















Maskin	Placering	Status
 Press 1	0	transport
 Press 2	0	transport
 Press 3	0	transport
 Press 4	0	transport
 Press 5	0	transport
 Press 6	0	transport
 Press 7	0	transport
 Lastare, fält	0	transport
 Transportör 1	0	transport
 Transportör 2	0	transport
 Transportör 3	0	transport
 Transportör 4	0	transport
 Transportör 5	0	transport
 Lastare, lager	0	transport

## Halm som bränsle

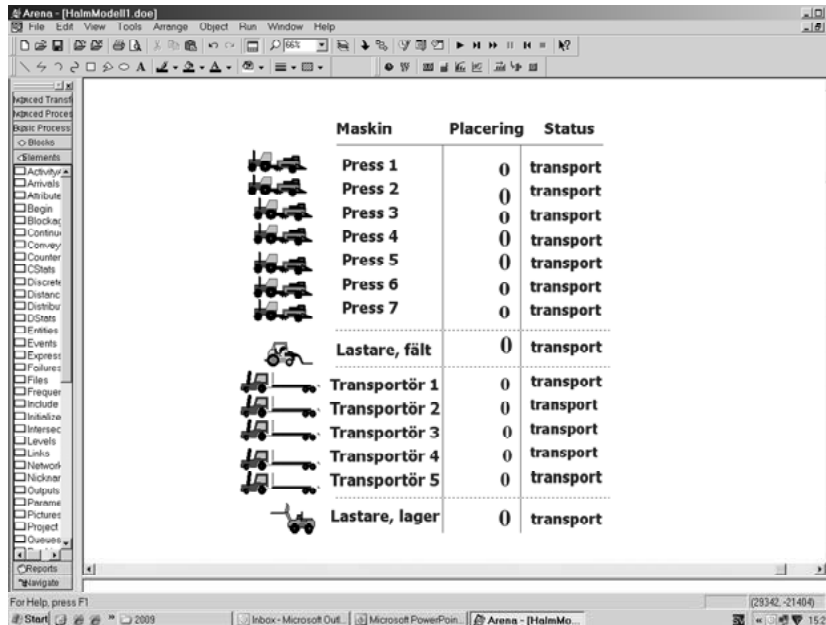
- Del 3: Dynamisk simulering av hanteringssystem















## Straw as fuel

- Part 3: Dynamic simulation of handling systems

Daniel Nilsson  
Sven Bernesson





Maskin	Placering	Status
 Press 1	0	transport
 Press 2	0	transport
 Press 3	0	transport
 Press 4	0	transport
 Press 5	0	transport
 Press 6	0	transport
 Press 7	0	transport
 Lastare, fält	0	transport
 Transportör 1	0	transport
 Transportör 2	0	transport
 Transportör 3	0	transport
 Transportör 4	0	transport
 Transportör 5	0	transport
 Lastare, lager	0	transport

## Halm som bränsle

### - Del 3: Dynamisk simulering av hanteringssystem

## Straw as fuel

### - Part 3: Dynamic simulation of handling systems

Daniel Nilsson  
Sven Bernesson

SLU, Sveriges lantbruksuniversitet  
Institutionen för energi och teknik

Halm som bränsle  
Del 3: Dynamisk simulering av hanteringssystem

Straw as fuel  
Part 3: Dynamic simulation of handling systems

Daniel Nilsson och Sven Bernesson

Report 021  
ISSN 1654-9406  
Uppsala 2010

Nyckelord: biobränsle, halm, bärgning, logistiksystem, dynamisk simulering, biofuel, straw, harvest, logistics systems, dynamic simulation

## SAMMANFATTNING

När halm används som bränsle har logistiken från fält till panna en mycket stor betydelse för både kostnaderna och kvaliteten. Ofta utgör kostnaderna för olika logistikrelaterade arbetsoperationer (bärgning, lastning/avlastning, transport, lagring, m m) upp till 4/5 av de totala kostnaderna. Kvaliteten, uttryckt i termer av vattenhalt, värmevärde, askhalt, asksmälttemperatur, m m, påverkas också av logistiken genom de val som görs när det gäller maskintyp, maskinkapacitet, lagringsmetod, etc. Syftet med denna studie var att identifiera viktiga faktorer som påverkar val av logistiksystem vid halmhantering, och sedan att vidareutveckla en simuleringsmodell som tidigare har använts vid hantering av halm och linhalm. Modellen tillämpades därefter på ett system för leverans av halm till ett antaget mindre värmeverk i Sölvesborgs kommun i Blekinge.

