogasanlæggene skal omsætte halm i tilstrækkelig grad, bør det ske med en opholdstid på minimum 40-50 dage. En kortere opholdstid vil medføre et forøget restgaspotentiale i den afgassede biomasse, som vil medføre risiko for forøget metanemission fra lageret og dermed en mindre klimaeffekt. Mangelfuld omsætning vil også bevirke en lavere biogasproduktion og et højere tørstofindhold i den afgassede biomasse.

Mange af de nuværende biogasanlæg er designet til en opholdstid på 30-40 dage, og de færreste har installeret separationsudstyr. Det vil således være forbundet med ekstra omkostninger til forøget reaktorkapacitet samt separationsudstyr, hvis biogasanlæggene skal håndtere større mængder halm på en tilfredsstillende måde.

Hvis der alene ses på råvareomkostningerne, kan der i den nuværende situation findes halmrige, konkurrencedygtige, alternativer til de energiafgrøder, der er under udfasning. Men alle biogasanlæg har en øvre grænse for den tørstofmængde, der kan rent fysisk håndteres i anlægget. Anlæg, der allerede opererer ved denne grænse, og hidtil har anvendt maksimal mængde af energiafgrøder, kan ikke uden videre erstatte energiafgrøder med halm uden, at det medfører et betydeligt økonomisk tab. Det skyldes, at gasudbyttet fra halm pr tons tørstof er lavere end fra de fleste energiafgrøder, og derfor vil der ved samme totalmængde af tørstof ske en betydelig nedgang i gasproduktionen. Det er ikke sådan, at biogasproduktion på basis af store mængder halm ikke økonomisk lader sig gøre, men der skal større behandlingskapacitet i anlægget til for at realisere den samme gasproduktion, som hvis majsensilage fortsat var en mulighed. Udskiftning af majs med halm vil derfor medføre, at enhedsomkostningerne pr. Nm³ CH₄ blive højere.

Desuden er der den problemstilling, at størstedelen den afgassede biomasse i fremtiden sandsynligvis skal separeres, når der anvendes store mængder halm, af hensyn til kvælstofudnyttelsen i den afgassede biomasse. Dette medfører øgede omkostninger for biogasproduktionen, ikke mindst fordi det traditionelt har været svært at få afsat fiberproduktet. En løsning på denne udfordring kunne være pyrolyse af de afgassede gyllefibre, hvorved gyllefibrene bliver omdannet til grøn energi og biochar. En anden mulighed er at introducere teknologier, som kan sænke viskositeten i den blandede biomasse i anlægget. Det kan gøres ved neddeling eller desintegration af biomassen i et pumpeloop fra reaktoren.

Der er bevilget midler til en ny støtteordning til produktion af biogas og andre grønne gasser. De præcise rammer for støtteordningen er endnu ikke fastlagt, men man forventer, at der bliver tale om en udbudsmodel, hvor projekter til produktion af biogas og andre grønne gasser skal byde ind med et tilskudsbehov. Man forventer, at det væsentligste udvælgelseskriterie vil blive mest mulig grøn gas for pengene. En bekymring kan derfor være, at ønsket om at opnå den lavest mulige pris, kan afholde byderne fra at inkludere fordyrende tekniske løsninger, som kunne forbedre miljø- og klimagevinsterne ved biogasproduktionen.

Endelig er det tydeligt, at der fortsat er et behov for, at der på forsknings- og udviklingsfronten fortsat fokuseres på metoder til at højne gasudbyttet og omsætningen af halm.

