

Final report

1. Project details

Project title	StrawSilage – Ensiling as combined pretreatment and storage of straw for biogas production
File no.	64020-1039
Name of the funding scheme	EUDP
Project managing company / institution	Danish Technological Institute
CVR number (central business register)	DK 5697 6116
Project partners	Aarhus Universitet, MKjeldal, Danske Maskinstationer og Entreprenører (DM&E), POMI Industri ApS, Skinnerup Maskinstation I/S, Stenhøjgaard Invest ApS, AU-Vindmøller I/S
Submission date	07 February 2025

2. Summary

Project summary

The purpose of the project

StrawSilage aimed to develop and optimize ensiling as a biological pretreatment and storage method for wet straw to increase the use of this underutilized resource in biogas production. The goal was to improve methane yield by 30% thus optimizing the straw value chain by concurrently increasing the economic feasibility from field to biogas plant.

Results, conclusions and perspective

Key results:

- Lab-scale ensiling demonstrated pH reduction in wet straw and increased methane potential by 10-20% after 6-10 months of ensiling.
- Wheat straw exhibited an increased methane potential after 3 months of ensiling.
- Water content was crucial for successful ensiling with methane potential improving from water content of 30%.
- Results in laboratory scale were verified in field tests.
- The effect of using ensiling agents was minor in terms of methane potential.

- Full-scale testing showed dry matter losses of only 5% in properly wrapped bales compared to 18% in unwrapped bales
- The POMI Wrap 8 system was successfully modified for dense stacking and wrapping of wet straw bales, however wrapping was not sufficient for efficient ensiling.
- Practical tests at biogas plants demonstrated that it was possible to handle the ensiled straw.
- Economic analyses indicated that ensiled straw could be a cost-effective alternative to other pretreatment methods.

Future implementation:

- The technology enables biogas plants to utilize straw.
- The system allows farmers and agricultural contractors to bale straw during moist conditions.
- The concept could be used commercially.

Expected effects:

The results will enable biogas plants to incorporate straw as a sustainable biomass source, reducing dependence on energy crops. The technology is expected to improve reactor efficiency, reduce greenhouse gas emissions from slurry, and benefit stakeholders across the straw value chain.

Projektresumé

Formålet med projektet

Strawsilage havde til formål at udvikle og optimere ensilering som en biologisk forbehandlings- og lagringsmetode til våd halm for at øge anvendelsen af denne ressource i biogasproduktion. Målet var at forbedre methanudbyttet med 30% og dermed optimere værdikæden for halmen ved samtidig at øge den økonomiske rentabilitet fra mark til biogasanlæg

Resultater, konklusioner og perspektiv

Hovedresultater

- Laboratorieforsøg med ensilering viste en reduktion i pH i våd halm og en stigning i methanpotentialet på 10-20 % efter 6-10 måneders ensilering.
- Hvedehalm udviste øget methanpotentiale efter 3 måneders ensilering.
- Vandindhold var afgørende for en vellykket ensilering, hvor stigende methanpotentiale med stigende vandindhold blev observeret (ved mindst 30 % vand).
- Resultater fra laboratorieforsøg blev bekræftet i markforsøg.
- Effekten af ensileringsmidler var begrænset i forhold til methanpotentialet.
- Test i fuld skala viste tørstofstab på kun 5 % i korrekt indpakkede baller mod 18 % i ikke-indpakkede baller.
- POMI Wrap 8-systemet blev modificeret til tæt stabling og indpakning af våde halmballer; dog var indpakningen ikke tilstrækkelig til effektiv ensilering.
- Forsøg på biogasanlæg demonstrerede, at det var muligt at håndtere det ensilerede halm.
- Økonomiske analyser viste, at ensileret halm kan være et omkostningseffektivt alternativ til andre forbehandlingsmetoder.

Fremtidig implementering:

- Teknologien gør det muligt for biogasanlæg at udnytte halm.
- Systemet tillader landmænd og maskinstationer at presse fugtig halm.

- Konceptet forventes at kunne anvendes kommercielt.

Forventede effekter:

Resultaterne vil gøre det muligt for biogasanlæg at integrere halm som en bæredygtig kilde og dermed reducere afhængigheden af energiafgrøder. Teknologien forventes at forbedre reaktoreffektiviteten, reducere drivhusgasemissioner fra gylle og gavne interessenter på tværs af halmens værdikæde.

3. Project objectives

The overall objective of the project was to develop ensiling as a biological pretreatment of straw for biogas production, as an energetically and economically efficient alternative to mechanical pretreatment.

The specific objectives of the project were:

- To increase the methane production rate and total yield of straw by at least 30% by using ensiling as a pretreatment.
- To increase the possible load of straw in biogas reactors and increase the maximum dry matter content without risk of formation of a floating layer and reduced pumpability.
- To optimize the pretreatment effect of ensiling of straw, e.g. by optimizing moisture content, particle size, addition of various types and doses of silage additives (lactic acid bacteria, acid, brown juice etc.) and ensiling duration.
- To optimize and increase the flexibility of the straw value-chain by production of two baled straw products; straw silage for biogas production baled during moist periods and dry straw for combustion baled during dry periods.
- To develop and test a system (POMI Wrap 8) for dense stacking and airtight wrapping of wet straw bales for ensiling for outdoor storage.
- To analyze the economic effect of the concept of ensiling straw for biogas production for the entire value-chain from field to biogas production.

Key deliverables

A biological pre-treatment ensiling method for straw for use in biogas production has been developed, specifically:

1. Ensiling of wet straw in bales as a pre-treatment technology, which includes:

- Development of techniques for baling wet straw (30-65% moisture content)
- Application of various ensiling additives (lactic acid bacteria, formic acid, acetic acid, brown juice)
- Development of air-tight wrapping systems for multiple bales (POMI Wrap 8 system)

2. Key technical components developed and demonstrated in the project:

- System for applying ensiling additives during baling based on available standard agricultural equipment.
- An improved wrapping system (POMI Wrap 8) with specialized gripping technology for dense stacking and airtight storage

3. The use of ensiled straw in biogas plants was performed in industrial scale

- The experiments at Skinnerup biogas plant demonstrated that ensiled straw could be successfully fed into the biogas plant at a rate of 2 bales per day with relatively easy handling (10 minutes/bale), though proper wrapping proved critical for preventing spoilage. While the specific methane yield impact was difficult to isolate due to simultaneous use of other substrates, the trials showed that well-ensiled straw required no additional pre-treatment before feeding and only caused moderate floating layer formation (up to 20cm), with a slight increase in mixing energy consumption from 1,450 to 1,660 kWh/day.
- The experiments at Ausumgaard biogas plant demonstrated that ensiled straw, particularly when pre-cut during baling, was relatively easy to handle, with bales springing apart upon cutting and showing good internal quality despite minor surface mold. However, challenges arose from straw clumps causing blockages in the feed system, highlighting the necessity of additional pre-treatment such as crushing or fine shredding to ensure smooth feeding and prevent operational disruptions.

4. Economic assessments

- Economic assessments were performed for a wide range of harvesting, storage and transport scenarios (see technical report for more detail)
- Smaller economic calculation models were delivered as part of the project and made open for public use

The developed technologies represent a complete system solution that addresses the entire value chain from field to biogas production, enabling efficient utilization of wet straw resources while providing operational and economic benefits to all stakeholders involved.

4. Project implementation

The project developed ensiling strategies partially in parallel with 1) laboratory scale experiments investigating key ensiling parameters 2) pilot scale testing of wrapping and baling techniques conducted in the field. Bales from the pilot experiments were tested under normal operational conditions at commercial biogas plants to assess the feasibility of utilizing the ensiled straw. No major challenges were observed at the biogas plants, while no changes in gas production were found, which was most likely due to the low amount of straw relative to other feedstocks. For more details also see attached technical report.

Project risks:

Risk: Limited effect of ensiling on methane yield

Mitigation: Comprehensive testing of multiple ensiling treatments and conditions

Outcome: Achieved 10-20% increase in methane yield, slightly below target of 30%

Risk: Scaling up challenges with uniform moistening of straw

Mitigation: Development of different practical technologies for additive application

Outcome: Successfully developed application methods, though moisture control remained challenging

Risk: Weather conditions affecting harvest and demonstrations

Mitigation: Extended testing over three years

Outcome: Successfully gathered data across varying conditions

Project milestones:

The project largely progressed according to plan, achieving key milestones:

- M1. Successful baling of wet straw and addition of ensiling additive during baling.
- M2. pH reduction and minimum 10% increase in methane yield in lab-scale ensiling of straw
- M3. Development of a new high precision *in situ* technique to monitor degradation of straw ligno-cellulosic containing substrates
- M4. Pilot-scale ensiling of wet straw with pH reduction to below 4.5
- M5. Demonstration of practical in-feeding of ensiled straw in biogas plant
- CM1. Wrap 8 system modified and tested in full-scale demonstration
- CM2. Prototype of straw bale grip developed and ready for demonstration

Unexpected challenges:

- Weather dependency proved more significant than anticipated, making it difficult to achieve consistent moisture content during baling
- Plastic integrity issues during storage led to unexpected heating and decomposition in some bales
- Insufficient wrapping led to decomposition in some bales
- The effect of ensiling additives was less pronounced than expected, as the water content was the most significant factor.
- The COVID-19 pandemic caused some delays in implementation and testing schedules
- Higher than expected variability in ensiling results between different scales of implementation

Despite these challenges, the project successfully demonstrated the technical feasibility of the concept while identifying important practical considerations for future commercial implementation.

5. Project results

Most of the original project objectives were achieved as described in the following.

Methane production rate was envisioned to reach at least 30% by using ensiling as a pretreatment, which was not achieved as results varied from 10-20 %. These findings were partially validated in full-scale tests, confirming that ensiled straw can be an effective supplement to existing biogas feedstocks. This improvement adds commercial value to the process by increasing energy output without significant additional costs. The **source of straw influenced results**, as wheat straw exhibited an increased methane potential after 3 months of ensiling, while a longer ensiling time (6 months) was necessary for barley straw, where also a smaller effect was seen.

It was shown that the **load of straw could be increased in biogas reactors** without an adverse effect on production, thus increasing the maximum dry matter content without reduced pumpability. However, the formation of a 20 cm floating layer was observed in some experiments at Skinnerup. At both biogas plants it was necessary to ensure good separation of the straw from the bales to avoid clogging of the reactor system, nevertheless the ensiled straw was easier to handle than dry straw.

Various ensiling parameters and agents were tested to **optimize the pretreatment effect of ensiling of straw**. While these experiments were successful overall, the conclusion was that the water content was the most important parameter overshadowing the effect of the other additives. Thus, the effect of using ensiling

agents was minor or in some cases negligible in terms of methane potential, but they seemed to help stabilize the ensiling process.

The project demonstrated the potential **flexibility of the straw value-chain** by producing straw silage for biogas production with straw baled during moist periods. The experiments performed in the field showed the variation in moisture depending on the day and the weather with variations from 20 % moisture to 50% moisture on the same day within a span of 5 hours (see attached technical report for further details).

The POMI Wrap 8 **system for dense stacking and airtight wrapping of wet straw bales** for ensiling for outdoor storage was developed and tested. The system provided a reduction of dry matter loss, however sufficient preservation of biomass quality was not achieved. Further development is needed to ensure sufficiently airtight wrapping. Thus, while the POMI WRAP 8 system provided a means to reduce the use of plastic, a less efficient ensiling system was obtained.

An extensive cost analysis of the **potential economic effect** of the concept of ensiling straw for biogas production was performed. This analysis indicated that the total cost of ensiled straw in bales is competitive with other biomass sources. Part of the analysis consists of online tools for economic feasibility calculations, which have been made available to the public¹.

The solutions and technologies developed in the STRAWSILAGE project have clear applications for multiple stakeholders across the biogas value chain. Below, the target groups and the added value for each solution/technology are outlined:

1. Target Group: Biogas Plants

- **Solution:** Ensiled straw as a supplementary biomass feedstock.
- **Added Value:** Biogas plants can achieve higher methane yields and overcome the operational challenges associated with dry straw, such as floating layers and poor pumpability. Ensiled straw can also reduce reliance on more expensive feedstocks, improving overall plant profitability and sustainability.

2. Target Group: Agricultural Contractors and Farmers

- **Solutions:**
 - POMI WRAP systems for efficiently wrapping wet straw bales in place. Further improvements are needed to achieve good ensiling conditions.
 - Knowledge of optimal water content and handling of straw during ensiling.
 - Economic models available online
- **Added Value:** Contractors and farmers can utilize surplus straw to create a value-added product for biogas plants. By optimizing and investing in efficient wrapping systems, they can minimize spoilage and maximize the marketability of ensiled straw, creating an additional revenue stream.

3. Target Group: Manufacturers of Silage Equipment and Additives

- **Solutions:**
 - Development of novel wrapping technologies (e.g., POMI WRAP 8 and WRAP 2 systems).

¹ <https://www.teknologisk.dk/projekter/strawsilage-ensilering-af-halm-til-biogas/42466>

- Optimization of additive application in straw ensiling. While the tested additives were not needed, the methods developed in the project are suitable for implementation should other more promising additives be made available in the future.
- **Added Value:** Manufacturers gain access to new markets by catering to the growing demand for straw ensiling solutions. They can capitalize on the clear need for efficient and reliable wrapping systems, as well as tailored additives that improve product consistency and storage stability.

4. Target Group: Policy Makers and Sustainability Advocates

- **Solution:** Documentation of the environmental and economic benefits of using ensiled straw in biogas plants.
- **Added Value:** The project demonstrates that ensiled straw can serve as a sustainable alternative to maize in biogas production, reducing land-use conflicts and enhancing the circular utilization of agricultural residues. This aligns with national and EU-level goals for renewable energy and carbon reduction.

5. Target Group: Biogas Plant Designers and System Integrators

- **Solution:** Guidelines for designing feed-in systems compatible with ensiled straw.
- **Added Value:** Ensiled straw's improved handling characteristics and higher methane yield can be leveraged to optimize biogas plant operations. System integrators can market these improvements to plant operators as part of new installations or retrofits.

The project has been disseminated to a broad audience through presentations at conferences, articles in journals & trade papers, posts on social media (LinkedIn) as well as on the homepage of the project. Furthermore, several videos have been created, which are available on youtube.com. For further information see appendices.

6. Utilisation of project results

The technological results obtained in the Strawsilage project provide a solid foundation for future development and use by various stakeholders in the biogas and agricultural sectors. Optimization of straw ensiling technology brings valuable knowledge to farmers, contractors and biogas plant operators. Farmers and agricultural contractors will be able to adopt these technologies to produce higher-quality ensiled straw, ensuring a stable supply of feedstock for biogas plants. Biogas plant designers and equipment manufacturers will integrate the findings into the design of feed-in systems and wrapping machinery to improve compatibility between ensiled straw and biogas plant needs. The project demonstrated the importance of airtight wrapping to minimize spoilage and dry matter loss. This knowledge will be applied by farmers, contractors and equipment manufacturers to ensure better storage solutions for biomass.

POMI could potentially commercialize the wrapping technology (e.g., POMI WRAP 8 & 2 similar) to agricultural contractors and biogas plant operators. This includes the development of specialized machinery for tightly stacking and wrapping straw bales. An interest from the industry would be needed to push this development. The findings also open opportunities for additive manufacturers to refine or develop new ensiling additives for straw-specific applications, even if the current results showed limited effects.

With further development, the findings of the project will enable farmers to generate revenue by selling wet straw that otherwise would have been discarded or incorporated into the soil. The economic models developed in the project can contribute with assessment of economic feasibility.

The project has not yet directly led to increased turnover, as many of the technological solutions are still in early stages of adoption. However, the project partners expect a significant increase in turnover as ensiled straw becomes an established biomass feedstock in the biogas industry. The wrapping technologies and associated equipment (e.g., POMI WRAP 2) have export potential in regions with large-scale biogas industries, such as Germany, the Netherlands, and Eastern Europe, where straw is underutilized. Thus, in the long term new jobs are expected to be created in straw handling, wrapping, and transport services. Additionally, equipment manufacturers will require additional labor to produce and service the new machinery.

The STRAWSILAGE project aligns closely with national and EU energy policy objectives by:

1. **Enhancing Renewable Energy Production**

- By improving the methane yield of straw, the project contributes to increasing the overall biogas output, supporting the transition to renewable energy sources.

2. **Reducing Emissions**

- The project promotes the utilization of straw, which would otherwise decompose or be burned, releasing greenhouse gases. Additionally, the use of ensiled straw in biogas plants helps reduce methane emissions from untreated agricultural residues.

3. **Supporting Circular Economy Principles**

- The project enables the use of second-grade straw as a valuable feedstock, ensuring better resource utilization and reducing waste.

In conclusion, the STRAWSILAGE project has demonstrated strong potential for technological and commercial impact, addressing key challenges in the biogas industry while contributing to energy policy objectives and sustainability goals. As adoption increases, the project results are expected to catalyze significant economic and environmental benefits.

7. Project conclusion and perspective

The market for straw-based biomass is growing as biogas plants seek alternatives to e.g. maize due to sustainability concerns and policy changes. Ensiled straw is positioned as an affordable and efficient alternative feedstock. The Strawsilage project successfully demonstrated that ensiling of wet straw is a viable biological pre-treatment method for biogas production, achieving a 15-20% increase in methane yield after 6-10 months of ensiling compared to untreated straw. The optimal results were achieved with straw moisture content of 30-35%, and the project validated that pre-cutting during baling significantly improved handling characteristics at biogas plants. The development and testing of the POMI Wrap 8 system consisting of ensiling treatment and baling provided a practical solution for efficient large-scale wrapping of straw bales utilizing less plastic wrapping than traditional single-bale wrapping, although efficient ensiling was not achieved. The WRAP 2 system was tested to a lesser extent but is deemed by the consortium to be the most promising in terms of ease of handling as well as ensuring sufficient airtightness of the wrapping, which in turn will give the best ensiling results.

While silage additives showed limited additional benefits, the project identified that successful ensiling primarily depends on proper moisture content and airtight storage. The economic analysis revealed that ensiled straw in bales is cost-competitive with other biomass sources, offering biogas plants a sustainable alternative to maize silage while providing farmers and contractors with new revenue opportunities from previously unused wet or second-grade straw. The technology developed through the project provides a foundation for improved straw utilization in the biogas sector, contributing to both renewable energy goals and circular economy principles.

8. Appendices

- List of dissemination activities (in Danish)
- Technical report (in Danish)

Oversigt over formidlingsaktiviteter i StrawSilage-projektet

Artikler og posts

TIs hjemmeside 13/10 2020: Beskrivelse af projektet og igangsatte aktiviteter.

<https://www.teknologisk.dk/strawsilage-ensilering-af-halm-til-biogas/42466>

Udsendt med TIs nyhedsbrev til agro- og fødevarerindustrien 22/10 2020.

Engelsk projekthjemmeside 9/3 2023

<https://www.dti.dk/projects/strawsilage-silage-of-straw-for-biogas/44814>

LinkedIn-post 19/10 2020: Kort beskrivelse af projektet og link til projektside på TIs hjemmeside.

https://www.linkedin.com/posts/s%C3%B8ren-ugilt-larsen-a461569_teknologisk-au-mkjeldal-activity-6723866494071033856-4-cw

Ensilering af halm til biogas: Så er EUDP-projektet StrawSilage godt i gang. Vi skal undersøge mulighederne for at presse og ensilere fugtig/våd halm i baller, der wrappes med et videreudviklet POMI-system. Ensileringen skal fungere som en biologisk forbehandling af halmen, der kan øge metanudbyttet og modvirke dannelse af flydelag, når halmen bruges i biogasanlæg.

Læs om projektet og de første aktiviteter her: <https://lnkd.in/emVgf6q>

[#teknologisk.dk](#) [#AU](#) [#MKjeldal](#) [#DM&E](#) [#POMI](#) [#Skinnerup](#) [#Stenhøjgaard](#) [#AU](#)-Vindmøller
[#biogas](#) [#halm](#) [#biomasse](#) [#halmleverandører](#)



Artikel i Maskinbladet 30/10 2020, nr. 654, s. 23.

Kjeldal, M. (2020). Ny metode gør halmen mere egnet til biogas. Maskinbladet, nr. 654, s.23.

<http://publikationer.fbg.dk/Maskinbladet/?page=22>

Nyhed på Danske Halmleverandørers hjemmeside 20/11 2020 med link til projektsiden på TIs hjemmeside:

<https://www.danskhalm.dk/nyheder-2020/ensilering-af-halm-til-biogas>

ENSILERING AF HALM TIL BIOGAS

20.11.30

Der er gang i flere test af ensilering af halm til biogas. Det ene er en storskala test, hvor leverandører og et biogasselskab er gået sammen om at ensilerer nboget halm fra høsten 2020. Det andet er et projekt, med Teknologisk som projektleder.

Den praktiske test foregår med halm fra Halmselskabet Danmark, Frandsbjerg Energy og Halm80. Halmen er i høsten 2020 pakket ind i pølser både med og uden ensileringsmiddel. Halmen skal i løbet af vinteren levers til et Nature Energy biogasanlæg. Når projektet har resultater, vil de formidles her og i vores foreningsblad.

Det andet forsknings- og udviklingsprojekt er ligeledes sat igang i 2020. Her skal der over de næste tre år udvikles en biologisk forbehandlingsmetode for halm til biogas. Det projekt har en række deltagere og herunder Mogens Kjeldal, som Danske Halmleverandører arbejder tæt sammen med. [Læs mere om projektet.](#)

LinkedIn-post 2/2 2021: På 'Landbrug og Bioressourcer – Teknologisk Institut'

[\(22\) Post](#) | [Feed](#) | [LinkedIn](#)

– Hvis den våde halm kan presses, ensileres og udnyttes til biogas, så vil det være en fordel for biogasproducenterne men også for landmænd og halmleverandører, der derved får en alternativ anvendelse af halmen. Og ikke mindst en mulighed for at udnytte halm, som ikke kan presses tør nok til fx foder eller forbrænding, fortæller [Søren Ugilt Larsen](#), seniorspecialist på Teknologisk Institut og projektleder for EUDP-projektet StrawSilage.

Halm er en af de største biomasseressourcer i Danmark. Derfor kan der være økonomiske og klimamæssige fordele i at anvende halmen til biogasproduktion. I projektet vil vi bruge ensilering til at forbehandle halmen, så det er lettere at få gennem biogasanlægget, og så vi kan opnå et større udbytte af biogas.

Læs mere om EUDP-projektet bag her: <https://lnkd.in/dtGrdUg>

[#biogas](#) [#halm](#) [#klima](#) [#biomasse](#) [#landbrug](#)

Nyhed på TIs hjemmeside 28. januar 2022

[Våd halm kan blive en værdifuld ressource i biogasproduktionen - Teknologisk Institut](#)

Post på LinkedIn 1/2 2022

https://www.linkedin.com/posts/landbrug-og-bioressourcer_v%C3%A5d-halm-kan-blive-en-v%C3%A6rdifuld-ressource-activity-6894157377113862144-FZO9

I AgroTechs Nyhedsbrev 1/4 2022

Halm til biogas. Med link til projektsiden på TIs hjemmeside.

LinkedIn-post 1/7 2022 på 'Landbrug og Bioressourcer – Teknologisk Institut': Film vedr. ensileringsforsøg

https://www.linkedin.com/posts/landbrug-og-bioressourcer_det-er-vigtigere-end-nogensinde-f%C3%B8r-at-satse-activity-6948500867390058497-BFRO?utm_source=linkedin_share&utm_medium=member_desktop_web

Delt via Søren Ugilt Larsens LinkedIn-profil 1/7 2022.

Film ligger også på YouTube på kanalen 'Teknologisk Institut – Markforsøg':
Kort udgave med undertekster (2.59) [EUDP projekt: StrawSilage kort video - YouTube](#)
Lidt længere udgave (3.48): [EUDP projekt: StrawSilage lang video - YouTube](#)

Filmen blev også formidlet i AgroTechs nyhedsbrev 14/7 2022 og 25/8 2022.

Artikel (online) på Landbrugsavisen Mark

Larsen, S.U. (2022). Presset, ensileret våd halm kan blive vigtig kilde til biogas. Artikel i Landbrugsavisen Mark, online 13/10 2022.

[Presset, ensileret våd halm kan blive vigtig kilde til biogas | LandbrugsAvisen](#)

LinkedIn-post 10/2 2023 på 'Landbrug og Bioressourcer – Teknologisk Institut': Film vedr. ensileringsforsøg i storskala

https://www.linkedin.com/posts/landbrug-og-bioressourcer_storskala-fors%C3%B8g-med-ensilering-af-v%C3%A5de-halmballer-activity-7029501601870438400-9Kdn?utm_source=share&utm_medium=member_desktop

Kommenteret af Søren Ugilt Larsen 10/2 2023

Artikel i Bioenergi Magasinet April 2023

Larsen, S.U. & Møller, H.B. (2023). Ensilering af halm øger metanudbyttet. Bioenergi Magasinet, April 2023, s.12-14.

Lagt på projektsiden 24/4 2023:

https://www.teknologisk.dk/_media/87326_Larsen%20%20M%20%20F8ller%202023%20Bioenergimagasinet%20April-2023%20s12-13-14.pdf

Beregningsmodeller på hjemmeside

Interaktive modeller lagt på projekthjemmesiden d. 13. januar 2025

[Snittevogn](#)

[Halmtransport](#)

[Finsnitter](#)

[Strawpack](#)

[Strawpack2](#)

Film

Film juni 2022

StrawSilage – Ensilering af halm til biogas

På youtube – lang udgave: https://www.youtube.com/watch?v=xmPZ_-QtP8s

På youtube – kortere udgave: <https://www.youtube.com/watch?v=BAIEUBBQHbw>

Film februar 2023

Storskalaforøg med ensilering af våde halmballer til biogas

På youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=DT55lt9HfEU>

Mundtlig formidling

Formidling ved indlæg m.m. efteråret 2020

Indlæg hvor Henrik Møller har omtalt projektet StrawSilage (Fra Henrik Møller 6/1 2021)

- INBIOM seminar d. 26. oktober 2020: Oversigt over teknologier til optimering af biogasproduktion, v./ Henrik B. Møller, Aarhus Universitet
- Seminar om grønne gasser den 3. november 2020. DGF's virtuelle seminar om grønne gasser, som streames tirsdag den 3. november fra kl. 13.00-15.30 fra Industriens Hus, H.C. Andersens Boulevard 18, 1553 København V: Nye trends i biogasudbygningen, v./ Henrik B. Møller, Aarhus Universitet
- Biogas Danmark Konferencen d. 9. december 2020: Ny viden om forbehandling af halm og andre biomasser, v./ Henrik B. Møller, Aarhus Universitet

Formidling ved indlæg m.m. foråret 2021

Larsen, S.U. (2021). "Erfaringer med brug af halm til biogas". Webinar: Halm til biogas, 25/5 2021. Virtuelt seminar gennemført Food & Bio Cluster Denmark. Ca. 45 tilhørere. StrawSilage omtalt i indlægget.

Formidling ved indlæg m.m. efteråret 2022

Ward, A.J., Møller, H.B. & Larsen, S.U. (2022). Ensiling of straw as a pretreatment and storage method for biogas production. Præsentation på: 27th Congress of The Nordic Association of Agricultural Science – NJF, 2022 – Onward in Agriculture! Reyjavik, Iceland, 28/9 2022.

Møller, H.B. (2022). Halm til biogas
Indlæg på Biogasscenen på Agromek, Herning Messecenter, 1/12 2022.

Ward, A.J. Ensiling of straw as a pretreatment and storage method for biogas production. Advances and Innovations in Agricultural Engineering. The 4th NJF - EurAgEng - Agromek Joint Seminar, Herning, November 2022. <https://www.nmbu.no/forside/agromek>

Formidling ved indlæg m.m. 2024

Besøg (26/9-2024): Fransk delegation besøger Foulum biogasanlæg (AU) og introduktion til projekter og resultater med halm. (14 personer)

Besøg (24/10-2024): Nordisk biogasdelegation besøger Foulum biogasanlæg (AU). Introduktion til projekter og resultater med halm. (55 personer)

Presentation.2024. New technologies for next generation biogas based on lignocellulosic biomass. Nordic Biogas Conference, Aalborg, 22-24 October 2024. No proceedings available.

Poster: Measuring anaerobic degradation at a wide range of temperatures using fibre bags. Nordic Biogas Conference, Aalborg, 22-24 October 2024. No proceedings available.

Publikationer

Søren Ugilt Larsen, Nicolaj Ma, Svend Vendelbo Nielsen, Alastair James Ward, Henrik Bjarne Møller:
The impact of water content and additives on ensiling and methane yield of cereal straw,
Bioresource Technology Reports, 24 (2023) 101672

Jared Onyango Nyang'au, Henrik Bjarne Møller, Søren Ugilt Larsen, Peter Sørensen:
Brown juice assisted ensiling of straw and press cake for enhanced biogas production and nutrient availability in digestates, *Environmental Technology & Innovation*, 32, (2023) 103248

Søren Ugilt Larsen, Henrik Bjarne Møller:
Baling and ensiling of wet cereal straw as combined storage and pretreatment for biogas production, *Biomass and Bioenergy*, 187 (2024) 107294



TEKNOLOGISK
INSTITUT

StrawSilage



Halmensilage – ensilering som en kombineret forbehandling og lagring af halm til biogasproduktion

Kurt Hjort-Gregersen, Teknologisk Institut

Mogens Kjeldal, Mkjeldal

Henrik B. Møller, Århus Universitet

Poul Mikkelsen, POMI Industri ApS

Thomas Kristensen, Danske Maskinstationer og Entreprenører

Gerth Pedersen Holm, Danske Maskinstationer og Entreprenører

Natanya M. L. Hansen, Teknologisk Institut



Indholdsfortegnelse

1. Baggrund, formål og indledning	3
2. Udvikling og test af ensilering i laboratorieskala.....	4
2.1 Resultater	5
2.2. Konklusion på laboratorieforsøg	11
3. Udvikling og test i fuldskala af ensilering af våd halm.....	11
3.1 Test af forskellige ensileringsmidler	13
3.2 Resultater	14
3.3 Systemer til wrapping af halmen.....	18
3.4 Konklusion på markforsøg	20
4. Ensilering af våd halm.....	21
4.1 Presning og sammenkørsel af halm til ensilering i Skinnerup	21
4.2 Indpakning af halm i 2022 v. Skinnerup	22
4.3 Indpakning af halm 2024 hos I/S Mikkelsen.....	23
5. Test af ensileret halm i biogasanlæg	25
5.1 Test af ensileret halm i biogasanlægget ved Skinnerup Maskinstation	25
5.1.1 Beskrivelse af biogasanlæg og indfødningssystem	25
5.1.2 Halmensilage til test i biogasanlægget i maj-juni 2022	26
5.1.3 Erfaringer med håndtering og indfødning af ensileret halm i testperioden maj-juni 2022	27
5.1.4 Målinger og registreringer ved brug af ensileret halm i biogasanlægget maj-juni 2022	29
5.1.5 Halmensilage til test i biogasanlægget i februar-april 2023.....	30
5.1.6 Erfaringer med håndtering og indfødning af ensileret halm i testperioden februar-april 2023....	32
5.2 Test af ensileret halm i biogasanlægget ved Ausumgaard.....	33
5.2.1 Beskrivelse af biogasanlæg og indfødningssystem	33
5.2.3 Halmensilage til test i biogasanlægget i maj 2022	35
5.2.4 Erfaringer med håndtering og indfødning af ensileret halm i testperioden maj 2022	36
5.3 Sammenlignende økonomiske scenarieanalyser.	38
5.3.1 Forudsætninger:	39
5.3.2 Diskussion	43
5.3.3 Konklusion for brugen af ensileret halm i biogasanlæg	44



1. Baggrund, formål og indledning

Den store udbygning af den danske biogassektor skaber behov for bæredygtige biomasseressourcer, især som supplement til gyllebaseret biogasproduktion. Her er halm under danske forhold en oplagt ressource, da der i øjeblikket findes 2-3 mio. ton halm, der ikke udnyttes men snittes og nedpløjes¹. Det overordnede formål med projektet er derfor at undersøge og udvikle ensilering som biologisk forbehandling af halm til biogasproduktion, som et energimæssigt og økonomisk effektivt alternativ til mekanisk forbehandling. Samensilering af halm med forskellige våde restbiomasser kan også øge både biogasudbyttet fra halm og udnyttelsen af andre restressourcer.

Formålet med projektet er at udvikle en biologisk forbehandlingsmetode for halm til biogasproduktion baseret på ensilering af våd halm i baller, der stables og indpakkes i plast. Ensileringen af halm ventes dels at give et større methan udbytte af halmen og dels at reducere halmens tendens til at danne flydelag og være vanskeligt at pumpe og omrøre i biogasanlægget. Desuden er målet at øge værdien af fugtig 2. klasses halm og at udnytte muligheden for også at kunne presse halm i perioder med våde forhold.

Projektet vil undersøge betydning af vandindhold, ensileringsmidler, ensileringsvarighed m.m. for biogasproduktionen, og tekniske løsninger til presning og wrapping af våd halm vil blive udviklet og testet i pilotskala og storskala.

Konceptet vil understøtte gyllebaseret biogasproduktion i Danmark ved at gøre halmressourcen brugbar som supplerende biomasse i biogasanlæg. Dette vil have en positiv klimaeffekt ved at reducere emissionen af methan fra gylle og ved at øge den samlede energiproduktion fra både gylle og halm. Endelig vil det have positive økonomiske effekter både for biogasanlæg og halmleverandører samt maskinstationer og vognmænd m.fl. i værdikæden fra mark til biogasanlæg.

Projektet omfatter en stor del forskning for at undersøge og optimere grundlæggende mekanismer for halmensilering og anvendelse af ensileret halm i biogasproduktion samt udvikling og praktisk implementering og demonstration.

De vigtigste mål for projektet er:

- a. At øge methanproduktionen og det samlede udbytte af halm med mindst 30% ved at bruge ensilering som forbehandling.
- b. At øge den mulige belastning af halm i biogasreaktorer og øge det maksimale tørstofindhold uden risiko for dannelse af et flydende lag og reduceret pumpbarhed.
- c. At optimere forbehandlingseffekten af ensilering af halm, f.eks. ved optimering af fugtindhold, partikelstørrelse, tilsætning af forskellige typer og doser af ensilagetilsætningsstoffer (mælkesyrebakterier, syre, brun juice mv.) og ensileringsvarighed.

¹ <https://www.statbank.dk/HALM1>



- d. At optimere og øge fleksibiliteten i halmværdikæden ved produktion af to halmpressede produkter; halmensilage til biogasproduktion balles i fugtige perioder og om muligt lige efter mejetærskeren eller i dug om aftenen. Tørt halm til forbrænding presses i tørre perioder.
- e. At udvikle og teste et system (POMI WRAP 8) til tæt stabling og lufttæt indpakning af våde halmballer til ensilering til udendørs opbevaring.
- f. At analysere den økonomiske effekt af konceptet med ensilering af halm til biogasproduktion for hele værdikæden fra mark til biogasproduktion.

2. Udvikling og test af ensilering i laboratorieskala

Indledningsvist blev der foretaget en undersøgelse af de grundlæggende faktorer, der påvirker ensilering af våd halm, og virkningerne af ensilering. Der blev udført ensileringsforsøg i laboratorieskala med ensileringsadditiver udført af Teknologisk Institut og AU. Efterfølgende blev der gennemført analyser af ensileringsens effekt på biomassensammensætning og methanudbytte. Dette arbejde blev udført af AU. Der blev gennemført analyser både i batch og kontinuerte reaktorer. Endelig blev der på AU arbejdet med udvikling af en metode til in-situ analyse af biomassenedbrydning i biogasanlæg.



Våd halm pakket i vakuum poser for ensilering i hhv. 3, 6 og 10 måneder

Der blev udført en række forsøg med ensilering i lab-skala med halm fra vinterhvede og vårbyg. Der blev udført forsøg med både grovsnittet og finsnittet (Haybusted)



Effekten af vandindhold (15, 20, 25, 30, 35 og 50%) blev testet ligesom en række additiver blev undersøgt. Følgende additiver blev anvendt:

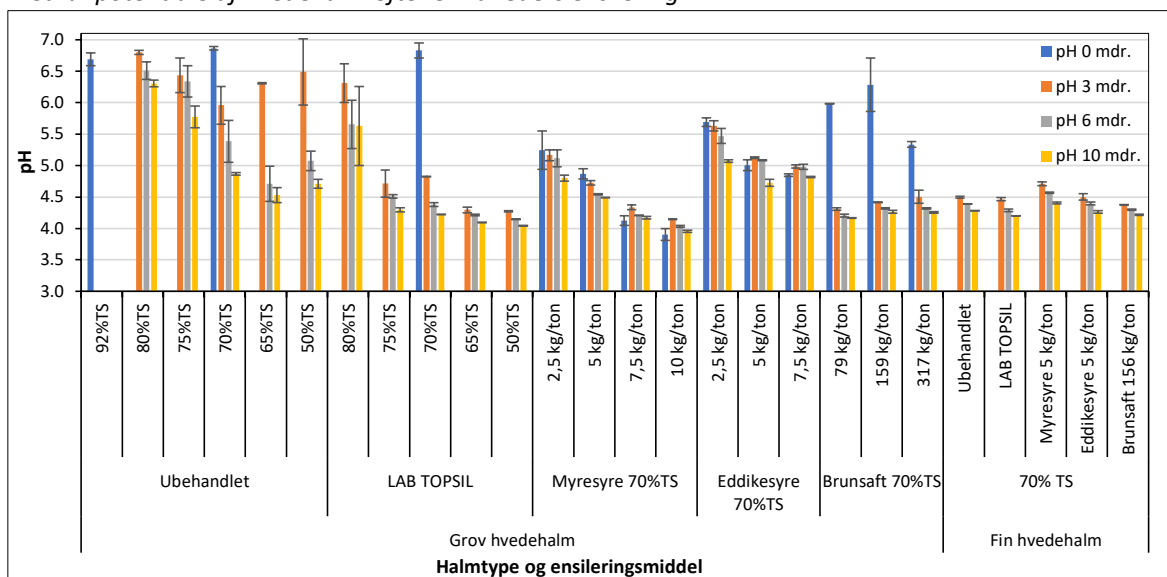
- Ensileringsmidler i form af Mælkesyrebakterier (LAB-TOPSIL-behandling):
 - *Lactobacillus plantarum* DSMZ 16627 / 1k20749: 75,0*10⁹ CFU²/g
 - *Pediococcus acidilactici* NCIMB 30005 / 1k21013: 37,5*10⁹CFU/g
 - *Lactobacillus paracasei* NCIMB 30151 / 1k20748: 37,5*10⁹ CFU/g
- Myresyre (78%), 0, 2½, 5, 7½, 10 kg/ton FW³
- Eddikesyre (70%), 0, 2½, 5, 7½ kg/ton FW
- Brunsaft (fra AU), 79, 159, 317 kg/ton FW

De anvendte ensileringsstider var hhv. 0, 3, 6 og 10 måneder

Der blev observeret et fald i pH under ensileringen af byg og hvedehalm. Findeling fremmede ensileringshastigheden og fald i pH. Endvidere skete der en positiv effekt på ensileringshastigheden ved anvende af LAB, syre og brunsaft. Vandindholdet er ligesom af afgørende betydning og med mindre end 30% opnåes der ikke en effektiv ensilerings proces.

2.1 Resultater

Methanpotentiale af hvedehalm efter 3 måneders ensilering

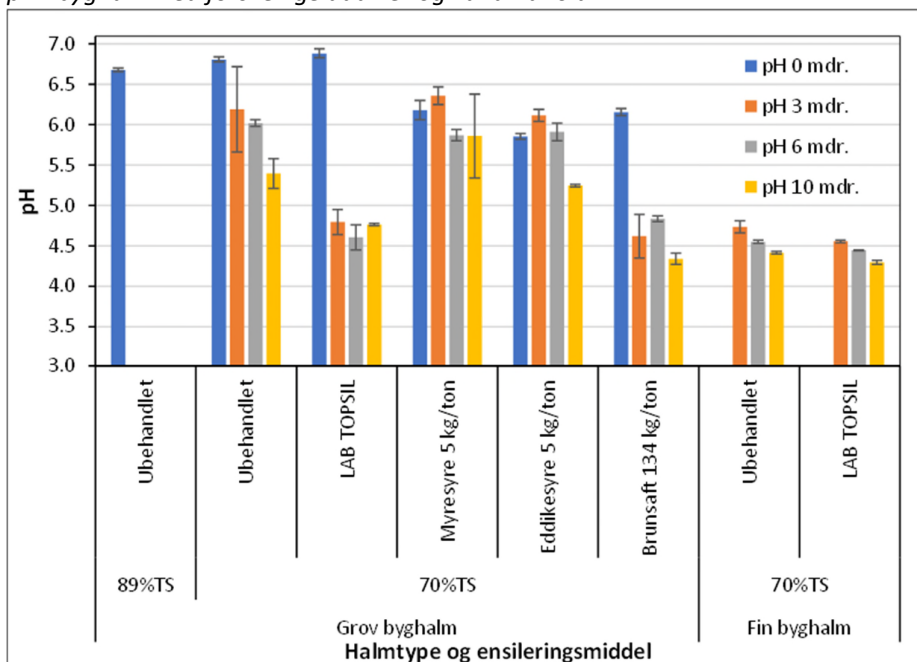


² CFU: Colony Forming Units

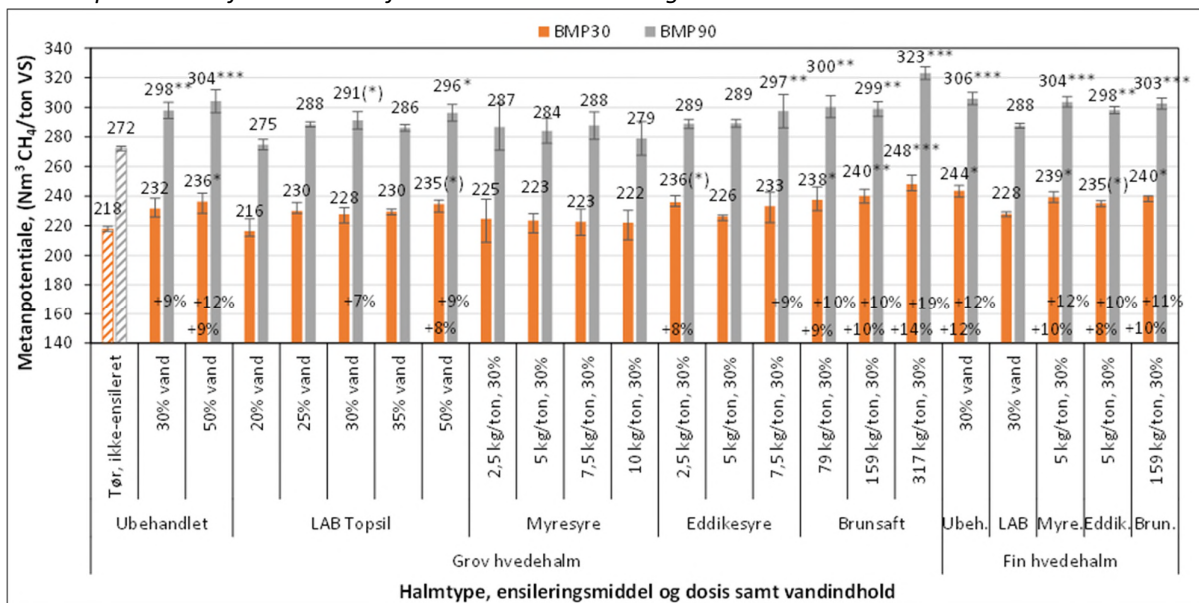
³ FW: Fresh Weight



pH i byghalm ved forskellige addiver og vandindhold



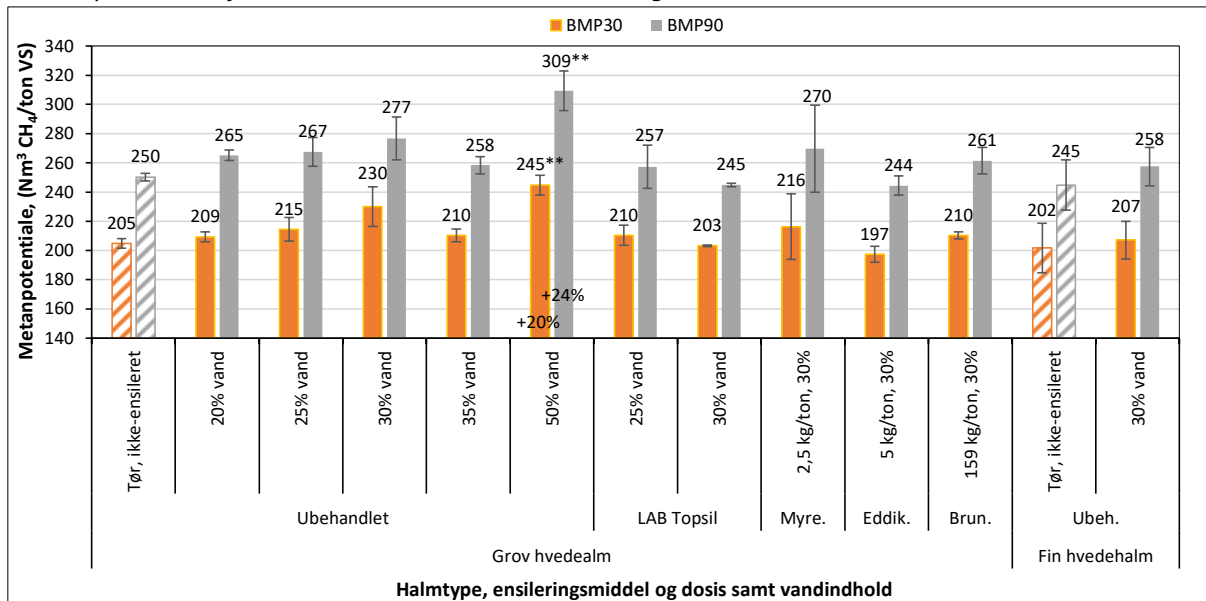
Methanpotentiale af hvedehalm efter 3 måneders ensilering



Efter 3 måneders ensilering ses en effekt af vandindholdet samt en yderligere effekt af findeling og brunsaft. Der ses dog ingen statistisk sikker effekt af LAB-TOPSIL, myresyre og eddikesyre.

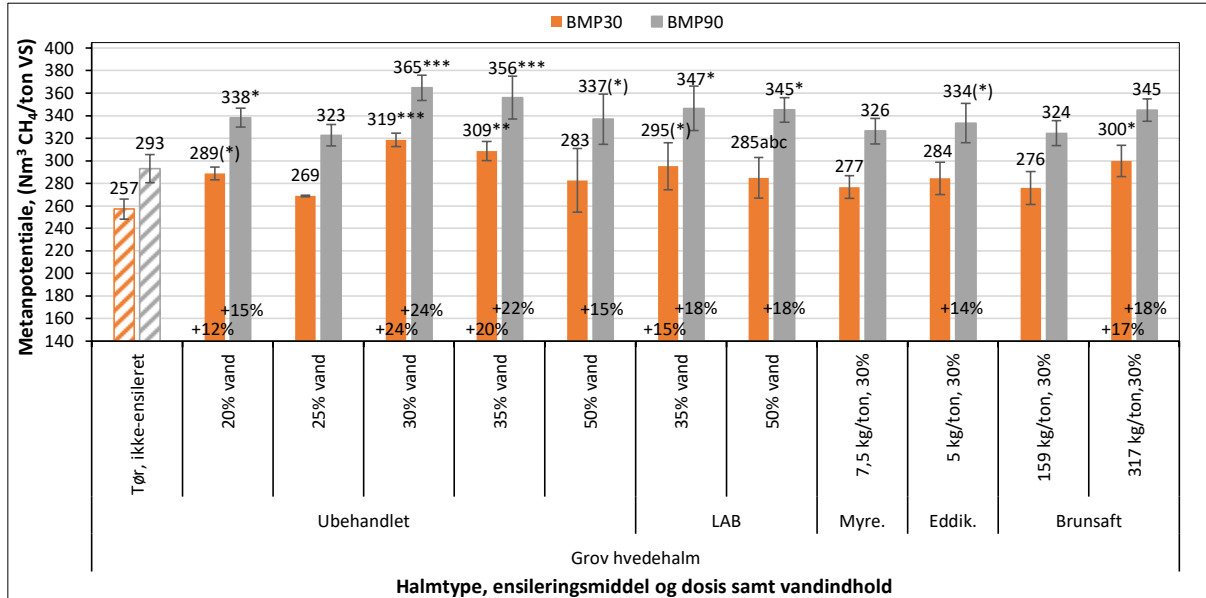


Methanpotentiale af hvedehalm ved 6 måneders ensilering.



Efter 6 måneders ensilering ses en effekt af vandindholdet men ingen ekstra effekt af ensileringsmidler (ref. 30% vand).

Methanpotentiale af hvedehalm ved 10 måneders ensilering.

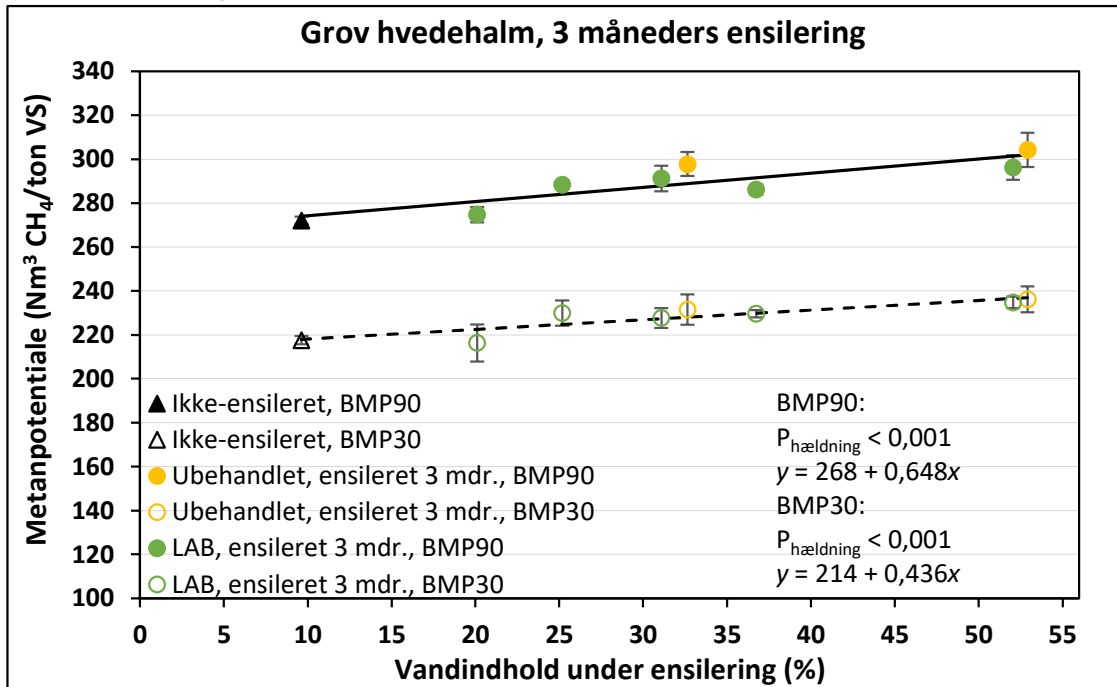


Efter 10 måneders ensilering ses en effekt af vandindhold, men ingen ekstraeffekt af ensileringsmidler (ref. 30% vand).

Det fremgår at methanpotentialet stiger med stigende vandindhold efter 3 måneders ensilering, men der er ingen forskel mellem ubehandlet og LAB-behandlet.

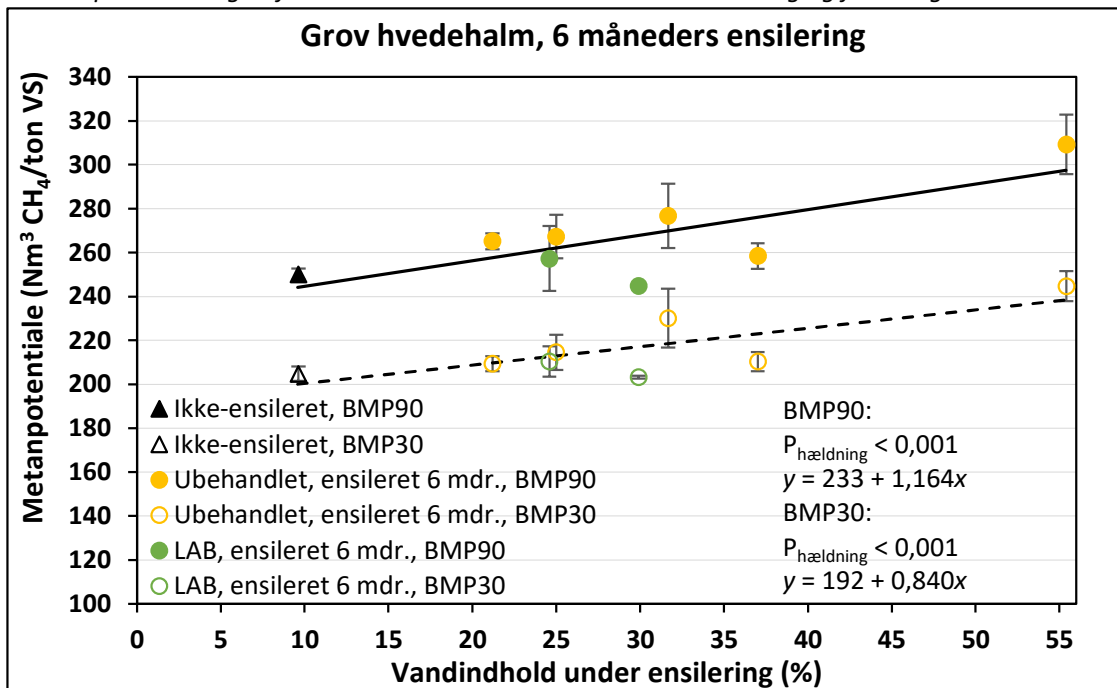


Methanpotentiale i grovformalet hvedehalm ved 3 måneders ensilering og forskellige vandindhold efter 3 måneders ensilering.



Det fremgår at methanpotentialet stiger med stigende vand efter 6 måneders ensilering, men der er ingen forskel mellem ubehandlet og LAB-behandlet.

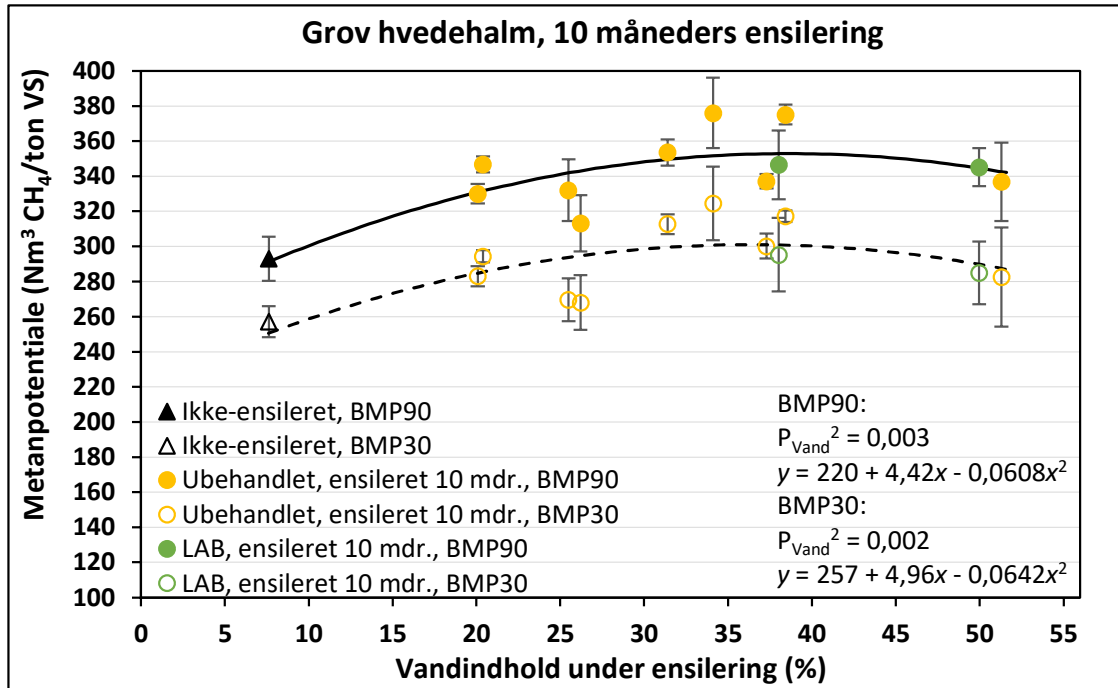
Methanpotentiale i grovformalet hvedehalm ved 6 måneders ensilering og forskellige vandindhold





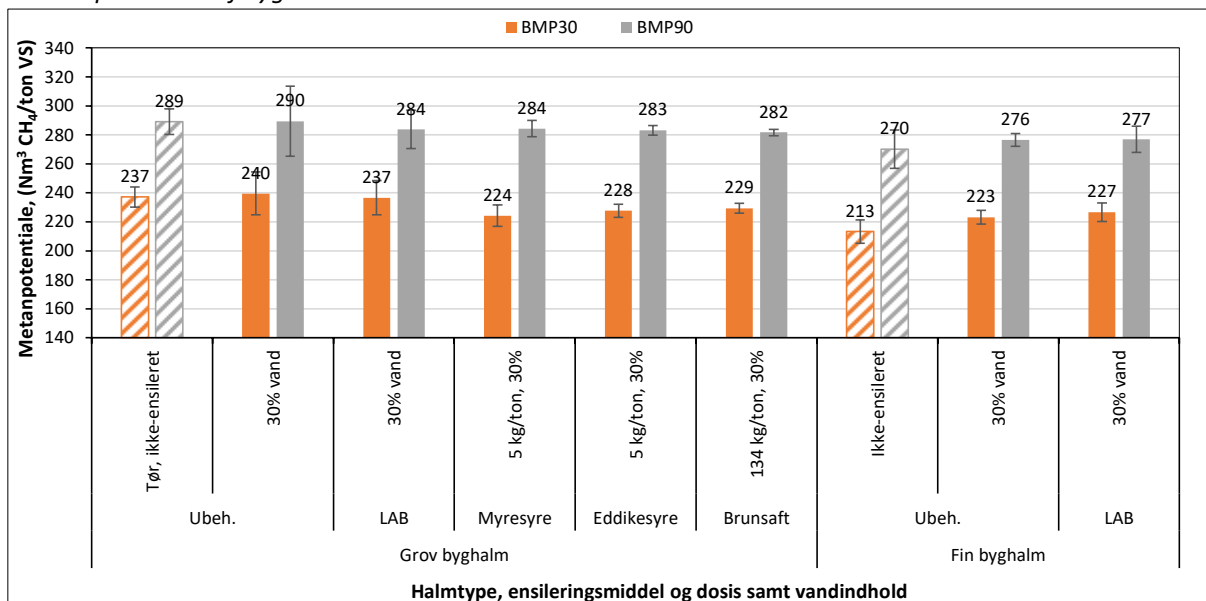
Efter 10 måneders ensilering (se nedenstående figure) fremgår det, at methanpotentialiet stiger med stigende vandindhold men kun indtil 35% vand. Højere vandindhold viser en faldende tendens.

Methanpotentialie i grovformalet hvedehalm ved 10 måneders ensilering og forskellige vandindhold



Efter 10 måneder er methanpotentialiet også højere ved højere vandindholdet i halmen, men forskellen er mindre markant ved 10 måneders ensilering end ved 6 måneders ensilering.

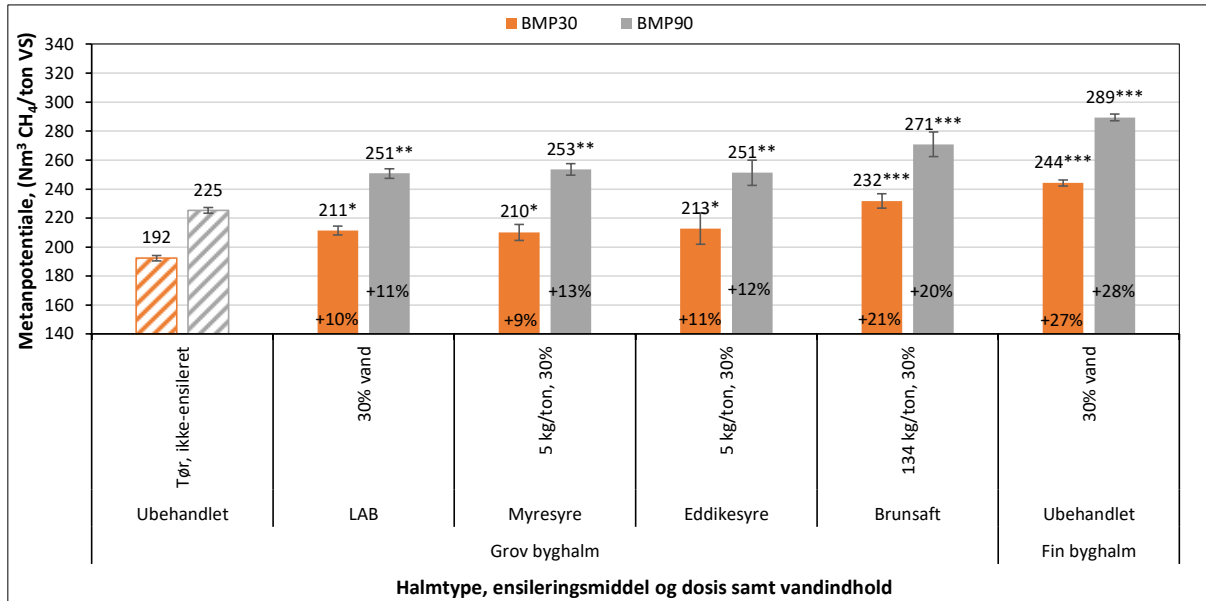
Methanpotentialie af byghalm ensileret i 3 måneder



For byghalm, der var ensileret i 3 måneder, blev der ikke fundet nogen effekt af ensileringen.

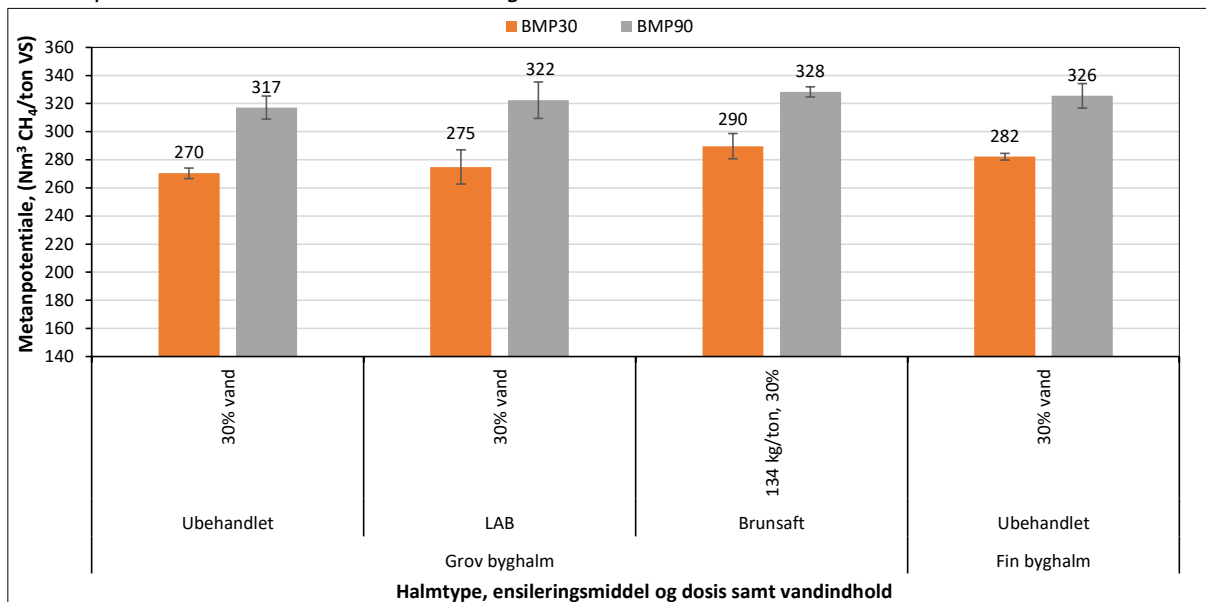


Methanpotentiale af byghalm ensileret i 6 måneder.



Efter 6 måneders ensilering blev der fundet en klar effekt af ensilering og findeling idet methanpotentialet for den findelte halm er signifikant højere.

Methanpotentiale ved 10 måneders ensilering



I dette forsøg var der ingen ikke ensileret reference, så selve effekten af ensileringen kan ikke måles. Men der var ingen forskel mellem behandlingerne.



2.2. Konklusion på laboratorieforsøg

Resultaterne gav anledning til følgende konklusioner:

- pH falder under ensilering af våd halm – men faldet fremmes af højt vandindhold og ensileringsmidler
- Der fandtes ofte højere methanpotentiale efter ensilering
 - Hvede: ~ 10% ekstra efter 3 mdr., ~15-20% efter 6-10 mdr. (i lab, lavere i baller)
 - Byg: Ingen effekt efter 3 mdr. ~10-20% efter 6 mdr.
- Methanpotentialet øges med stigende vandindhold under ensilering.
- Der var tegn på større effekt af ensilering på methanpotentialet efter 6-10 mdr.
- Der blev generelt fundet en lille ekstra effekt af ensileringsmiddel på methanpotentialet
- Der blev fundet nogen effekt af brunsaft på methanpotentialet, op til 6-7% ekstra ved 150 kg/t.
- Der blev fundet en positiv effekt af kaliumhydroxid på methanpotentialet ved 35% vandindhold, nemlig 3-15% ekstra gas.

3. Udvikling og test i fuldskala af ensilering af våd halm

Næste skridt var udvikling og test af fuldskala ensilering af våd halm. Udvikling af udstyr til udbringning af additiv og ballepresning af våd halm. Denne opgave blev varetaget i et samarbejde mellem M. Kjeldal, DM&E, TI, Skinnerup, Stenhøjgaard. Derefter blev der arbejdet med en ændring af POMI WRAP 7 til WRAP 8 og udvikling af grebssystem i et samarbejde mellem POMI, M. Kjeldal og DM&E. Sidst men ikke mindst blev der foretaget produktion af indpakkede og ensilerede baller. Dette arbejde blev udført i samarbejde mellem TI, Skinnerup, Stenhøjgaard, AU-Vindmøller og Pomi.



Oversigt over de forskellige ensileringsforsøg og efterfølgende test i biogasanlæg

ID	Presningsdato	Antal baller	Halmtype	Behandling	Ballevægt	Indpakning	Biogasanlæg	Testperiode Biogasanlæg
I	9/9 2020	24	Hvede	Forskellige, inkl. 15 m. brunsaft	350-550 kg	Enkeltwrappet	Ausumgaard	Maj 2022
II	19/8 2021	6	Hvede, byg, rug	Ingen	500-800 kg	Enkeltwrappet	Ausumgaard	Maj 2022
III	16/9 2021	60	Vinter-hvede	21 kg brunsaft pr. balle	Ca. 700 kg	POMI WRAP 2	Skinnerup Maskinstation	Maj-juni 2022
IV	16/9 2021	10	Hvede	Forskellige	Ca. 750 kg	Enkeltwrappet	Ausumgaard	Maj 2022
V	27/8 2022	124	Hvede	Eddikesyre	Ikke angivet	POMI WRAP 8	Skinnerup Maskinstation	Feb-apr 2023
VI	27/8 2022	28	Hvede	Myresyre	Ikke angivet	POMI WRAP 8	Skinnerup Maskinstation	Feb-apr 2023
VII	27/8 2022	5	Hvede	Kalium-hydroxid	Ikke angivet	POMI WRAP 8	Skinnerup Maskinstation	Feb-apr 2023
VIII	27/8 2022	59	Hvede	Ingen	Ikke angivet	POMI WRAP 8	Skinnerup Maskinstation	Feb-apr 2023
IX	24/8-2024	32	Havre	Ingen (fugtindhold 40-50%)	800-900 kg	POMI WRAP 8	Ej testet i projektet	



3.1 Test af forskellige ensileringsmidler



Spredning af eddikesyre med fladdyser (venstre). Spredning af LAB med gødningsdyser (højre).



Spredning af brunsaft- høj dosis (venstre). Spredning af brunsaft med fladdyser (højre).

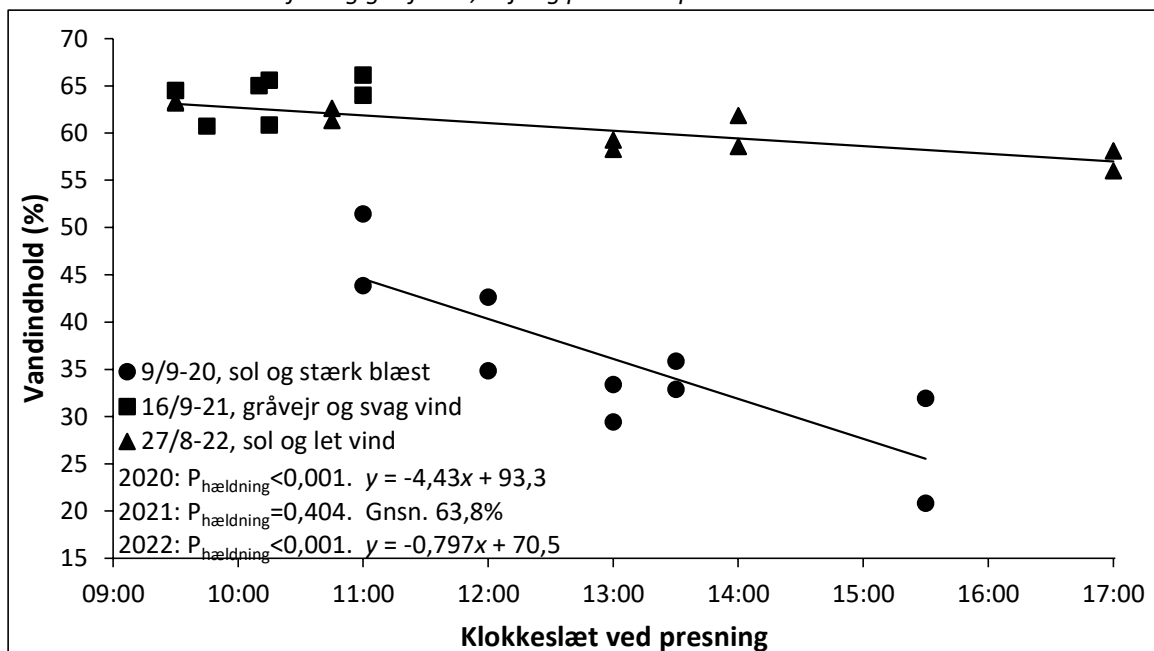


Dosering af additiver i marken (venstre). Enkeltwrap af mediballer (90 x 120 cm) (højre).



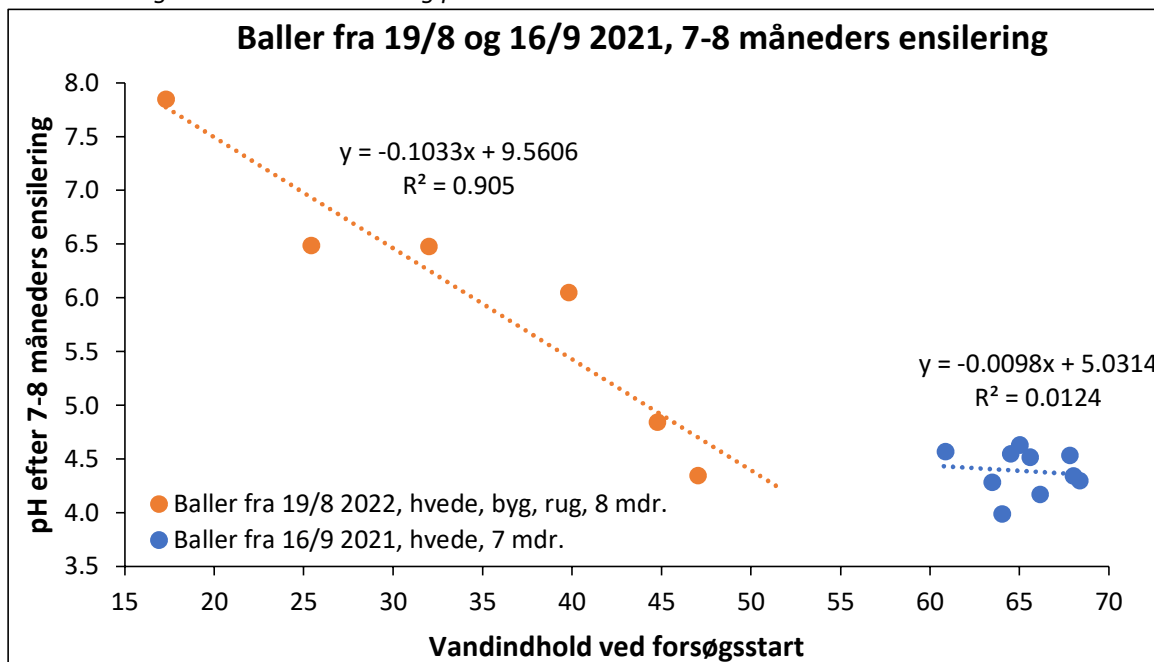
3.2 Resultater

Variation i vandindhold afhængigt af vind, vejr og pressetidspunkt



Det viste sig svært at styre vandindholdet under presningen, idet dette kan variere i løbet af dagen afhængigt af vejret

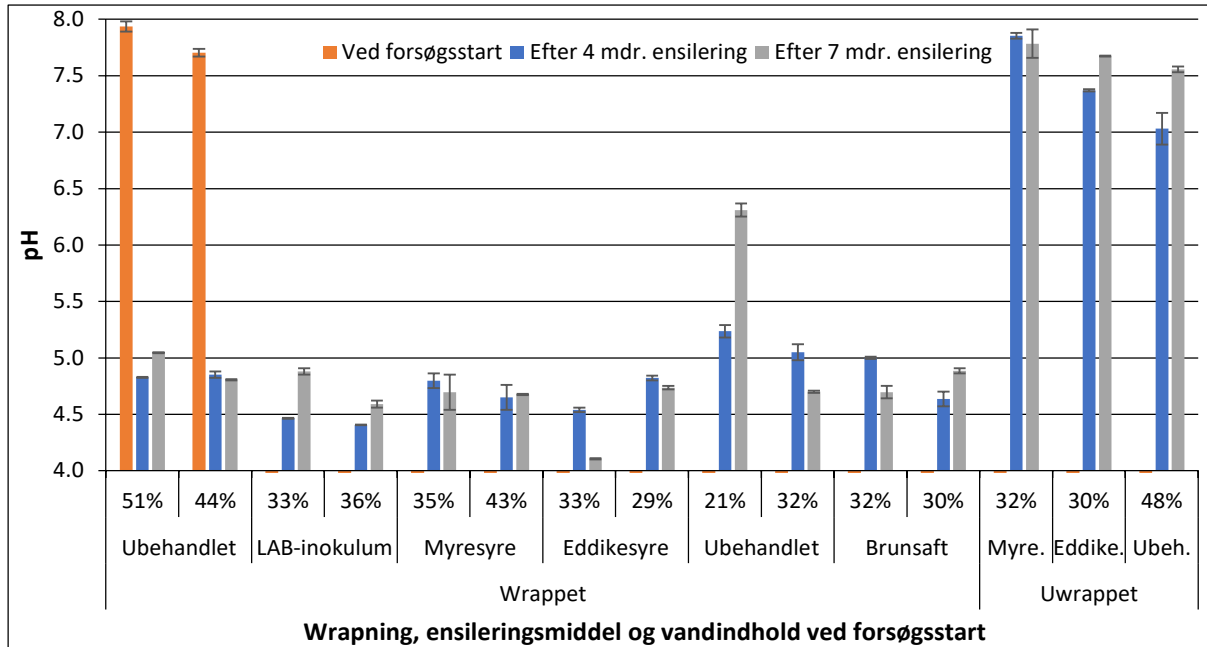
Sammenhæng mellem vandindhold og pH





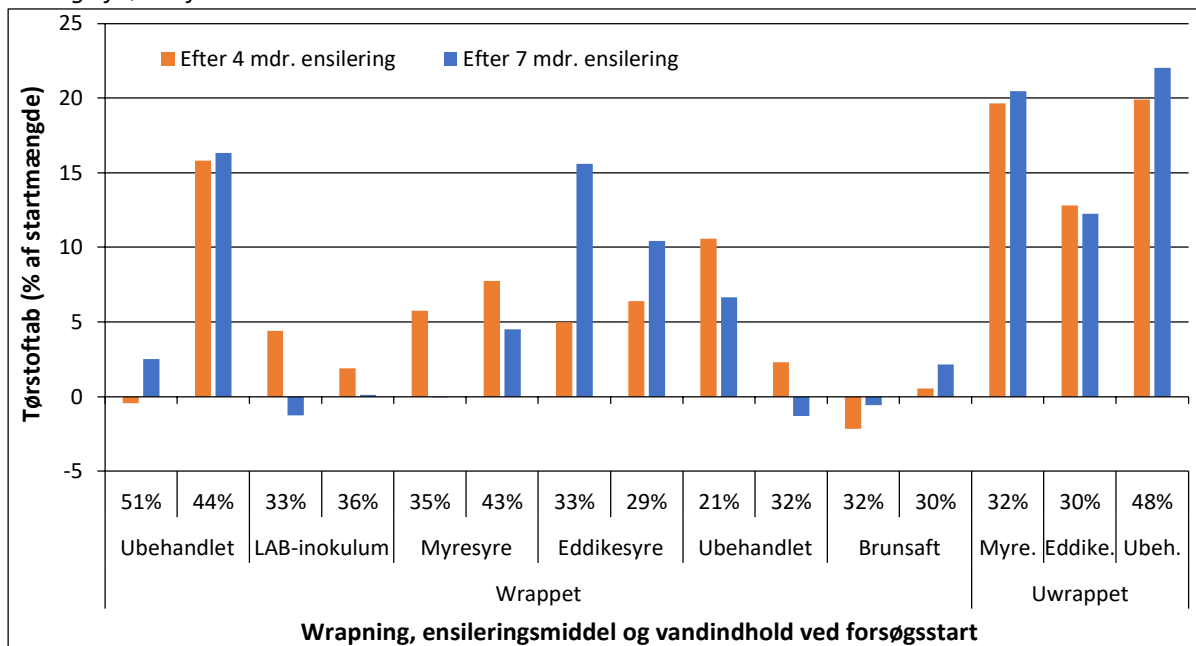
Laboratorieforsøgene viste, at der skal et vist vandindhold til for at opnå lavt pH ved ensileringen, hvilket blev bekræftet i markforsøgene.

pH målinger i ballerne



Der ses pH fald i alle ensileringsbehandlinger. Forsøgene viste ikke noget fald i pH i ikke-indpakket halm, hvilket vil medføre en kompostering og dermed kraftigt tørstof-tab, hvis halmen er våd.

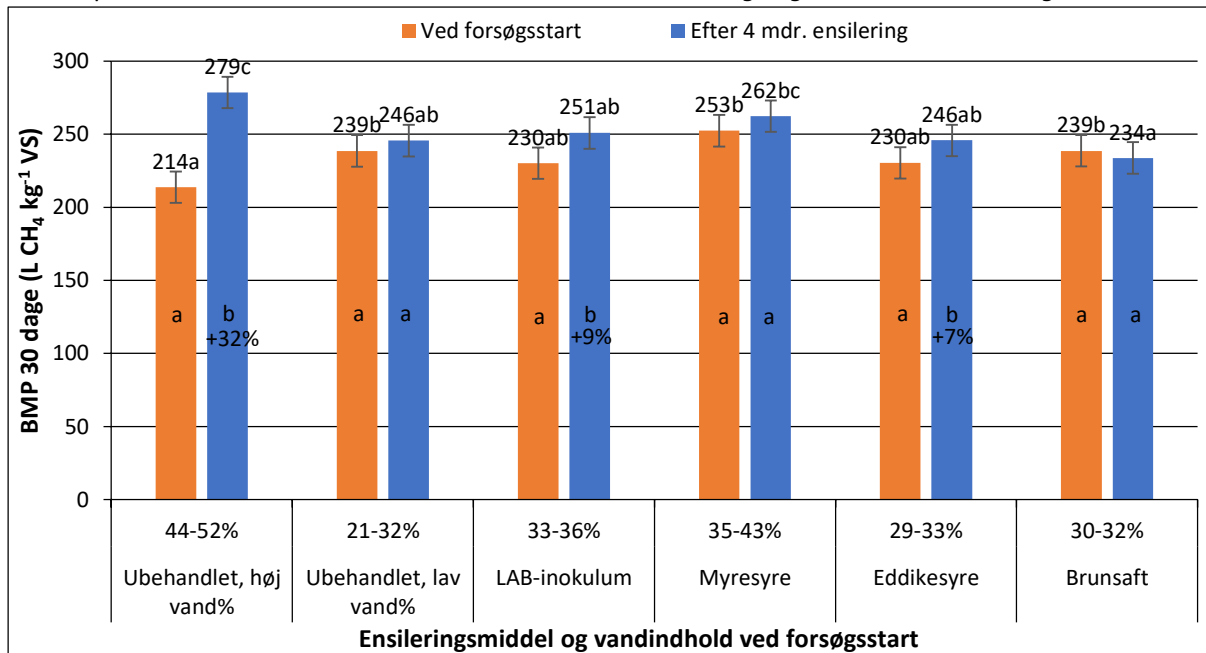
Måling af tørstof-tab





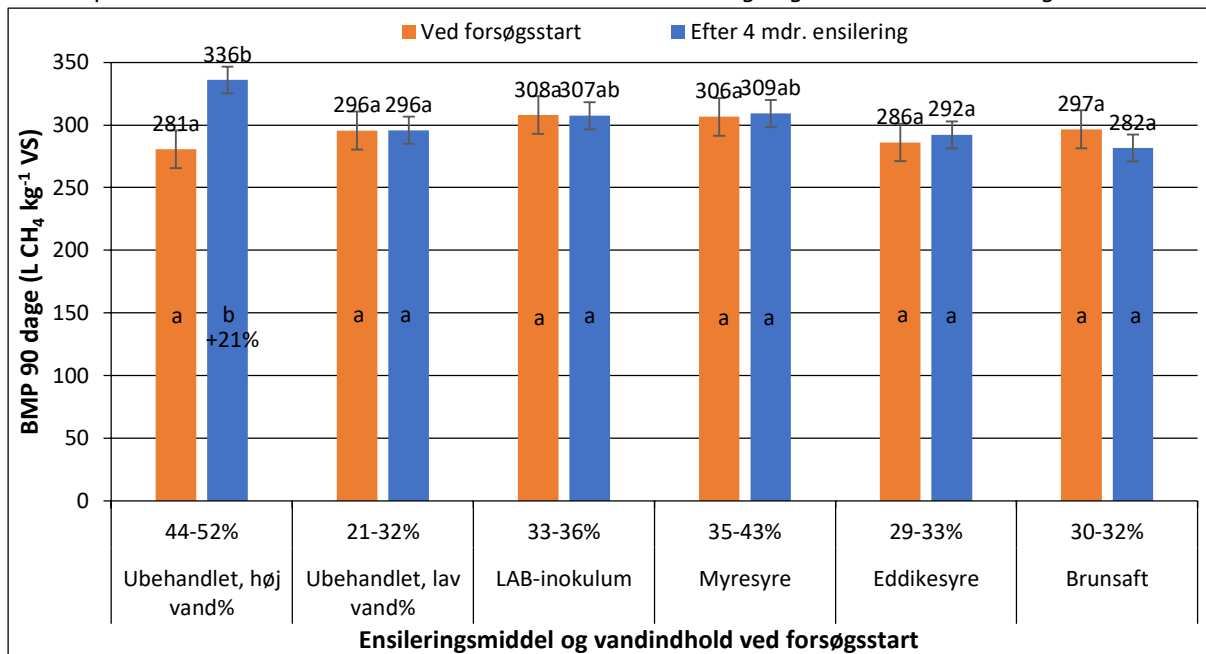
Der er nogen usikkerhed i disse målinger, men der blev i gennemsnit fundet et tørstofstab på 4,6 % i de wrappede baller og 18,3 % i ikke-wrappede baller.

Methanpotentialebestemmelser i behandlet hvedehalm ved 30 dage og 4 måneders ensilering



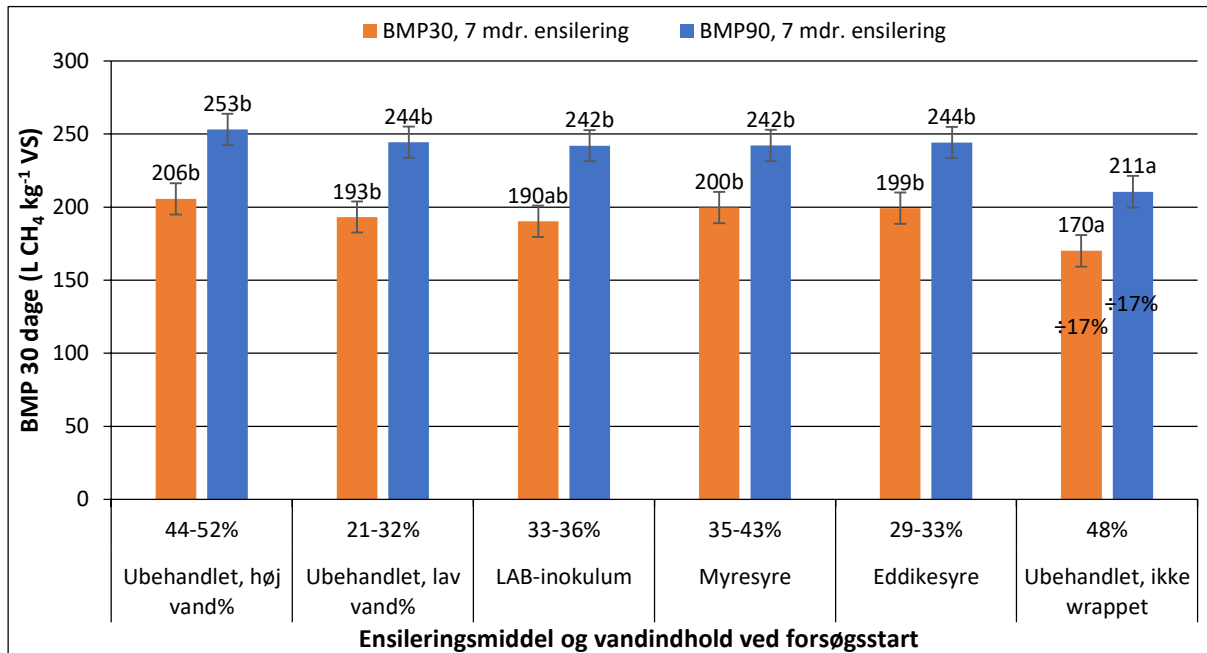
Det ses af ovenstående figur, at der stort set kun er en god effekt i prøven med meget højt vandindhold. Ved 90 dages opholdstid var billedet det samme, da der kun ses en positiv effekt af ensileringen i den meget våde prøve.

Methanpotentialebestemmelser i behandlet hvedehalm ved 30 dage og 4 måneders ensilering



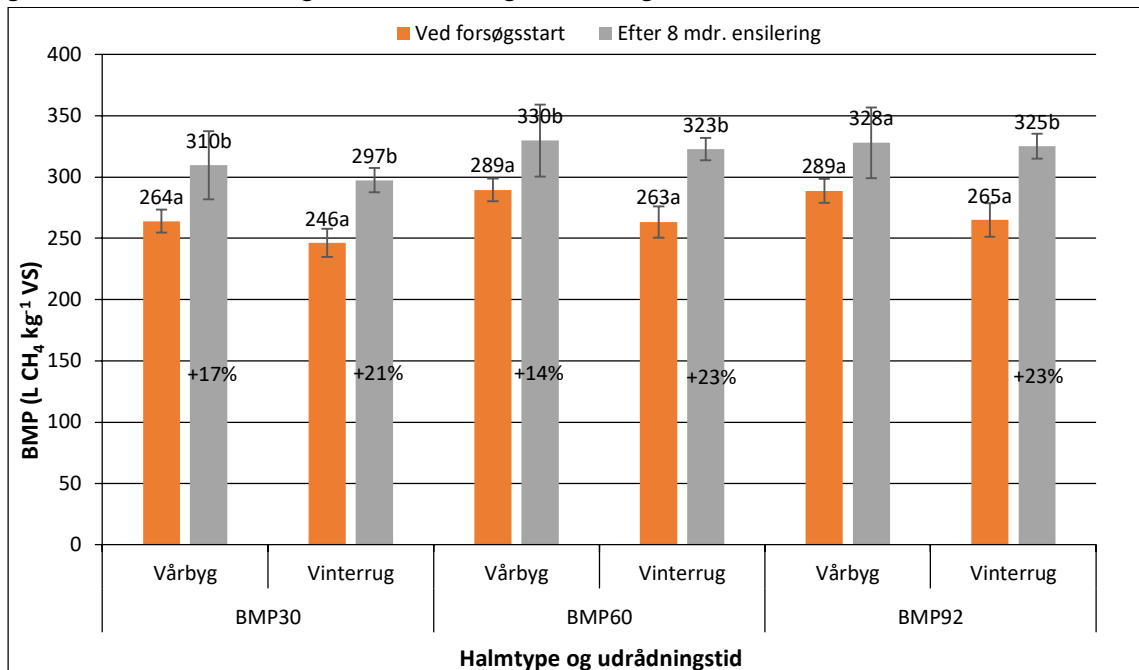


Der blev også gennemført en sammenligning af methanpotentialiet i indpakket halm i forhold til ikke indpakket halm, hvilket er vist nedenfor.



Tabet i methanpotentiale i ikke-indpakket halm blev opgjort til 17%.

Der blev gennemført analyser af methanpotentialiet i vårbygghalm og vinterrughalm, der indeholdt en del grøn biomasse, hvilket meget vel kan have øget ensileringseffekten.



Der blev fundet en markant stigning i methanpotentialiet for begge halmtypen på +18-19%



3.3 Systemer til wrapping af halmen



Enkeltwrappede baller blev åbnet på Ausumgaard.

Der blev observeret en generelt fin kvalitet af enkeltwrappede baller med lidt mug på overfladen, men ikke egentlig råd. Halmen var let at skille ad. Methanpotentialet var øget med 2-5%.



WRAP 2 Kombipakning af baller med brunsaft



Kombipakning (WRAP 2) bruger mindre plast end enkeltwrap

Plastforbrug ved enkeltwrap

103,9 meter á 0,34 kr./meter = 35,33 kr./balle

Plastforbrug ved WRAP 2

65,5 meter á 0,34 kr./meter = 22,27 kr./balle



Udpakning af kombiwrappede (WRAP 2) baller med brunsaft

Der var varmedannelse og megen råd langt inde i ballerne og i det meste af stakken. Der blev vurderet, at der var brugt for få lag plast, hvilket resulterede i en mindre effektiv ensilering. Dette reducerede methanpotentialet med 26-30 %

WRAP 8-systemet:

Der blev ensileret baller af våd halm med WRAP 8 fra POMI. Betegnelsen WRAP 8 dækker over, at der stilles 8 baller i en række, som så omvikles med plast. POMI udviklede et særligt greb, der tager 4 halmballer ad gangen, og kan presse dem sammen så de står helt tæt i stakken. Greben ses på billederne nedenfor.



Greb til WRAP 8-systemet, som blev udviklet i projektet



Ensilerings baller af våd halm ved brug af WRAP 8-systemet fra POMI.

Der blev presset og wrappet 216 midiballer med POMI WRAP 8-system (forsøg V-VII)

3.4 Konklusion på markforsøg

Dette arbejde ledte til følgende konklusioner

- Det er svært at styre vandindholdet i halm i praksis
- pH falder ved ensilering af halm, især i meget våd halm eller ved tilsætning af ensileringsmidler
- God indpakning er vigtig for at minimere varmetab samt tab af tørstof og BMP
- Tørstofftab under ensilering:
 - ~5% ved god indpakning, ~18% uden wrapping (indpakning)
- Methanpotentiale i ensileret halm:
 - kan øges ~10% (0-20%) ved god ensilering
 - kan reduceres ~17-31% ved dårlig ensilering
 - Ensileringsmidler synes at have begrænset effekt på BMP
 - Vandindhold er afgørende, hvor 30% vand eller mere viser en gavnlig effekt
- Indpakning af stor stak skal forbedres for at opnå en tilstrækkelig lufttæthed



4. Ensilering af våd halm

Kg balle vægt ved forskelligt vandindhold

Vand%	20	25	30	35	40	45	50
400 kg tørstof	500	533	571	615	667	727	800
425 kg tørstof	531	567	607	654	708	773	850
450 kg Tørstof	563	600	643	692	750	818	900
475 kg tørstof	594	633	679	731	792	864	950
500 kg tørstof	625	667	714	769	833	909	1000
525 kg tørstof	656	700	750	808	875	955	1050

4.1 Presning og sammenkørsel af halm til ensilering i Skinnerup

Presning og sammenkørsel af halm til ensilering foregik d. 27. august 2022 på Toustrupvej 5 i Skinnerup. Presning blev foretaget med KRONE BiG Pack 1290 HDP II XC som binder med 8 snore og forsynet med indbygget snitter med 26 knive og en teoretisk snitlængde på 44 mm. Dimensionen på ballerne var 120 x 0,88 x 2,50 med en balle vægt på ca.1000 kg i gennemsnit. Ved kontrolmåling viste det sig at ballerne var 1,23 m brede.

Vandindholdet blev målt med spyd til 50 – 60 %, hvilket svarer til et tørstofindhold på 4 – 500 kg/balle, ved en balle vægt på 1000 kg. Tørstofmålinger i laboratorie ville kunne vise mere korrekte målinger af halmballerens vandindhold.



KRONE BiG Pack 1290 HDP II XC anvendt til presning af baller

Presserens gennemsnitlige kapacitet blev målt til 60 baller/time, i de perioder, hvor presseren kørte uden problemer. Der opstod en del bindeproblemer, som resulterede i løse baller, som blev efterladt på marken. Bindeproblemerne skønnes ikke umiddelbart at kunne henholdes til den høje



vandprocent. Desværre var opsamleren stillet for lavt, hvilket gav en del sten i halmen og tekniske problemer med opsamleren som det tog noget tid at løse.

Sammenkørsel og stakning af halm

Sammenkørsel af halmen foregik på selve marken og halmen blev aflæsset og stablet til indpakning i enden af marken, marken var på ca. 40 ha. Ud fra tidsstudier skønnes hvert læs i gennemsnit at vare 30 minutter, med transport, læsning og aflæsning.



Stakning af halmballer

4.2 Indpakning af halm i 2022 v. Skinnerup

Indpakning af baller blev udført med WRAP 8 og special nyudviklet halmspyd med en hydraulisk funktion til at presse ballerne tæt sammen ved indpakning.

Tidsforbrug:

Det tog ca. 30 min med opstart med påsætning af ruller og endefolie med 2 mand og gummiged

Det tog ca. 30 min med afslutning af stak med ende folie samt sammenpakning af maskine med 2 mand og gummiged

Kapaciteten vurderes til 100 -120 baller/time, når det hele er sat op og kører. Kapaciteten kunne muligvis være større med en afskubber anordning på greben, da 3 grebe i hver balle gav besvær med at slippe dem igen.

Plastforbrug:

Der blev anvendt 1 meter bredt folie i en tykkelse på 25 μm . Hver rulle indeholder 1200 meter. Plasten blev forstrøket 60 %, hvilket betyder at hver rulle har en effektiv længde på 1920 meter i en bredde på 0,8 m efter forstrækning. Maskinen var forsynet med 5 ruller som giver i alt 9600 effektive meter. Omkredsen på stakken var $((2,5+ 2,5) \times 2 \text{ m} + (0,88 \times 8) \text{ m}) = 17,04$ meter ud fra en ballelængde på 2,5 meter og en ballehøjde på 0,88 m. Ballens bredde blev målt til 1,23 m. Hver række indeholder 8 baller.

Ved 10 lag plast skal der i hver række med 8 baller anvendes $((1,23:0,8) \times 17,04)$ meter \times 10 lag = 262 meter



I alt blev der indpakket 27 rækker á 262 meter = 7,074 meter. I alt blev der indpakket 216 baller

Plastomkostning

Hver rulle plast koster 650 kr., hvilket svarer til $650:1920$ meter = 0,34 kr./meter (1920 m er 1200 m forstruktet 60 %)

7074 meter koster 2405 kr.

Ved 216 baller bliver plastomkostningen kr./balle $2405:216 = 11,14$ kr.

Hvert lag koster 1,144 kr/balle

Totale indpakningsomkostninger

Hvis selve indpakning sættes til 20 kr./balle, bliver totalomkostningerne 31,14 kr/balle.

Hertil skal lægges omkostninger til pålægning af ende folier og udpakning og sammenpakning af maskine 1 time med gummiged + 1 mandetime = 1000 kr. = 4,60 kr./balle

De totale omkostninger skønnes således at blive ca. 35,74kr./balle (se nærmere i beregningsmodellen Strawpack

Afregningsprisen kunne også være 1000 kr. i startgebyr + 35 kr./balle ved 10 lag

Ved indpakning med WRAP 2 er omkostningerne beregnet til 45 kr/balle ved 10 lag (se beregningsmodel strawpack2)

4.3 Indpakning af halm 2024 hos I/S Mikkelsen

Dato: 24 august 2024

Sted: Løgstørvej 142, 9500 Hobro

Halmart: Havre



Indpakning af stak den 24. august.



Antal baller: 32 stk.

Pressertype: CNH BigBaler 1290 + cropcutter (snitter var aktiveret)

Fugt: 40- 50 %

Vægt: 800- 900 kg

Kg tørstof/balle 450 – 480. Ballevægt omregnet til 15 % vand 529– 565kg

Ballerne er vejet på presseren og fugten er målt med DSE måler monteret på presseren

Der kunne ikke måles kapacitet over så kort en strækning, men ifølge maskinføreren var der ikke stigende kapacitet når der måles antal baller/time, men måles der på kg halm presset/time er kapaciteten høj.

De 32 baller blev sat i 4 rækker og pakket ind med "WRAP 8" og der blev anvendt 10 lag plast. Der blev indsat ende-plast både før og efter indpakningen og endelig blev hele stakken dækket med net og spændt fast med laststropper og på toppen blev der anbragt dæksider. I enderne blev der anbragt halmballer for at støtte stakken og hindre, at plasten og nettet kan "blafre" med henblik på en lufttæt tildækning, som er en forudsætning for en vellykket ensileringsproces.

Resultater

Stakken blev besøgt af konsortiet i forbindelse med projektmøde onsdag d. 25. september 2024. Der var områder af stakken, som føltes varme gennem plasten og det blev derfor besluttet af åbne og besigtige halmen. Store dele af halmen var gået i forrådnelse og der var vækst af svampe. Nogle steder var stakken så varm indeni, at man knapt kunne røre ved den. Dette var langt fra det resultat, der var forventet og det blev derfor opgivet at arbejde videre med halmen fra stakken. Stakken blev stående delvist indpakket og først helt afdækket i oktober, hvor dele af den var ved at kompostere, hvilket vanskeliggjorde læsning af halmen fra marken til lastbil til videre transport til AU. Ved AU blev halmen anvendt i et mindre biogasanlæg, men der blev ikke foretaget yderligere tests på materialet.



Den udpakkede stak inden læsning (ultimo oktober 2024)



5. Test af ensileret halm i biogasanlæg

Afsnittene 5.1 & 5.2 dækker som helhed leverancerne D3.1 *Report on feed-in techniques with recommendations for optimized procedures* samt D3.2 *Report on effects of ensiled straw in biogas plants – gas production, floating layer and viscosity*

5.1 Test af ensileret halm i biogasanlægget ved Skinnerup Maskinstation

5.1.1 Beskrivelse af biogasanlæg og indfødningssystem

Biogasanlægget ved Skinnerup er bygget i 2007 og er af fabrikatet Lundsby. Anlægget består af en fortank med uopvarmet gylle fra stald kombineret med gaslager, en mixertank med én omrører og hvor fast biomasse blandes med gylle før indpumpning i de to serieforbundne reaktorer, og den afgassede biomasse ender i en uoverdækket efterlagertank. De to reaktorer er på hhv. 3.000 m³ og 2.500 m³, og der er hhv. 5 og 3 omrørere, men det er kun hhv. 3 og 2 omrørere, der er i brug ad gangen. Omrøring kører i faste intervaller og sker normalt kun om natten, hvor strømmen er billigere. Temperaturen i de to reaktorer er 38°C, og tørstofindholdet i reaktorerne er typisk 5-6%. Indfødning af fast biomasse sker via en Kuhn foderblander med vejeceller, hvor biomassen neddeles, før den sluses ned i mixertanken.

Biogasanlægget tilføres typisk 120 tons gylle pr. døgn samt ca. 6 tons fast biomasse. I perioder anvendes også anden biomasse såsom fiskeaffald. Derfor kan gasproduktionen variere betydeligt over tid. Med indfødning af 126 tons pr. døgn og en samlet reaktorkapacitet på 5.500 m³ er der en gennemsnitlig opholdstid på ca. 44 dage.



Foderblander og mixertank til indfødning af fast biomasse i Skinnerup Biogasanlæg. Foderblanderen er monteret med vejeceller (venstre). Kombineret gyllefortank og gaslager på Skinnerup biogasanlæg (højre).



Skinnerup Biogasanlæg. I baggrunden ses den første af de to serieforbundne reaktortanke og i forgrunden den anden reaktortank.

5.1.2 Halmensilage til test i biogasanlægget i maj-juni 2022

I maj-juni 2022 blev der anvendt 60 halmballer (midiballer) med ensileret vinterhvedehalm til test af indfødning og effekt på biogasanlægget. Ballerne blev presset ved Skinnerup 16/9 2021, og alle blev tilført ca. 21 kg brunsaft pr. halmballe ved presningen. Ballerne vejede ca. 700 kg, og tørstofindholdet var ca. 65% ved presningen. Ballerne blev kombipakket i én lang stak med ballerne lagt på siden. Stakken blev lukket i begge ender vha. en balle, der var wrappet enkeltvis, og som fungerede som 'prop' i kombistakken (se fotos).



Presning af vinterhvedehalm 16/9 2021 med tilsætning af brunsaft.



Tv. Kombipakning 16/9 2021 af 60 midiballer med våd vinterhvedehalm, der var tilført brunsaft ved presningen. Th. Stakken fotograferet 6/4 2022 efter 7 måneders lagring.

5.1.3 Erfaringer med håndtering og indfødnings af ensileret halm i testperioden maj-juni 2022

De 60 baller med ensileret halm blev anvendt i biogasanlægget i periode 11/5 til 12/6 2022. Der blev generelt indfødt 2 baller om dagen (svarende til ca. 0,5 ton halmtørstof pr. dag). Denne mængde blev anvendt udover den sædvanlige foderplan på ca. 120 tons gylle og ca. 6 tons anden fast biomasse, primært dybstrøelse. I testperioden blev der dog også anvendt en del 'blodvand'⁴ fra Hanstholm Havn, og da der er et betydeligt gaspotentiale i blodvand, er det ikke muligt at vurdere effekten af den ensilerede halm på biogasproduktionen.

Ved anvendelse af den ensilerede halm blev ballerne fra kombistakken pakket ud, snorene blev skåret af manuelt, og halmen i ballerne blev løsnet ved at løfte halm med grabben på en læssemaskine og lade halmen falde ned på et betonunderlag. Dette blev gjort flere gange efter behov for at sikre, at halmen ikke danner prop i foderblanderens. Den løsnede halm blev herefter læsset i foderblanderens, hvor den blev yderligere neddelte før udslusning i mixertanken. Da det ikke var rationelt at pakke to baller ud af gangen, blev der i stedet pakket ud til en uges tid ad gangen, hvor halmen blev løsnet og lagt i en stak, og der blev så taget to skovfulde pr. dag svarende til ca. 2 baller. Den samlede arbejdstid i forbindelse med håndteringen og indfødnings af ensileret halm blev vurderet til at være ca. 10 minutter pr. halmballe.

⁴ Blodvand er typisk blodholdigt spildevand, der opstår fra fiskerihavnens aktiviteter, såsom losning, rensning og forarbejdning af fisk.



Udpakning af kombipakkede baller med ensileret halm og løsning af halmen med grab på læssemaskinen før aflæsning i Kuhn-foderblander til yderligere neddeling før opblanding med gylle. Bemærk at halmen på billedet desværre var komposteret og derfor var noget 'brændt sammen' og dermed var sværere at skille ad end i baller med god halmensilage.



Halmballe ca. 5 baller inde i stakken, fotograferet 11/5 2022. Halmen er rådden i kanten, men der er også en zone i midten/bunden, hvor der ikke har været ilttilgang. (Foto: Peter Kjær, Skinnerup Maskinstation).



Udpakning og løsning af kombipakkede baller med ensileret halm, 2/6 2022. Der var en betydelig andel af rådden halm rundt i kanten af halmballerne. Inde midt i stakken var halmen mindre rådden og primært med mug på overfladen af ballerne. (Foto: Peter Kjær, Skinnerup Maskinstation).

5.1.4 Målinger og registreringer ved brug af ensileret halm i biogasanlægget maj-juni 2022

Da der som nævnt blev brugt en del blodvand i biogasanlægget i testperioden, var det ikke muligt at vurdere effekten af halmensilagen på biogasproduktionen. Tykkelsen af flydelaget blev observeret gennem perioden, og der var ved starten af testperioden ikke noget flydelag, men der udviklede sig et flydelag på op til ca. 20 cm gennem perioden. Elforbruget til omrøring var relativt konstant igennem testperioden, dog med en tendens til en let stigning fra ca. 1.450 kWh/dag i starten af perioden til ca. 1.660 kWh/dag sidst i perioden, formodentlig i forbindelse med at reducere tykkelsen af flydelaget.

Til måling af viskositet i den afgassede gylle inden anvendelse af ensileret halm blev der 6/4 2022 udtaget ca. 30 L afgasset gylle fra biogasanlægget. Prøven blev udtaget i efterlagertanken, hvor der blev pumpet afgasset gylle ud fra reaktor 2 (se fotos). Der blev udtaget en ny prøve til måling af viskositet medio juni 2022, dvs. lige efter perioden hvor der var anvendt ensileret halm.



Udtagning af prøve af afgasset gylle fra biogasanlægget ved Skinnerup 6/4 2022 til analyse af viskositet m.m. før anvendelse af ensileret halm.

5.1.5 Halmensilage til test i biogasanlægget i februar-april 2023

Hvedehalmen, der blev testet i biogasanlægget ved Skinnerup februar-april 2023, blev presset 27/7 2022 med en Krone midiballe-presser BIGPACK 1290 HDPIIXC, som binder med 8 snore med en målt ballebredde på ca. 123 cm, en ballehøjde på 90 cm og en gennemsnitlig ballelængde på ca. 250 cm. Ved presningen blev halmen snittet med den indbyggede snitter med 26 knive og en teoretisk snitlængde på 44 mm. Halmen blev presset med ca. 60% vand, og der blev tilsat forskellige ensileringsmidler ved presningen.

Der blev 28/8 2022 lavet en stor stak med i alt 216 baller, dvs. ballerne blev pakket ca. et døgn efter presning. Ballerne blev wrappet med POMI WRAP 8-systemet med 8 baller i tværsnit med 2 baller ved siden af hinanden og 4 baller i højden. De 216 baller repræsenterede 124 baller med eddikesyre, 28 baller med myresyre, 5 baller med kaliumhydroxid og 59 baller uden ensileringsmiddel.

Under lagring var der problemer med, at endplasten blæste ud, hvorved der var fri adgang for ilt til halmen. Selvom stakken blev lukket igen, var der stadig for meget luft, bl.a. pga. blafrende plast på stakkens sider. Der skete derfor en betydelig varmedannelse i stakken med temperaturer til op over 60°C. Ved åbning af stakken i januar 2023 var der derfor en del rådden halm, især i de øverste baller i stakken.



Presning af hvedehalm 27/8 2022 ved Skinnerup Maskinstation. Der blev tilført forskellige ensileringsmidler på halmstrengen med SyreN-anlæg og fladdyser umiddelbart inden presning.



Ved åbning af stakkens sydende 26/1 2023, hvor halmen var tilført eddikesyre ved presning, var halmen rådden i overfladen, især i toppen og ydersiden af stakken men også ned midt imellem de to halmstakke.



Resten af halmstakken fotograferet 31/3 2023. (Foto: Peter Kjær, Skinnerup Maskinstation).

5.1.6 Erfaringer med håndtering og indfødnings af ensileret halm i testperioden februar-april 2023

Ved håndtering af de ensilerede halmballer blev snorene fjernet, og halmen blev løsnet ved at løfte ballerne op og lade dem falde ned på pladsen et par gange. Der blev typisk løsnet ca. 10 baller ad gangen, så der var halmensilage til en uges tid. Herefter blev der løbende taget af dyngen, og halmen var løs nok til at kunne køres i blanderen, hvor den skilte fint ad.

De nederste baller i stakken var generelt meget tunge og af bedre kvalitet (meget lette at skille ad) sammenlignet med de øverste, der var temmelig rådne. De mest rådne baller var dog ikke specielt hårdt brændt sammen af komposteringen og skiltes også forholdsvis let ad. Det vurderes, at ballerne i den store stak fra høsten 2022 har været bedre/lettere at håndtere end ballerne fra kombistakken fra høsten 2021, som var meget brændt sammen. Halmen lugtede også mere ensileret, specielt inde midt i ballerne. Der var hul i plasten på stakken flere steder, hvilket indikerer, at der burde have været anvendt flere lag plast for at holde stakken lufttæt.



Halmensilage efter løsning. (Fotos: Peter Kjær, Skinnerup Maskinstation).

5.2 Test af ensileret halm i biogasanlægget ved Ausumgaard

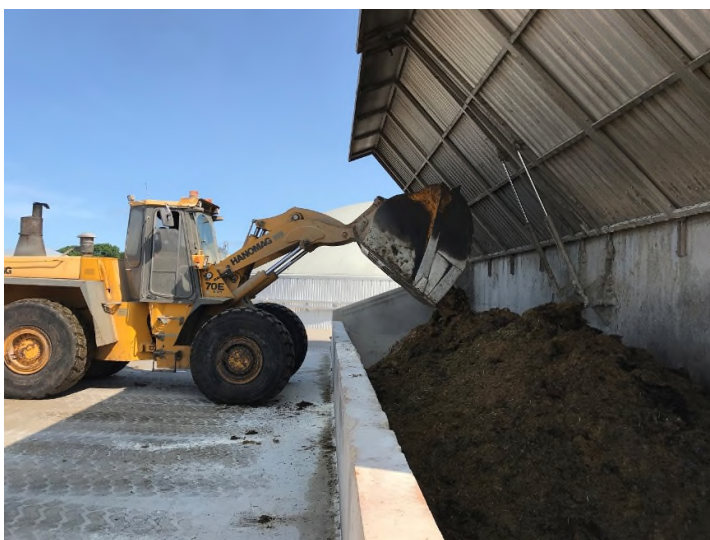
5.2.1 Beskrivelse af biogasanlæg og indfødningsystem

Biogasanlægget er et gårdbiogasanlæg opført i 2017, som leverer opgraderet gas til naturgasnettet. Anlægget er lavet af den tyske producent Envitec og er opbygget af 3 parallelle reaktorer (A, B og C) på hhv. 5.200, 5.200 og 5.800 m³ og med hhv. 4, 4 og 6 omrørere. Desuden er der to uopvarmede sekundære rådnetanke på 2.800 m³ med 4 omrørere, og disse tanke er enkeltvis knyttet til de to reaktorer på 5.200 m³, dvs. biomassen cirkuleres mellem hovedreaktoren og den uopvarmede reaktor. I alt er der en samlet reaktorkapacitet på 21.800 m³. Den afgassede biomasse pumpes fra reaktorerne via de to sekundære rådnetanke. Der er ingen efterlager med gasopsamling, men gyllen køles ned til ca. 28°C, når den pumpes fra de sekundære rådnetanke. Temperaturen er ca. 51,6-51,7°C i de tre hovedreaktorer og ca. 46-47°C i de to sekundære rådnetanke uden opvarmning. Tørstofindholdet i reaktorerne må maks. være 10,5% og er typisk mellem 10,0 og 10,5%. Omrørerne kører ca. 1/3 af tiden. Opholdstiden er 70-80 dage. Der indføres typisk 200 tons biomasse pr. døgn, heraf ca. 90 tons fast biomasse, mens resten er flydende biomasser som gylle, vaskevand, vand fra ensilagepladser m.v. Den fast biomasse udgøres især af dybstrøelse, ensileret frøgræshalm, græsfiber fra proteinekstraktion m.m.

Fast biomasse indføres via et walking-floor påslag og mikses i to dissolver-enheder à 4½ m³ med gylle, opsamlet vand fra ensilagepladser m.m. samt recirkuleret biomasse fra reaktorerne. I hver af de to dissolvere sidder en stjernekniv, som sikrer opblanding samt findeler fast biomasse lidt. På pumpestrengene fra dissolverne sidder der en Börger grinder (knive med modskær), som neddeler biomassen yderligere. Recirkuleret biomasse køres også igennem disse grindere.



Ausumgaard Biogas. Forest en uopvarmet sekundær rådnetank, der er forbundet til en opvarmet reaktortank i baggrunden. Desuden ses tanke til glycerin eller anden flydende biomasse.



Opfyldning af påslag med walking floor til fast biomasse.



To Envitec-dissolvere à 4,5 m³ til opblanding af fast biomasse i gylle og recirkulat. Til højre ses nye stjerneknive, der sikrer omrøring og delvis neddeling i dissolverne.



Börger-grindere på indpumpningsstrengene.

5.2.3 Halmensilage til test i biogasanlægget i maj 2022

Der blev i april 2022 leveret ca. 40 baller med ensileret halm fra Skinnerup til test i biogasanlægget på Ausumgaard. Der var tale om halmballer fra følgende ensileringsforsøg:

- Ca. 24 enkeltballer fra 9/9 2020; hvedehalm med forskellige ensileringsmidler, bl.a. 15 baller med brunsaft. Balle vægt på ca. 350-550 kg og vandindhold på 21-52%.
- 6 enkeltballer fra 19/8 2021; hårdt pressede baller, hvedehalm samt økologisk byghalm og rughalm med et betydeligt indhold af grønt (ukrudt), ingen ensileringsmidler. Balle vægt på ca. 500-800 kg og vandindhold 17-52%.
- 10 enkeltballer fra 16/9 2021; hvedehalm med forskellige ensileringsmidler. Balle vægt på ca. 750 kg og vandindhold på ca. 65%.



Wrappede baller med ensileret halm til test i biogasanlægget på Ausumgaard maj-juni 2022.

5.2.4 Erfaringer med håndtering og indfødning af ensileret halm i testperioden maj 2022

De ca. 40 ensilerede halmballer blev anvendt i biogasanlægget i første halvdel af maj 2022. De ensilerede halmballer så generelt fine ud efter udpakning. På nogle af ballerne var der hvid mug på overfladen af ballerne under plasten, men det blev ikke registreret, hvilken behandling med ensileringsmiddel, der var anvendt på ballerne med mug. Når snorene blev skåret over, sprang ballerne fint op, og indeni ballerne var halmen lys og ikke rådden, dvs. halmen var ikke brændt sammen som rådden halm eller dybstrøelse, og den ensilerede halm i ballerne var relativt let at skille ad, også fordi halmen blev snittet ved presningen.

Ved anvendelsen af halmen i biogasanlægget blev wrapplasten skåret op, ballerne blev rejst på siden, hvorefter snorene blev skåret op og fjernet. Ved anvendelse af de første 10-15 baller blev halmballerne herefter håndteret vha. skovlen på en gummiged, som løsnede ballerne ved at lade dem falde ned ovenpå anden biomasse. En blanding af halm og anden biomasse blev herefter læsset over i påslaget til indfødning af fast biomasse (se fotos).

Selvom halmen i ballerne var nogenlunde let at løsne, så gav halmen alligevel udfordringer i biogasanlægget pga. klumper af halm, der ikke blev løst ordentligt. Halmklumperne blev ikke ordentligt opløst i dissolverne, og derfor kunne de sætte sig i pumperne, fordi stråene var for lange. Dette medførte ujævn indfødning af biomasse og pludselig trykstød.

De sidste 25-30 ensilerede halmballer blev derfor knust i en knuser fra AB Skovservice før indfødning i anlægget, dvs. halmen blev håndteret på samme måde som ved anvendelse af dybstrøelse på biogasanlægget. Knuseren neddelte halmen så meget, at det ikke efterfølgende gav nogen problemer med indfødning og anvendelse i biogasanlægget. Det er derfor nødvendigt med en form for neddeling/knusning/snitning af de ensilerede halmballer før indfødning i biogasanlægget på Ausumgaard. Denne ekstra håndtering af halmen skal indregnes i de samlede omkostninger til at anvende halm i biogasproduktionen.



Da de ca. 40 halmballer kun udgjorde en relativt lille biomasse mængde i forhold til anlæggets samlede kapacitet, var det ikke forventeligt at kunne måle nogen tydelig effekt på hverken gasproduktion, flydelagsdannelse eller viskositet. Derfor var der primært fokus på at vurdere de håndteringsmæssige aspekter ved at anvende ensileret halm på anlægget.



Opskæring af wrapplast fra enkeltballe samt fjernelse af snore. Halmen, der var snittet ved presningen, var relativt let at skille ad, da den ikke var brændt sammen.



Eksempel på ensileret halmballe med lidt hvid mug på overfladen under wrapplasten. For nogle baller var der mere mug på overfladen, men halmen inden i ballerne var ikke rådden.



Håndtering og løsning af ensilerede halmballer med gummiged.



Aflæsning af løsnet halm i blanding med anden biomasse i påslag med walking floor til indfødning af fast biomasse.

5.3 Sammenlignende økonomiske scenarieanalyser.

Følgende dækker leverance D4.3 *Report on techno-economic evaluation for straw silage for biogas production*

Der er som led i projektet gennemført et stort antal forsøg og analyser. For at få et centralt overblik er der i det følgende udvalgt et antal scenarier, der repræsenterer både ensileringsforsøgene og eksisterende referencer med tør halm, således der kan sammenlignes direkte.

Det blev aftalt at foretage økonomianalyser for følgende scenarier:

- Halm, tør, direkte indfødnet.
- Halm, tør, forbehandlet på anlægget
- Halm, tør, snittet på anlæg og ensileret på anlægget



- Sekundahalm, våd, direkte indfødret
- Våd halm ensileret i baller
- Våd halm bjærget med snittervogn og ensileret
- Våd halm bjærget med finsnitter og ensileret
- Halmpiller som strøelse
- Halmpiller direkte indfødret.

5.3.1 Forudsætninger:

Resultaterne af gaspotentialebestemmelserne viste en klar tendens til at jo længere ensileringen får lov at virke desto større effekt på gasudbyttet kan opnås. Der er i det foregående vist resultater fra 6, 7, 8 og 10 måneders ensilering. I nedenstående analyse er valgt 8 måneders ensileringsperiode, som udtryk for et realistisk gennemsnit.

Det er velkendt at opholdstiden i reaktorerne har betydning for det samlede gasudbytte, der kan opnås, især når det drejer sig om tungt nedbrydelige biomasser som halm. Der er udført forsøg hvor den akkumulerede methanproduktion er aflæst ved 30, 60 og 92 dage. De fleste anlæg, der anvender betydelige mængder halm er klar over at de skal have en opholdstid på op imod 60 dage for at realisere et rimeligt gaspotentiale fra halmen. Derfor er de 60 dage valgt som forudsætning for beregningerne.

Med hensyn til anvendelse af halmpiller til biogasproduktion er der en særlig fordel, der knytter sig til at pillerne kan anvendes som strøelse i kvægstalde, hvor de så kommer med gyllen ind på biogasanlægget. Derved kan de erstatte sand i sengebåse, og giver derved en omkostningsbesparelse. En analyse fra Videncenter for landbrug angav en gennemsnitlig omkostning på 200 kr. pr. ko i 2013. Firmaet AJ Energi og Strø angiver et forbrug af halmpiller på 120-140 kg pr. ko pr. år.

Maskinomkostningerne er beregnet ved hjælp af et beregningsværktøj, der er udviklet i projektet af Mogens Kjeldal, Links til disse kan findes i appendix samt i slutningen af dette kapitel. Egne tal og forudsætninger kan indsættes i modellerne.

I den følgende tabel er disse omregnet til omkostninger pr. ton råvare.



Sammenligning af forskellige metoder til levering af halm til biogas

Tabel 12. Nettonråvareomkostninger ved forskellige biomasse pr. ton og pr. Nm³ CH₄ an reaktoren
Der er ikke indregnet omkostninger, til fortjeneste administration og forsikringer

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Biomasse				Nm ³	Nm ³	Omkostn	købspris	Omk	60 km	40 km
	Tons TS	VS	VS kg	CH ₄ /kg VS	CH ₄ /	Bjærgning	halm	ensilering	transp	transp
		% af TS	/tons		ton VS	kr/ton	kr/ton	kr/ton	kr/ton	kr/ton
Halm, tør, direkte indfødret	0.87	0.95	827	0.240	198	310	350	0	100	84
Halm, snittet på anlæg og ens	0.87	0.95	827	0.276	228	260	350	50	100	84
Sekunda, snittet på anlæg	0.7	0.95	665	0.220	146	0	350	0	108	92
Balleensilering Wrap 2	0.8	0.95	760	0.276	210	280	350	90	108	92
Balleensilering Wrap 8	0.8	0.95	760	0.276	210	280	350	70	108	92
Løs ensileret snittevogn	0.7	0.95	665	0.276	184	128	350	50	211	152
Løs ensileret finsnit	0.7	0.95	665	0.278	185	152	350	50	211	152
Halmpiller som strøelse	0.92	0.95	874	0.280	245	0	1,000	0	120	86
Halmpiller direkte indfødret.	0.92	0.95	874	0.290	253	0	1,500	0	60	43

1	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Biomasse	20 km	Lager	Neddeling	pris/ton	pris/ton	pris/ton	Omk pr	Omk pr	Omk pr
	transp	læsning	Biogas	vare	vare	vare	m ³ CH ₄	m ³ CH ₄	m ³ CH ₄
	kr/ton	kr/ton	kr/ton	60 km	40 km	20 km	60 km	40 km	20 km
Halm, tør, direkte indfødret	70	100	0	860	844	830	4.34	4.25	4.18
Halm, snittet på anlæg og ens	70	30	150	940	924	910	4.78	4.71	4.65
Sekunda, snittet på anlæg	78	30	200	688	672	658	6.07	5.96	5.86
Balleensilering Wrap 2	78	30	0	858	842	828	4.09	4.01	3.95
Balleensilering Wrap 8	78	30	0	838	822	808	4.00	3.92	3.85
Løs ensileret snittevogn	94	40	0	779	720	662	4.24	3.92	3.61
Løs ensileret finsnit	94	40	0	803	744	686	4.34	4.02	3.71
Halmpiller som strøelse	54	20	0	1140	1106	1074	4.66	4.52	4.39
Halmpiller direkte indfødret.	27	20	0	1580	1563	1547	6.23	6.17	6.10

Beregningsarket har 20 kolonner. Her følger en forklaring på hvad modellen bruger de enkelte kolonner til.

Kolonne:

1. Kolonnen beskriver navn og type på biomasserne.
2. Kolonnen angiver det forholdsmæssige tørstofindhold (TS) som er forudsat i modellen. Niveaue er fastlagt som et ekspertskøn. Det betyder, at der i praksis kan forekomme variationer heri.
3. Her angives det organiske tørstofindholds (VS) andel af tørstofindholdet i procent. Som kilde til det organiske tørstofindhold er bl.a. anvendt Niras fakta ark biogas, 2012.
4. Her beregnes det organiske tørstofindhold i kg.
5. Der er angivet mål for gaspotentialet pr. kg organisk tørstofindhold. Som kilde til det specifikke methanpotentiale er primært Henrik B. Møller og Teknologisk Instituts rapporter.
6. Her beregnes methanpotentialet for den pågældende råvare.
7. Denne kolonne viser bjærgningsomkostningerne pr. ton råvare som omfatter vending/skårløftning ved tør halm, presning med og uden snitning samt sammenkørsel af halm. (se skema fig.)



8. I denne kolonne angives værdien af halmen ab. mark, dvs. før bjærgning.
9. Her angives omkostninger forbundet med ensilering af halm som består af omkostninger til indpakning med plastfolie brug af læsemaskine. Indpakningen fungerer samtidig som lager for halmen indtil levering. Ensileringsmidler indgår ikke selvstændigt i beregningerne da effekten er udeblevet.
10. Transportomkostninger til anlægget ved 60km.
11. Transportomkostninger til anlægget ved 40 km.
12. Transportomkostninger til anlægget ved 20 km.
13. Her beregnes en lageromkostning til ensilageplads for løs halm i stak ved tør halm er tillagt omkostninger til transport fra mark til lager. Ved ensilering af baller er indpakningen lageret.
14. Omkostninger til neddeling på anlægget, i de scenarier hvor det er en forudsætning.
15. Denne kolonne summerer omkostninger pr. ton råvare 60 km.
16. Denne kolonne summerer omkostninger pr. ton råvare ved 40 km.
17. Denne kolonne summerer omkostninger pr. ton råvare ved 20 km.
18. Her beregnes den samlede netto råvarepris udtrykt i kr. pr. Nm³ methan ved 60 km.
19. Her beregnes den samlede netto råvarepris udtrykt i kr. pr. Nm³ methan ved 40 km.
20. Her beregnes den samlede netto råvarepris udtrykt i kr. pr. Nm³ methan ved 20 km.

Ensilering af halm i baller som indpakkes

Ved ensilering af halm i baller pakkes halmen ind i enten WRAP 8 eller WRAP 2. Indpakningen fungerer samtidigt som lager og derved spares der kørsel fra mark til et lager som er typisk for bjærgning af tør halm. Den ensilerede halm opbevares enten på marken eller den transporteres direkte til biogasanlægget og indpakkes her, det kan have den fordel at når større mængder kan indpakkes, uden der skal flyttes mellem marker, må der forventes større effektivitet ved indpakning og dermed lavere omkostninger.

Når der presses fugtigt snittet halm, bliver tørstofmængden i hver balle næsten den samme som i en tør usnittet halmballe, da selve snitningen af halmen øger presningsgraden med ca.10 %, samtidig med at fugtigt halm kan presses hårdere sammen end tør halm, dog afhængigt af halmsort og høsttidspunkt. I beregningerne indgår halmen som om det var 500 kg baller for at kunne anvende kendte værdier Omkring ensilering af halm i baller er der foretaget observationer, tidsstudier og beregninger.

I beregningerne indgår ikke omkostninger til anvendelse af ensileringsmidler, som består af ensileringsmiddel, udstyr til udbringning og tidsforbrug forbundet med dette. Omkostningerne afhænger meget af det middel der anvendes. Alene omkostninger til udstyr, udbringning af udstyr er beregnet til ca. 20 kr/tons tørstof

Med de afprøvede ensileringsmidler blev der ikke opnået den forventede effekt.

Omkostninger til transport er hentet fra modellen "halmtransport".

Bemærkninger til de enkelte metoder:

Halm, tør direkte indfødret.

Tør halm har typisk et vandindhold på 10 – 15 %. For at sikre tør halm er det nødvendigt at halmen tørrer nogle dage efter mejetærskeren og det er ofte nødvendigt at vende halmen eller anvendelse af en skårløfter. Halmen snittes med en snitter indbygget i presseren. Når halmen er presset, bliver den typisk transporteret



til en hal hvor den opbevares indtil levering. Halmen kan dog også opbevares på marken indpakket med Pomi indpakkingsmaskiner WRAP 5, 7 eller 12 som betyder indpakning af 5,7 eller 12 bigballe i hver række. De samme maskiner kan indpakke henholdsvis 7, 11 og 18 baller i hver række, når det drejer sig om midiballer. Indpakkingsmaskinerne anvendes typisk ved korttidslagring. Der er beregnet omkostninger til opbevaring på 70 kr/tons og 30 kr/tons til læsning.

Halm, tør, snittet på anlæg og ensileret

Halmen kan også usnittet transporteres direkte til biogasanlægget, hvor halmen i stedet bliver snittet med l-grinder eller en Haybuster og herefter ensileres i en stak og ofte sammen med andre afgrøder eller pulp. Her spares omkostninger til opbevaring, men i stedet er der omkostninger til sammenkørsel og tildækning.

Sekunda, våd, forbehandlet

Her drejer det sig om halm som af en eller årsag er blevet fugtigt og derfor må sælges til biogasanlæg for en reduceret pris. Her er regnet med en pris på 350 kr/tons ab mark. Der er de samme omkostninger ved bjærgning af sekunda halm, som ved tør halm. Selv med en lav handelspris bliver sekunda halm ikke nødvendigvis billigt for biogasanlægget, men det afhænger af hvor længe halmen har ligget og hvor meget tørstof der er brændt af.

Balleensilering WRAP 2

Her benyttes en indpakkingsmaskine til 2 lag baller, 2 baller i hver række, og hvor der anvendes 10 lag plast. Med de observationer der er gjort indtil nu betragtes WRAP 2 som en mere sikker metode end brug af WRAP 8 og stakkens lave højde på 1,8 m, gør det nemmere at lukke enderne.

Balleensilering WRAP 8

WRAP 8 indpakkingsmaskinen blev udviklet i projektet og er konstrueret til indpakning af 8 baller i hver række og indpakket i 10 lag plast. Desværre har der vist sig vanskeligheder med at opnå en tilstrækkelig tæthed, med den nuværende løsning. Størrelsen af stakken 2,80 m høj, gør det vanskeligt at lukke enderne, så der er lufttæthed i stakken. En videreudvikling af metoden må kunne give bedre resultater.

Løs ensileret med snittevogn

De selvlæsende snittevogne bliver løbende udviklet med kortere snitlængde og har den fordel at 1 mand med traktor kan opsamle halmen direkte fra skåret og køre det i stak ved enden af marken. Ved et gårdbiogasanlæg, kan der også køres direkte til lager i umiddelbar nærhed af biogasanlægget. Snittevogne har en udfordring, når der ikke køres fra mark til gård, men direkte til et eksternt biogasanlæg da snittevognen er forsynet med markvenlige brede dæk som overstiger den tilladelige bredde for kørsel på offentlig vej. Dette gælder både for landbrug og maskinstationer. Det løst opsamlede halm har en lav volumenvægt med ca. 7 tons snittet halm i 50 m³ vogn på trods af at vognen pakker halmen under fyldning. Den snittede halm skal inden ensilering køres sammen og herefter dækkes med plast, hvorefter den ensilerede halm transporteres til biogasanlæg. Efter ensilering er halmen faldet godt sammen og har en højere volumenvægt, især når det er samensileret med pulp og den højere volumenvægt reducerer transportomkostningerne. I beregningen er det snittede halm transporteret med lastbil til biogasanlæg og ensileret her, Hvis sammenkørsel og dækning udelades, spares omkostninger til sammenkørsel og plast 60 - 80 øre/tons mv men i stedet fås et tørstofstab som kan være i størrelsesorden 15 – 20 %.



Løs ensileret halm med finsnitter

Med finsnitteren følger 2 eller flere frakørselsvogne afhængig af køreafstand til aflæsningssted, hvilket giver en langt højere kapacitet end snittevogne kan levere. Den snittede halm kan enten placeres i en stak på marken eller køres direkte til gårdbiogasanlægget og her gælder de samme regler for kørsel på vej som beskrevet for snittevogne. Selv ved fugtigt halm vil en 50 m³ vogn ikke kunne indeholde mere end 6 tons snittet halm. Det betyder høje transportomkostninger. Ved transport direkte til biogasanlæg med 80 m³ lastbil vil der kun kunne medbringes ca. 12 tons frisk snittet halm. Ved ensilering på marken øges volumenvægten afhænger af eventuel samensilering med pulp eller andet, så en lastbils lasteevne bedre kan udnyttes, hvilket betyder meget for transportomkostningerne fra mark til biogasanlæg. I beregningerne her er der regnet med at halmen køres til biogasanlægget og ensileret der. Finsnitteren kan indstilles til at snitte halmen finere end snittevognen er i stand til.

Halmpiller som strøelse

Nogle biogasanlæg betaler landbrug for at benytte halmpiller eller briketter til strøelse, mod at det senere bliver leveret til biogasanlægget. Når halmpillerne som en slags dybstrøelse senere leveres til biogasanlægget, er der et mere biogasvenligt produkt som også har fordele med hensyn til salg af certifikater. For biogasanlægget skal den ekstra betaling for produktet til landmanden dog modregnes i det endelige regnskab. Her er der regnet med at biogasanlægget betaler et tilskud på 50 øre pr. kg halmpiller. Der beregnes 2 gange transportomkostninger som er henholdsvis levering til landbrug og transport fra landbrug til biogasanlæg. Transporten kan foregå med 4- akslede sættevogne med lastevne på ca. 38 tons.

Halmpiller direkte indfødt

Her leveres en vare til biogasanlægget som kan indfødtes direkte. Udvikling af støv og en høj omkostning er de ulemper og barrierer der nævnes mod, at metoden ikke er særlig udbredt. Der beregnes direkte transport til biogasanlægget. Transport med halmpiller kan foregå med lastbiler med en lastevne på ca. 38 tons, hvilket reducerer omkostninger til transport.

Der er desuden udarbejdet nogle mindre beregningsmodeller, som er tilgængelige her:

<https://mkjeldal.dk/calc/Finsnitter/index.htm>

<https://mkjeldal.dk/calc/Snittevogn/>

<https://mkjeldal.dk/calc/Halmtransport/>

<https://mkjeldal.dk/calc/straw/> (WRAP 8)

<https://mkjeldal.dk/calc/strawpack2/>

5.3.2 Diskussion

Resultaterne viser, at tør halm direkte indfødt og ensileret halm giver den billigste råvarepris pr. Nm³ methan. Gasudbyttet er lavere i tør halm sammenlignet med ensileret halm. Det vil desuden være de færreste anlæg, der kan indføde større mængder af tør halm uden yderligere neddeling. noget dyrere er det når halmen neddeles på anlægget, men der er til gengæld en ret betydelig omkostning til neddeling typisk med en I-Grind eller en Haybuster.



Interessant for dette projekt er det, at de ensilerede baller ikke har større omkostninger end de tørre forbehandlede baller. Især fordi de ifølge erfaringerne fra Skinnerup falder let fra hinanden, og da de er snittet i presseren behøver de ikke yderligere forbehandling. Det skal her nævnes, at der ikke er beregnet omkostninger til afsnoring af baller og bortskaffelse af plast.

Der er også regnet på scenarier, hvor halmen ensileres løs i stak. Det kan gøres af tørre baller på anlægget, hvilket muligvis vil kræve en neddeling, men våd halm kan også bjærges med en finsnitter og frakørselsvogne eller en opsamler/snittervogn. Disse er dyrere end de ovenfor nævnte, og det skyldes primært transport fra mark til anlæg, idet man ikke kan fragte så meget tørstof pr. læs som ved halm i baller. En mulighed er at ensilere halmen decentralt, fordi den ensilerede halm vil fylde mindre pr. ton, og dermed reducere transportomkostningerne. Under alle omstændigheder skal bjærgning af løs halm ske i ret kort afstand til anlægget, ellers betaler det sig bedre at anvende halm i baller.

Endelig findes muligheden for at købe halmpiller til anlægget. Det billigste vil være at give leverandører af kvæggylle et tilskud til indkøb af piller, som så kommer til biogasanlægget når gyllen leveres. Hertil kommer, at halmpillerne er at betragte som husdyrgødning når de leveres i gyllen, og dermed har en højere bæredygtighedsværdi end ren halm, som afspejler sig i den potentielle værdi af de bæredygtighedscertifikater, der kan udstedes på baggrund af gasproduktionen.

5.3.3 Konklusion for brugen af ensileret halm i biogasanlæg

Generelt er biogasanlæggene sjældent vilde med at betale mere end en råvarepris på 2,5 kr pr m³ methan. Resultaterne fra denne analyse viser, at råvareprisen for halm, med de her anvendte forudsætninger, i alle tilfælde ligger over dette. Men alt afhænger naturligvis af markedsbetingelserne for at skaffe egnede biomasser. Majs er på vej ud, så det vil være oplagt for de anlæg, der ellers har satset på det, at overveje en højere andel af halm i biomasseforsyningen.

Ensiling af halm rummer bestemt perspektiver, men også risici hvis ikke der opnås en god ensiling. Men der er også omkostninger forbundet med det. Halmen skal helst ikke transporteres for langt, den skal snittes i presseren, og så skal anlægget være udrustet med et indfødningssystem, der muliggør indfødning uden en ekstra omkostningstung neddeling.

Halmensilage i baller er ifølge beregningerne det billigste, men der udestår en betydelig opgave med afsnoring og bortskaffelse af plast. Det vil være langt mere rationelt af have halmensilagen i en af de plansiloer, der ellers skulle rumme majsensilage. Og tidligere analyser har vist, at for eksempel majsensilage ikke er afgørende billigere end vellykket halmensilage.

En metode, der ikke blev afprøvet i projektet, men som måske kunne være en vej frem er, at stille våde halmballer tæt i en plansilo og så overdække dem med plast eller dug. Det afgørende er, at overdækningen er helt lufttæt.