Det finns en rad viktiga faktorer som sätter de yttre ramarna för logistiksystemen vid bärgning av bränslhalm. Exempel på sådana faktorer, som kan karakteriseras som icke påverkbara, är vädret (t ex nederbörd, temperatur, relativ luftfuktighet), geografiska förhållanden (t ex vägnät, fältens storlek, form och koncentration), markegenskaper (t ex jordart och dräneringsegenskaper) och växtrelaterade egenskaper (t ex avkastning, skördetidpunkt och materialets torkningsegenskaper). Med hjälp av data från SMHI, Lantmäteriet, Jordbruksverket, m fl, kan man modellera inverkan av dessa faktorer och på så sätt få reda på hur förutsättningarna för halmbärgning ser ut för en specifik ort/region i landet.

I studien visades att händelsestyrd simulering är ett mycket användbart redskap för modellering av hela maskinsystem från fält till panna (eller mellanlager). Olika maskinuppsättningar, lagerstrategier, organisationsmodeller, m m, kan simuleras och analyseras med hjälp av en mängd olika kvantitativa och kvalitativa resultatmått. Simuleringsprogrammet som användes i projektet (Arena) har stor flexibilitet och kan även användas för simulering av hantering av andra åkerbränslen med liknande problemställningar (korta skördeperioder, stort beroende av vädret, omfattande transportarbeten, m m).

Den framtagna metodiken tillämpades för analys av några hanteringssystem för ett mindre värmeverk i Sölvesborgs kommun. Resultaten visade bl a att kostnaderna för balad halm varierade från ca 140 kr/MWh till 170 kr/MWh. De största potentialerna för att minska kostnaderna finns troligen när det gäller lagring och transporter av halmen. Fler studier behöver göras när det gäller kapaciteter och prestanda för nya maskinsystem, kassationsförluster vid lagren, m m, i syfte att få bättre beräkningsunderlag till kalkylerna. Hantering av fälthackad halm blev betydligt dyrare än balad halm, men för småskaliga tillämpningar bedömdes att det finns potential att minska kostnaderna om man kan ha ett system där flera grödor (energigräs, majs, hampa, m m) hackas och där eventuellt flera olika användningsområden ingår (direkt förbränning, tillverkning av briketter, biogasproduktion, m m).



## ABSTRACT

When straw is used as a fuel, the choice of logistics system from field to heating plant plays an important role for both costs and fuel quality. More than 80 % of the total fuel costs can often be assigned to different logistics operations, including harvest, loading, transport, unloading, storage, etc. The fuel quality, expressed in terms of moisture content, heating value, ash content, ash softening temperature, etc., is also, to a certain degree, dependent on the logistics, i.e. the choice of machinery, storage methods, etc. The objective of this study was to identify important factors that influence the choice of logistics system for fuel straw, and to further develop an existing simulation model for straw handling. This model was then applied to a system for delivery of fuel straw to a fictitious small-scale heating plant in the municipality of Sölvesborg in south Sweden.

There are a number of factors that determine the outline of the logistics systems for fuel straw. Some examples are not controllable, such as the weather (e.g. amount of rain, temperature, relative humidity), geography (e.g. road network, size, shape and concentration of fields), soil properties (e.g. soil type and drainage characteristics), and crop-related characteristics (e.g. yield, harvest time and drying properties). By means of data from SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute), Lantmäteriet (the Swedish mapping, cadastral and land registration authority) and Jordbruksverket (Swedish Board of Agriculture), the impact of these factors can be modelled. Thereby the conditions for straw harvest in specific regions in Sweden can be investigated.

Discrete event simulation is a very useful tool to model the whole machine system from field to heating plant (or storage). Different sets of machinery, storage strategies, types of organisation, etc. can be simulated and analysed by means of different quantitative and qualitative measures. The simulation programme used in this study (Arena) has a great flexibility and can also be used for simulation of handling of other biofuels with similar harvest and handling difficulties (short harvest periods, dependence on the weather, extensive transport work, etc.).

