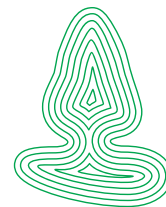


Rapport
fra Skog og landskap

22/2011



skog+
landskap

NORSK INSTITUTT FOR
SKOG OG LANDSKAP

HALM SOM BIOBRENSSEL

Høste-, innsamlings-, transport- og lagringsmetoder
for optimal fyringskvalitet og kostnadseffektivitet i
områder med kort og fuktig innhøstingssesong

Helmer Belbo



HALM SOM BIOBRENSEL

Høste-, innsamlings-, transport- og lagringsmetoder for optimal fyringskvalitet og kostnadseffektivitet i områder med kort og fuktig innhøstingssesong

Helmer Belbo

ISBN: 978-82-311-0147-5

ISSN: 1891-7933

Omslagsfoto: Halm, Toten. Fotograf: Ragnar Eltun, Bioforsk Øst Apelsvoll

Norsk institutt for skog og landskap, Pb. 115, NO-1431 Ås

FORORD

Dette arbeidet sammenstiller resultater fra det fireårige prosjektet «Halm som biobrensel - tilgjengelige mengder, produksjon- og bruksutfordringer i områder med kort og fuktig innhøstingsperiode», som er finansiert av Forskningsrådets program for Areal og trebasert næringsutvikling og Jordbruksavtalen. Energigården – Senter for bioenergi og Bioforsk Øst Apelsvoll har koordinert arbeidet og vært oppdragsgiver for Norsk institutt for skog og landskap. En stor takk rettes også til de sju brukerne som i tre år har rapportert avlinger, tidsforbruk og energiproduksjon ved sine respektive halmfyringsanlegg.

Steinkjer, desember 2011

Helmer Belbo

SAMMENDRAG

I denne rapporten gis en oversikt over tidsforbruk og kostnader i forbindelse med innsamling og bruk av halm som biobrensel i småskala fyringsanlegg. Rapporten er basert på data fra sju gårdbrukere med egne halmfyringsanlegg som i tre år har rapportert tidsforbruk og kostnader i sin halmforsyning. Seks av brukerne benyttet rundballer og sats-fyrte anlegg, mens en benyttet store firkantballer og anlegg med kontinuerlig innmating.

Halmavlingene lå i intervallet 130 – 300 kg tørrstoff med et gjennomsnitt på 200 kg ts per dekar, noe som er litt under erfaringstall for halmavling i Sverige og Danmark.

Raking av halmen ble gjort på ca 30 prosent av arealet som ble høstet. Gjennomsnittlig tidsforbruk for raking var $6,4 \pm 2$ minutter per tonn ts, og kostnaden for dette er beregnet til å være 42 ± 30 kr per tonn ts. Tidsforbruket for rundballepressing var 21 ± 7 min per tonn ts. Brukeren med stor firkantballepresse indikerte et tidsforbruk på 5 minutter per tonn ts. Kostnaden for pressing av rundballer var i 276 ± 57 kr per tonn ts, mens brukeren med firkantballepresse hadde en kostnad på 208 kr per tonn ts. Tidsforbruket for innsamling og transport ved avstand kortere enn 2,5 km var 14 ± 4 min per tonn ts, og kostnaden for denne operasjonen var 111 ± 34 kr per tonn ts. På korte transportavstander (< 2 km) var transportkostnaden i liten grad avhengig av avstanden. Andre faktorer som arrondering og arbeidsforhold ved opplasting og avlesning har like mye å si.

Kostnadene for raking og pressing lå noe under prisnivået som oppgis i maskinleieprisindeksene i Norske landbrukstidsskrifter.

Halmballene ble lagret enten under tak, pakket i plastpølse eller under presenning. Presenning er det klart billigste alternativet om en lykkes med denne lagringsformen, mens pøsepakking og lagring under tak kom ganske likt ut kostnadmessig (180 – 300 kr per tonn ts for begge metoder). Det ble erfart at halmen må være meget tørr før innpakking eller overdekking med presenning, om ikke vil det danne seg kondens – med fuktig halm langs kontaktflatene mellom halm og dekke som resultat. Videre opplevde flere brukere at halmballene ble fuktige nedenfra i lageret. Lagringsplassen må være godt drenert, og halmballene må plasseres høyt i terrenget så overflatevann ikke forekommer i halmlageret. I starten av prosjektet hadde fem brukere halmlager ute, og to av disse gikk over til lagring under tak i løpet av prosjektperioden. Lager under tak gir høyere faste kostnader, dermed blir utnyttelsesgraden av lageret en interessant variabel. Rundballer har vanligvis lavere densitet enn store firkantballer, og kan heller ikke utnytte volumet i halmlageret like godt som firkantballer. Ved bruk av store firkantballer får en derfor 30-50 prosent mer halm per kubikkmeter lagervolum enn ved bruk av rundballer.

Brukere med halmballene lagret under tak brukte i gjennomsnitt 7 minutter per produserte MWh på ilegging og opptenning, mens brukere som hadde utelager i pølse eller under presenning brukte 17 minutter på dette. For feiing og asketømming gikk det med 2,5 minutter per produserte MWh. Brukeren med firkantballer og anlegg med kontinuerlig fyring brukte i gjennomsnitt 2,5 minutter per produserte MWh til ilegging, fyring og askehåndtering.

Om mye halm samles i et område kan en være tjent med å benytte stor firkantballepresse. Dette øker produktiviteten i halmsamlingen, noe som gjør at en behøver mindre tid og kortere tidsluke med pent vær for å få inn halm av brukbar kvalitet. Videre gir det betydelig reduserte kostnader ved lagring av halmen under tak.

Få og korte perioder med tørt vær etter tresking høstene 2009 og 2011 gjorde halmfangsten litt ekstra utfordrende, men nesten alle brukerne var likevel fornøyd med halmfangsten. De fleste sats-fyrte anlegg kan også fyres med tørt trevirke, og mange av brukerne brukte tørt trevirke som backup eller for fyring på lav last om sommeren.

Nøkkelord: Bioenergi, halm, logistikk, kostnader.

INNHOOLD

1.	Termer og forkortelser	1
2.	Bakgrunn og målsetting	1
3.	Materiale og metoder	5
4.	Resultater	6
4.1.	Halmressursen	6
4.2.	Raking og Pressing	7
4.3.	Balletransport.....	8
4.4.	Vinterlager.....	9
4.5.	Faste kostnader for fyrkjel	11
4.6.	Drift av kjel	12
5.	Systemanalyse	14
6.	Diskusjon og konklusjon	15

1. TERMER OG FORKORTELSER

kg ts kg tørrstoff

t ts tonn tørrstoff

MWh energimengde på 10^3 kWh

TWh energimengde på 10^9 kWh

η eta – virkningsgrad (%)

2. BAKGRUNN OG MÅLSETTING

Politiske målsettinger og økonomiske incentiver for økt bruk av bioenergi

Økt utnyttelse av bioenergi har av flere grunner blitt et hett tema de senere år, også i Norge. Dagens forbruk av fossile energikilder øker konsentrasjonen av CO₂ i atmosfæren, og andelen CO₂ har gått opp med ca 37 prosent siden før-industriell tid (IPCC, 2007). FN's klimapanel IPCC holder det for svært sannsynlig at de siste 40 års markante økning i global gjennomsnittstemperatur er et resultat av menneskeskapt utslipp av klimagasser (IPCC, 2007). Som en konsekvens av dette har den sittende regjering satt seg fore at «Norge fram til 2020 påtar seg en forpliktelse om å kutte de globale utslippene av klimagasser tilsvarende 30 prosent av Norges utslipp i 1990», og videre at Norge skal være karbonnøytralt i 2050 (MD, 2007). Ett av tiltakene skissert i klimameldingen er å øke bruken av bioenergi med inntil 14 TWh innen 2020 (MD, 2007). I Stortingsmelding nr 39, «Klimautfordringene – landbruket en del av løsningen», er målsettingen satt til samme nivå. Samtidig er det stadfestet at Norges jordbruksarealer først og fremst skal forbeholdes matproduksjon (LMD, 2009). For å realisere målsettingene gir norske myndigheter økonomisk støtte til etablering av biobvarmeanlegg tilknyttet gårdsbruk gjennom Innovasjon Norge, samt støtte til utbygging av større fjernvarmeanlegg gjennom Enova. Elektrisk energi øker i verdi, dels på grunn av knapphet og dels på grunn av tettere kobling mot kontinentet. Sammen gjør dette at utnyttelse av biomasse fra jord og skogbruk til energiformål blir et økonomisk interessant alternativ.

Halmressursen

Halm er et biprodukt fra kornproduksjon, og kan nyttes som grovfor, brensel eller andre formål. Bruk av halm som energikilde er således ikke i konflikt med den politiske målsettingen om at norske jordbruksarealer skal forbeholdes matproduksjon. Av totalt ca 8,2 mil da fulldyrka areal i Norge benyttes ca 3 mil da til korn og oljevekster. I Danmark nytter man 3 tonn halm per hektar som realistisk estimat på halmavlinger (Nikolaisen et al., 1998). I Sverige opererer man med en såkalt halm:kjerne-kvote, dvs kg halm ved 18% fukt (i halmen) per kg kornavling ved 14% fukt i kornet. Dette forholdstallet er oppgitt å være 0,6 for hvete, 0,7 for rug og 0,5 for bygg (Bernesson & Nilsson, 2005). Omregnet til tørrstoffmengde for begge sortiment (halm og korn) gir dette et forholdstall på hhv 0,57, 0,66 og 0,47. Bioforsk har nylig gjort omfattende forsøk og analyser på tilgjengelige halmmengder i ulike fylker i Norge (Riley et al., 2011). Deres undersøkelser indikerer at en ved 10 cm stubbehøyde kan forvente forholdstall på 0,6 for 6-radsbygg og høstkorn, 0,7 for 2-radsbygg, 0,8 for havre og 1 for vårhvete. Stubbehøyden har imidlertid mye å si for hvor mye halm som blir igjen på åkeren (Riley et al., 2011). Brutto tilgjengelig halmmengde ligger på 500-700 tusen tonn ts for hele landet, litt avhengig av stubbehøyde og bruk av stråforkorting. Drygt

100 tusen tonn er i bruk til fôr og strø/talle (Riley et al., 2011). Noe bør også bli liggende for å opprettholde moldinnholdet i jorda. Videre vil man på grunn av ustabil vær i innhøstingsperioden neppe lykkes med innhøsting av all halm hvert år. 500 tusen tonn halm tilsvarer et potensiale på 2.4 TWh.

Bruk av halm som brensel

Bruk av halm som energikilde har på ingen måte lange tradisjoner her i landet, og omfanget av dette er både uoversiktlig og begrenset.

I Danmark har utnyttelsen av halm til energi økt i rykk og napp siden midten av 70-tallet, og ligger i dag på ca 5 TWh, tilsvarende ca 1,8 mill tonn og ca 1/3 av halmpotensialet (Danmarks Statistikk - Miljø og energi, 2011), mens man i Sverige utnytter om lag 0,1 mill tonn (Bernesson & Nilsson, 2005). I tillegg til tradisjonell varmeproduksjon med brenning av halmen, har man de senere år fått demonstrert at halm kan benyttes til flere energiprodukter (elektrisk energi, gass, biogass, etanol), noe som på sikt kan øke etterspørselen etter halm og andre biomassefraksjoner fra jordbruket. Omforming via anaerob utråtning til biogass samt nye metoder for forgassing gir muligheter for å føre en større andel av halmens næringsstoffer tilbake til voksestedet (Skøtt, 2011a).

Halm – egenskaper, brenselkvalitet og forbrenningsteknologi

Utover 1980- og 90 tallet ble det i Danmark og Sverige gjennomført en rekke prosjekter for å bestemme halmens forbrenningsegenskaper, estimere tilgjengelige halmmengder og beskrive ulike produksjonskjeder (Nikolaisen et al., 1998; Bernesson & Nilsson, 2005). Halm skiller seg fra trebrensel (ved, flis, briketter, trepellets) ved vesentlig lavere energitetthet (kWh per m³), høyere innhold av aske, klor og alkalimetaller, lavere askesmeltepunkt, og at halm ikke på samme vis som flis kan tømmes i beholdere og mellomlager. Lav energitetthet gir relativt høye transport og lagringskostnader sammenlignet med trebrensel. Klor og alkalimetaller i halmen danner natrium- og kaliumklorid (salter) under forbrenningen. Dette er svært korrosive stoffer, noe som krever spesielle hensyn ved materialvalg og overflatebehandling i brennkammer, varmevekslere og pipe. Det lave askesmeltepunktet vil forårsake sintring og slaggdannelse i brennkammer og varmevekslere om temperaturen blir for høy. Innholdet av klor og kalium kan reduseres betraktelig om halmen utsettes for regn før den presses til ball (Nikolaisen et al., 1998). Som for trebrensel, er lagringsstabilitet og effektiv brennverdi (dvs nyttbar energi for små til mellomstore varmeanlegg) knyttet til materialets fuktighet. Om halmen er fuktig (> 18-20 % fuktighet) under lagring er det gode forhold for mugg- og råtesopp. Dette gir en biologisk nedbryting / forbrenning av halmen, noe som gir energitap i form av tørrestofftap samt økt helserisiko ved håndtering på grunn av økt eksponering av sopp sporer. Selvantennning i høy og halm på grunn av kraftig varmegang er også en kjent årsak til brann i driftsbygninger.

Som ved forbrenning av alle andre biomasser foregår forbrenningen i flere faser. Først fordampes alt fritt vann. Deretter skjer det en pyrolyse (forgasning) hvor brennbare gasser bestående av CO, H₂, CH₄ og andre flyktige emner «dannes» fra biomassen. Disse gassene reagerer med oksygen i en eksoterm reaksjon – som avgir varme. Til sist reagerer oksygen med det såkalt bundne karbonet i biomassen, dvs at det gløder i glohaugen, også dette i en eksoterm reaksjon. Ved fullstendig forbrenning har alt karbon og hydrogen i brenselet reagert med oksygen og dannet CO₂ og H₂O. Ved ufullstendig forbrenning går uforbrente gasspartikler ut med røykgassen, og / eller uforbrent karbon og brenselrester ligger igjen i asken.

Virkningsgraden til et anlegg angir hvor stor andel av den potensielle varmeenergien i brenselet et anlegg avgir som varme til forbruker. Om et anlegg har 60 % virkningsgrad, betyr det at 60 % av teoretisk tilgjengelig varmeenergi i brenselet er avgitt til forbruk, mens 40 % går tapt. Alle anlegg har et visst tap, og dette tapet har hovedsakelig fire årsaker:

1. Varme ut gjennom pipa. Om temperaturen på røykgassen er høy når denne forlater varmeveksleren går denne varmeenergien tapt. Dette må veies mot at om røykgasstemperaturen blir for lav, vil en få kondens på innsiden av skorsteinen. Dette reguleres med temperaturføler på røykgassen ut av varmeveksleren og trekkstyring. Er varmeveksleren nedsotet av aske blir den mindre effektiv, med høyere røykgasstemperatur og lavere virkningsgrad som resultat. Hypping feiing eller automatisk avsoting av varmeveksler hjelper mot dette.

2. Uforbrendte partikler ut gjennom pipa. Om temperaturen i brennkammeret er for lav, eller det er for liten tilførsel av oksygen, vil ikke all CO, tjærestoffer og andre lette partikler fra biomassen brenne opp før de forlater brennkammeret. Dette ser en godt som brunfarget røyk ut fra pipa, og måles gjerne med en CO-måler som angir konsentrasjonen av CO i røykgassen. Jo mer CO – jo mer andre uforbrendte partikler har en i røykgassen. Om en ikke kan skimte røyken der den forlater pipeåpningen (dvs før den kondenserer lenger opp) har en oppnådd nær fullstendig forbrenning av disse partiklene, får mye varme ut av brenselet og lite generende røyk i nabolaget. En Lamdasonde er ofte brukt for å måle konsentrasjonen av O₂ i røykgassen. Om konsentrasjonen av O₂ er for høy betyr dette at en sender unødvendig mye luft til brennkammeret og gjennom kjelen. Om O₂ konsentrasjonen er for lav betyr det at det er for lite luft tilgjengelig for å oppnå fullstendig forbrenning av partiklene i røykgassen. På moderne anlegg er lamdasonde mer eller mindre standard, denne kobles via en styringsenhet til vifter og spjeld for å regulere tilførsel av primærluft og sekundærluft.

3. Uforbrendt biomasse i asken. Er temperaturen eller oksygentilgangen i brennkammeret for lav kan en også risikere at rester av halm eller kull ikke brenner opp. Dette ser en lett på asken, om den er svart eller har halmrester i seg betyr det at en kunne fått mer ut av brenselet. Dette kan også enkelt testes ved å sende asken til laboratorium for å bestemme rest-brennverdien.

4. Dårlig isolering av fyrkjel, akkumulatortank og varmtvannsrør. Er utstyret dårlig isolert vil installasjonen avgi mye varme til omgivelsene. Dette varmetapet kan reduseres med å ha så lav temperatur som mulig i akkumulatortank og oppvarmingskrets.

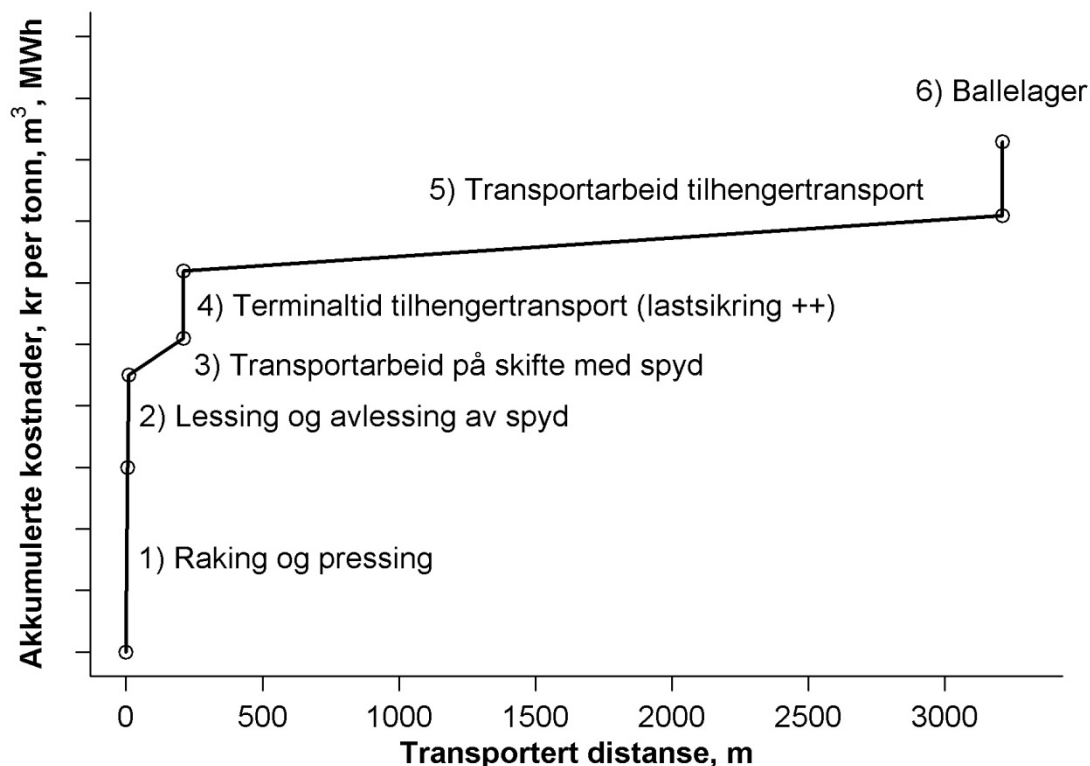
Virkningsgraden til anlegget har stor innflytelse på økonomien og tilfredsstillelsen ved et biovarmeanlegg. Om en oppnår høy virkningsgrad vil en behøve mindre brensel og får dertil lavere energikostnad. Videre går det mindre tid til fyring, det blir mindre generende røyk rundt anlegget og det blir mindre askehåndtering.

For småskala halmfyring (< 1 MW) finnes det to hovedtyper forbrenningsanlegg. Det ene er såkalt sats-fyrte kjeler, hvor et antall halmballer legges inn i brennkammeret hver gang en skal fyre. Halmen tennes på og varmen som utvikles lagres i en akkumulatortank. De første anleggene av denne typen hadde en virkningsgrad på 30-40 % og rundt 1 % CO i røykgassen. Dette har bedret seg markant, og moderne anlegg oppnår en virkningsgrad på 80-85 % og CO konsentrasjon på under 0,1 % når de blir testet for typegodkjennig (Skøtt, 2011b). Ved oppfyring, før temperaturen i brennkammer og varmeveksler når sitt ideelle nivå, er det likevel litt dårlig forbrenning med tilhørende brunrøyk og partikkelutslipp. Den andre typen anlegg mates kontinuerlig med brensel, ved at halmen settes på en såkalt halmbane, og føres mot en halmriver som hakker i stykker ballen og sender halm kontinuerlig inn i kjelen. Denne kjeletypen har noe mer leamikk og er derfor noe dyrere i innkjøp. På den annen side går det mindre tid til ilegging, fyring og askehåndtering, man slipper generende røykutvikling ved opptenning, samt at virkningsgraden vanligvis er noe høyere.

Sintring og slaggdannelse kan være en utfordring i halmfyringsanlegg. Sintring innebærer at pulver (i dette tilfelle aske) vokser sammen til større partikler. Om temperaturen i materialet øker tilstrekkelig, vil disse partiklene smelte (<http://snl.no/sintring>). Den smeltede asken herder når temperaturen går ned igjen, og om asken da har smeltet fast i brennkammer eller varmeveksler kan det være en stri tårn å få den bort. Problemet er størst for havrehalm, og denne halmtypen er derfor i liten grad benyttet som brensel (Bernesson & Nilsson, 2005).

Forsyningskjeden – fra halmstubb til fyrkjel

Som for annen biobrenselproduksjon består forsyningskjeden av en rekke del-operasjoner, hvor hver operasjon innebærer en (forhåpentligvis) hensiktsmessig endring av brenselets form, egenskaper eller posisjon. Figur 1 illustrerer en typisk produksjonskjede for halm. Raking motiveres av at man ønsker å forbedre brenselets egenskaper eller posisjon ved bedre tørking, og at halmen konsentreres i større strenger for å effektivisere ballepressingen.



Figur 1. Prinsippkisse for hvordan kostnadene for prosessering og transport baller på seg utover i forsyningskjeden.

Ved ballepressing endres brenselets form til handterbare og mer kompakte enheter, noe som forenkler og øker kapasiteten i den videre handtering. Ved lessing og transport flyttes brenselet til egnet lagringssted og gjerne nærmere fyrkjelen. Kapasitet til en gitt prosess (for eksempel pressing) kan beskrives med tonn eller kubikkmeter per time, og kapasiteten til en transportenhet beskrives ofte tilsvarende med tonn-km per time. Når en skal analysere kjeder eller sekvenser av operasjoner, er det ofte vel så hensiktsmessig å snu denne brøken – til innsats (timer eller kroner) per produsert enhet (tonn, tonn-km, kWh, se figur 1). Dermed kan innsatsen enkelt summeres gjennom hele kjeden.

Det er mange forhold som er med å bestemme produktiviteten og lønnsomheten ved berging og utnyttelse av halm som brensel. Arrondering og halmavling (kg halm per dekar og løpemeter halmstreng) påvirker produktiviteten ved pressing og sammen-kjøring på det enkelte jorde. Balledensitet, transportdistanse og volumkapasitet på transportutstyret påvirker tidsforbruk og kostnader for å transportere halmen fra jorde til sesonglager.

Målsetting for studiet

Mange aspekter ved bruk av halm som brensel er allerede relativt godt kjent. Likevel hersker det en viss usikkerhet om hvorvidt det er lønt å satse på halm som brensel i Norge. Kan vi forvente samme halm-avlinger her som det de har erfart i Danmark og Sverige? Gjør klima og vekstsesong det enda mer utfordrende å høste halmen i Norge? Gjør våre høye personellkostnader og en eventuelt kortere «tidsluke» for høsting at vi bør velge andre produksjonskjeder, satse på større backup-lagre eller velge andre omformingsprosesser enn tradisjonell forbrenning?

Målsettingen med arbeidet som presenteres i denne rapporten har vært å evaluere ulike alternative logistikk-løsninger for halm med fokus på brenselkvalitet og økonomi. Evalueringen omfatter produksjonskjeden fra halmstubb til og med forbrenning.

3. MATERIALER OG METODER

Brukere

Sju gårdbrukere med egne halmfyringsanlegg har i tre år loggført og rapportert halmavlinger, logistikk-løsninger, logistikk-kostnader, fyringsrutiner og øvrige relevante erfaringer ved sine anlegg. Brukernes rapporter er brukt til å estimere kostnader og andre faktorer som er med på enten å påvirke bergingskostnadene eller totaløkonomien for halmfyringsanleggene.

Halmberging – volum, metoder og kostnader

Halm ble samlet fra jorder med hvete og bygg. Seks av brukerne presset halmen i rundballer, mens en presset dem i store firkantballer (også kalt Hesstonballer eller høydensitetsballer). I noen tilfeller ble halmen på forhånd vendt og samlet med høyrive. Brukerne rapporterte areal på jorde, kornavling, kornslag, halmavling (i antall baller) og anslått eller veid ballevekt og anslått eller målt halmfuktighet. Ut fra dette ble halmavlingen beregnet til kg tørrstoff per dekar. Noen av brukerne engasjerte entreprenører eller nabo til hele eller deler av halminnsamlingsjobben, mens andre gjorde alt selv. De som benyttet entreprenør har i stor grad rapportert kostnader per ball, per dekar osv. De som gjorde jobben selv har notert tidsforbruk per ball, per dekar osv. For å beregne kostnadene ut fra medgått tid har en benyttet timepriser og akkordpriser gitt i de årlige oversiktene som gis ut av Bedre Gardsdrift (Agjeld, 2010) og Norsk Landbruk (Berger, 2010).

Halmlager

Halmen ble lagret enten i lagerhall, under presenning eller pakket i plastfolie. Brukerne med haller rapporterte oppføringskostnad og andre faste kostnader (forsikring, ytre vedlikehold) for sine halmlagre. De som hadde utelagring rapporterte kostnader og tidsforbruk for dette.

Halmfyringsanlegg og halmfyring

Sju anlegg var av typen sats-fyring, dvs 1-3 halmballer legges inn i fyrkjelen, halmballene brennes og energien lagres i en buffertank på kjelen. Et anlegg var med halmriver og kontinuerlig fyring. Alle anlegg hadde energimåler og dermed god kontroll på hvor mye varme anlegget har avgitt til forbruk mellom hver måling. Brukerne har rapportert hvor mye brensel de har brukt, samt tidsforbruk til fyring, feiing og askehåndtering på sine anlegg.

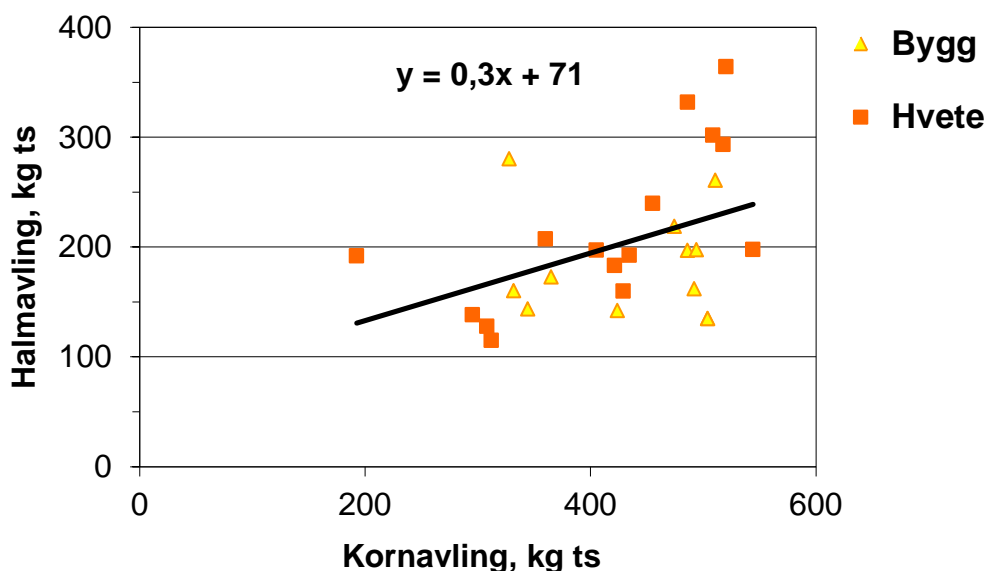
Kostnadskalkyler

Alle kalkyler er i utgangspunktet gjort per tonn tørrstoff (t ts). Ved 18 % fuktighet, som er en realistisk fuktighet for halm, kan man dele tørrstoffmengden på 0,82 for å få reell vekt. Effektiv brennverdi per t ts ved 18 % fuktighet er ca 4,7 MWh. Årlige kapitalkostnader er beregnet for halmlager og fyr-anlegg etter annuitetsmetoden (gir samme total kostnad for renter og avdrag hvert år i hele avskrivningsperioden), hvor antatt skrapverdi for hus og lager er satt til 0, antatt

funksjonstid er satt til 30 år for bygninger og 20 år for teknisk utstyr (fyrkjel og evt matesystem) og inflasjonsjustert nominell rente er satt til 5 %. Leiekjøringsbilagene fra Bedre Gardsdrift og Norsk Landbruk er brukt for å sette pris per maskintime hvor medgått tid er rapportert fra brukerne. I leiekjøringsbilagene oppgis også akkordpriser på mange operasjoner i halmforsyningskjeden, og disse akkordprisene er sammenlignet med kostnadene som er oppgitt eller kalkulert fra brukernes tidsforbruk.

4. RESULTATER

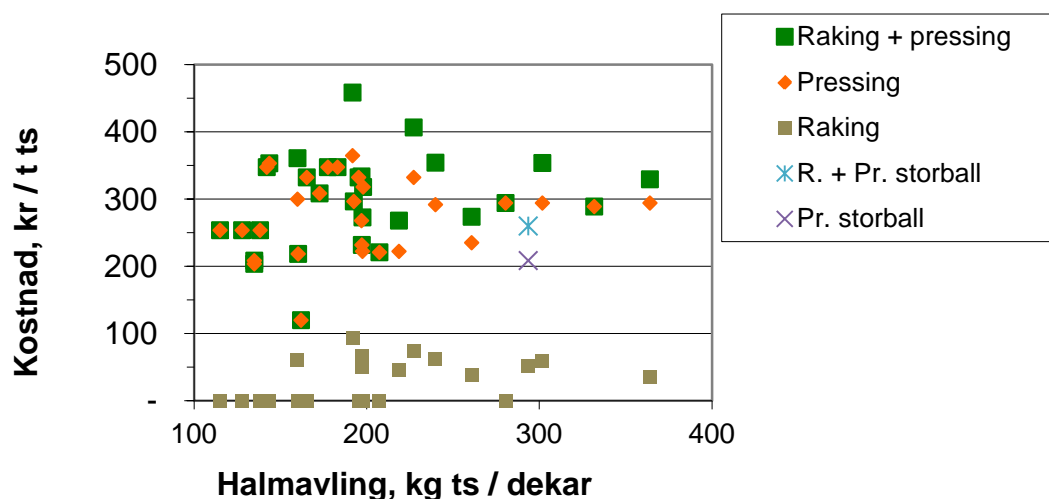
4.1. Halmressursen



Figur 2. Halmavling versus kornavling (kg ts per dekar)

Halmavlingene lå hovedsakelig i intervallet 150 – 300 kg ts per dekar. Om en ser bort fra observasjonen med høyest halmavling for bygg, kan det se ut til at hvete gir noe høyere halmavling enn bygg (figur 2). Undersøkelser ved Bioforsk Øst indikerer også høyere halmavling for hvete enn for bygg, men avlingene til brukerne lå 30-40 % under hva en har observert på Bioforsk (Riley et al., 2011).

4.2. Raking og pressing



Figur 3. Rake og pressekostnader, kr per tonn ts.

Raking ble utført på ca 30 % av jordene. Tidsforbruket for raking var i gjennomsnitt $6,5 \pm 2$ minutter per t ts, Rakekostnaden var 14 ± 3 kr per da og 58 ± 16 kr per t ts. Tidsforbruket for pressing av rundball var 21 ± 7 min per t ts, mens tidsforbruket ved pressing av stor firkantball var 5 minutter per t ts. Kostnaden for rundballepressing var $kr\ 279 \pm 57$ per t ts, mens for firkantball var denne $kr\ 208$ per t ts (fig 3). Det var ingen sammenheng mellom halmavling og pressekostnad.

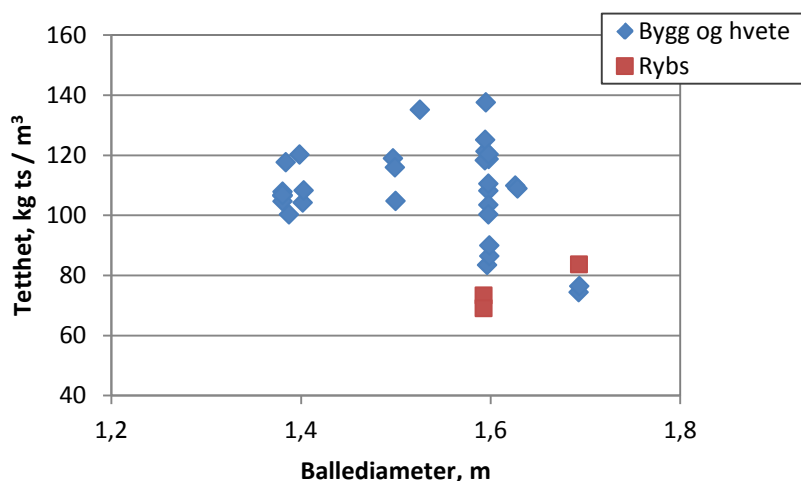
I leiekjøringsbilaget fra Bedre Gardsdrift år 2010 finnes det akkordpriser for store og små rundballer, firkantballer og samlerive som kan sammenlignes med brukernes rapporterte kostnader (Agjeld, 2010).

Tabell 1: Akkordpriser for 2010 (Agjeld, 2010).

	Samlerive	Rundball, Ø 1,5 m, 2,12 m ³	Rundball, Ø 1,2 m, 1,36 m ³	Firkantball uten kutting
Akkord	25 ± 5 kr / da	75 ± 12 kr / ball	55 ± 7 kr / ball	41 ± 7 kr / m ³
Tetthet	200 kg ts / da	100 kg ts / m ³	100 kg ts / m ³	115 kg ts / m ³
kr per t ts	125 ± 25	353 ± 49	405 ± 52	357 ± 61

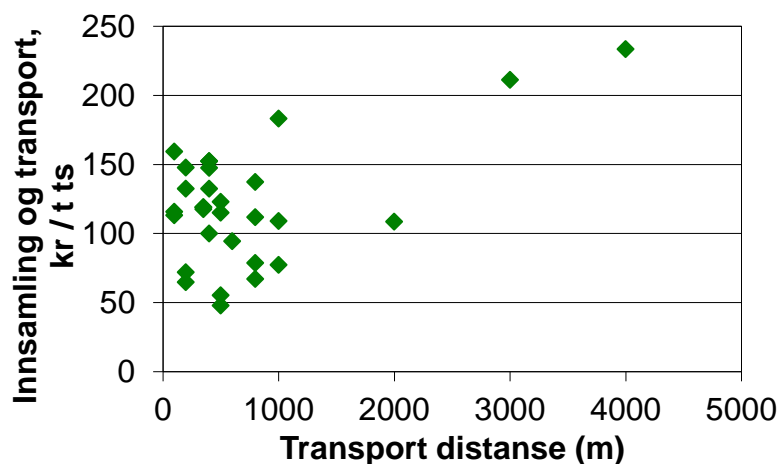
I henhold til akkordprisene fra 2010 en kan forvente seg en kostnad på om lag 125 kr / tts for raking og 340 – 410 kr per tts for pressing. Akkordprisene for raking og ballepressing er dermed henholdsvis 40 – 300 % og 20 – 40 % høyere enn hva brukerne har rapportert.

Halmfuktigheten, målt i rundballer etter pressing, lå i intervallet 16 – 25 %. Tørrstofftettheten lå for rundballene i intervallet 84 – 139 kg / m³ med gjennomsnitt 108 kg ts / m³ (figur 4), noe som er litt høyere enn tidligere rapporter (Bernesson & Nilsson, 2005) hvor de har angitt typisk tetthet i rundballer på 100 kg ts / m³. Det var ingen forskjell i tørrstofftetthet eller fuktighet på halmballer av bygg og hvete, og heller ingen klar sammenheng mellom balleidiameter og tetthet. Tre baller med rybs-halm hadde betydelig lavere tetthet; 70 – 82 kg ts / m³. For firkantballene ble ikke dette målt. Tradisjonelt har firkantballene hatt 10 – 30 % høyere densitet enn rundballene, Bernesson & Nilsson (2005) oppgir en tetthet på 110 – 130 kg ts / m³.



Figur 4. Tetthet i ballene versus balldiameter.

4.3. Balletransport



Figur 5. Transportkostnader, kr / tonn ts versus transport distanse.

Transportkostnadene vist i figur 5 er basert på brukernes rapporterte tidsforbruk og timepris med aktuell traktor og tilleggsutstyr i leiekjøringsbilaget til Bedre Gardsdrift 2010 (Agjeld, 2010). Tidsforbruket var 14 ± 4 minutter per t ts for rundballetransporter og 5 minutter per t ts for transport av firkantballer med selvlessende balehenger. Transportkostnadene var 121 ± 45 kr per t ts. Det virker ikke som transportavstanden hadde så mye å si for transportkostnaden for avstander under 2 km (figur 5). Dette kan være riktig for korte avstander (< 2 km) siden arbeidsforholdene på jordet og ved sesonglager også har mye og si for tidsforbruk og dermed kostnader.

Tabell 2: Transportredskap brukt for halmtransport.

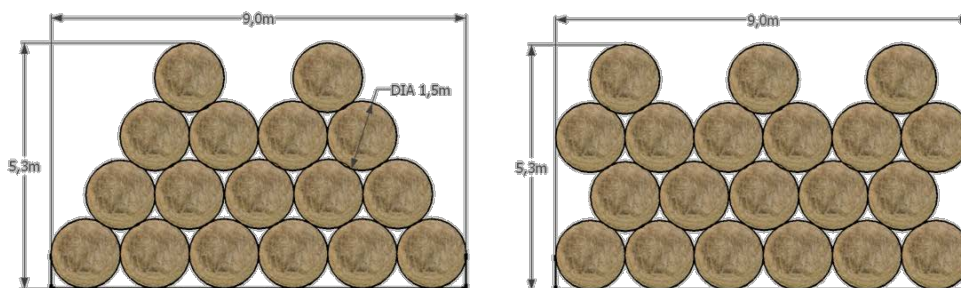
Type	Spyd fram + bak	Traktor- henger	Ballehenger	Lastebil	Selvlessende henger
Lastareal	-	2,4 x 4 m	2,5 x 8,5 m	2,5 x 6 m	2,5x6 m
Kapasitet, t	3	10	12	10-20	8
N rundballer Ø150	4	6	22	12	16 firk baller 1,2x0,7x2,4
Ballevekt, kg ts (kg totalt)	212 (259)	212 (259)	212 (259)	212 (259)	232 (259)
Lassvekt t ts (t totalt)	0,85 (1,0)	1,3 (1,6)	4,7 (5,7)	2,54 (3,1)	3,7 (4,1 t)
Lesse og losse- tid, min per ball	1,5	3	3	3	1
Hastighet, km/h	5	10	10	20	10
Minutt per t ts	7,1 + 14,1s	14,1 + 4,6s	14,1 + 1,3s	14,1 + 1,2s	4,3 + 1,6s
ved 1 km avst	21,2 min	18,7 min	15,4 min	15,3 min	5,9 min
Timepris leie- kjøring 2010	510+/- 60	550+/- 70	570 +/- 75	700 ^{b)}	1500 ^{b)}
Kostnad per t ts ved 1 km	180	171	146	179	147

s er avstand fra jorde til sesonglager i km. ^{b)} eget estimat uten støtte fra prislister for leiekjøring.

For transportarbeidet benyttet brukerne alt fra ballespyd foran og bak via vanlige traktorhengere til selvlessende ballevogn for firkantball. Kapasiteten til de ulike alternativene er vist i Tabell 2. Transporthastigheten kan synes lav, årsaken er at vi har antatt at en ikke har returlass og dermed blir effektiv transporthastighet nesten halvert (evt effektiv transportavstand doblet).

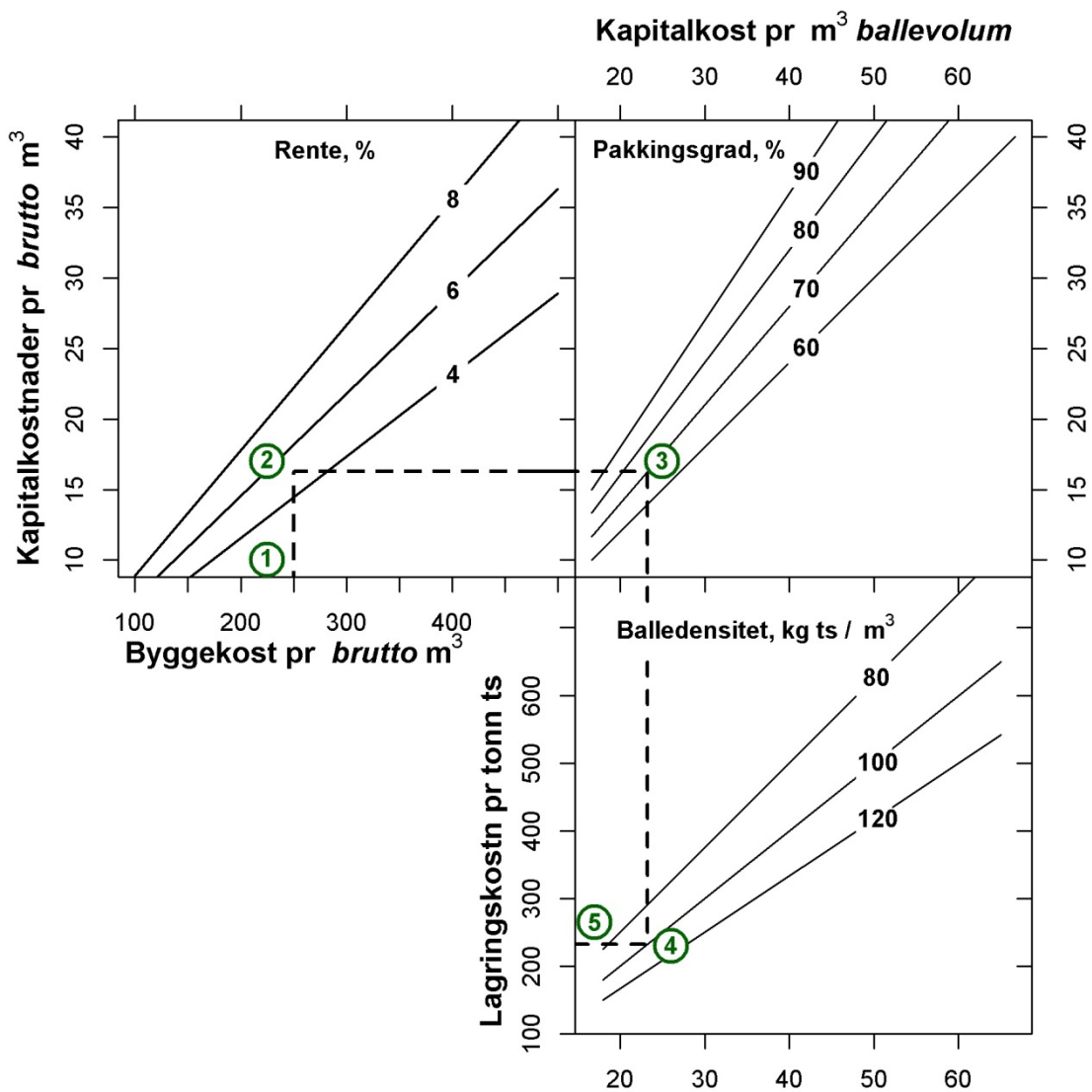
4.4. Vinterlager

Halmballene ble lagret enten ute pakket i pølse, ute under presenning eller under tak i nærheten av fyrkjelen. Ved prosjektets start hadde tre brukere lagerhall for halmballene, og i løpet av prosjektperioden bygde ytterligere tre brukere haller for sine halmballer.



Figur 6. Utnyttelsesgrad ved stabling av rundballer på rundsiden kan teoretisk sett være i intervallet 63% (venstre side) - 74% (høyre side).

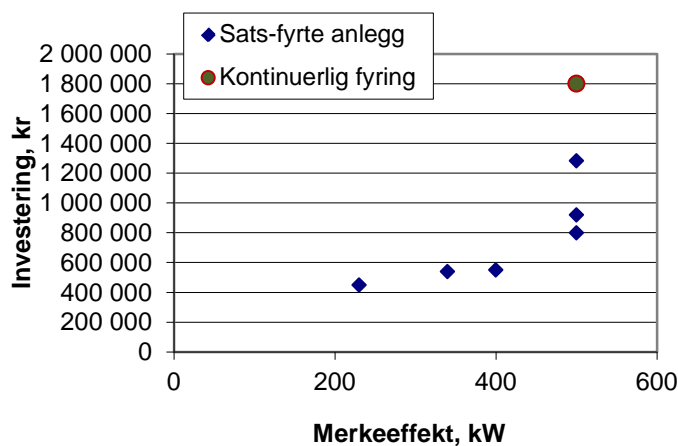
Lagerhallene til de brukerne som nylig hadde bygd kostet kr 400-1700 per kvadratmeter. Om en tar utgangspunkt i en oppføringskostnad på kr 1250 per kvadratmeter for et enkelt stolpehus med 5 m innvendig utnyttbar høyde, gir dette en byggekostnad på kr 250 per m³. Ved 30 års avskrivning og 5 % rente koster dette kr 16 per år og kubikkmeter i renter og avskrivning. Om ballene stables i pyramide på «rundsiden» (dette er mest praktisk om ballene håndteres med spyd) får man erfaringsmessig (fra brukerrapportene) plass til 3,5 m³ rundball per kvadratmeter. Man utnytter dermed 3,5 av 5 m³ og får en utnyttelsesgrad på 70 prosent av volumet ballene okkuperer i lagerbygget. Ved en tetthet på 100 kg ts per m³ ball gir dette en kostnad på kr 230 per t ts (60-70 kr / MWh). Om ballene kan stables oppover langs veggene (se figur 6), blir stablet på høykant, eller ved stabling av firkantballer, kan man få en betydelig høyere pakkingsgrad og dertil lavere lagringskostnader. Figur 7 illustrerer sammenhengene mellom bygge-kostnader, renter, lager utnyttelsesgrad, ballettetthet og lagrings kostnader.



Figur 7. Diagram for lagringskostnader for halm i lagerbygg. Ved en gitt byggekostnad (1) og rentenivå (2) ser man kapitalkostnadene per m³ lagringsvolum i halm lageret. Her har en brukt 30 års avskrivningstid. Ved en antatt pakkingsgrad (3) og balledensitet (4) kan en videre få et anslag på kapitalkostnadene per tonn halm. For å få lagringskostnadene per MWh kan en dele resultatet (5) på 4,7.

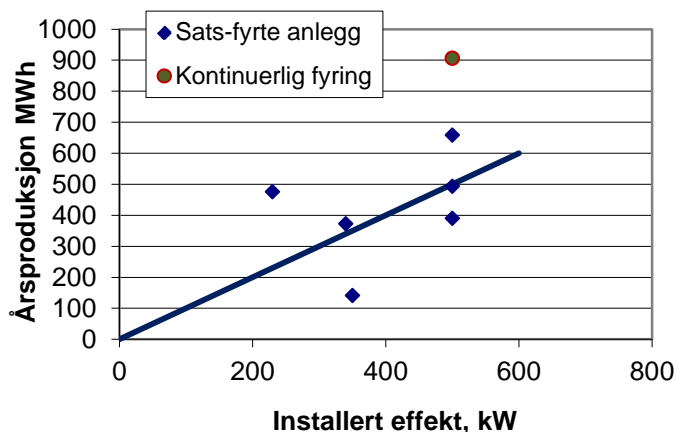
Pølsepakking kostet typisk 20 – 45 kroner per balle inkl plast for brukerne, mens dette er rapportert å koste kr 50 per balle uten plast i leiekjøringsbilagene (Agjeld, 2010; Berger, 2010). Ved ett pris-spenn på 40 – 70 kr per balle med plast, for rundballer med diameter 1,5 m, gir dette en lagerkostnad på 180 – 310 kr per t ts. Dermed er kostnaden for lager i pølse ganske lik et rimelig lagerbygg med lav utnyttelsesgrad (figur 7). Store enkle presenninger koster 3-4 kr / m², så gitt at den holder ut sesongen er dette er et meget rimelig alternativ. For lagring i pølser eller under presenning ga brukerne klare tilbakemeldinger om viktigheten av at halmballene ligger høyt i terrenget på drenert underlag, så det ikke blir stående vann rundt ballene ved snøsmelting og i milde perioder. Videre kunne det danne seg kondens under plasten, og dette problemet var større jo fuktigere ballene er ved innplasting eller overdekking.

4.5. Faste kostnader for fyrkjel



Figur 8. Investeringskostnad for anleggene i studien.

Kostnadene for kjøp og installasjon av sats-fyrte anlegg lå i intervallet 500-1200 000 kr (figur 8). Som tommelfingerregel kan man etter dette budsjettere med kr 2000 per kW installert effekt.



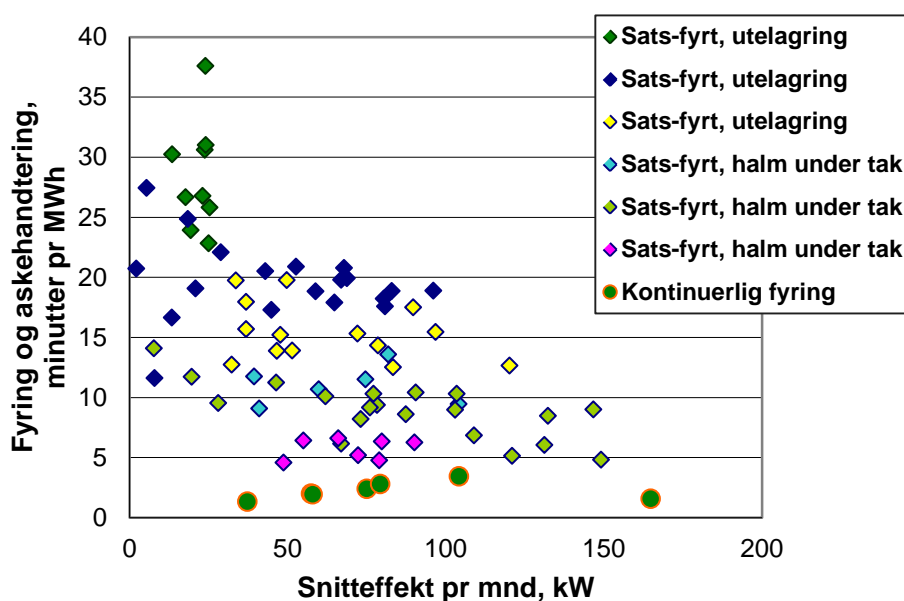
Figur 9. Produsert energimengde første hele sesong per anlegg.

I henhold til figur 9 ser det ut til at de sats-fyrte anleggene er i drift ca 1000 timer per år. For hver kW installert effekt produseres det altså ca 1 MWh per år. Om vi regner kr 2000 per kW installert effekt, 5 % realrente og 20 års avskrivning gir dette en kapitalkostnad på 160 kr per MWh per år, dvs 16 øre per leverte kWh.

4.6. Drift av kjel

Tidsforbruk ved ilegg, opptenning og askehåndtering.

Brukerne noterte tidsforbruk for fyring og askehåndtering samt produsert energimengde hver gang de la i brensel utover vinteren. For sats-fyrte anlegg var tidsforbruket typisk 5 til 30 minutter per produserte MWh, og varierte således betydelig mellom brukerne (figur 10). Noe av variasjonen kunne forklares med arbeidsforholdene ved ilegging og opptenning. De som hadde utendørs lagring, enten i pølse eller under presenning, brukte i gjennomsnitt 20 minutter per MWh, 11 minutter mer enn de som hadde lagring under tak.

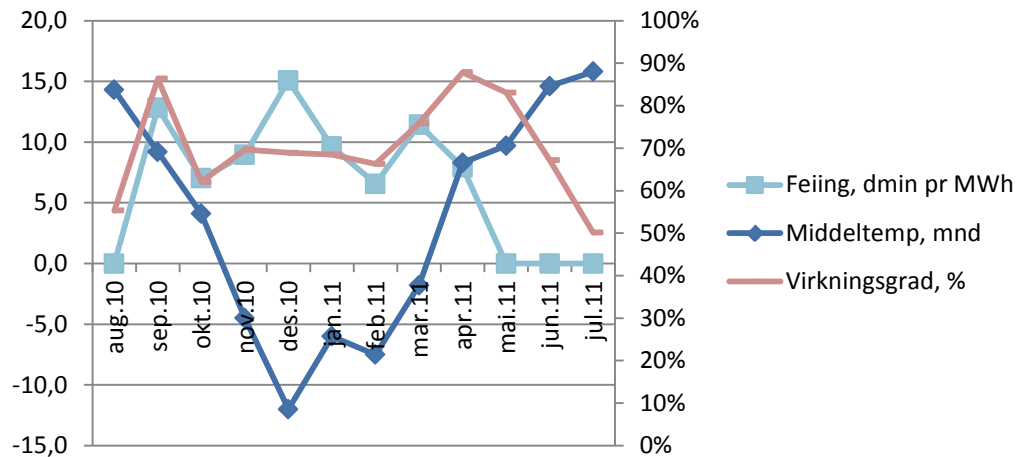


Figur 10. Tidsforbruk fyring, feiing og askehåndtering per produserte MWh. De ulike fargene angir ulike brukere.

Denne ekstra tidsbruken kan skyldes at mer tid går med til å åpne og forsegle halmlageret ved hvert ilegg, og at man av og til må sortere bort baller som har blitt fuktige pga kondens, regn eller dårlig drenert underlag. For anlegget med kontinuerlig innmating var tidsforbruket naturlig nok lavt, etter som 10-15 baller ble lagt på matebåndet i hvert «ilegg» og feiing / askehåndtering i stor grad var automatisert.

Virkningsgrad

Virkningsgraden på anleggene, estimert fra avgitt energimengde per måned og innfyrt brenselmengde, var i gjennomsnitt 79 %, og varierte fra 47 til 120 %. Dette indikerer først og fremst at en har hatt for dårlig oversikt over innfyrt brenselmengde og brenselets energiinnhold. En virkningsgrad i intervallet 70 – 85 % burde være realistisk for satsfyrte anlegg om disse følges opp tilstrekkelig med feiing og vedlikehold.



Figur 11. Virkningsgrad i en fyrsesong for ett anlegg. «Dmin» er desi-minutter, deles på 10 for å få tidsforbruk i minutter.

Figur 11 illustrerer godt at feiing av konveksjonsrør har innflytelse på virkningsgraden. Det kan også se ut som om virkningsgraden går ned ved lav utetemperatur. Dette kan i såfall skyldes at mer varme avgis fra fyrkjel og fyrhus til omgivelsene som strålevarme. Dataene gir imidlertid ikke grunnlag for å kunne anbefale feieintervaller eller et tydelig anslag på hva en kan forvente av virkningsgrad for halmfyringsanlegg. En av brukerne hadde hatt en del utfordringer med styringsenheten på anlegget. Når halmballene er nedbrent skal kjelen normalt stenge lufttilførselen slik at en ikke kjøler ned vannet i konveksjonsflater og akkumuleringstank med kald uteluft. Problemet var at hvis små glohauger lå igjen og ulmet i kjelen fikk styringsenheten melding fra lamdasonden om at oksygenivået sank. Dermed trodde styringsenheten at brukeren hadde fyrt opp, og kjørte en forhåndsprogramert oppstartsprosedyre med stor tilførsel av friskluft til brennkammeret i 10-15 minutter. Dermed gikk varmen til kråka og virkningsgraden ned. Oppdatering av programvaren i styringsenheten løste problemet, og dette eksempelet viser både at kjel-leverandørene fortsatt kan forbedre anleggene, samt at en selv må følge med om anlegget fungerer tilfredsstillende eller ikke.

5. SYSTEMANALYSE

Halmstubb til lager

Kostnadene for ballepressing, innsamling, transport og lagring er sammenlignet for fire ulike forsyningskjeder. Det som skiller dem er utstyr og arbeidsmetoder i transporten fra halmstubb til vinterlager. De ulike forsyningskjedene er angitt i tabell 3. Timepriser, ballevekter osv er som i tabell 2.

Tabell 3. Alternative forsyningskjeder

Delprosess		Kjedealternativ			
		I	II	III	IV
Raking	1	30 % av arealet			
Pressing	2	Firkantball BHL = 1,2 x 0,7 x 2,4		Rundball Ø 150	
Innsamling på jorde	3	Selvlasterende ballehenger (16)	Frontlaster (1), ballehenger (21)	Frontlaster (1), ballehenger (22)	Ballespyd frem bak (4)
Transport	4	“	Ballehenger (21)	Ballehenger (22)	Ballespyd frem bak (4)
Avlessing	5	“	Frontlaster (1)	Frontlaster (1)	Ballespyd frem bak (4)
Sesonglager	6	Stolpehus / lagerhall			

* Tallene i parentes angir antall baller per lass

De to første forsyningskjedene (**I** og **II**) baseres på firkantballer.

I kjede **I** benyttes en Walton Eclipse 5163 selvlasterende ballehenger med kapasitet på 16 firkantballer (1,2 x 0,7 x 2,4 m) for fangst, transport og stabling i stolpehus. Ballene fanges med en lastearm i det man passerer en ball. Ballene lastes og stables automatisk på hengeren mens man kjører mot neste ball. Når hengeren er full kjøres lasset til halmlageret og hele lasset settes av i en 6 m høy stabel.

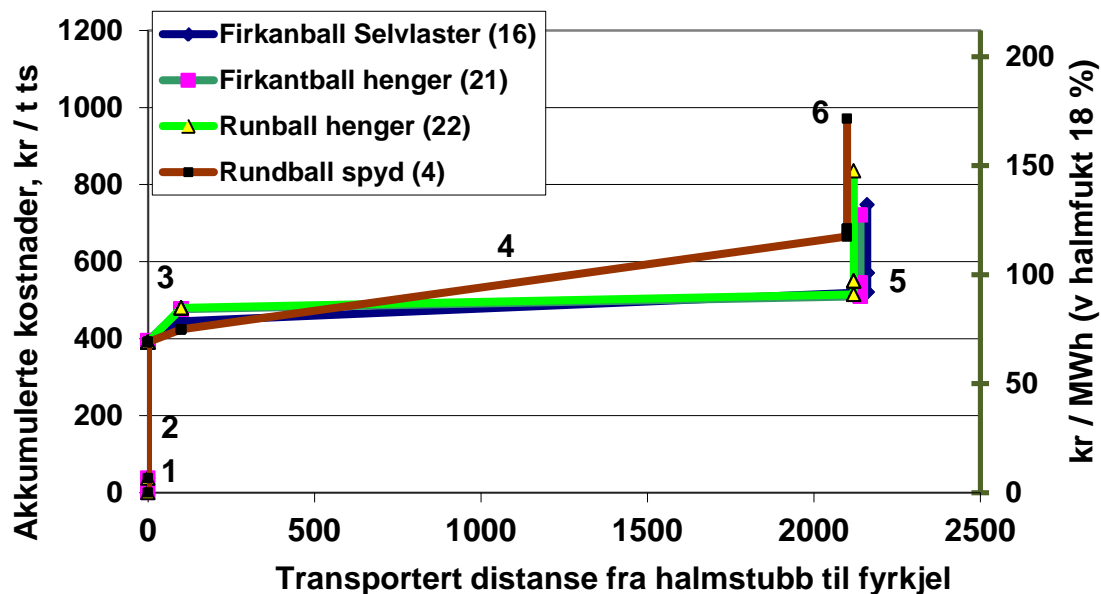
I kjede **II** lesses firkantballene på en vanlig ballehenger med flakstørrelse 2,4x8,5 m. Vi antar at en får på tre lag med 7 baller per lag, slik at høyden på stabelen i hengeren blir 2,1 m og totalt antall baller blir 21. Hengeren lesses på og av med frontlaster, og ballene stables til slutt i et halmlager.

Kjede **III** og **IV** baseres på rundballer med diameter 1,5 m og dybde 1,2 m.

I kjede **III** benyttes samme ballehenger som i kjede **II**. På hengeren er det plass til 22 rundballer om de stables i to høyder. Også her blir ballene lesset på og av med frontlaster, og stables i ballelager for vinteren.

I kjede **IV** transporteres ballene utelukkende med ballespyd foran og bak. Dette er en urealistisk metode for lange transportavstander, men en ser lett hvilken avstand det lønner seg å laste over til henger for.

Alle kjedene ender opp i et halmlager. Her er det antatt en byggekostnad på kr 250 per m³, 5% rente, 30 års avskrivning, balledensitet på 100 og 115 kg / m³ for hhv rundballer og firkantballer, og en pakkingsgrad på 70% og 90% for hhv rundballer og firkantballer.



Figur 12. Sammenligning av kostnadene for fire alternative transportkjeder fra stubb til og med vinterlager. Tallene (1-5) indikerer den enkelte delprosess fra tabell 3. Tallene i parentes etter hver alternative transportkjede indikerer antall baller på hvert lass.

De ulike kjedene kommer (med unntak av spyd over lange distanser) meget likt ut kostnadsmessig (figur 12). Det som gir størst forskjell er lagerkostnaden, som er kr 177 per tonn ts for firkantballene og 286 for rundballene. Innsamling på jorde er noe billigere med selvlasterovogven enn de andre, mens den er dyrere enn de andre på vegtransport. Dette skyldes dens natur: Selvlasterende henger er en kostbar maskin med få brukstimer per år, noe som gir relativt høye kapitalkostnader. Den er svært effektiv til å samle og stable halmen sammenlignet med de andre, men med samme lastekapasitet og kjørehastighet etter veg blir den litt mer kostbar enn de andre alternativene på lange transporter.

6. DISKUSJON OG KONKLUSJON

Halmavling

Halmavlingene lå i intervallet 0,35 - 0,6 ganger kornavlingen, noe som er 30-40 % lavere enn hva man teoretisk sett skal kunne forvente (Riley et al., 2011). Avlingene var også noe lavere enn referansetallene fra Sverige (Bernesson & Nilsson, 2005) og Danmark (Nikolaisen et al., 1998). Dette har flere forklaringer. Mye av halmavlingen blir igjen på åkeren om man stubber høyt under tresking, da stråene er mer massive mot rota enn mot toppen (Riley et al., 2011). Videre blir det gjerne noe spill igjen på åkeren ved at man med rakeutstyr og presseutstyr ikke får med riktig alt opp fra åkeren. For planlegging av halmfangst kan en beregne en halmavling på 200 kg ts per dekar.

Raking av halmen

Hvis halmstrengen har klappet sammen på grunn av regn kan raking være helt nødvendig. I andre tilfeller, for eksempel etter en tresker med smalt skjærebord, kan raking bidra til å senke pressekostnadene samt redusere jordpakking ved at presseren kan kjøre på en mindre del av arealet. Datamaterialet i denne rapporten gir ikke grunnlag for å kunne estimere en eventuell reduksjon i pressekostnadene på grunn av raking. I gjennomsnitt ble ca 30 % av arealet raket før pressing, til en kostnad på 40 – 90 kr / t ts. Utsagn fra brukerne tyder på at andel rakt areal går opp, siden de ønsker at halmen skal ligge og bli vasket av regn før pressing.

Rund eller firkantballer

Seks av sju brukere benyttet rundballer og en benyttet stor firkantball i sin brenselforsyning. Valg av metode skyldes nok i stor grad at en ønsker å bruke eksisterende maskinpark – rundballepresser er mye mer utbredt enn storballepresser i Norge. I områder hvor store mengder halm benyttes til brensel, og hvor også større fjernvarmeanlegg benytter halm, er storballepressene så og si enerådende (Nikolaisen et al., 1998; Bernesson & Nilsson, 2005). Produktiviteten til storballepressene har tradisjonelt vært ca 75% høyere enn rundballepressene (Nielsen, 2003). Mye av forskjellen skyldes at en må stanse fremdriften for å binde nett eller snøre rundt rundballen og slippe den ut av pressa. Med storballepresse kan en kjøre kontinuerlig i skåren, også når ballene bindes. Her i Norge er kostnaden for pressing relativt lik for de to balletypene (tabell 1). Lagerkostnadene blir imidlertid lavere for firkantballene av to årsaker; høyere densitet i ballene, og bedre plassutnyttelse i ballelageret. I mange tilfeller vil høyere tetthet og pakkingsgrad også senke kostnadene på innsamling og transport. I eksemplene og kalkylene for lagring under tak var lagringskostnadene ca 90 kr / t ts lavere for firkantballer enn for rundballer, og man kan i dette tilfelle tolerere 25 % økning i pressekostnaden for firkantballer før det vil lønne seg med rundballer. En åpenbar ulempe med firkantballepresser er at de er relativt tunge (6,5-10 tonn) sammenlignet med rundballepresser (2,5 – 3,5 tonn) og dermed krever gode høsteforhold (tørr jord) og stor trekraft.

Balletransport

Valg av transportsystem hadde relativt lite å si for transportkostnadene (se tabell 2 og figur 9). Dette skyldes at kostnadene for transportekvipasjen er relatert til kapasiteten på utstyret. Kapasiteten kan imidlertid være et viktig moment når innhøstingssesongen er hektisk. Om en skal samle 100 tonn ts (470 MWh) og transportere 1 km, vil en bruke om lag 10 timer med en selvløstervogn som samler storballer og 25 timer med andre løsninger.

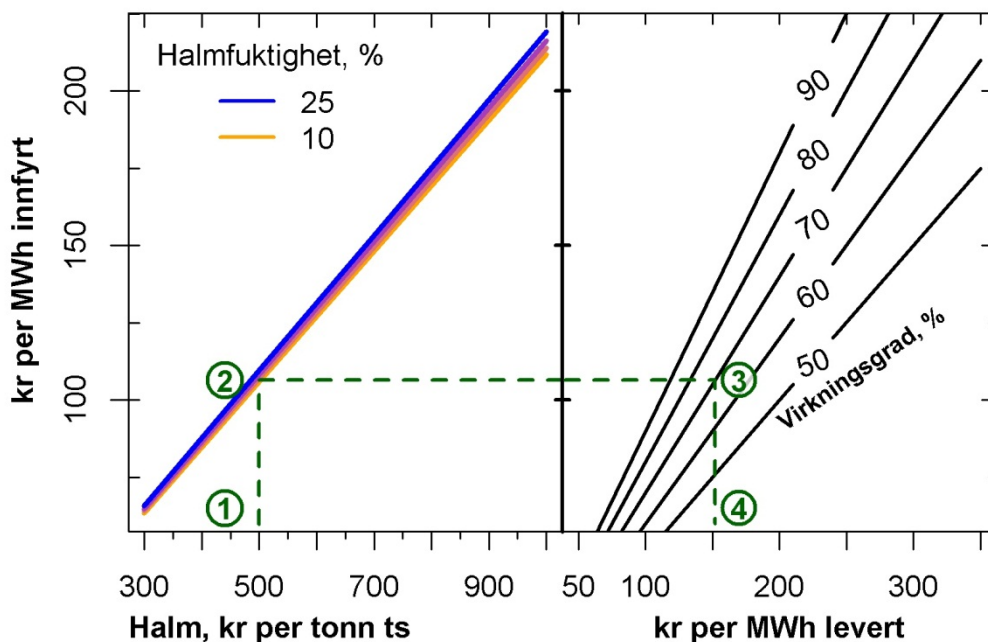
Ballelager – tak, presenning eller plastpølse

Presenning og pøsepakking har den klare fordel at en slipper å binde kapital i et lagerbygg. For å lykkes med denne lagringsformen er det avgjørende at halmballene er tørre før de legges til lager, og at de legges på godt drenert underlag. Om ikke vil halmballene trekke vann nedentil i våte perioder og snøsmelting, og bli våte i toppen på grunn av kondens. For å unngå kondens ved lagring i plast eller under presenning bør halmballene ha en fuktighet på maks 14-15 % (Bernesson & Nilsson, 2005). Flere av brukerne gikk fra utelagerløsninger til lagerhall eller stolpehus for ballelagring, hovedsakelig for å forbedre brenselkvaliteten på halmen. Et annet moment er at halmhandteringen i frysingssesongen ser ut til å bli enklere når halmen er lagret under tak. I denne undersøkelsen var forskjellen ca 10 minutter per produserte MWh, noe som ved en timekostnad på kr 550 (antar at en bruker traktor med frontlaster i denne jobben) tilsvarer ca kr 90 per MWh.

Virkningsgrad

Studiet var ikke lagt opp på en slik måte at en kan slå fast virkningsgraden i det enkelte anlegg. For å ha kontroll på virkningsgraden, må en ha meget god kontroll på hvilke energimengder som er lagt inn i anlegget, og hva som er kommet til nytte som varme ut til forbruker. Alle anleggene hadde energimåler og således god kontroll på hvor mye energi som var levert fra anlegget til varmeforbruk. For å kunne fastslå energiinnholdet i brenselet som brukes, må en vite brenseltype (stammeved, bark, eller halm), brenselfuktighet og vekt. Satsfyrte kjeler med akkumulatortank har tradisjonelt hatt en virkningsgrad på 56-63 prosent, mens kjeler med kontinuerlig mating naturlig nok har en høyere virkningsgrad 77-82 % (Bernesson & Nilsson, 2005). I en dansk undersøkelse på virkningsgrader i nyere (2001 – 2005) mindre stokerfyringsanlegg fyrt med korn og pellets, ble virkningsgraden økt og redusert med opp til 10 % avhengig av hyppigheten på rengjøring av konveksjonsrørene (Pedersen & Nielsen, 2006). Ved laboratorietester oppnår moderne satsfyrte kjeler i dag en virkningsgrad på 80 – 85 % (Skjøtt, 2011b), og kjeleleverandørene oppgir dette

nivået i sine annonser. For å oppnå denne virkningsgraden må en lykkes med å skaffe brensel av god kvalitet, og en må ha gode rutiner for feiing av konveksjonsflater. Figur 12 illustrerer sammenhengen mellom halmkostnad, virkningsgrad og reell brenselkostnad per produserte MWh.



Figur 13. Sammenhengen mellom virkningsgrad og reell brenselkostnad. Ved en brenselkostnad på kr 500 per tonn ts (1) får en (litt avhengig av fuktigheten) en energikostnad på 105 kr per MWh før en korrigerer for anleggets virkningsgrad. Ved en virkningsgrad på 70 % (3) gir dette en reell energikostnad på 150 kr / MWh (4).

Økonomi

Kostnadene for pressing, innsamling og transport lå i intervallet 350 – 450 kr / t ts, tilsvarende kr 75 - 100 per MWh. Lagringskostnadene ble ikke rapportert direkte, men er estimert til å ligge i intervallet 100 – 300 kr per t ts, tilsvarende kr 25 – 65 per MWh. For å få de reelle energikostnadene må en korrigere for kjelens virkningsgrad. Om halmballene har en kostnad på 150 kr / MWh, og fyrkjelen har en virkningsgrad på 75 %, vil den reelle kostnaden være kr 200 per MWh.

Alle kjelene var relativt nye, så vedlikeholdskostnader er knapt registrert. Kapitalkostnadene til anleggene er beregnet til ca kr 160 per produserte MWh. Tidsforbruket til fyring og askehåndtering var i intervallet 5-30 minutter per produserte MWh, dvs en kostnad i intervallet 20 – 150 kr per MWh. Tidsforbruket var relatert til arbeidsforholdene ved kjelen – om ballene lagres under tak i umiddelbar nærhet av fyrkjelen får man det laveste tidsforbruket til fyring.

Den totale energikostnaden for halmfyring med satsfyrte anlegg, når kostnadene i logistikkjeden er korrigert for virkningsgrad, ligger dermed i intervallet 300 – 450 kr per MWh. Dette inkluderer lønnskostnader til eget eller leid arbeid både ved halmfangst, fyring og askehåndtering.

Resultatene fra denne studien er relevante også om halmen skal benyttes til andre formål, som for eksempel strø eller talle. Også da er det om å gjøre å ha så tørr halm som mulig, og en møter derfor mange av de samme utfordringene som når en skal benytte halmen til brensel.

Andre erfaringer fra prosjektet

Flere av brukerne mente de hadde gjort viktige forbedringer i sin halmforsyning gjennom prosjektperioden. Et viktig moment var at en ikke bør presse halmen rett etter tresking. Selv om været blir gråere utover høsten, får en vanligvis anledning til å presse / samle halm helt til godt ut i oktober måned. Halmen blir bedre som brensel jo lengre den får ligge upresset på jorde, såfremt den blir tilstrekkelig tørr før pressing. Høsten 2011 var en svært utfordrende høst med mye grått vær, men selv dette året mente brukerne at de hadde fått inn nok halm og av delvis meget god kvalitet for fyringssesongen. Ugras i åkeren, som gjerne vokser fram i legdeflekker eller etter tidlig tresking, kan være en større utfordring. Om en får grønt gras i ballene vil det bli mye tykk røyk fra fyrkjelen, selv om halmen i seg selv er tørr. Et annet moment i denne sammenhengen er at en bør rake halmen så lite som mulig. Jo flere ganger en rører i halmen, jo mindre avling får en med fra åkeren.

En lettvinnt og effektiv metode for å følge opp hvor godt kjelen utnytter brenselet er å notere hvor mye tørrstoff en legger i kjelen ved hver opptenning, samt hvor mye energi som er avgitt fra kjelen. Om dette summeres for hver måned får en raskt en oversikt over hvor mange MWh en får ut av hvert tonn tørrstoff, og kan derfra beregne virkningsgraden på anlegget. Dette krever at en har vekt og fuktighetsmåler tilgjengelig.

7. REFERANSELISTE

- Agjeld, J. (2010). Maskinleie Prislister. *Bedre gardsdrift*, 8.
- Berger, H. (2010). Leiekjøringspriser. *Norsk Landbruk*, 07/10.
- Bernesson, S. & Nilsson, D. (2005). *Halm som energikälla* (Rapport - miljø, teknik ock landbruk 7). Uppsala: SLU, Institutionen för biometri och teknik.
- Danmarks Statistik - Miljø og energi. (2011). (Publication. Retrieved 2011-01-08, from Danmarks Statistik: <http://www.statistikbanken.dk/statbank5a/default.asp?w=1280>)
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Landbruks- og matdepartementet (2009). *St.meld. nr. 39 (2008-2009) Klimautfordringene - landbruket en del av løsningen* (St.meld. 39). Oslo: LMD.
- Miljøverndepartementet (2007). *Norsk klimapolitikk* (St.meld. nr. 34 (2006-2007)). Oslo: Miljøverndepartementet.
- Nielsen, V. (2003). *Teknik til halmbjærgning siden 1950* (DJF rapport Markbrug nr. 95). Tjele, Danmark: Danmarks JordbrugsForskning.
- Nikolaisen, L., Nielsen, C., Larsen, M. G., Nielsen, V., Zielke, U., Kristensen, J. K., et al. (1998). *Halm til energiformål*. (2 ed.): Videncenter for Halm- og Flisfyring.
- Pedersen, J. & Nielsen, K. J. (2006). *Mindre, stokerfyrede biobrændslefyre* (FarmTest): Dansk Landbruksrådgivning.
- Riley, H., Åsven, M., Todnem, J., & Eltun, R. (2011). *Halm som biobrensel - Tilgjengelige halmmengder, halmbehov til dyrefôr og strø/talle, samt konsekvenser av halmfjerning for jordas bæreevne og kvalitet* (Bioforsk Rapport XX (In print)): Bioforsk.
- Skøtt, T. (2011a). Halm gjennom tiderne. *Forskning i Bioenergi, Brint & Brændselceller*, 8, 15.
- Skøtt, T. (2011b). *Halm til energi - status, teknologier, og innovation, i Danmark 2011*: Agro Bussines Park A/S.

Vedlegg 1 – formler

1. Beregning av årlige kapitalkostnader av en investering med annuitetsmetoden

$$PMT = \left(PV - \left(\frac{R}{(1+i)^n} \right) \right) * \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}}$$

PMT er renter og avdrag per år

PV er investert beløp

R er antatt restverdien etter endt brukstid

i er rentesats eller internrente

n er levetid (år) på investeringen

2. Effektiv brennverdi for halm, kWh per kg tørrstoff, når vekt og fuktighet er kjent.

$$q_{eff} \left(\frac{kWh}{kg\ ts} \right) = 4,86 - \left(0,7 * \frac{F(\%)}{(100-F(\%))} \right)$$

4,86 er effektiv brennverdi for halm med 0 % vanninnhold (kWh / kg ts),

0,7 er fordampningsvarmen som kreves for å fordampe 1 kg vann, (kWh / kg vann).

F er brenselfuktigheten i prosent.

3. Tørstoffmengde, når vekt og fuktighet er kjent

$$kg\ ts = kg\ råvekt * \left(\frac{100 - F\%}{100} \right)$$

4. Virkningsgrad. På bakgrunn av registreringer av varmeproduksjon, brenselforbruk og elforbruk i anlegget kan fyrkjelens virkningsgrad bestemmes.

$$Virkningsgrad\ \eta\ (\%) = \frac{\text{Energigitt fra varmeanlegget}}{\text{Energiforfbrukt (kWh brensel + evt el.)}} * 100$$

Avgitt energi beregnes fra temperaturforskjellen mellom tur og retur rør fra fyrkjel til varmekunde, samt en flowmåler som registrerer hvor mye varmt vann som går i varmekretsen. Dette kobles til et regneverk som regner ut avgitt energimengde. Innfyrte energimengde kan bare beregnes om en kjenner til brenselets brennverdi, vekt og fuktighet.