14. Referencer

- Abraham, A., Mathew, A.K., Park, H., Choi, O., Sindhu, R., Parameswaran, B., Pandey, A., Park, J.H., Sang, B.-I. 2020. Pretreatment strategies for enhanced biogas production from lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 301, 122725.
- Anonym, 2018. Indretning af stalde til kvæg – Danske anbefalinger. 5. rev. udgave. SEGES 184 pp
- Balsari, P., Menardo, S., Airoidi, G. 2011. Effect of physical and thermal pre-treatments on biogas yield of some agricultural by-products.
- Biogas Danmark, 2021. Biogas Outlook 2021, s.l.: Biogas Danmark.
- Birkmose, T., 2021. Notat tilton forslag til forsuring af afgasset gylle i udkast til gødningsavnedelsesbekendtgørelsen, s.l.: s.n.
- Birkmose, T., Hjort-Gregersen, K., Hinge, J. & Hørfarter, R., 2015. Kortlægning af hensigtsmæssig lokalisering af nye biogasanlæg i Danmark, Aarhus: SEGES og AgroTech.
- Birkmose, T. et al., 2019. Forforregulering - Er biogasanlæg en løsning eller en udfordring, s.l.: Landbrug & Fødevarer.
- Brønnum-Johansen, C. et al., 2014. Biogas i de danske kommuner - Afprøvede løsninger, s.l.: Miljøministeriet - Naturstyrelsen.
- Bødker, L. & Toft, L. V., 2020. Landbrugsinfo.dk - Husk analyser for klorindhold i specielt afgasset gylle til brug stivelseskartofler. [Online] Available at: https://www.landbrugsinfo.dk/basis/2/e/5/afgroder_husk_analyser_for_klorindhold_afgasset_gylle [Senest hentet eller vist den 21 December 2021].
- Danmarks Statistik, 2020. Danmarks Statistik, Halmudbytte og halmanvendelse. [Online] Available at: <https://www.statistikbanken.dk/HALM1> [Senest hentet eller vist den 8 November 2021].
- Danmarks Statistik (2022). Statistikbanken, Tabellen HALM 1, Halmudbytte og halmanvendelse efter område, anvendelse, enhed, afgrøde og tid. Data hentet 9/2 2022. Statistikdokumentation vedr. Høsten af korn, raps og bælgsgødning. [Energinet.dk](http://energinet.dk) (2012).
- Danmarks Statistik, 2021. Danmarks Statistik, Biogas. [Online] Available at: <https://www.statistikbanken.dk/ENE2HO> [Senest hentet eller vist den 6 December 2021].
- Energistyrelsen, 2020. ens.dk - Biomasseopgørelse 2019/2020. [Online] Available at: <https://ens.dk/ansvarsomraader/bioenergi/energi/afgroeder-til-biogas> [Senest hentet eller vist den 6 December 2021].
- Feng, L., Perschke, Y.M.L., Fontaine, D., Ward, A.J., Eriksen, J., Sørensen, P., Møller, H.B. 2019. Co-ensiling of cover crops and barley straw for biogas production. *Renewable Energy*, 142, 677-683.
- Finansministeriet, 2021. Aftale om grøn omstilling af dansk landbrug, København: Finansministeriet.
- Frandsen, T. (2021). Energi- og foderroer, sorter. Landsforsøgene 2021. Forsøg og undersøgelser i Dansk Landbrugsrådgivning. s.372-377. SEGES og Innovationscenter for Økologisk Landbrug.
- Gallegos, D., Wedwitschka, H., Moeller, L., Zehnsdorf, A., Stinner, W. 2017. Effect of particle size reduction and ensiling fermentation on biogas formation and silage quality of wheat straw. *Bioresource Technology*, 245(Part A), 216-224.
- Gebrehan, M.M., Gordon, R.J., Madani, A., VanderZaag, A.C., Wood, J.D. 2014. Silage effluent management: A review. *Journal of Environmental Management*, 143, 113-122.
- Geurts, J. & Fritz, C., 2018. Paludiculture pilots and experiments with focus on cattail and reed in the Netherlands, Nijmegen: Radboud University.
- Geurts, J. J. et al., 2020. Nutrient removal potential and biomass production by *Phragmites australis* and *Typha latifolia* on European rewetted peat and mineral soils, s.l.: Science Direct.
- Gissén, C., Prade, T., Kreuger, E., Nges, I.A., Rosenqvist, H., Svensson, S.-E., Lantz, M., Mattsson, J.E., Börjesson, P., Björnsson, L. 2014. Comparing energy crops for biogas production – Yields, energy input and costs in cultivation using digestate and mineral fertilisation. *Biomass and Bioenergy*, 64(0), 199-210.
- Hansen, M. N., 2020. Udvikling og variation i gødningskvalitet af afgasset gylle, Århus: Landbrug og Fødevarer F.M.B.A. - SEGES.

- Hansen, R.N., Fallov, J., Forskov, T., Braunstein, T., Lindeneg, S., Werther, I. & Paamand, K. (2017). Bæredygtig behandling af organisk dagrenovation på Sjælland – teknologianalyse. Roskilde Kommune, Københavns Kommune, KLAR Forsyning & Solrød Kommune. 64 s. <https://genanvend.mst.dk/media/189523/kod-rapport-endelig-november-2017.pdf>
- Hjort-Gregersen, K, et al, Fleksibel kraft-varmeproduktion fra biogas baseret på restbiomasser fra landbruget, Teknologisk Institut, 2017
- Hjort-Gregersen, K et al, Udvikling og effektivisering af biogasproduktionen i Danmark, Teknologisk Institut, 2015
- Hjort-Gregersen, K., 2020. Rationel bjærgning og håndtering af halm og efterafgrøder til biogasproduktion, s.l.: Teknologisk Institut.
- Kjeldsen, A. M. H., 2021. Landbrugsinfo - tal om kvæg. [Online] Available at: <https://talomkvaeg.landbrugsinfo.dk/Kvaeg/Tal-om-kvaeg/Sider/f60307202100.aspx#Min> [Senest hentet eller vist den 17 December 2021].
- Klima- energi- og forsyningsministeriet, 2021. kefm.dk - Ny aftale sikrer grønnere biogas produktion. [Online] Available at: <https://kefm.dk/aktuelt/nyheder/2021/jul/ny-aftale-sikrer-groennere-biogasproduktion>[Senest hentet eller vist den 6 December 2021].
- KMC Agro, 2021. kmcagro.dk - Gødskning - Kvælstof. [Online] Available at: <http://www.kmcagro.dk/avlsinformation/goedskning-kvaelstof/>[Senest hentet eller vist den 7 December 2021].
- Kristensen, E.F., Feng, L., Møller, H.B. 2016. Storage and pretreatment of grass for from extensive lowland areas used in a biogas plant. CIGR-AgEng conference Aarhus, Denmark. pp. 1-7.
- Landbrugsstyrelsen (2021). Opgørelse af afgrødefordeling 2021. Landbrugsstyrelsen, Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri, 24/6 2021. https://lbst.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Tilskud/Arealtilskud/Direkte_stoette_-_grundbetaling_mm/2021/Opgoerelse_af_afgroedefordelingen_2021.pdf
- Larsen, S.U. (2015). Efterafgrøder efter ribbehøstet korn. Oversigt over Landsforsøgene 2015. Forsøg og undersøgelser i Dansk Landbrugsrådgivning. S.199-203. SEGES.
- Larsen, S.U., Ambye-Jensen, M., Jørgensen, H., Jørgensen, U. 2019. Ensiling of the pulp fraction after biorefining of grass into pulp and protein juice. *Industrial Crops and Products*, 139, 111576.
- Larsen, S.U., Hjort-Gregersen, K., Hinge, J. 2021. Harvest of cereal straw and catch crops in mixture for biogas production: Effect of ensiling on methane yield. in: 29th European Biomass Conference, (Eds.) N. Scarlat, A. Grassi, Vol. 29, ETA-Florence Renewable Energies. Online, pp. 57-61.
- Larsen, S.U., Hjort-Gregersen, K., Vazifehkoran, A.H., Triolo, J.M. 2017. Co-ensiling of straw with sugar beet leaves increases the methane yield from straw. *Bioresource Technology*, 245, 106-115.
- Miljø- og Fødevareministeriet (2018). Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål. BEK nr. 1001 af 27/06/2018 (Gældende). <https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2016/1001>
- Miljøstyrelsen (2019). Kildesorteret organisk dagrenovation (KOD) Business Case med miljømæssige og økonomiske konsekvenser. Miljøprojekt nr. 2092, juli 2019. 47 s. <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2019/07/978-87-7038-087-4.pdf>
- Miljøstyrelsen, 2021. mst.dk - Klima-lavbund. [Online] Available at: <https://mst.dk/natur-vand/vandmiljoe/tilskud-til-vand-og-klimaprojekter/klima-lavbund/> [Senest hentet eller vist den 11 Januar 2022].
- Mikkelsen, M. (2021). Majs. Sorter til helsød. Landsforsøgene 2021. Forsøg og undersøgelser i Dansk Landbrugsrådgivning. s.398-405. SEGES og Innovationscenter for Økologisk Landbrug.
- Molinuevo-Salces, B., Larsen, S.U., Ahring, B.K., Uellendahl, H. 2013. Biogas production from catch crops: Evaluation of biomass yield and methane potential of catch crops in organic crop rotations. *Biomass and Bioenergy*, 59, 285-292.
- Molinuevo-Salces, B., Larsen, S.U., Ahring, B.K., Uellendahl, H. 2015. Biogas production from catch crops: Increased yield by combined harvest of catch crops and straw and preservation by ensiling. *Biomass and Bioenergy*, 79, 3-11.

- Møller, J., Thøgersen, R., Hellestøj, M.E., Weisbjerg, M.R., Søgaard, K. & Hvelplund, T. (2005). Fodermiddeltabel 2005. Dansk Kvæg, Rapport nr. 112, august 2005. 65 s.
- Møller, H.B., Sommer, S.G., Ahring, B.K. 2004. Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass and Bioenergy*, 26(5), 485-495.
- Møller, H.B., Romio, C., Rasmussen, M.D., Jensen, L.S., Schwartzkopff, M., Holm-Nielsen, J.B., Agdal, E.B.L., Larsen, S.U. & Hinge, J. (2020). Halm til biogas – erfaringer og klimaaspekter. Rapport udarbejdet af TI, AU, KU og AAU, december 2020. 92 s. <https://foodbiocluster.dk/Admin/Public/DWS-Download.aspx?File=%2fFiles%2fFiles%2fFBC-materialer%2fHalm-og-klima-rapport.pdf>
- Møller, H. B. & Nielsen, K. J., 2016. Biogas Taskforce - Udvikling og effektivisering af biogasproduktionen i Danmark, s.l.: Aarhus Universitet, DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug.
- Naturstyrelsen, 2011. Apopros - Kommuneplanlægning for biogasanlæg, s.l.: Naturstyrelsen.
- Niras (2019). Alternativer for anvendelse af KOD. Lokal anvendelse eller ekstern afsætning. Rapport udarbejdet af Niras for Thisted Kommune, november 2019. 25 s. https://www.thisted.dk/~media/ESDH/committees/142/855/Punkt_290_Bilag_1_Rapport_biopulp__Thisted.ashx
- Niras faktaark biogas, 2012, Energinet.dk.
- Olesen, J. E. et al., 2020. Bæredygtig Biogas - Klima- og Miljøeffekter af Biogasproduktion, s.l.: Aarhus Universitet, DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug.
- Oversigt over Landsforsøgene (2009). Udbytter og næringsstofindhold i vinterhvedehalm. Oversigt over Landsforsøgene 2009, Dansk Landbrugsrådgivning, Landscentret Planteproduktion. s.230. Oversigt over Landsforsøgene 2009 (landbrugsinfo.dk)
- Pakarinen, O., Lehtomäki, A., Rissanen, S., Rintala, J. 2008. Storing energy crops for methane production: Effects of solids content and biological additive. *Bioresource Technology*, 99(15), 7074-7082.
- Pedersen, C. Å., 2005. Oversigt over Landsforsøgene 2005, s.l.: Landsudvalget for Planteavl.
- Toft, L. V., 2020. [Landbrugsinfo.dk](http://www.landbrugsinfo.dk) - anbefalinger til at forbedre tørstofniveauet i din gylle. [Online] Available at: https://www.landbrugsinfo.dk/basis/0/d/a/kvagstalde_produktionsanlag_anbefalinger_for_bedre_torstofniveau_gylle [Senest hentet eller vist den 21 December 2021].
- Slagelse Forsyning (2017). Håndbog i behandling af KOD biopulp på rådnetanke. Slagelse Forsyning A/S, Slagelse Kommune & EnviDan A/S. 89 s. <https://genanvend.mst.dk/media/182105/haandbog-i-behandling-af-kod-biopulp-paa-raadnetanke.pdf>
- Starke, P. & Hoffmann, C.M. (2014). Yield parameters of Beta beets as a basis to estimate the bio-gas yield. *Sugar Industry*, 139, 169-176.
- Sun, H., Cui, X., Li, R., Guo, J., Dong, R. 2021. Ensiling process for efficient biogas production from lignocellulosic substrates: Methods, mechanisms, and measures. *Bioresource Technology*, 342, 125928.
- Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Valijanian, E., Kazemi Shariat Panahi, H., Nizami, A.-S., Ghanava-ti, H., Sulaiman, A., Mirmohamadsadeghi, S., Karimi, K. 2020. A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, Part 1: Upstream strategies. *Renewable Energy*, 146, 1204-1220.
- Teknologisk Institut, Kortlægning af hensigtsmæssig lokalisering af nye biogasanlæg i Danmark, 2015
- Vestergaard, E. (2022). Erik Vestergaard, specialkonsulent, Fødevarestyrelsen, personlig meddelelse, 15/3 2022
- Toft, L. V., 2022. Budgetkalkuler for produktion på organogene jorde 2022. [Online] Available at: https://projekter.seges.dk/-/media/projectreport/projectdocuments/promilleafgiftsfonden-for-landbrug/promilleafgiftsfonden-for-landbrug---2021/4300/pm_21_4300_ap4_budgetkalkuler_forproduktion_paa_organogene_jorde_2022.ash [Senest hentet eller vist den 14 2022].
- Undiandeye, J., Gallegos, D., Lenz, J., Nelles, M., Stinner, W. 2022. Effect of Novel Aspergillus and Neurospora Species-Based Additive on Ensiling Parameters and Biomethane Potential of Sugar Beet Leaves. *Applied Sciences*, 12(5), 2684.
- Wenzel, H., Triolo, J. M., Toft, L. V. & Østergaard, N., 2020. Energifgrødeanalysen, Odense: Syddansk Universitet og SEGES.

Bilag 1: Interviewguide

Biogasanlæggets stamdata

- Hvornår er anlægget opført og evt. udvidet/moderniseret?
- Hvordan er anlægget opbygget?
- Hvilket indfødningssystem bruges til fast biomasse?
- Hvor stort er anlæggets reaktorvolumen (reaktor og efterlager)?
- Ved hvilken temperatur(er) drives anlægget?
- Gennemsnitlig opholdstid? Hvis anlægget drives i serie, angives opholdstid i hvert trin.
- Hvilken tørstofprocent køres der med i reaktoren? Hvad er det højeste I har kørt med? For serielle anlæg opgives tørstof i hvert trin.
- Typisk biomassesammensætning (procentandele af hovedtyper, husdyrgødnings-typer, energiafgrøder, halm, diverse andre biomasser)? Hvor meget græs bruger I i anlægget?
- Hvor stort er jeres råvareforbrug og energiproduktion om året?
- Metanprocent for den producerede biogas?

Om anvendelsen af halm:

- Hvor længe har I brugt halm?
- Hvordan introducerede I anvendelsen af halm – hvilke råvarer erstattede det evt?
- Hvilke typer halm anvendes (hvede, byg, frøgræs)?
- Hvilke kvalitetskrav har I til halmen, som I bruger?
- Hvor stor andel af halm bruges fordelt på halm-typer?
- Hvor stor en andel af halm vurderer I, at I kunne bruge?
- Hvor meget gas forventer I halmen giver?
- Hvordan høstes, transporteres og behandles halmen?
- Hvordan lagrer I halmen?
- Hvordan forbehandles halmen før indfødning (neddelingsmetode, partikelstørrelse m.m. – gerne fotos inkl. tommestok)?
- Hvordan indföder I halmen?
- Erfaringer med anvendelse af halm? Flydelagsdannelse?
- Omrøringsproblemer/elforbrug til omrøring?
- Plan for fremtidig anvendelse af halm?
- Anbefalinger til andre biogasanlæg vedr. erstatning af energiafgrøder med halm?
- Hvilke barrierer ser du for anvendelsen af halm til biogasproduktion i stort omfang?

Økonomi:

- Hvad betaler I for halmen?
- Hvilke omkostninger har I til ensilering og forbehandling af halmen?
- Hvor meget tid bruger I på at håndtere halmen?
- Har brug af halm øget jeres driftsomkostninger

Gødningskvalitet:

- Hvilken gødningskvalitet har jeres afgassede biomasse (analyser fra anlægget: TS, VS, N, NH₄, P, K)?
- Udføres der separation af det afgassede?
- Hvordan oplever I anvendelsen af halm har påvirket gødningsproduktet?

Bilag 1. Samlet oversigt over råvareomkostninger an biogasalæg i 2021 priser.

Bilag 2: Råvareomkostninger ind i biogasanlæg.

Tabel 19: Råvareomkostninger pr. Ton biomasse og pr. Nm³ CH₄ ind i reaktor

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
|-------------------------------------|-----|------|---------|--------|-------|------------------------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|----------|----------|-----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Biomasse | | | | | | Nm ³ | Nm ³ | Køb/ *) | 1km | 5 km | 10 km | Omk | Lager | pris/ton | pris/ton | pris/ton | forbeh/ | Omk pr | Omk pr | Omk pr |
| | Ton | TS % | Tons TS | VS | VS kg | CH ₄ /kg VS | CH ₄ / | Bjærgning | transp | transp | transp | Forlager | Udkørs | frisk | frisk | frisk | ton frisk | m ³ CH ₄ | m ³ CH ₄ | m ³ CH ₄ |
| | | | | %af TS | | | ton VS | kr/t frisk | Kr/t frisk | Kr/t frisk | Kr/t frisk | Kr/t frisk | Kr/t frisk | 1km | 5 km | 10 km | | 1km | 5 km | 10 km |
| Dybstrøelse direkte indfødret | 1 | 30 | 0,3 | 0,75 | 225 | 0,250 | 56 | 30 | | | | | 10 | 40 | 40 | 40 | 0 | 0,71 | 0,71 | 0,71 |
| Dybstrøelse forbehandlet | 1 | 30 | 0,3 | 0,75 | 225 | 0,270 | 61 | 30 | | | | | 10 | 40 | 40 | 40 | 50 | 1,48 | 1,48 | 1,48 |
| Sekundahalm, våd, direkte indfødret | 1 | 70 | 0,7 | 0,95 | 665 | 0,220 | 146 | 500 | | | | | 20 | 520 | 520 | 520 | 0 | 3,55 | 3,55 | 3,55 |
| Sekundahalm, våd, forbehandlet | 1 | 70 | 0,7 | 0,95 | 665 | 0,240 | 160 | 500 | | | | | 20 | 520 | 520 | 520 | 50 | 3,57 | 3,57 | 3,57 |
| Halm, tør, direkte indfødret | 1 | 90 | 0,9 | 0,95 | 855 | 0,240 | 205 | 700 | | | | | 20 | 720 | 720 | 720 | 0 | 3,51 | 3,51 | 3,51 |
| Halm, tør, forbehandlet | 1 | 90 | 0,9 | 0,95 | 855 | 0,260 | 222 | 700 | | | | | 20 | 720 | 720 | 720 | 50 | 3,46 | 3,46 | 3,46 |
| halmpiller som strøelse | 1 | 90 | 0,9 | 0,95 | 855 | 0,260 | 222 | 500 | | | | | 20 | 520 | 520 | 520 | 0 | 2,34 | 2,34 | 2,34 |
| Halmpiller direkte indfødret. | 1 | 90 | 0,9 | 0,95 | 855 | 0,260 | 222 | 1500 | | | | | 20 | 1520 | 1520 | 1520 | 0 | 6,84 | 6,84 | 6,84 |
| Frøgræshalm ubehandlet | 1 | 90 | 0,9 | 0,95 | 855 | 0,250 | 214 | 75 | | | | | 20 | 95 | 95 | 95 | 0 | 0,44 | 0,44 | 0,44 |
| Frøgræshalm forbehandlet | 1 | 90 | 0,9 | 0,95 | 855 | 0,265 | 227 | 75 | | | | | 20 | 95 | 95 | 95 | 50 | 0,64 | 0,64 | 0,64 |
| Frøgræshalm snittet og ensileret | 1 | 38 | 0,377 | 0,93 | 351 | 0,280 | 98 | 75 | | | | | 20 | 95 | 95 | 95 | 0 | 0,97 | 0,97 | 0,97 |
| Efterafgrøder | 1 | 15 | 0,15 | 0,85 | 128 | 0,300 | 38 | 75 | 13 | 23 | 29 | 20 | 20 | 128 | 138 | 144 | 0 | 3,35 | 3,61 | 3,76 |
| Efterafgrøder + halmstub | 1 | 19 | 0,19 | 0,91 | 173 | 0,300 | 52 | 85 | | | | | 20 | 105 | 105 | 105 | 0 | 2,02 | 2,02 | 2,02 |
| Frøgræsudlæg + halmstub | 1 | 20 | 0,2 | 0,91 | 182 | 0,275 | 50 | 85 | | | | | 20 | 105 | 105 | 105 | 0 | 2,10 | 2,10 | 2,10 |
| Græsfiber fra proteinproduktion | 1 | 33 | 0,33 | 0,85 | 281 | 0,310 | 87 | 300 | | | | 20 | 20 | 340 | 340 | 340 | 50 | 4,49 | 4,49 | 4,49 |
| Naturarealer sen 60 % | 1 | 60 | 0,6 | 0,85 | 510 | 0,265 | 135 | 162 | 15 | 28 | 35 | 0 | 20 | 197 | 210 | 217 | 50 | 1,83 | 1,92 | 1,98 |
| Naturarealer tidlig 25 % | 1 | 25 | 0,25 | 0,85 | 213 | 0,265 | 56 | 58 | 15 | 26 | 33 | 20 | 20 | 113 | 124 | 131 | 50 | 2,89 | 3,09 | 3,21 |
| Roetopensilage | 1 | 12,5 | 0,125 | 0,8 | 100 | 0,330 | 33 | 9 | 20 | 31 | 40 | 20 | 20 | 69 | 80 | 89 | 0 | 2,09 | 2,42 | 2,70 |
| Majsensilage | 1 | 30 | 0,3 | 0,95 | 285 | 0,320 | 91 | 300 | | | | 20 | 20 | 340 | 340 | 340 | 0 | 3,73 | 3,73 | 3,73 |
| Græsensilage | 1 | 30 | 0,3 | 0,9 | 270 | 0,32 | 86 | 270 | | | | 20 | 20 | 310 | 310 | 310 | 50 | 4,17 | 4,17 | 4,17 |
| Røer | 1 | 20 | 0,2 | 0,95 | 190 | 0,37 | 70 | 270 | | | | 20 | 20 | 310 | 310 | 310 | 50 | 5,12 | 5,12 | 5,12 |

*) Bjærgning og hjemtransport for frøgræshalm, frøgræsudlæg+halm og efterafgrøder + halmstub er indeholdt i et samlet tal. Tallene er fra rapporten; Rationel bjærgning og håndtering af halm og efterafgrøder til biogasproduktion (Teknologisk Institut, 2020). 2021 priser.

Beregningsarket har 21 kolonner. Her følger en forklaring på hvad modellen bruger de enkelte kolonner til:

1. Kolonnen beskriver navn og type på biomasserne.
2. Der beregnes i alle tilfælde på 1 ton råvare.
3. Kolonnen angiver det tørstofindhold (TS) som er forudsat i modellen. Niveauet er fastlagt som et ekspertskøn. Det betyder, at der i praksis kan forekomme variationer heri.
4. Her beregnes tørstofmængden i et ton på baggrund af tørstofprocenten.
5. Her angives det organiske tørstofindholds (VS) andel af tørstofindholdet i procent. Som kilde til det organiske tørstofindhold er bla. anvendt Niras faktaark biogas, 2012.
6. Her beregnes det organiske tørstofindhold i kg.
7. Der er angivet mål for gaspotentialer pr. kg organisk tørstofindhold. Som kilde til det specifikke methanpotentialer er primært Henrik B. Møller og Teknologisk Instituts rapporter.
8. Her beregnes methanpotentialer for et ton af den pågældende råvare.
9. I denne kolonne angives en købspris for de varer, som der er et etableret marked for, typisk halm. For andre er der tale om beregnede bjærgningsomkostninger, som i nogle tilfælde er baseret på empiri, f.eks. slæt og bjærgning af halm og efterslæt af frøgræsudlæg. Bjærgningsomkostninger og transport er for disse biomasser repræsenteret ved ét tal.
10. Transportomkostninger til anlægget ved 1 km.
11. Transportomkostninger til anlægget ved 5 km.
12. Transportomkostninger til anlægget ved 10 km.
13. Her beregnes en lageromkostning til ensilageplads for de faste grønne biomasser. Dog ikke for halm og sent høstet naturplejegræs, da de forudsættes opbevaret som baller, og enten kan stå i det fri eller leveres når det skal bruges.
14. De faste biomasser, der modtages på anlægget konverteres til afgasset gylle. Som sådan skal den opbevares i 6-9 måneder og i øvrigt transporteres ud til landmanden, som skal bruge den som gødning. Det er her forudsat, at det er biogasanlægget, der afholder disse omkostninger, og biogasanlægget skal bekoste transporten ud til landmændene.
15. Denne kolonne summerer omkostninger pr. ton frisk masse for biomassen ved 1 km.
16. Denne kolonne summerer omkostninger pr. ton frisk masse for biomassen ved 5 km.
17. Denne kolonne summerer omkostninger pr. ton frisk masse for biomassen ved 10 km.
18. I denne kolonne anføres et skøn for forbehandling af biomassetyperne. Der er anvendt en forudsætning om forbehandling ved hjælp af en hammermølle.
19. Her beregnes den samlede netto råvarepris udtrykt i kr. pr. Nm³ metan ved 1 km.
20. Her beregnes den samlede netto råvarepris udtrykt i kr. pr. Nm³ metan ved 5 km.
21. Her beregnes den samlede netto råvarepris udtrykt i kr. pr. Nm³ metan ved 10 km.

Specifikke forudsætninger anvendt ved de enkelte biomasser:

1. Dybstrøelse og andre koncentrerede husdyrgødninger transporteres i 25 ton containere, der kan rumme små 40 m³. Gennemsnitshastighed 40 km/t.
2. Transport af faste grønne biomasser er beregnet med tilsvarende forudsætninger.
3. Tør halm er forudsat leveret på anlægget efter behov for 700 kr. pr. ton. Halmen er forudsat forbehandlet ved enten knusning i hammermølle eller fx Haybuster, og det resulterende gasudbytte er justeret i forhold hertil.
4. Våd ukurant halm og frøgræshalm forudsættes i grundscenariet at kunne fås for at hente det, eller der anvendes eget halm. Bjærgningsomkostningen er fastsat til 100 kr. pr. ton svarende til presningen. Alternativet hertil er at snitte og hjemkøre med frakørselsvogne. Dette scenarie kan med lidt god vilje sammenlignes med halmstub og efterslæt, i hvert fald hvad angår omkostningerne.

5. Efterafgrøder er forudsat at give et udbytte på 1 ton tørstof pr. ha. Da det koster 750 kr. pr. ha at høste, koster et ton frisk materiale 75 kr. ved 10 pct. tørstof. Ved optimeret dyrkning og anvendelse af kvælstoffikserende afgrøder kan udbyttet sandsynligvis øges markant.
6. Sent høstet græs fra naturarealer forudsættes skårlagt, revet, presset og wrappet. Der forudsættes høstet 2 ton tørstof pr. ha. ved 60 pct. tørstof. For dette er omkostningerne beregnet til 450 kr. pr. ton tørstof, hvilket svarer til 162 kr. pr. ton frisk vare.
7. Tidligt høstet græs fra naturarealer forudsættes høstet med frontmonteret klipper og opsamlervogn. Det koster 600 kr. pr. time, og tager 46 minutter at høste 1 ha. Det vil sige, at hektarprisen er $600/60 \cdot 46 = 460$ kr. Der forudsættes høstet 2 ton tørstof pr. ha, der ved 25 pct. tørstof giver 8 ton friskmasse. Prisen pr. ton friskmasse bliver derfor $460/8 = 58$ kr.
8. Majs forudsættes købt for 300 kr. pr. ton og opbevaret på anlægget.
9. Ved roetop forudsættes et udbytte på 5 ton tørstof pr. ha. Da tørstofindholdet er meget lavt (12,5 pct.), skal der høstes hele 40 tons frisk masse pr. ha. Omkostningsberegningerne er hentet fra rapporten; Demonstration af samensileret roetop og halm til biogasproduktion fra Teknologisk Institut. I beregningerne er der taget højde for ventetid for roeoptageren når der skal aflæsses roer, hvilket beløber sig til små 20 minutter pr. time.
10. Alle de grønne biomasser forudsættes ensileret og opbevaret på anlægget. Omkostningerne hertil er beregnet til 20 kr. pr. ton for en nyetableret ensilageplads.