The results from the application of the model to a small-scale plant showed that the costs varied from 140 SEK/MWh to 170 SEK/MWh. The operations with the largest potential to further reduce costs were considered to be transport and storage. Further studies are also required regarding machine capacities, storage losses, etc. in order to get more reliable data for the simulations and cost calculations. Costs for handling of chopped straw were considerably higher compared to baled straw. However, it was concluded that there is a potential to reduce costs by including chopped crops with other harvest times (e.g. energy grass, maize, hemp) in the handling system, and also by including other possible areas of use (production of briquettes, biogas, etc.).





## FÖRORD

Logistiken för bränslehalm från fält till panna har en avgörande betydelse för dess kostnader. Ofta utgör kostnaderna för olika logistikrelaterade arbetsoperationer upp till 4/5 av de totala bränslekostnaderna. Även halmens användbarhet och kvalitet påverkas starkt av valet av hanteringssystem. I denna studie presenteras en dynamisk simuleringsmodell med vars hjälp man kan analysera olika maskinsystem för bärgning och hantering av halm. Modellen baserar sig på s k händelsestyrd simulering, som är en mycket användbar metod för modellering av komplexa logistiksystem.

Denna rapport är den tredje av tre som beskriver resultaten i ett forskningsprojekt om bränslehalm ("Kostnader, tillgångar och kvalitet hos bränslehalm") vid Institutionen för energi och teknik, SLU. Den första rapporten heter "Halm som bränsle. Del 1: Tillgångar och skördetidpunkter" (rapport 2009:011), och den andra "Halm som bränsle. Del 2: Fuktegenskaper" (rapport 2009:018).

Till projektet har en referensgrupp varit knuten, bestående av Per-Anders Hansson, SLU, Gunnar Lundin, JTI, Sven-Göran Green, Lantmännen Energi, och Nils-Erik Bondesson, LRF Sydost. Vi vill tacka dem för deras medverkan.

Slutligen vill vi framföra vårt tack till Stiftelsen Lantbruksforskning (SLF), som har finansierat projektet.

Uppsala, 10 mars 2010

Daniel Nilsson och Sven Bernesson



## INNEHÅLL

1. INLEDNING .....	9
1.1. Bakgrund .....	9
1.2. Syfte .....	10
1.3. Läsanvisning .....	10
2. SYSTEMBESKRIVNING .....	11
3. MODELLERING AV ICKE PÅVERKBARA SYSTEMFAKTORER .....	13
3.1. Väder .....	13
3.2. Markens vatteninnehåll .....	14
3.3. Halmens vattenhalt .....	16
3.3.1. Förändringar i mängden bundet vatten .....	16
3.3.2. Avdunstning och kondensation .....	17
3.3.3. Förändringar av mängden fritt vatten .....	18
3.3.4. Använda modellparametrar .....	18
3.4. Geografiska förhållanden .....	21
3.5. Växtrelaterade förhållanden .....	21
3.5.1. Avkastning .....	22
3.5.2. Skördetidpunkter .....	22
3.5.3. Halmens ”gråhet” (kvalitet) .....	23
4. MODELLERING AV MASKINSYSTEM .....	25
4.1. Händelsestyrd simulering .....	25
4.2. Modellering av maskinoperationer .....	30
4.3. Verifiering, validering, variansreduktion, m m .....	33
5. TILLÄMPNING FÖR ETT MINDRE VÄRMEVERK I SÖLVESBORGS KOMMUN ...	36
5.1. Tillgängliga halmmängder .....	36
5.2. Indata .....	38
5.2.1. Väderdata .....	38
5.2.2. Markdata .....	39
5.2.3. Geografiska data .....	39
5.2.4. Växtdata .....	41
5.2.5. Maskindata .....	42
5.3. Resultat och diskussion .....	45
5.3.1. System med balad halm .....	45
5.3.2. Lagring .....	49
5.3.3. Några känslighetsanalyser .....	51
5.3.4. System med hackad halm .....	51
6. AVSLUTANDE DISKUSSION .....	54
7. SLUTSATSER .....	57
REFERENSER .....	58
BILAGA 1. HALMFRAKTIONERING FRÅN OLIKA TRÖSKTYPER .....	61
BILAGA 2. LOKALISERING AV FÄLT .....	63
BILAGA 3. FÖRