

Fleksibel kraft-varmeproduktion fra biogas baseret på restbiomasser fra landbruget.



Roemark i Thy. Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut

Delrapport 1.

Kurt Hjort-Gregersen, Søren Ugilt Larsen, Jørgen Pedersen
Teknologisk Institut - AgroTech
December 2017

Forord

Nærværende projekt, "Fleksibel kraft-varmeproduktion fra biogas baseret på restbiomasser fra landbruget" er gennemført i et samarbejde mellem Teknologisk Institut – AgroTech og Aarhus Universitet, Institut for ingeniørvidenskab. Projektet er støttet af Energinet.dk via ForskEL programmet.

Der bringes en tak til gård- og maskinstationsejere Jens og Morten Kirk, Thisted, og gårdejer Henry Kuhr, Rødkærsbro, for at hjælpe med at skaffe roetop og halm til de forskellige forsøg.

Indholdsfortegnelse

- 1. Sammendrag**
- 2. Baggrund**
- 3. Formål**
- 4. Indledning**
- 5. Forsøg i projektet**
- 6. Laboratorieskalaforsøg i 2014-2015**
- 7. Pilotskala forsøg i 2015-2016**
- 8. Forsøg med boost af biogasproduktionen i kontinuert drift med roetop-halmensilage**
- 9. Flydeevneforsøg**
- 10. Høst og bjærgning**
- 11. Økonomianalyser og forretningsmodeller**
- 12. Konklusioner**

1. Sammendrag

Det danske elsystem har behov for regulerbar elproduktionskapacitet. Behovet herfor øges i takt med udbygningen med stadig mere vindkraft. Nærværende projekt har til formål at undersøge om, og hvordan, ensilage af roetop og halm kan anvendes til at regulere biogasproduktionen både generelt og "on demand" når elsystemet kalder på regulerbar elproduktion.

Det er velkendt at biogasproduktionen kan boostes med letomsættelige biomasser, som fedt- eller sukkerholdigt industriaffald, med energiafgrøder eller glycerin.

Men øget efterspørgsel efter de mest attraktive affaldsfraktioner har øget prisen, og i Danmark har man fornuftigvis valgt ikke at satse på biogasudviklingen på energiafgrøder. Derimod må man gerne anvende såkaldte restbiomasser, som ganske vist stammer fra planteproduktionen, men som ikke dyrkes med henblik på biogasproduktion, men derimod er restprodukter der er til overs, når den primære afgrøde er høstet og bjærget. Det gælder således halm fra kornproduktion og roetop fra produktion af foder- eller sukkerroer.

Der findes for øjeblikket 2-3 mio. ton halm, der ikke udnyttes, men snittes af mejetærskeren, og som efterfølgende nedmuldes. Der dyrkes samtidig 30-40.000 ha. med sukkerroer, og arealet med fodersukkerroer er svagt stigende. Sammenlagt repræsenterer disse restbiomasser et kolossalt energipotential for biogasproduktion. Omregnet til fyringsolie svarer det til 500.000 ton olie.

Det er i projektet undersøgt og fundet, at ensilageblandinger af roetop og halm er et glimrende substrat til biogasproduktion. Hvis blandingen består af 75 % roetop og 25 % halm viser erfaringerne fra projektet, at der ikke er noget saftfløb.

Der blev fundet methanpotentialer på omkring 270 NL CH₄ pr. kg organisk tørstof. Der blev også fundet en betydelig synergieffekt på methanudbyttet fra halmdelen på hele 24 % i pilotskala ensileringsforsøget i projektet. Derfor kan det konkluderes, at roetop-halmensilage kan erstatte organisk affald i biogasanlæggene. Hertil kommer, at opfugtningen af halmen under ensileringen synes at bevirke en øget pumpbarhed og mindre tendens til flydelagsdannelse.

Desuden blev der udført forsøg med at booste produktion ved pulstilsætning af ensilages til en proces med kvæggylle i kontinuert drift. Et af forsøgene viste, at det var muligt at øge produktionen med en faktor 3 med kort varsel, hvilket betyder, at biogasproduktionen med roetop-halmensilage kan øges markant når elsystemet har brug for regulerbar el. Der er dog en risiko for overdosering, hvorved processen risikerer at komme i ubalance.

Endelig er der udført økonomiberegninger for forskellige bjærgningsscenarier for roetop og halm. Analyserne viste råvareomkostninger for blandingsensilagen på 2,5 – 3 kr. pr. Nm³ CH₄ indenfor 10 km afstand, hvis halmen skal købes til markedspris. Denne pris er fuldt konkurrencedygtig med råvareprisen for fx majsensilage. Har man selv halmen, og derfor kun behøver at indregne bjærgningsomkostninger, kan det gøres for mellem 1,5 – 2 kr. pr. Nm³ CH₄ indenfor 10 km.

2. Baggrund

I Danmark er produktionen af biogas på landbrugsbaserede biogasanlæg altovervejende baseret på husdyrgødning og organiske restprodukter fra fødevarerproduktionen. Det har siden Grøn Vækst Planens vedtagelse i 2009 været regeringens ambition, at 50 % af husdyrgødningen skal anvendes til biogas. Der er generelt enighed om, at biogasproduktion alene baseret på husdyrgødning er økonomisk vanskelig, og med tilkomsten af nye anlæg er konkurrencen om affaldet øget. Selvom der for nærværende udfoldes bestræbelser på at skaffe nye affaldsstrømme fra fx servicesektoren, vil det for en fortsat udbygning med nye anlæg være behov for at finde nye ressourcer til biogasproduktion, der vel at mærke ikke karakteriseres som energiafgrøder men som restbiomasser.

Teknologisk Institut - AgroTech foretog for Naturstyrelsen i 2015 en kortlægning af relevante biomasser for biogasproduktion (ref. 1). Den helt store ressource, bortset fra husdyrgødning, udgøres af et halmoverskud på ikke mindre end 3 mio. ton på årsbasis. Samtidig dyrkes der i Danmark ca. 40.000 ha. med sukkerroer hvor roebladene eller roetoppene, ikke udnyttes, men efterlades på marken. Roetoppe og halm udgør dermed en kæmperessource, der kunne være til rådighed for biogasproduktion, såfremt den blev indsamlet. Tilsammen er der et produktionspotentiale på ca. 500 mio. m³ CH₄ på årsbasis, svarende til 500.000 ton fyringsolie. Roetop og halm kan udmærket anvendes hver for sig, men fra ren roetopensilage er der et betydeligt saftafløb, og tør halm kræver betydelig forbehandling for at kunne anvendes i biogasanlæg. Ideen i projektet er derfor, at saftafløbet vil blive opsuget af halmen i ensilageblandingen, hvorved halmen bliver blødgjort, og dermed lettere håndterbar i anlægget. Samtidig er der i elsystemet behov for at udvikle teknologier til elproduktion, der er fleksible i forhold til at være i stand til at regulere elproduktionen som en back-up kapacitet, som er nødvendiggjort at udbygningen med vindmøller, der jo kun producerer når vinden blæser.



Fodersukkerroe. Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut

3. Formål

Det er projektets formål at undersøge og tilvejebringe viden om, hvorvidt og hvordan samensileret roetop og halm kan anvendes til at regulere biogasproduktionen og dermed el og varmeproduktionen fra biogas. Det er desuden et formål gennem teknisk økonomiske analyser at vurdere business casen samt at pege på attraktive forretningsmodeller.

4. Indledning

Der er i disse år betydelig interesse for at anvende halm til biogasproduktion. Det gælder både i form af halm i dybstrøelse, men også i ren halm. Halm er imidlertid en biomasse, der ikke umiddelbart er så let at håndtere i fuldt oprørte systemer, som er den måde biogasanlæg i Danmark er indrettet på. Ubehandlet halm er langstrået, sejt og luftfyldt, hvilket vanskeliggør oprøring i gylle og giver risiko for flydelagsdannelse. Derfor er der taget en række metoder i brug på danske anlæg, der forbehandler halmen for at mindske disse problemer. Det er alt fra kraftig omrøring i kombination med snittepumper eller maceratorer til egentlig neddeling i kædeknusere, hammermøller, brikettering eller ekstrudering. De to sidstnævnte har en dokumenteret effekt på gasudbyttet ved opholdstider under ca. 30 dage. Alt sammen særdeles hårdhændede metoder, med et vist energiforbrug og slid på bevægelige dele.

5. Forsøg i projektet

Overordnet set omfatter projektet 4 slags forsøg med roetop-halmensilage:

1. Samensilering i laboratorieskala med efterfølgende gaspotentialebestemmelser i batchforsøg.
2. Samensilering i pilotskala med efterfølgende gaspotentialebestemmelser i batchforsøg
3. Forsøg med boost af biogasproduktionen ved punktvis tilførsel af ensilage fra pilotskalaforsøgene i kontinuert drevne laboratorie- og pilotskala reaktorer.
4. Langtidsforsøg med anvendelse af ensilage fra pilotskalaforsøgene (+andre biomasser) i kontinuert drevne pilotskalareaktorer.

Forsøgene under 1 og 2 er udført af Teknologisk Institut – AgroTech og afrapporteres i nærværende delrapport 1.

Forsøgene under 3 og 4 er udført af Aarhus Universitet, Institut for Ingeniørvidenskab. Resultaterne afrapporteres særskilt i delrapport 2, men hovedkonklusionerne inkluderes i nærværende rapport

6. Laboratorieskalaforsøg i 2014-2015

Laboratorieskalaforsøgene blev indledt i efteråret 2014. Her blev der høstet roetop hos gårdejer Jens Kirk i Skinderup ved Thisted i Thy.

Roetoppen blev høstet med en grønthøster og hjemkørt i en tipvogn. Halmen blev udtaget fra bigballer opbevaret under tag.

Materialer og metoder.

Der blev lavet ensilage i ialt 86 små vakuumposer med forskellig forbehandling af halmen og blandet i forskelligt forhold med roetop. Selve blandingen foregik manuelt

Der blev i forsøgene anvendt ubehandlet halm, snittet halm (haybuster) og ekstruderet halm



Foto: Jørgen Pedersen, Teknologisk Institut

Ubehandlet og snittet halm samt roetop. Disse halmtyper blev derefter blandet med roetop i følgende blandingsforhold målt i vægt

Tabel 1. Blandingsforhold af roetop og halm i ensilageprøver

Prøvetype	Roetop, vægtandel, % af friskvægt	Halm, vægtandel, % af friskvægt
1	100	0
2	88	12
3	80	20
4	72	28
5	67	33
6	0	100
7	0	Vand 67:Halm 33

De blandede prøver blev lagt i 5 l poser, som efterfølgende blev lukket under vakuum. Dette foregik ved hjælp af en laboratorieskala vakuumpakker. Der blev lavet 3-5 gentagelser af alle prøverne. Endelig blev en af hver prøvetype nedfrosset som ubehandlet.



Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut

Herefter blev de vakuumpakkede ensilageposer henlagt til ensilering i 6 måneder i uopvarmet lade.

Biogaspotentialbestemmelser

I juni måned 2015 blev ensilageposerne fundet frem igen med henblik på methanpotentialbestemmelser

Forud for batchudrødning blev alle prøvernes tørstofindhold (TS) og askeindhold bestemt. Dette gøres for at bestemme det organiske tørstofindhold (VS), som jo er det der afgør, hvor meget gas der kan produceres. Tørstofindholdet bestemmes ved i første omgang at små prøver på 5-20 g tørres i et døgn ved 60 C°. Askeindholdet findes ved at foraske små prøver ved 550 C° i fire timer. Når der arbejdes med ensilerede biomasser, er det vigtigt at være opmærksom på, at ensilagen indeholder små mængder flygtige organiske stoffer, der produceres under ensileringsprocessen. Disse stoffer vil under tørringen fordampe, hvorved man let kommer til at undervurdere det organiske tørstofindhold i prøverne, hvorved man i sidste ende let kunne overvurdere gaspotentialet. Derfor er alle de ensilerede prøvers tørstofindhold beregningsmæssigt korrigeret i forhold til tørstofindholdet fundet i de frosne prøver, hvor der ikke har fundet en ensilering sted.

TI – AgroTech råder over 3 kassetter med batchreaktorer til hver 5 prøver med 3 gentagelser i 500 ml flasker. Hver gang skal der bruges et sæt flasker til en blindprøve og et sæt til en positivprøve. Det samlede antal prøver der kan testes ved anvendelse af alle tre kassetter på en gang er således 13.

I løbet af 2015 blev der således gennemført tre kørsler med alle kassetter med i alt 36 prøver. De to første blev gennemført i Skejby med podedgylle fra Baanlev Biogas. Den tredje kørsel blev gennemført i AgroTechs daværende laboratorie i Holeby med podedgylle fra biogasanlægget Bigadan Nysted. Forsøgene blev gennemført i 60 dage ved 38-39 °C.

Den første kørsel med podedgylle fra Baanlev Biogas fungerede i det store og hele udmærket. Det viste sig dog, at flaskerne ikke er særligt egnede til at køre med ubehandlet halm. Dette viste sig ved, at nogle omrørere havde svært ved at klare opgaven, og at nogle lange strå længe strittede op over gylleoverfladen, og derfor ikke fuldt ud var i berøring med bakteriekulturen. Det havde været bedre at klippe det lidt i stykker.

Ved den anden kørsel klippede vi den ubehandlede halm lidt i stykker. Til gengæld var der nu nogle af omrørerne, der var gået i stykker. Dette problem blev løst ved jævnligt at ryste de pågældende flasker. Efterfølgende viste det sig, at mange af prøverne gav helt usandsynlige resultater, og derfor måtte kasseres. Årsagen hertil er ikke klarlagt. Men det skyldes måske, at podedgyllen blev hentet i ferietiden, og måske derfor blev tappet et andet sted end sædvanligt, og derfor muligvis har haft et for stort restpotentiale.

Ved den tredje kørsel var udstyret som nævnt blevet flyttet til Holeby. Her blev forsøgene gennemført som nævnt med podedgylle fra Bigadan Nysted. Kørslen foregik uden nævneværdige problemer og med viste det sig, interessante resultater.

Resultater

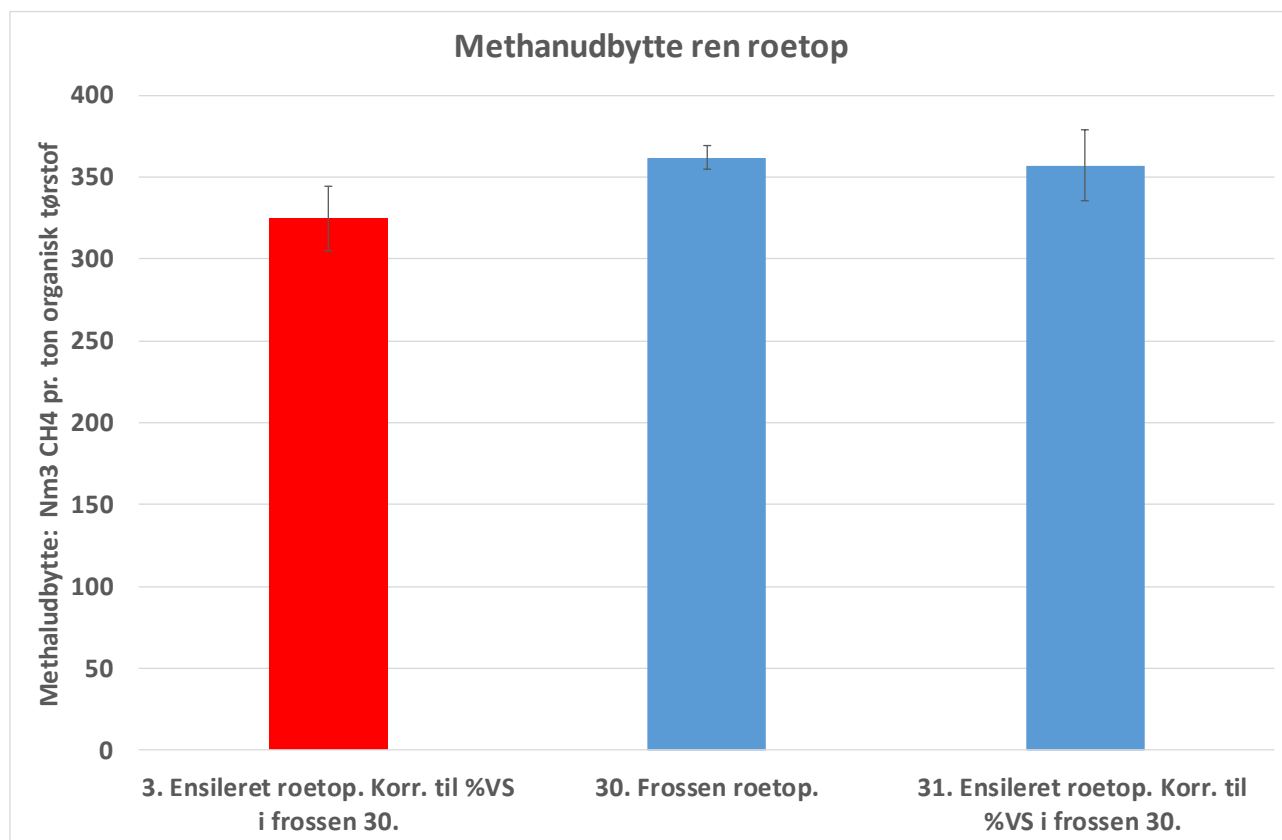
Indledningsvist skal det understreges, at det er vanskeligt at lave en homogen blanding af to så umage biomasser som roetop og halm, i særdeleshed den ubehandlede halm. Derfor er det også vanskeligt at udtage repræsentative prøver af ensilagen, hvilket er en betydelig usikkerhedsfaktor ved vurdering af resultaterne af biogaspotentialebestemmelserne.

Desuden er det en kendt sag, at den anvendte podedgylle kan have stor indflydelse på de fundne resultater, forstået på den måde, at forskellige podedgyller kan give ret forskellige resultater, og som, det vil fremgå, også er fundet i dette projekt.

Gaspotentialiet i ren roetop.

Der blev gennemført gaspotentialebestemmelser på tre prøver med ren roetop.

Den røde søjle er resultatet bestemt ved anvendelse af pødegylle fra Bigadan Nysted, de blå søjler er bestemt ved anvendelse af pødegylle fra Baanlev Biogas.

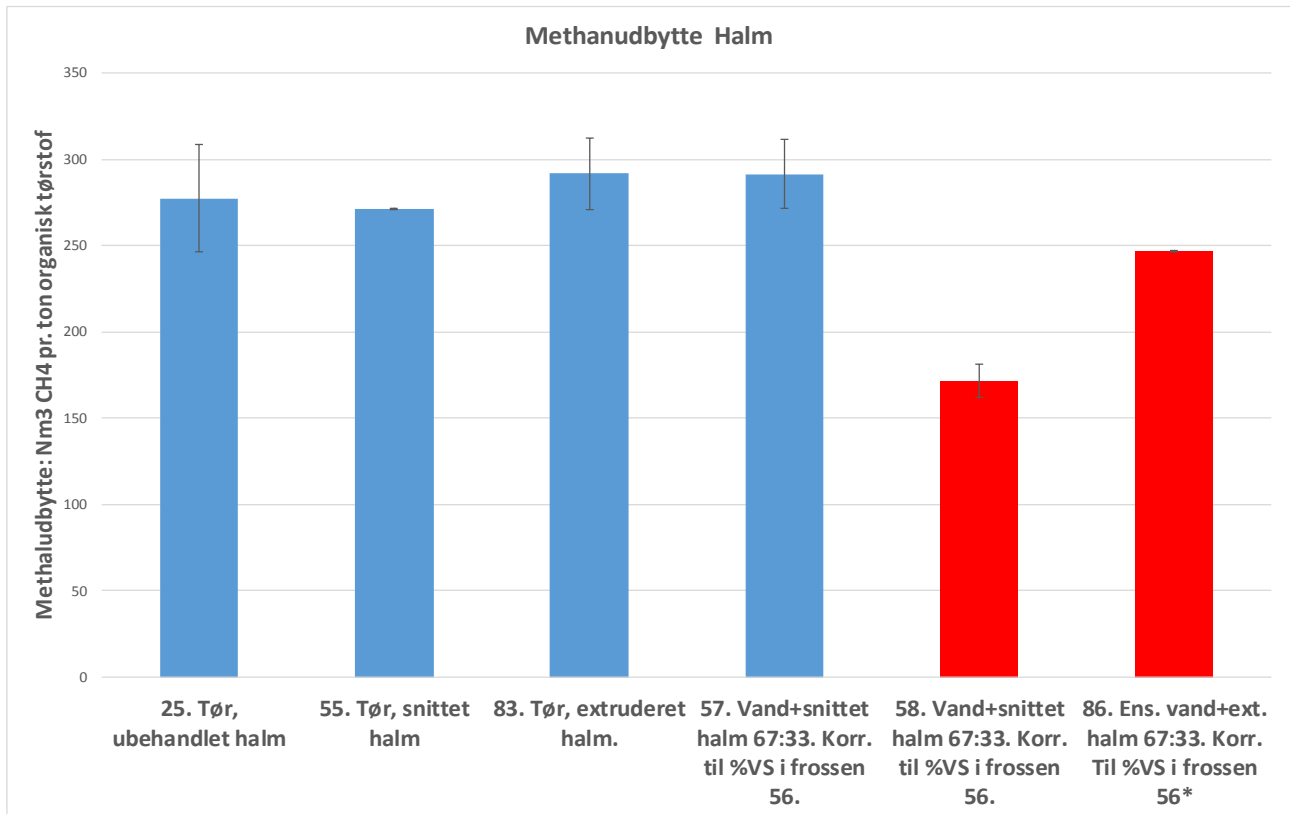


Figur 1. Methanudbytte af ren roetop. Tallene i forklaringen til søjlerne refererer til prøvenumre.

Resultaterne repræsenteret ved de blå søjler er næsten ens og svarer til fundne gasudbytter i litteraturen. Resultaterne repræsenteret ved den røde søjle er en smule mindre. Det kan skyldes forskellig pødegylle.

Gaspotentialiet i ren halm.

Der blev gennemført gaspotentialebestemmelser på i alt 6 prøver med halm alene. Dvs. prøverne hvis resultater er repræsenteret ved de tre blå søjler længst til venstre har været pakket som tør halm, de øvrige er pakket og søgt ensileret med tilsætning af vand. De blå søjler repræsenterer resultater bestemt ved anvendelse af pødegylle fra Baanlev Biogas, og de røde er tilsvarende bestemt ved anvendelse af pødegylle fra Bigadan Nysted.



Figur 2. Methanudbytte i halm. Tallene i forklaringen til søjlerne refererer til prøvenumre.

Ekstruderet halm er medtaget i forsøgene, fordi det er velkendt, at ekstruderingen medfører et vist merudbytte og kan derfor bidrage til at vise en eventuel synergieffekt afledt af ensileringsprocessen.

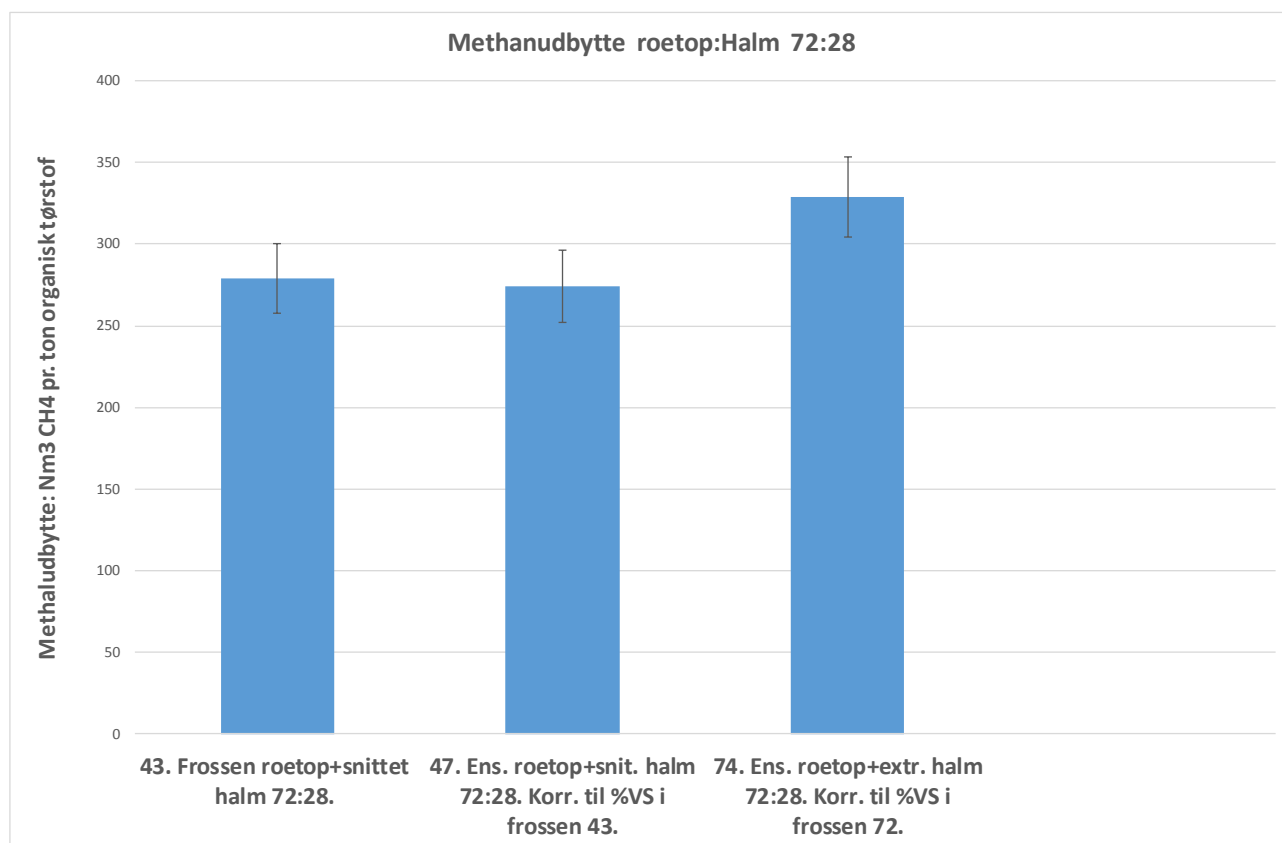
Hvis vi ser på resultaterne repræsenteret ved de røde søjler er der en klar forskel på resultaterne fundet for blandinger med snittet halm og ekstruderet halm. Den samme forskel genfindes imidlertid ikke ved de blå søjler. Faktisk må det siges, at udbytterne bag de blå søjler er endog særdeles høje, især for ubehandlet og snittet halm. Hvordan kan de høje udbytter så forklares? I netop disse tilfælde kan det imidlertid ikke forklares med usikker prøveudtagning, eftersom al tørstoffet jo i sagens natur er halm.

En forklaring kan være, at podedegyllen fra Baanlev Biogas er veltilpasset til udrådning af halm. En støtte for denne forklaring kan være den, at Baanlev Biogas i en årrække har anvendt særdeles halmrig dybstrøelse fra hestehold, og derfor måske over tid har opnået en høj tilvænning til udrådning af netop halm.

En anden forklaring kan være, at der på tidspunktet for udtagning af podedegylle muligvis har været en vis ammoniumhæmning i processen hos Baanlev Biogas, hvilket et relativt højt pH synes at antyde. Tilsætning af halm til podedegyllen kan derfor have forvoldt en forskydning i C/N forholdet, hvilket kan have udløst et gaspotentiale i podedegyllen, som ikke blev genfundet i blindprøven. I så fald er der tale om en synergieffekt i forhold til podedegyllen.

Gaspotentialiet i ensilage af roetop og halm

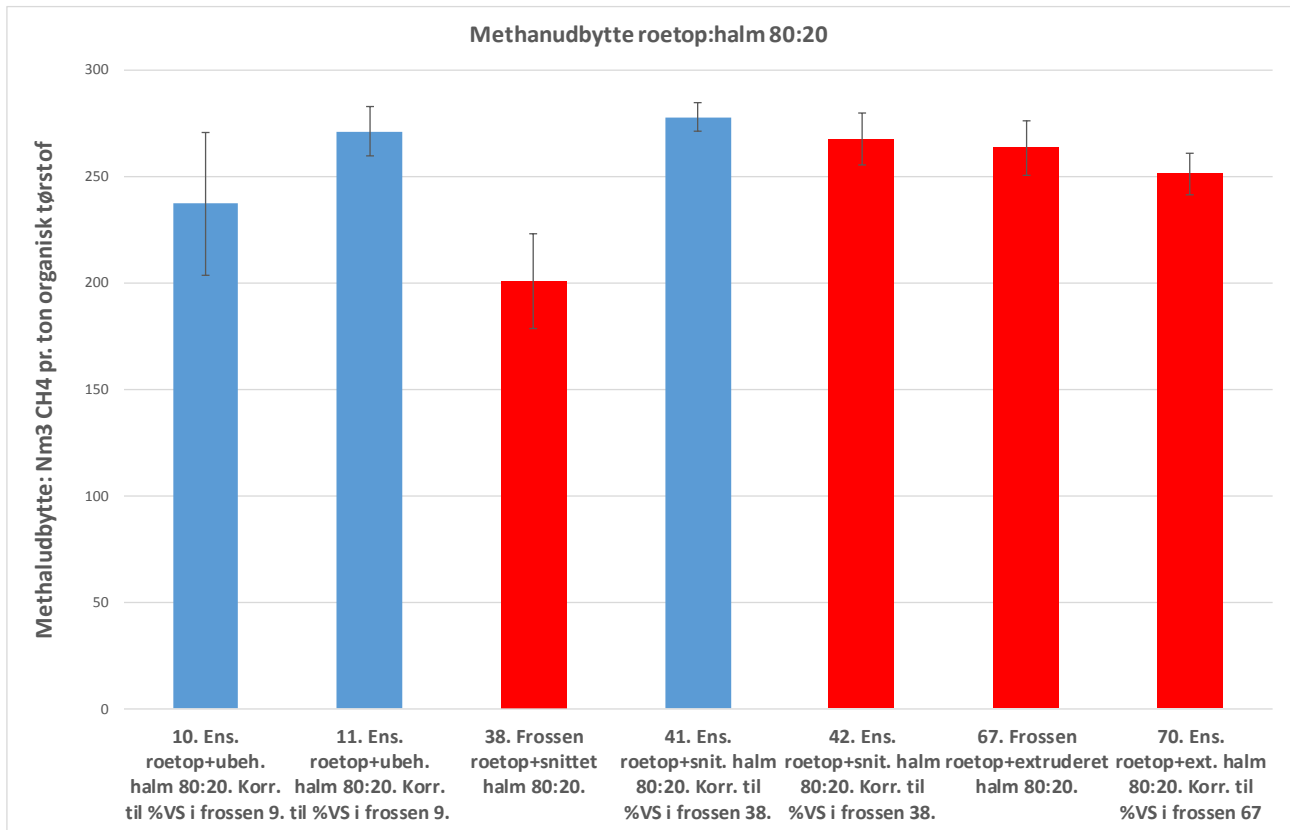
I nedenstående figur 3 er vist resultaterne af udrådning af ensilage i en blanding af roetop og halm i forholdet 72:28 i friskvægtprocent



Figur 3. Methanudbytte i ensilage af roetop og halm . Numrene i forklaringen refererer til prøvenumre

Som forventet findes der et højere gasudbytte ved blandingen med ekstruderet halm. Derimod er der ikke i dette tilfælde fundet nogen effekt af ensileringen eftersom gasudbyttet er det samme for den frosne og den ensilerede prøve. Det er muligt, at effekten af halmtilsætning her overskygger ensileringseffekten, eftersom gasudbyttet fra halmtilsætning jvf. figur 2 blev fundet at være meget høj.

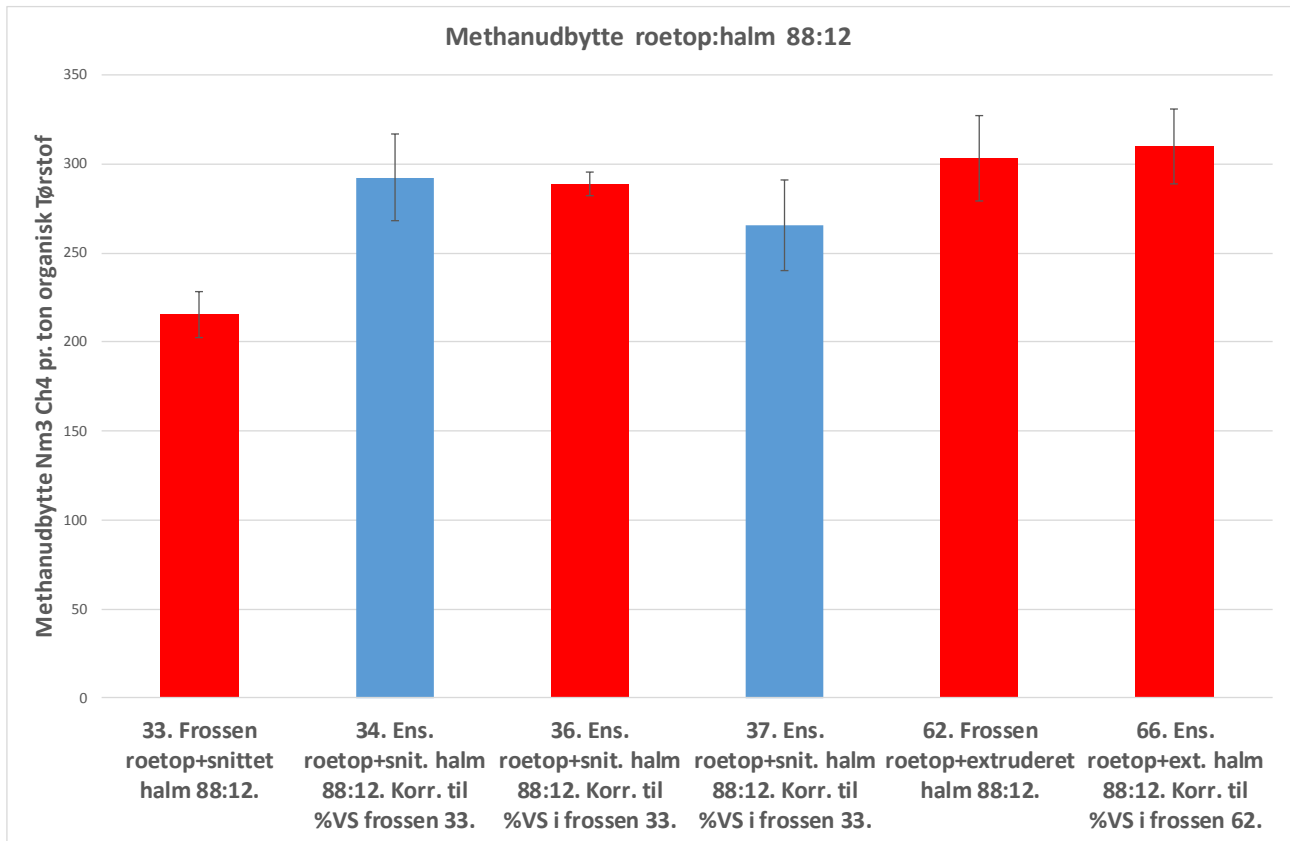
I figur 4 vises resultaterne af gaspotentialebestemmelse af roetop og halmensilage i blandingsforholdet 80:20



Figur 4. Methanudbytte i ensilage af roetop og halm.

Med denne blanding er der udført gaspotentialebestemmelse med pødegylle fra både Baanlev Biogas (blå) og Nysted Bigadan (rød). Prøve nr. 38 var frossen og dermed ikke ensileret. I forhold til de øvrige både røde og blå søjler er det fundne gasudbytte for denne noget lavere end alle de øvrige, hvilket tyder på en ensilerings- og dermed synergieffekt her. Omvendt har anden prøve fra højre har ligeledes været frosset. Halmindholdet i denne var imidlertid ekstruderet halm, hvilket må være forklaringen på, at den ligger markant højere i gaspotentiale end nr. tre fra venstre, og fuldt på højde med prøven yderst til højre.

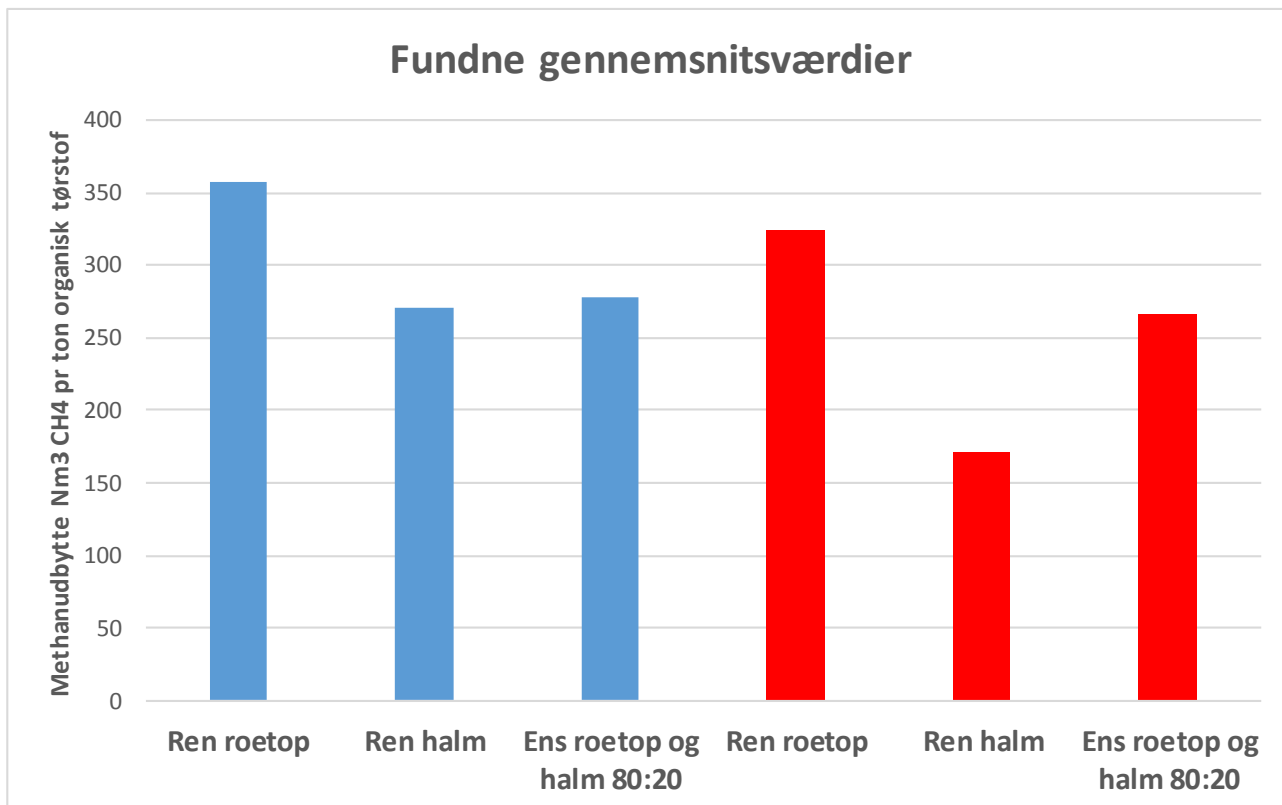
Nogenlunde samme sammenhæng genfindes i nedenstående figur 5, hvor roetop og halmensilage i blandingsforholdet 88:12 er vist.



Figur 5. Methanudbytte i blandingsensilage.

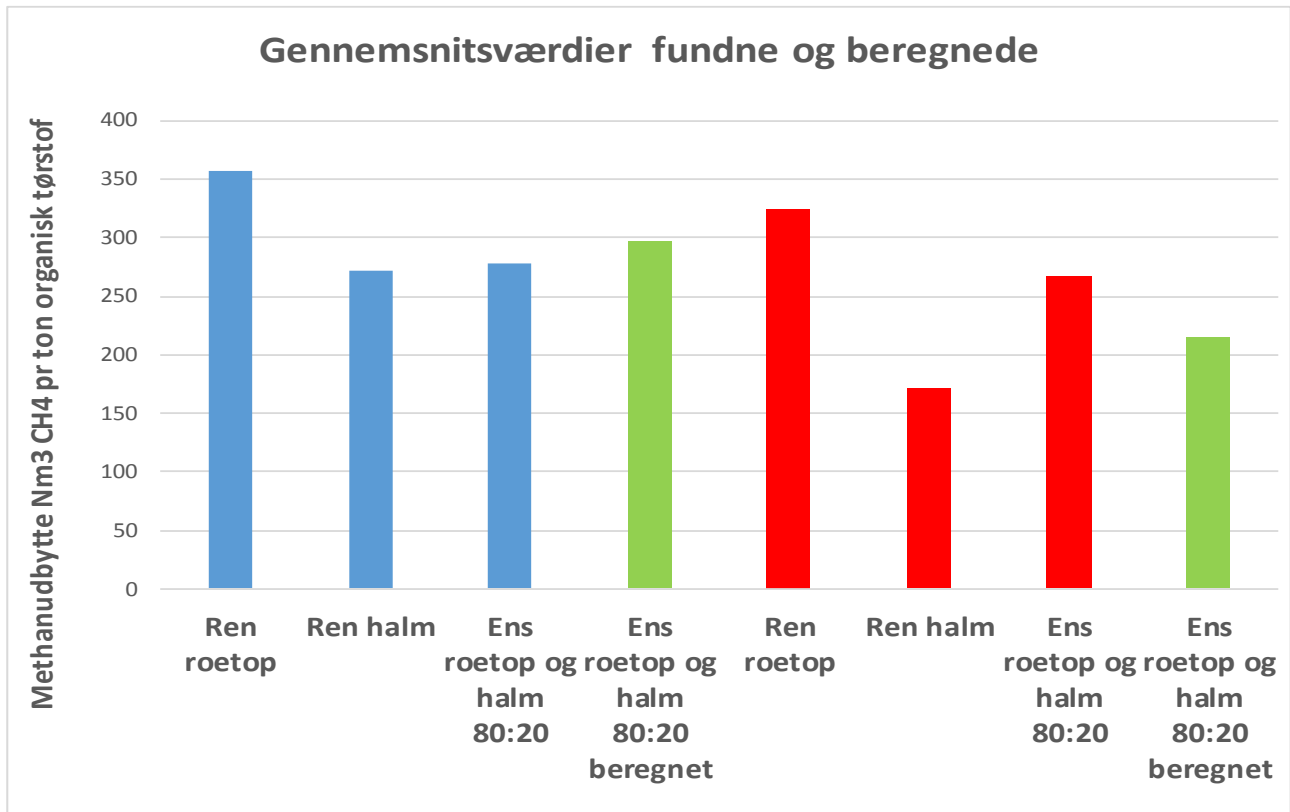
Yderst til venstre er en frossen prøve (33), der ligger lavere end de øvrige. Næstyderst til højre er der tilsvarende en frossen prøve (62) med ekstruderet halm, der ligger fuldt på højde med de ensilerede prøver, inkl. den yderst til højre (66), der også er med ekstruderet halm.

For overskuelighedens skyld er der i nedenstående figur 6 indsat fundne gennemsnitsværdier for methanpotentiale på tværs af de tre serier. Figuren viser resultater for prøver af ren halm, ren ensileret roetop og samensileret roetop og halm i blandingsforholdet 80:20 målt ved anvendelse af podegylle fra både Baanlev Biogas og Nysted Bigadan.



Figur 6. Fundne gennemsnitsværdier for methanpotentiale i ren halm, ren ensileret roetop og samensileret roetop og halm i blandingsforholdet 80:20. Gennemsnit af flere forsøg med samme blandingsforhold.

Generelt er de fundne gasudbytter noget højere ved de blå søjler end de røde af før omtalte årsager. De blå søjler rummer derfor sandsynligvis en "skjult" synergieffekt ved frigørelse af et uforløst potentiale i podedegyllen. Resultaterne i Figur 6 er på baggrund af gaspotentiale i ren roetop hhv. ren halm herefter anvendt til at beregne et teoretisk potentiale i 80:20 blandingen for at undersøge, om der kan konstateres en synergieffekt. Resultatet er indsat i nedenstående figur 7.



Figur 7. Fundne og beregnede gennemsnitsværdier.

De beregnede gaspotentialer for 80:20 ensilagen er repræsenteret ved de to grønne søjler. Forståelsen af de grønne søjler er den, at hvis det målte gaspotentiale i blandingsensilagen er højere end den beregnede, er der tale om en synergieffekt, og vice versa. Dette er tilfældet ved den røde og grønne længst til højre, hvorimod den blå og grønne hhv. tredje og fjerde fra venstre ikke tyder på nogen synergieffekt, som følge af ensileringen fordi det fundne potentiale i ren halm blev fundet så højt som tilfældet var.

Den akkumulerede værdi af gaspotentialerne.

En ting er det samlede gasudbytte målt over 60 dage, som det blev foretaget i ovennævnte forsøg, noget andet er hvor hurtigt biogassen frigives. Det har nemlig betydning for, hvor lang opholdstiden behøver at være, men også for at belyse mulighederne for at kunne regulere produktionen "on demand," om man så må sige. Dette forhold er illustreret i nedenstående figur 8.



Figur 8. Akkumuleret methanproduktion af halm, roetop og diverse blandinger.

Figuren viser ikke overraskende viser, at den rene roetopensilage kommer meget hurtigt i gang, og har frigivet 85 % af potentialet allerede efter en uge. Roetopensilage med ekstruderet halm når et højt slutniveau og når 85 % af potentialet efter ca. 3 uger. De øvrige blandinger med roetop og halm når dette niveau efter ca. 30 dage.

Konklusion på batchforsøgene.

Batchforsøgene viste, at roetop-halmensilage er et udmærket substrat til produktion af biogas. Dermed kan ensilagen bruges til at erstatte organisk industriaffald. Blandingerne giver typisk 270 NL CH₄ pr kg VS. Den rene roetopensilage kommer hurtigt i gang, hvor ensilagen er blandet med halm går det lidt langsommere. Omvendt kan man sige, at alle ensilageblandingerne kan anvendes til at øge produktionen med en uges varsel. Forsøgene indikerer desuden en vis synergieffekt på gasudbyttet fra halmdelen, en effekt, der tilskrives ensileringsprocessen

7. Pilotskala forsøg i 2015-2016

Der blev i perioden november 2015 til august 2016 gennemført et pilot-skala forsøg med samensilering af roetop-halm til biogasproduktion. Forsøget er gennemført i pilot-skala, dvs. der er lavet blanding af roetop-halm med kommercielt udstyr hos landmand Henry Kuhr ved Rødkærsbro, og blandingen er ensileret i 4 pilot-skala siloer ved Teknologisk Institut i Skejby. Formålet med forsøget var dels at bestemme lagertab og evt. saftafløb ved samensilering af roetop-halm og dels at belyse en potentiel 'synergieffekt' ved samensileringen i form af højere methanpotentiale pga. bedre omsætning af halmfraktionen efter ensilering. Desuden var formålet at levere roetop-halmensilage til videre forsøg ved AU i Foulum.

Materialer og metoder

Blanding af roetop-halm blev foretaget tirsdag 24/11 2015 hos landmand Henry Kuhr, Bredmosevej 31, 8840 Rødkærsbro. Roetop var høstet mandag 23/11 2015 med grønthøster i en mark med foderroesorter. Dyngen havde ligget i plansilo fra høst til blanding, og det havde regnet noget på dyngen (ca. 1½ m høj), men der var også drænet noget saft af dyngen. For at få en indikation på tørstofindholdet i roetoppen blev der tørret 100 gram i ca. ½ time i en ovn beregnet til tørstofbestemmelse. Analysen viste 14 % tørstof. Da der 31/10 2015 var 9,4 % tørstof i top af sukkerroesorter, blev der ved blandingen antaget et tørstofindhold på 12 % i roetoppen. Der blev anvendt vinterhvedehalm, der var presset i rundballer. Der blev antaget et tørstofindhold i halmen på 85 %. Ved blandingen blev der tilstræbt et blandingsforhold mellem halm og roetop, som resulterede i et gennemsnitligt tørstofindhold på 30 %, hvilket normalt giver en god ensileringsproces og meget begrænset risiko for saftafløb. Med et tørstofindhold på 12 % i roetop og 85 % i halmen skulle der opnås 30 % tørstof i blandingen ved et blandingsforhold på 24 % halm og 76 % roetop.

Blanding blev lavet i en foderblander af mærket Trioliet Solomix 2-2400 L (produceret i Holland, 8400 kg kapacitet, max. 16.000 kg totalvægt, maskintype SM2-24-LVLH) med vejeceller med en nøjagtighed på 20 kg. Foderblander kan dels rive halmen i stykker og dels blande halm og roetop. Der blev lavet 3 portioner for at have en samlet mængde på ca. 8 tons. Ved hver portion blev der først læsset to rundballer op i blanderen (typisk 600-700 kg halm), hvorefter der blev drysset roetop i indtil, der blev opnået et blandingsforhold på ca. 24 % halm og 76 % roetop. Herefter blev portionen blandet i 20-25 minutter for at opnå en homogen blanding og for at få halmen revet noget i stykker. Strållængde efter blandingen var typisk 5-10 cm, men der var også en del kortere partikler. Der var kun en lille afvigelse i blandingsforholdet mellem de tre portioner (23,9, 24,5 og 24,1 % halm). De tre portioner blev læsset af på gulvet i 'striber', og striberne blev skubbet sammen med gummiged og læsset på lastbil, hvorved de tre portioner blev blandet yderligere. Herefter blev blandingen kørt til siloerne i Skejby.



Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut.

Foderblander anvendt til oprivning af rundballer med halm og blanding med roetop. Her ses blandesnegle med knive, som er med til at oprive halmen.



Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut.

Oprivning af halm og blanding med roetop. Til venstre ses klumper af halm, som endnu ikke er helt oprevet/iblandet. Til højre ses den færdige blanding af roetop og halm.



Færdig blanding af roetop-halm. (Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut).

Påfyldning af ensileringsiloer

I Skejby blev blandingen 'grabbet' fra lastbilen og op i siloerne, mens disse stod på vejeceller, så der blev aflæst silovægt før og efter påfyldning. Siloerne er 3,3 m høje og 1,0 m i diameter og med et rumfang på 2,5 m³ og med dræn og bundhane. Siloerne blev fyldt helt op og presset lidt sammen med grabben, men biomassen blev ikke komprimeret længere nede. Derfor kunne der kun være ca. 800 kg råvare i hver silo, svarende til en volumenvægt på ca. 330 kg pr. m³. Umiddelbart efter fyldning af siloerne blev der monteret lufttætte låg på siloerne.

Ved forsøgets start blev der udtaget følgende prøver, til tørstofbestemmelse samt til nedfrysning til senere analyse af methanpotentiale: 1) ren roetop, 2) ren halm (usnittet), 3) roetop-halmblanding. Dagen efter forsøgsstart blev der lavet tørstofbestemmelse af de 3 prøver ved tørring ved 80 °C i 18 timer og med 3 replikater.



Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut.

Påfyldning af siloer med roetop-halm.

Måling af saftfløb og massetab samt tømning af siloer

I løbet af lagringsforsøget blev det flere gange undersøgt, om der var saftfløb fra ensilagen ved at åbne bundhanerne i siloerne. Dette blev gjort hhv. 18/12 2015, 22/2 2016, 5/4 2016 og 18/5 2016 samt ved selve tømningen af siloerne.

Silo 6 blev tømt 19/5 2016, mens silo 1, 4 og 5 blev tømt 31/5 2016, dvs. efter 177-189 dages ensilering. Ved tømningen blev siloerne vejjet hhv. før og efter tømning for at bestemme vægten af biomassen efter lagringsperiode. Herefter blev siloerne med kran vendt på hovedet og tømt ud på en presenning. Her blev der udtaget repræsentative prøver fra hver af de 4 siloer til analyse for methanpotentiale. Fra hver silo blev der udtaget materiale omtrent 10 steder, hvorefter dette materiale blev blandet godt, og der blev udtaget en delprøve på ca. 2 kg. Efterfølgende blev ensilagen grabbet op i en container og leveret til forsøg ved Aarhus Universitet i Foulum.



Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut.

Tømning af siloer med roetop-halmensilage efter 6 måneders lagring.

Dataanalyse

Massetabet ved ensilering af roetop-halmblandinger blev bestemt som differencen mellem råvaremængde ved forsøgsstart og råvaremængden ved forsøgets afslutning.

Synergieffekten ved samensilering af roetop-halm kan testes på to måder: 1) Methanpotentialet i en prøve af den ensilerede blanding kan sammenholdes med methanpotentialet i en prøve af den ikke-ensilerede blanding (som nedfryses 'frisk' umiddelbart efter blanding). 2) Methanpotentialet i en prøve af den ensilerede blanding kan sammenholdes med det 'beregnete methanpotentiale' i den ikke-ensilerede blanding. Det beregnede methanpotentiale for blandingen beregnes ud fra methanpotentialet (baseret på VS) i hhv. ren, ikke-ensileret halm og ren, ikke-ensileret roetop samt ud fra andelen af hhv. halm og roetop (VS-andel) i blandingen. På grund af et tvivlsomt resultat af methanalysen af den ikke-ensilerede roetop-halmblanding er hovedvægten i det

efterfølgende lagt på den sidstnævnte metode, dvs. ved sammenligning med det beregnede methanpotentiale for blandingen.

Ved dataanalysen vedr. methanpotentialet blev der lavet en statistisk analyse baseret på data fra følgende 'prøver':

Roetop-halm – ikke-ensileret, målt

Roetop-halm – ikke-ensileret, beregnet

Roetop-halm – ensileret, silo 1

Roetop-halm – ensileret, silo 4

Roetop-halm – ensileret, silo 5

Roetop-halm – ensileret, silo 6

For hver prøve var der methanpotentiale fra 3 replikater. For det beregnede methanpotentiale for prøve 2 blev der benyttet methanpotentiale for replikat 1 for ren halm kombineret med replikat 1 for ren roetop, replikat 2 kombineret med replikat 2 osv. Til analysen blev der anvendt en model med faktoren Lagring med tre kategorier: i) Ikke-ensileret, målt, ii) Ikke-ensileret, beregnet, iii) Ensileret, målt. Desuden indgik faktoren Silo 'nested' indenfor Lagring, således at data fra 4 siloer x 3 replikater indgik i kategorien 'Ensileret, målt'. Synergieffekten blev testet ved parvis sammenligning af 'Ikke-ensileret, beregnet' og 'Ensileret, målt'. Der blev udført separat analyse af methanpotentialet efter hhv. 10, 15, 20, 30, 40, 50 og 58 dage.

Resultater

Tørstofindholdet i halm og roetop ved blandingen var hhv. 83,4 og 13,2 %, og i den resulterende blanding var tørstofindholdet 30,6 %. I tabel 1 er angivet råvaremængder af halm og roetop brugt til blandingen, samt hvor stor en andel de to biomasser udgør af blandingen på basis af hhv. råvare, tørstof og VS. Halm udgør ca. 24 % af råvaremængden, men pga. det høje tørstofindhold udgør halm ca. 72 % af VS-mængden.

Tabel 2. Råvaremængder og andele af hhv. halm og roetop i blandingen af roetop-halm, blandet 24/11 2015.

Blandingsforhold	Halm	Roetop
Råvaremængde i blandingen, kg	1.940	6.080
Andel af råvare, %	24,2	75,8
Andel af tørstof, %	66,8	33,2
Andel af VS, %	72,1	27,9

Ud fra tørstofanalyserne af hhv. halm og roetop og ud fra de afvejede råvaremængder kan der beregnes et forventet tørstofindhold i blandingen på 30,2 %, dvs. det målte tørstofindhold er ca.

0,4 procentpoint højere end det beregnede tørstofindhold, hvilket vurderes at udgøre en relativt lille usikkerhed.

Saftfløb og massetab under lagringen

Der blev på intet tidspunkt i løbet af lagringsperioden registreret noget saftfløb fra nogen af siloerne, og ved tømning af siloerne var der heller ikke tegn på saft i bunden af siloerne. Den iblandede halm har således kunnet absorbere den frigivne saft fra roetoppen. Dette stemmer med det generelle billede af, at saftfløbet aftager med stigende tørstofindhold i den indlagte biomasse, og at der generelt er lille risiko for saftfløb fra ensilage, hvis tørstofindholdet er minimum 30 %.

Risikoen for saftfløb kan dog også afhænge af andre forhold såsom findelingsgraden og ikke mindst højden på ensilagestakken. I pilot-skala siloerne var højden på stakken ca. 3,3 m ved start, men da biomassen ikke kunne komprimeres i siloerne, var der en ret lav volumenvægt i ensilagen ved indlægningen, og dermed har trykket i siloen heller ikke været så stort. I praksis vil man ved samensilering af roetop-halm foretage en grundig komprimering af biomassen ved indlægningen i siloen, hvilket vil øge volumenvægten og dermed risikoen for saftfløb. Samlet set vurderes det dog, at der kun vil forekomme et begrænset saftfløb fra roetop-halmensilage, hvis tørstofindholdet er minimum 30 %.

Ved åbning af siloerne var biomassen sunket sammen til ca. 45 cm under silokanten. Dermed var volumenvægten øget fra ca. 330 til 380 kg pr. m³ gennem ensileringsperioden på 6 måneder. Ved åbningen var der lidt mug på overfladen i nogle af siloerne (silo 1, 4 og 6), hvilket indikerer, at der har været en vis forekomst af ilt. Da ensilagen blev tømt ud på presenning, lugtede det af god ensilage med behagelig syrlig lugt. Farven var rødbrun, men overfladen blev hurtigt mere bleg formodentlig pga. udtørring. Der kunne enkelte steder ses struktur af roeblade, men generelt synede roebladene ikke meget i forhold til halm. Halmen virkede jævnt opfugtet af saften fra roetoppene.



Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut.

Roetop-halmensilage ved åbning af silo efter 6 måneders lagring. Bemærk at biomassen er sunket sammen i løbet af lagringsperioden. Bemærk desuden svampevækst på overfladen.



Foto: Søren Ugilt Larsen, Teknologisk Institut.

Halm-roetopensilage efter 6 måneders lagring.

Råvaremængder og massetab ses for de 4 siloer i tabel 2. I silo 1 og 4 var biomassens vægt 3-7 kg større efter lagring end før lagring, mens biomassen i silo 5 og 6 vejede 2-9 kg mindre efter lagring end før lagring. Som gennemsnit af de 4 siloer har der været et lagertab på 0,01 % af biomassens vægt ved start. Da der ikke kan forventes en øget masse under ensileringen, antyder resultaterne en vis vejeusikkerhed. Standardafvigelsen for massetab blandt de 4 siloer er da kun 0,73 procentpoint, og samlet set viser resultaterne et meget lille massetab under ensileringen. Energitalbet under ensileringen afhænger dog både af ændringer i masse og energiindhold i massen (se under methanpotentiale).

Tabel 3. Råvaretap ved samensilering af halm og roetop. Forsøg i pilot-skala siloer i vinteren 2015-2016.

Silo-nummer	Startdato	Slutdato	Ensilerings-tid, dage	Råvare-mængde ved start, kg	Råvare-mængde efter ensilering, kg	Lagertab, kg	Lagertab af råvare, % af startvægt
1	24/11 2015	31/5 2016	189	807	810	-3	-0,37
4	24/11 2015	31/5 2016	189	808	815	-7	-0,87
5	24/11 2015	31/5 2016	189	809	800	9	1,11
6	24/11 2015	19/5 2016	177	817	816	2	0,18
Gnsn.	-	-	-	810	810	0,1	0,01

Methanpotentialebestemmelser

Der blev i perioden juli-august 2016 lavet analyse af methanpotentialet ved 'batch-udrådning' af følgende 7 prøver fra forsøget:

Ren halm, ikke-ensileret

Ren roetop, ikke-ensileret

Roetop-halm, ikke-ensileret

Roetop-halm – ensileret, silo 1

Roetop-halm – ensileret, silo 4

Roetop-halm – ensileret, silo 5

Roetop-halm – ensileret, silo 6

Analyserne blev udført ved Teknologisk Instituts laboratorium i Holeby.

Prøvernes methanpotentiale blev analyseret ved udrådning i gylle, der fungerer som inokulum (podemateriale) for udrådningen. Som inokulum blev afgasset gylle afhentet på Bigadan Nysted. Udrådningen blev foretaget ved en temperatur på 38-39° C, hvilket var temperaturen på gyllen, da den blev afhentet på biogasanlægget. Inokulumet stod i varmeskab ved den nævnte temperatur i ca. en uges tid inden igangsætning af udrådningen. Methanproduktionen fra prøven er bestemt med det automatiserede system AMPTS II (Bioprocess Control AB, Lund, Sweden). Hver prøve blev udrådnings i tre gentagelser.

Som forberedelse til en udrådning analyseres indholdet af tørstof og aske i prøven for at kunne beregne indholdet af omsætteligt tørstof, også kaldet Volatile solids (VS). Disse analyser blev udført på laboratoriet i Skejby, og prøver til tørstof- og askeanalyse blev udtaget ved at save en skive/delprøve af de frosne prøver. Tørstofindholdet blev bestemt ved at tørre tre replikater à 5-

20 g prøvestørrelse ved 60 °C i 26 timer. Askeindholdet blev bestemt ved foraskning af tre replikater à 2-11 g prøvestørrelse ved 550 °C i 4 timer. VS-indholdet blev beregnet ved at trække askemængden fra tørstofmængden i prøverne.

Ved ensileringsprocessen dannes der flygtige stoffer såsom mælkesyre, eddikesyre og ethanol, og ved tørstofbestemmelse ved ovntørring vil disse forbindelse i større eller mindre grad fordampe (bl.a. afhængig af tørringstemperaturen). Denne fordamning medfører en fejl ved tørstofbestemmelsen (det målte tørstofindhold bliver lavere end det reelle tørstofindhold) og derfor også ved den efterfølgende bestemmelse af methanpotentialitet (det målte methanpotentiale bliver højere end det reelle methanpotentiale). Da der ved en god ensileringsproces normalt kun er et meget lille tab af tørstof og energi, blev der ved methananalyserne antaget at være samme tørstofindhold og VS-indhold i de ensilerede roetop-halmblandinger som i den ikke-ensilerede roetop-halmblanding.

Ved udtagning af prøvemateriale til methananalyse blev prøverne tørt op, hvorefter der blev udtaget repræsentative delprøver. Prøvemateriale og inokulum blev til udrådningen blandet, så forholdet mellem deres VS-andel i blandingen var 1:2, dvs. der var én del VS fra prøvematerialet blandet med to dele VS fra inokulum. Udrådningen af blandingen af prøvemateriale og inokulum blev udført med tre replikater. Methanpotentialitet blev beregnet som akkumuleret methanproduktion i Nml pr. g VS (svarende til Nm³ methan pr. ton VS) over testperioden på i alt 58 dage.

Methanpotentiale og synergieffekt

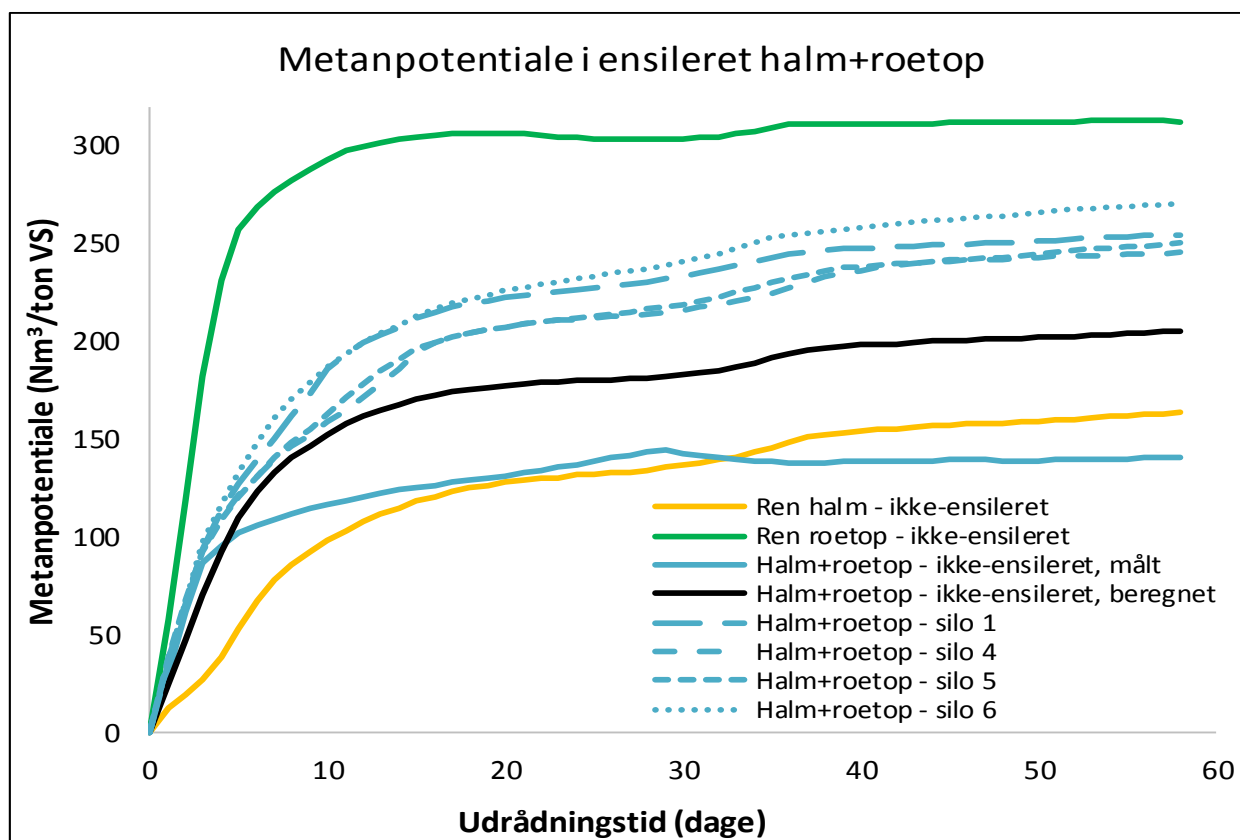
Det akkumulerede methanpotentiale over hele udrådningsperioden på 58 dage fremgår i figur 9. Methanpotentialitet efter forskellige tidsintervaller er desuden vist i tabel 3. Methanpotentialitet efter 58 dage ligger på 163 og 312 Nm³ methan pr. ton VS for hhv. ren halm og ren roetop uden ensilering, og figur 9 viser, at roetop er væsentligt hurtigere omsat end halm.

Methanproduktionen for den ikke-ensilerede blanding af roetop-halm ligger i de første dage som forventet mellem niveauet for roetop og halm, men derefter stagnerer produktionen, og methanpotentialitet efter 158 dage er 141 Nm³ methan pr. ton VS, hvilket er lavere end for ren halm (figur 9). Kurveforløbet og det lave slutniveau for methanpotentiale tyder på en hæmning af udrådningsprocessen for den ikke-ensilerede blanding, og denne prøve kan derfor desværre ikke benyttes som reference til at teste synergieffekten ved ensilering. Ud fra methanpotentialitet i ren halm og ren roetop samt VS-andelen af de to fraktioner er der beregnet et forventet methanpotentiale for en ikke-ensileret blanding af roetop-halm, og denne ligger naturligvis mellem niveauet for roetop og halm med et slutniveau på 205 Nm³ methan pr. ton VS (figur 9, tabel 4).

Methanpotentialitet for de ensilerede blandinger ligger efter 58 dage på mellem 245 og 270 Nm³ methan pr. ton VS med et gennemsnit på 255 (standardafvigelse = 10) (tabel 4), og kurveforløbene

i figur 9 tyder på en relativt lille variation mellem de 4 siloer. Dermed ligger methanpotentialiet for de ensilerede blandinger væsentligt over det beregnede niveau for en ikke-ensileret blanding. Som gennemsnit for de 4 siloer ligger merudbyttet ved ensileringen på mellem 14 og 24 % afhængig af udrådningstid, og merudbyttet ligger stabilt på 24 % for 30 til 58 dages udrådningstid (tabel 4). Merudbyttet er signifikant for alle de viste udrådningstider. Dermed ses der i dette forsøg en markant synergieffekt af ensileringen, som primært formodes at skyldes en øget omsættelighed af halm efter samensileringen med roetop. Det ville være ønskeligt yderligere at bekræfte synergieffekten vha. den ikke-ensilerede roetop-halmblanding, men ikke desto mindre formodes den anvendte test af give et validt resultat for de givne forsøgsbetingelser.

Størrelsesordenen af synergieffekten vil formodentlig kunne variere bl.a. afhængig af halmtype og findelingsgrad for den anvendte halm samt den anvendte inokulum anvendt i udrådningstesten. Således er der i visse andre tests fundet et væsentligt højere methanpotentialie for halm, formodentlig pga. anvendelse af inokulum fra et biogasanlæg, der gennem længere tid har anvendt halm og dermed har en mikrobiel sammensætning tilpasset nedbrydning af halm. Dette vil i givet fald kunne reducere synergieffekten.



Figur 9. Akkumuleret methanpotentialie i ren halm, ren roetop samt i blanding af roetop-halm, som enten var ensileret i 6 måneder eller nedfrosset frisk (dvs. ikke-ensileret).

Blandingen af roetop-halm bestod af 24,2 % halm og 75,8 % roetop i andel af råvareindholdet svarende til hhv. 72,1 % og 27,9 % af VS-indholdet i blandingerne. Methanpotentialiet for en ikke-ensileret blanding er beregnet ud fra methanpotentialiet i ren halm og ren roetop samt VS-andelen af de to biomassetyper.

I Tabel 4 vises methanpotentialer efter forskellige tidsintervaller for ren halm, ren roetop samt i blanding af roetop-halm, som enten var ensileret i 6 måneder eller nedfrosset frisk (dvs. ikke ensileret). Methanpotentialiet for en ikke-ensileret blanding er beregnet ud fra methanpotentialiet i ren halm og ren roetop samt VS-andelen af de to biomassetyper. Merudbytte i form af højere methanpotentialer efter ensilering er beregnet som forskellen mellem det gennemsnitlige methanpotentialer for de 4 siloer og det beregnede methanpotentialer for en ikke-ensileret blanding.

Tabel 4. Methanpotentialer efter forskellige tidsintervaller

Biomasse og lagringsform	Tørstof	Aske	VS	Methanpotentialer (Nm ³ /ton VS) efter forskellige udrådningstider						
	% af råvare			10 dage	15 dage	20 dage	30 dage	40 dage	50 dage	58 dage
Rene råvarer, ikke-ensileret										
Ren halm	86,4	2,3	84,1	98,2	118,3	128,0	136,5	154,4	159,6	163,7
Ren roetop	13,5	3,2	10,2	293,1	305,0	306,3	303,7	311,7	312,2	312,7
Blanding, ikke-ensileret										
Roetop-halm - målt	29,2	2,8	26,4	116,9	125,5	131,7	143,1	138,8	139,3	141,3
Roetop-halm - beregnet)	31,1	3,0	28,1	152,5	170,3	177,7	183,1	198,3	202,2	205,3
Blanding, ensileret										
Roetop-halm - Silo 1	29,9b)	3,3	26,7b)	185,8	211,7	222,4	233,4	247,8	251,2	254,7
Roetop-halm - Silo 4	29,2b)	3,0	26,2b)	159,0	195,1	207,7	216,4	236,5	242,9	245,4
Roetop-halm - Silo 5	26,8b)	3,0	23,8b)	163,4	196,4	207,5	219,2	238,5	245,0	250,7
Roetop-halm - Silo 6	29,7b)	3,0	26,8b)	187,0	212,9	226,1	241,0	258,4	265,9	270,8
Roetop-halm - gnsn. af siloer	28,9b)	3,1	25,9b)	173,8	204,1	215,9	227,5	245,3	251,3	255,4
Ensilering kontra ikke-ensilering (beregnet methanpotentialer)										
P-værdi for forskel	-	-	-	P<0,001	P<0,001	P<0,001	P<0,001	P<0,001	P<0,001	P<0,001
Gnsn. merudbytte ved ensilering	-	-	-	14%	20%	21%	24%	24%	24%	24%
Interval for merudbytte ved ensilering	-	-	-	4-23%	15-25%	17-27%	18-32%	19-30%	20-32%	20-32%

a) Beregnet ud fra blandingsforhold mellem halm og roetop (24,2 hhv. 75,8 % råvareandel) samt analyser af ren halm og ren roetop.

b) Analyse af tørstofindhold og VS-indhold i ensilage er behæftet med fejl pga. flygtige stoffer. I beregningerne er der derfor i stedet regnet med tørstof- og VS-indhold ikke-ensileret roetop-halm.

Samlet energigevinst ved samensilering.

Ved en 'god' ensileringsproces vil der normalt kun være et meget begrænset energitab under lagringen i størrelsesordenen 0,2-1,7 % afhængig af, hvilken fermenteringsproces der vil være dominerende (Wilkinson, 2005). Dog kan der opstå et betydeligt energitab, hvis fermenteringen domineres af enterobakterier (16,6 % tab) eller clostridier (smørsyregæring, 18,4 % tab).

Ved anvendelse af ensilage til biogasproduktion er det afgørende, hvor stor en energiproduktion der opnås af den anvendte biomasse, og her har methanpotentialet afgørende betydning. I dette ensileringsforsøg blev methanpotentialet øget i størrelsesordenen 14-24 % via 6 måneders samensilering, dvs. synergieffekten overstiger langt det beskedne fermenteringstab, der normalt vil være under en god ensileringsproces. Dermed har samensileringen samlet set medført en energigevinst. Samtidig har samensileringen haft den funktion, at halmen absorberer overskudssaft fra roetoppen, som ellers ville kræve en separat håndtering.

I praksis vil der typisk ske et energitab, når ensilagestakken åbnes, og der kommer ilt til udtagningsfladen. Dette tab ville formodentlig være det samme fra roetopfraktionen, hvis den blev ensileret separat, hvorimod der ikke ville være et sådan tab fra halmfraktion ved traditionel, tør lagring af halmen. Tabet fra udtagningsfladen kan dog minimeres ved god håndteringspraksis, så samlet set vurderes dette tab stadig at være væsentligt mindre end synergieffekten ved samensilering.

Konklusion på pilotskalaensileringsforsøg og methanpotentialebestemmelse

Der var ingen saftafløb fra ensilagen, og det bekræfter, at risikoen for saftafløb fra ensilage er meget begrænset, når tørstofindholdet er mindst 30 %.

Der var en signifikant synergieffekt af at samensilere halm med roetop, idet methanpotentialet for ensileret roetop-halmblanding var 14-24 % højere end det beregnede methanpotentiale for en ikke-ensileret blanding.

Samlet set vurderes synergieffekten ved samensilering at være væsentligt større end fermenteringstabet under ensileringen, og dermed vil der kunne opnås en netto-energi gevinst ved samensilering af roetop-halm.

8. Forsøg med boost af biogasproduktionen i kontinuert drift med roetop-halmensilage

Som led i projektet blev der gennemført belastnings- eller boostforsøg med tilsætning af ensilage bestående af sam-ensileret roetop og halm hos Aarhus Universitet i Foulum. Resultaterne af disse forsøg er afrapporteret selvstændigt i delrapport 2. Nedenfor refereres kortfattet til resultater og konklusioner fra dette arbejde.

Boostforsøgene blev foretaget i 10 l, 15 l, 10 m³ og 30 m³ forsøgsreaktorer i kontinuert drift.

1. forsøg: Boostforsøg på dagsbasis i 10 l kontinuerede reaktorer: Forsøgene i laboratorieskala blev foretaget ved anvendelse af kvæggylle som basis med en organisk belastning på 4 g VS/l pr. dag over en uge. Boostforsøgene blev gennemført ved at øge tilsætningen til 6,9 g VS/l pr. dag i den reaktor der var omfattet af forsøget svarende til 150 g ensilage og 350 g kvæggylle medens en reference reaktor fortsatte med oprindelige belastning. Denne tilsætning medførte ca. en fordobling af produktionen med en times varsel, hvorefter produktionen næsten faldt tilbage til udgangsniveauet. Dette skyldes at de lettest omsættelige dele af ensilagen omsættes meget hurtigt, men at de tungere omsættelige dele noget langsommere. Totalt set blev den organiske belastning øget ift. referencen hvilket er forklaringen på, at produktionen ligger højere end referencen efterfølgende.

2. forsøg: Boostforsøg på ugebasis i 15 l kontinuerede reaktorer. Forsøgene i 15 l reaktorer blev foretaget ved anvendelse af kvæggylle med en organisk belastning på 4 g VS/l pr. dag over 2 uger. Boostforsøgene blev gennemført ved at øge tilsætningen til 8 g VS/l ved tilsætning af roetop-halmensilage dag 1 i den reaktor der var omfattet af forsøget. Eftersom der blev konstateret hæmning af processen ved det første boost reduceredes belastningen i 2. boost til 6 g VS/l. De dage i perioden, hvor der ikke blev boostet blev der tilsat kvæggylle svarende til 4 g VS/l pr. dag. Dette forsøg viste på sin vis både mulighederne og begrænsningerne ved boost af produktionen med roetop-halmensilage. Den høje belastning ved første boost medførte en hæmning, som medførte at produktionsboostet blev knap så højt som ved 2. boost, hvor produktionen blev øget med en faktor 3,5.

3. forsøg: Boostforsøg i 10 og 30 Nm³ pilotreaktorer i kontinuert drift, mesofil og termofil. Eftersom mængden af roetop-halm ensilage fra pilotskala ensileringsforsøgene var begrænset blev boostforsøgene i pilotreaktorer gennemført ved anvendelse af majsensilage og briketteret græs. Forsøgene blev gennemført over en periode på 3 måneder. Reaktorerne blev tilført 2,6 kg VS pr. m³ i kvæggylle, og i de ugentlige boosts blev der i forsøget med briketteret græs tilført græs svarende til en fordobling af den organiske belastning, nemlig 5,2 kg VS pr. m³. Den ekstra gasproduktion efter hvert boost var ca. 30 % den første dag

I tilsvarende forsøg med majsensilage blev der fundet 57 % ekstra gas på førstedagen ved den termofile forsøgsreaktor, men kun 34 % ved den mesofile forsøgsreaktor. Dette tyder altså på, at den termofile proces reagerer betydeligt hurtigere på boost med majsensilage end den mesofile proces. Efter to dage var den ekstra gasproduktion hhv. 85 og 57 % og produktionen var tilbage på udgangsniveauet efter tre dage.

4. forsøg: Langtidsforsøg med øget belastning i pilotskala kontinuerte reaktorer. Der blev gennemført to serier på 2 hhv. 2,5 måneder med halmpiller i den første periode og roetop-halm ensilage i den anden periode. Der blev anvendt pødegylle fra 4 biogasanlæg, grundsubstratet var kvæggylle og forsøget blev gennemført med 2 reaktorer i mesofil drift og 2 i termofil. I forsøget med halmpiller var det tydeligt, at de termofile reaktorer reagerede betydeligt hurtigere på halmtilsætningen (3%) end de mesofile, der gradvist øgede produktionen i forsøgsperioden. Efter 2 måneder blev der i stedet for halmpiller tilført 3,75 % roetop-halmensilage. Igen reagerede de to termofile reaktorer betydeligt hurtigere end de mesofile. På grund af den lidt lavere organiske belastning med ensilagen i stedet for halmpiller faldt den daglige produktion i begge reaktortyper, men interessant nok synes de mesofile reaktorer i slutningen af perioden at udligne forskellen i daglig produktion i forhold til de termofilt drevne reaktorer.

Konklusion på boostforsøgene

Ensilagen kan udmærket anvendes til at øge gasproduktionen med kort varsel. I de kontinuerte forsøg, der blev udført i laboratorieskala, blev der fundet mulighed for at øge produktionen 3 gange inden for det første døgn ved at booste produktionen ved tilsætning af ensilage af roetop og halm. Ved boost med ensilagen falder methanprocenten kortvarigt ret markant, ligesom der er risiko for at skabe ubalancer i processen ved ophobning af organiske fede syrer, især hvis der doceres for meget ensilage. Derved kan der opstå hæmning af biogasprocessen, hvis der boostes med for stor en mængde ensilage. Endelig blev det fundet, at den termofile proces reagerer hurtigere på boost med ensilage end den mesofile proces.

For nærmere detaljer i boost og langtidsforsøg henvises til delrapport 2 forfattet af Aarhus Universitet.

9. Flydeevneforsøg.

I forbindelse med udtagning af prøver til biogaspotentialebestemmelser blev der udtaget ensilageprøver, der blev lagt i vand i høje plastikkrus. Det havde til formål at undersøge om der visuel kunne konstateres nogen forskel i de forskellige substraters flydeevne over nogle dage. Alle blandinger med roetop og halm var ensilerede

Krusene blev derefter fotograferet og igen 1 og 3 dage efter.










	Ubehandlet halm Roetop+sn.halm: 67:33 Ren roetop Ren roetop	Halm og top 80:20 Tør halm Vand og halm 67:33 Tør snittet halm	Top og ubehandlet halm 72:28 Top og snittet halm 72:28 Top og ekstr. Halm 72:28 Top og sn. halm 88:12
Dag 0			
Dag 1			
Dag 3			

Foto: Kurt Hjort-Gregersen, Teknologisk Institut

12 bægre blev fyldt med vand og halm og/eller roetop fra de prøver, der blev udrådnnet i 1. forsøgsserie blev fotograferet efter 0, 1 og 3 dage. Krusene er ovenfor indsat under hinanden. Allerede efter en dag er en del af materialet suspenderet i vandet, dog klart mindst i krusene med ren halm. Efter tre dage er langt det meste bundfældet, dog i mindre grad i krus med ren halm, især ubehandlet halm, hvor de stive strå ikke rigtig synker sammen. Men alle de prøver, hvor halmen har været befugtet under ensileringen er en stor del af materialet sunket efter 3 dage.

Dette ses også meget tydeligt på nedenstående noget større billede.



Foto: Kurt Hjort-Gregersen, Teknologisk Institut

Her er fremdraget 2 krus med roetop og snittet halm samt en hvor halm har været henlagt i ensileringsposen med vand (midt), fotograferet efter 3 dage. Det fremgår tydeligt at stort set alt materiale er bundfældet efter 3 dage.

Endelig viser nedenstående billede alle 12 krus efter 3 dage set i fugleperspektiv



Foto: Kurt Hjort-Gregersen, Teknologisk Institut

De mørkeste overflader er prøver med ren roetop, som tilsyneladende ret let lader sig opløse i vandet. Men alle andre prøver er ligeledes blevet mere eller mindre uklare, fordi indholdet delvist opløses i vand.

Dette, ganske vist helt uvidenskabelige, forsøg tyder på, at ensilageblandingerne ret hurtigt synker til bunds, og kun efterlader en smule materiale på overfladen. Dette indikerer, at der kan være en håndteringsmæssigt fordele ved, at halmen er opfugtet forud for indpumpning i biogasanlæg.

Forsøget kan imidlertid ikke sige noget om, hvordan materialerne opfører sig under praktiske forhold, hvor der ofte omrøres kontinuert i reaktorerne, og heller ikke hvad der sker under den opdrift, som opadstigende biogas forårsager i reaktoren.

Men de erfaringer der blev gjort med roetop-halmensilage under boostforsøgene i kontinuerte reaktorer, der blev udført af Århus Universitet tyder klart på, at det ensilerede materiale er væsentligt mere pumpbart end hvis samme tørstofindhold var opnået ved tilsætning af ubehandlet halm. Der blev heller ikke observeret tendens til dannelse af flydelag.

10. Høst og bjærgning

Høst og bjærgning af roetop udgør en særlig udfordring fordi der nu til dags ikke findes ret meget maskineri hos landbrug og maskinstationer, der er egnet til det. Indtil for 30 år siden havde de fleste kvægbrug, der dyrkede foderroer en grønthøster, som bl.a. blev brugt til at aftoppe roerne. Grønthøsteren kunne så blæse roetoppen op i en aflæssevogn, der var efterspændt traktoren. Efter den tid tog majs over i grovfoderforsyningen. Hos sukkerroedyrkerne blev der monteret en klipper foran på roeoptageren, så aftopning og roeoptagning skete i en arbejdsgang. Moderne roeoptagere er typisk udstyret med en såkaldt integralklipper, der fører den afklippede roetop ned mellem rækkerne, hvor den bliver integreret i jorden. Og sukkerroedyrkerne ønsker ikke at der kører en traktor med grønthøster og aflæssevogn i roemarken forud for roeoptagningen, fordi roerne let tager skade derved, og udbyttet derved reduceres.

Der findes imidlertid enkelte ældre maskiner i landet med frontmonteret afklipper, der kaster roetoppen ud til siden. På disse kan der monteres en transportør, der kan føre roetoppen op i en ledsagevogn. Det forudsætter dog, at roeoptageren har en tank til de opsamlede roer.



Foto: Kurt Hjort-Gregersen, Teknologisk Institut

Billedet viser en roeoptager af mærket Holmer, der har monteret en transportør til roetoppen. Maskinen ejes af maskinstationen Sv. A Christensen, og ses på billedet i aktion på en demonstrationsdag for roer ved Vraa i Vendsyssel.

Der er flere måder, hvorpå halmen kan bjerges på. Dette er analyseret i afsnit 11 om økonomianalyser. Hvis man vil undgå yderligere neddeling af ensilagen forud for biogasanlægget, er det nok nødvendigt, at halmen snittes, før den lægges i stak. Dette gøres lettest og billigst under bjærgningen, fx ved at benytte en bigballepresser med snitter eller ved anvendelse af en snittevogn.

Det har ikke i projektet været muligt at gennemføre fuldskalaforsøg med samensilering af roetop og halm. Hvis man vil opnå en homogen blanding i stakken, er der nok ikke nogen vej udenom, at der skal ske en opblanding ved ilægning, men det vil givet være ganske tids og omkostningskrævende. Den mest fremkommelige løsning vil derfor sandsynligvis være at udlægge fx stempelslag (plader af halm i ca. 20 cm tykkelse) i bunden af plansiloen, og så tippe roetoppen ovenpå. Måske kan det gøres lagvis. Efterhånden som stakken bliver længere, skal der så lægges nye stempelslag ud. Plansiloens sider vil sikre, at saften fra roetoppen siver ned i halmen, som

gerne skulle kunne opsuge den. Ved 25 % halm er der ikke konstateret saftafløb i pilot-skalaforføgene.

11. Økonomianalyser og forretningsmodeller

Gaspotentialebestemmelser og boostforsøg har vist, at roetop-halmensilage er et glimrende substrat til biogasproduktion. Det kan være med til at erstatte behovet for organisk affald efterhånden, som antallet af biogasanlæg stiger og efterspørgslen dermed ligeså. Hertil kommer, at både roetop og halm anses for at være restbiomasser og kan derfor anvendes ubegrænset uden at konflikte med de bæredygtighedskriterier, der nu er gældende.

Spørgsmålet er så, hvad ensilagen er værd mht. biogasproduktion, og ikke mindst, hvad koster det at anskaffe ensilagen. Dette er i detaljer analyseret i det følgende.

Hvis der jvf. ovenstående resultater produceres en ensilage af 75 % roetop og 25 % halm fås en ensilage med ca. 30 % tørstof (TS), kan regnestykket se således ud.

Tabel 5. Forudsætninger for økonomiberegningen for blandingsensilage.

Mængde, tons	1
Tørstofindhold (TS), kg	300
Organisk tørstofindhold (VS) (VS=85% af TS), kg	255
Methanproduktion, Liter CH ₄ pr. kg VS	270
Methanproduktion pr. ton ensilage, Nm ³ CH ₄	69
Gasværdi, kr. pr. Nm ³ CH ₄	5
Værdi af 1 ton ensilage, kr.	345
Tilsvarende værdi af 1 ton majsensilage, kr.	446

Spørgsmålet er så, hvordan der kan produceres ensilage til tilstrækkeligt lave omkostninger til at det i praksis vil være rentabelt at implementere.

Derfor er der som led i projektet gennemført en række omkostningsanalyser for bjærgning, transport og lagring af roetop-halm ensilage.

Bjærgning af roetop.

Roetoppen forudsættes som beskrevet i afsnit 10 bjerget med en roeoptager med tank til roer, hvor der er påmonteret en transportør, der løfter den afklippede roetop op i en ledsagevogn. Det er skønnet, at merprisen ved roeoptagningen på denne måde er 10 %.

Tabel 6. Forudsætninger bjærgning af roetop med transportør på roeoptager.

Kapacitet, ha pr. time	1
Optagning inkl. aftopning	1800 kr. pr. time
Ekstrapris for transportør	180 kr. pr. ha.
Ledsagevogne	600 kr. pr. time
Læstørrelse	30 m ³
Hastighed på vej	20 km pr. time.
Indlægning og opbevaring	26 kr./ton

På den baggrund er de samlede omkostninger til anskaffelse af roetop beregnet ved forskellige transportafstande.

Tabel 7. Omkostninger til anskaffelse af roetop ved forskellige afstande

Afstand, km	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kr. pr. ton ialt	60	62	65	67	70	72	75	78	80	83

Udover fremskaffelsen af roetop er beregnet bjærgningsomkostninger for halm i følgende bjærgningsscenarier

- Halm snittet med selvkørende snitter og hjemkørt i tipvogne
- Halm snittet og bjerget med opsamlervogn
- Halm snittet og bjerget med opsamervogn med matrix til kompaktering af læsset
- Halm presset i bigballer og hjemkørt på halmvogn
- halm presset i rundballer og hjemkørt på halmvogn

I nedenstående beregninger er der fokuseret i første omgang på omkostningerne til bjærgning, transport, lagring og neddeling af halm, men uden at selve halmen er prissat. Dette gøres ud fra det synspunkt, at hvis halmen bjerget og anvendes til biogasproduktion og leveres tilbage i den afgassede gylle, mister halmleverandøren ikke de næringsstoffer, der fjernes med halmen og ej heller det bidrag til kulstofopbygning i dyrkningsjorden, som halmen udgør. Hvordan omkostningerne ser ud, hvis halmen skal købes analyseres senere.

Tabel 8. Forudsætninger bjærgning af halm snittet med selvkørende snitter og hjemkørt i tipvogne

Kapacitet, ha pr. time	2,2
Snitning	1500 kr. pr. time
Ledsagevogne	600 kr. pr. time
Læstørrelse	60 m ³
Hastighed på vej	20 km pr. time.
Indlægning og opbevaring	26 kr./ton

På den baggrund er de samlede omkostninger til anskaffelse af halm bjerget med selvkørende snitter og hjemkørt i ledsagevogne beregnet.

Tabel 9. Omkostninger til anskaffelse af halm bjerget med selvkørende snitter og hjemkørt i ledsagevogne beregnet ved forskellige transportafstande

Afstand, km	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kr. pr. ton ialt	274	292	311	329	348	366	385	403	422	440

Tabel 10. Forudsætninger bjærgning af halm snittet og bjerget med opsamlervogn

Kapacitet, ha pr. time	2,2
Snitning og opsamling	800 kr. pr. time
Læstørrelse	40 m ³
Hastighed på vej	20 km pr. time.
Indlægning og opbevaring	26 kr./ton

Tabel 11. Omkostninger til anskaffelse af halm snittet og beregnet ved forskellige transportafstande

Afstand, km	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kr. pr. ton ialt	245	282	319	356	393	430	467	504	541	578

Tabel 12. Forudsætninger bjærgning af halm snittet og bjerget med opsamlervogn med matrix

Kapacitet, ha pr. time	2,2
Snitning og opsamling	800 kr. pr. time
Læstørrelse	40 m ³
Hastighed på vej	20 km pr. time.
Indlægning og opbevaring	26 kr./ton

Tabel 13. Omkostninger til anskaffelse af halm bjerget med opsamlervogn med matrix beregnet ved forskellige transportafstande

Afstand, km	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kr. pr. ton ialt	203	217	232	246	260	275	289	303	317	332

Tabel 14. Forudsætninger bjærgning af halm i bigballer

Kapacitet, ha pr. time	3,9
Presning	90 kr. pr. balle
Læstørrelse	10 tons
Timepris transport	600 kr. pr. time
Hastighed på vej	20 km pr. time.
Indlægning og opbevaring	26 kr./ton

Tabel 15. Omkostninger til anskaffelse af halm bjerget i bigballer beregnet ved forskellige transportafstande

Afstand, km	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kr. pr. ton ialt	276	282	288	294	300	306	312	318	324	330

*) inkl. Oprivning/neddeling

Tabel 16. Forudsætninger bjærgning af halm i rundballer

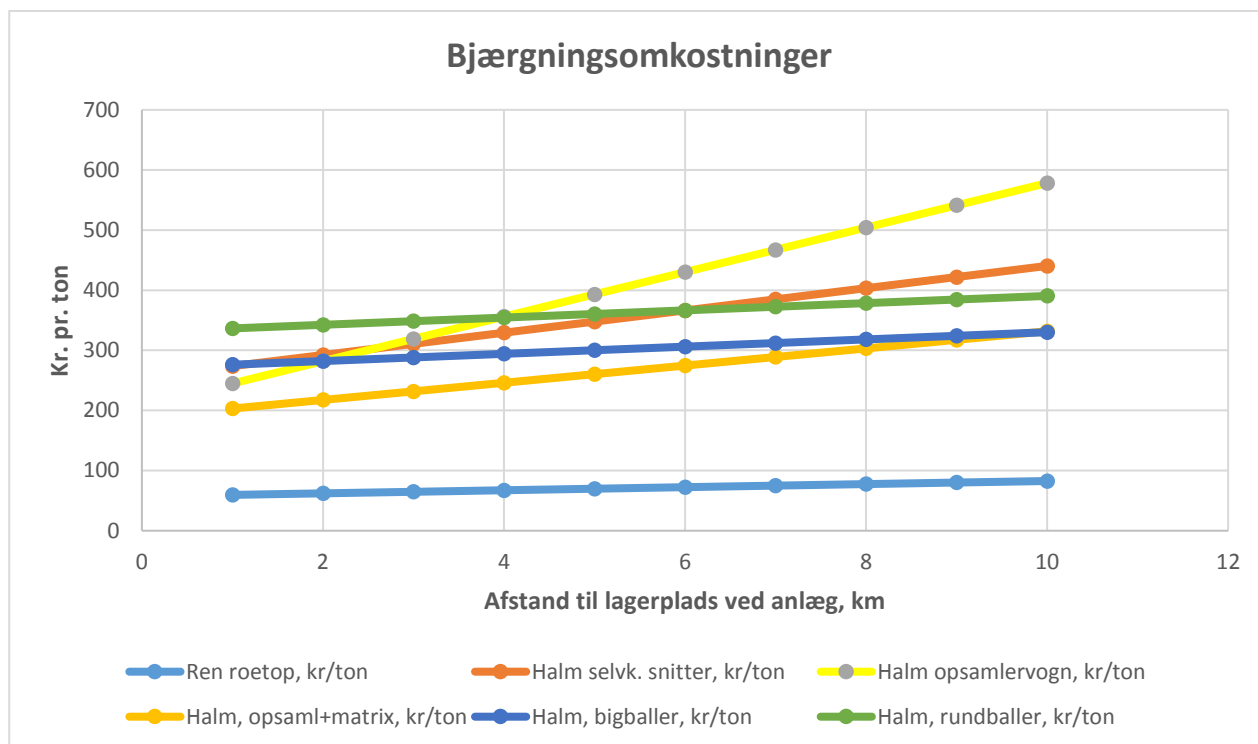
Kapacitet, ha pr. time	2,8
Presning	55 kr. pr. balle
Læstørrelse	10 tons
Timepris transport	600 kr. pr. time
Hastighed på vej	20 km pr. time.
Indlægning og opbevaring	26 kr./ton

Tabel 17. Omkostninger til anskaffelse af halm bjerget i rundballer beregnet ved forskellige transportafstande

Afstand, km	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kr. pr. ton ialt	337	343	349	355	361	367	373	379	385	391

*) inkl. Oprivning/neddeling

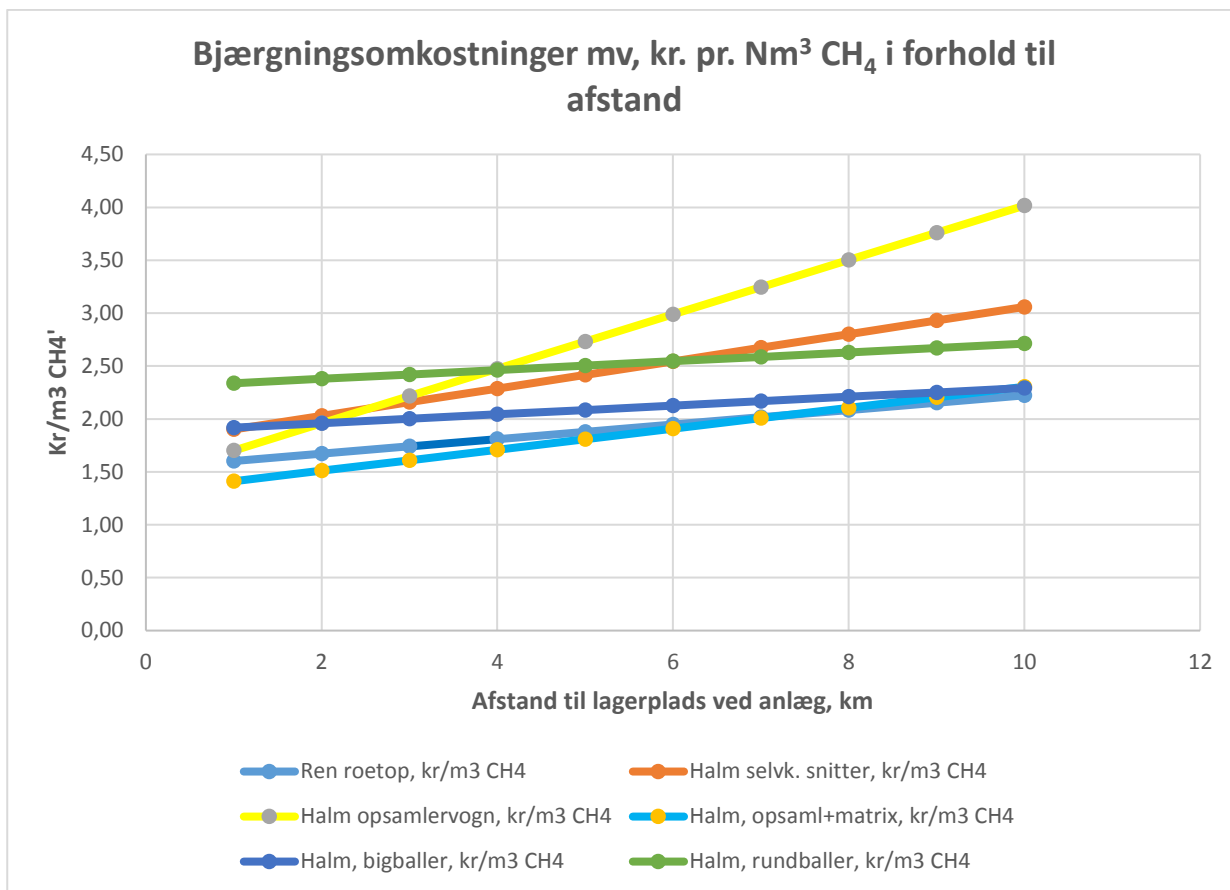
De således beregnede bjærings-, transport- og lagringsomkostninger er gengivet i nedenstående Figur 10



Figur 10. Bjæringsomkostninger/råvarepris, kr. pr. ton halm.

Når der alene fokuseres på omkostningerne pr. ton fremgår det at roetop er langt den billigste råvare at bjerge. Figuren viser også, at der ved korte afstande kan være fordele ved at bjerge halmen med opsamlervogn, især hvis den er monteret med en matrix, der kan kompaktere halmen, hvorved læsstørrelsen, og dermed kapaciteten, øges væsentligt. Men er afstanden større end 8 km er bigballer konkurrencedygtig, og over længere afstande klart den billigste måde at bjerge og transportere halm.

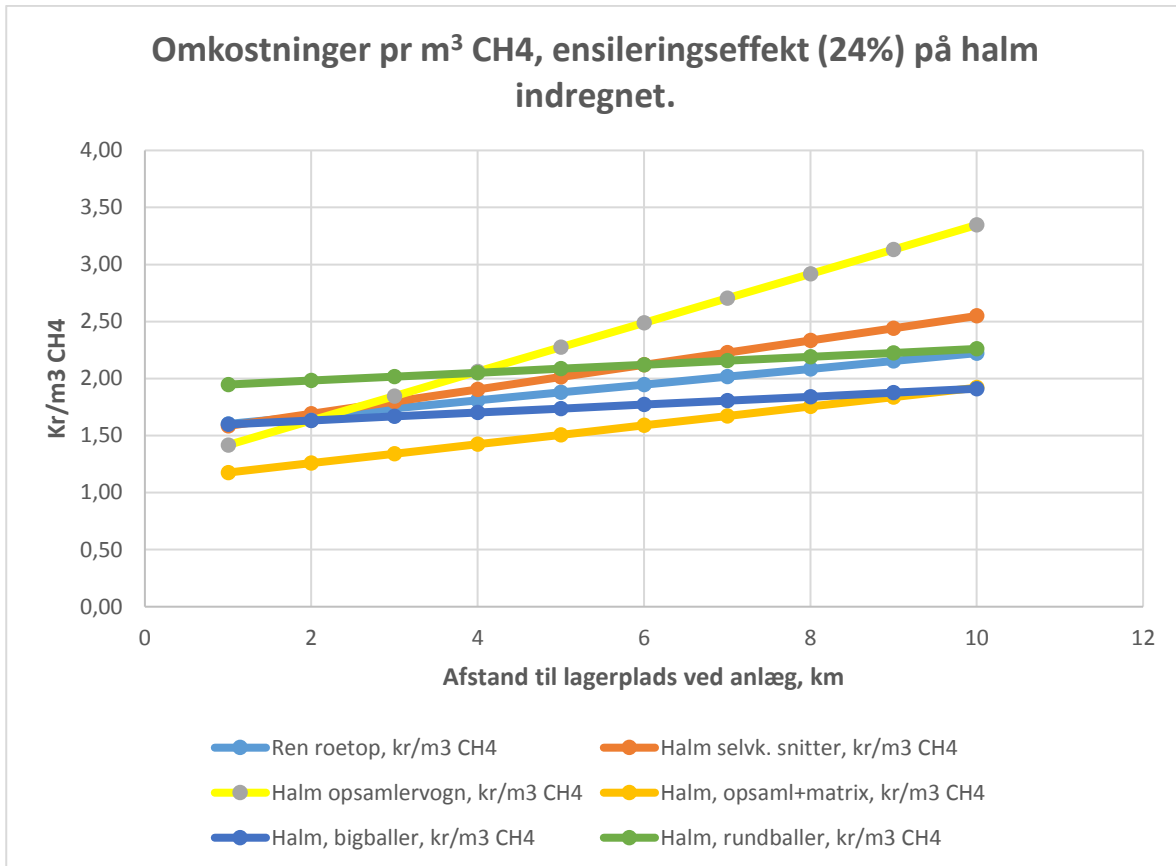
Men en ting er bjæringsomkostningerne målt pr. ton. Det der er interessant i biogas-sammenhæng er naturligvis, hvad prisen er, når den sættes i relation til gaspotentiallet. Derfor er bjæringsomkostningerne udtrykt pr. Nm³ CH₄.



Figur 11. Bjærgningsomkostninger mv, kr. pr. Nm³ CH₄ ved forskellig afstand.

Eftersom halmen jo har meget højere tørstofprocent, og dermed gaspotentialer, viser denne beregning, at der ikke som udgangspunkt er den store forskel på omkostningerne til bjærgning af halm og roetop udtrykt i kr. pr. Nm³ CH₄. Figuren viser også, at både roetop og halm bjerget enten som bigballer eller med opsamlervogn med matrix holder sig under 2,5 kr. pr. m³ CH₄ selv ved 10 km afstand. I disse beregninger er methanpotentialer i roetop hhv. halm beregnet ud fra forudsætning om 350 Nm³ CH₄ pr. ton VS hhv. 200 Nm³ CH₄ pr. ton VS.

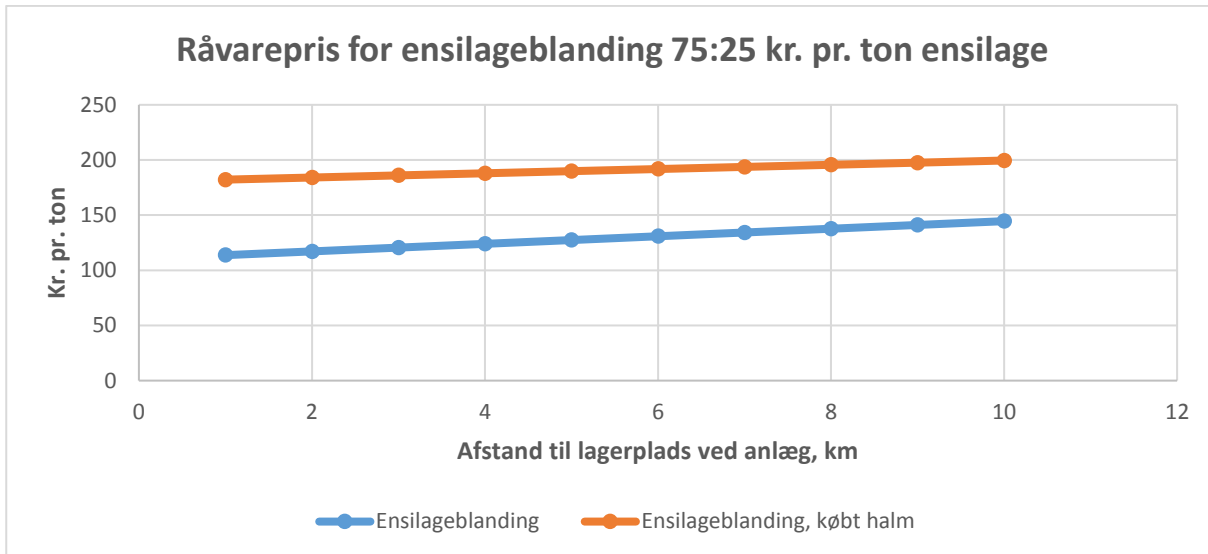
Men flere af forsøgene i dette projekt har netop vist, at der kan forventes en vis synergieffekt på methanudbyttet fra halm, når denne har været samensileret med roetoppe. Denne ensileringseffekt er indregnet i nedenstående figur med en forudsætning om 24 % højere methanudbytte fra halm delen ifølge pilotskalaforsøgene med roetop-halmensilage. Resultaterne af disse beregninger er vist i Figur 12.



Figur 12. Bjærgningsomkostninger mv. kr. pr. Nm³ CH₄ med indregnet ensileringseffekt.

Figuren viser, at omkostningerne falder med ca. 50 øre pr. Nm³ CH₄ når ensileringseffekten indregnes. Faktisk ligger alle bjærgningsmetoderne under de 2,5 kr. pr. Nm³ CH₄ ved 10 km, bortset fra opsamlervognen, der når dette loft ved 6 km.

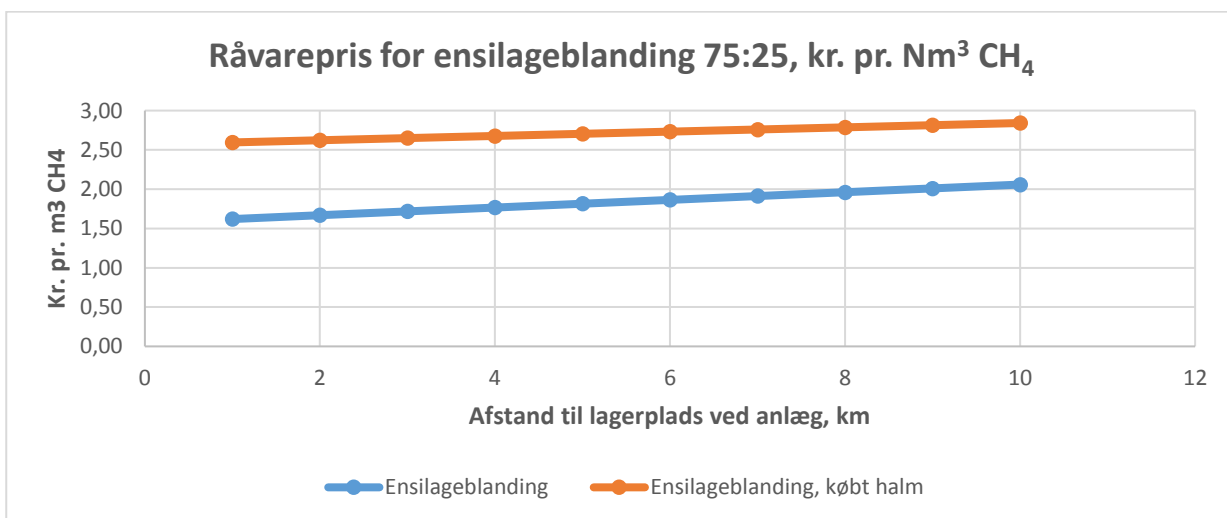
Så melder spørgsmålet sig om hvad prisen bliver på den færdige ensilage. Resultaterne af disse beregninger er vist i nedenstående Figur 13. I figuren er også indsat råvareprisen, som den vil være ved køb af halmen leveret i bigballer. Her er der taget udgangspunkt i en pris på 500 kr. pr. ton halm med tillæg på 50 kr. pr. ton for neddeling, som det også ovenfor er forudsat ved bigballer og rundballer.



Figur 13. Råvarepris for ensilageblanding roetop-halm i forholdet 75:25.

Figuren viser, at ensilageblandingen kan tilvejebringes for under 200 kr. pr. ton ved afstande på mindre end 10 km, selvom halmen indkøbes til markedspris.

Disse råvarepriser er efterfølgende omregnet til priser pr. Nm³ CH₄. Resultatet af disse beregninger er vist i nedenstående Figur 14.



Figur 14. Råvarepris for ensilageblanding 75:25, kr. pr. Nm³ CH₄.

Skal man fastholde målet om en max pris på 2,5 kr. pr. Nm³ CH₄ kan det knibe at tilvejebringe ensilageblandingen, såfremt der skal betales fuld markedspris for halmen. Men omvendt vil prisen for majsensilage ligge mellem 2,5 og 3 kr. pr. Nm³ CH₄. I forhold til det er roetop-halmensilage således konkurrencedygtig.

12. Konklusioner

- De biogaspotentialanalyser, der er gennemført som led i projektet viser, at samensileret roetop og halm er et udmærket substrat til biogasproduktion. Der kan forventes mellem 250 og 300 Nm³ CH₄ pr. ton organisk tørstof i ensilagen.
- Der blev i flere af forsøgene fundet en betydelig synergieffekt på methanudbyttet fra halmdelen som følge af, at saften fra roetoppen forårsager en forbehandling af halmen som led i ensileringsprocessen.
- Samlet set vurderes synergieffekten ved samensilering at være væsentligt større end fermenteringstabet under ensileringen, og dermed vil der kunne opnås en netto-energigevinst ved samensilering af roetop-halm.
- Roetop-halmensilagen kan endvidere anvendes til at øge gasproduktionen med kort varsel. I kontinuerede forsøg i laboratorieskala er der fundet mulighed for at øge produktionen 3 gange inden for det første døgn ved at booste produktionen ved tilsætning af ensilage.
- Ved boost af biogasproduktionen med roetop-halmensilagen falder methanprocenten kortvarigt ret markant, ligesom der er risiko for at skabe ubalance i processen ved ophobning af organiske fede syrer, især hvis der doceres for meget ensilage. Der kan således opstå hæmning hvis der boostes med for stor en mængde ensilage.
- Den thermofile proces reagerer hurtigere på boost med ensilage end den mesofile proces
- 25-30 vægtprocent halm er tilstrækkeligt til at opsuge saften fra roetoppen ved samensilering
- Det ser ud til, at halm, der har været opfugtet under lagringen, har mindre tendens til flydelagsdannelse. Men de erfaringer der blev gjort med roetop-halmensilage under boostforsøgene i kontinuerede reaktorer, der blev udført af Århus Universitet, tyder klart på, at det ensilerede materiale er væsentligt mere pumpbart end hvis der var anvendt ubehandlet halm. Der blev heller ikke observeret tendens til dannelse af flydelag.
- Roetop-halmensilage kan tilvejebringes for omkostninger, der ca. svarer til majsensilage. Dvs. ca. 2,5 kr. pr. Nm³ CH₄ hvis halmen købes til markedspris, lavere hvis man har den selv.
- Roetop-halmensilage betragtes som restbiomasse og kan derfor bruges ubegrænset i henhold til Energistyrelsens bæredygtighedskriterier.
- Derved kan roetop-halmensilage med fordel indgå i biomasseforsyningen på biogasanlæg og derved mindske afhængigheden af organisk affald eller energifgrøder.

Referencer

- 1) Kortlægning af hensigtsmæssig lokalisering af nye biogasanlæg i Danmark. AgroTech og SEGES, 2015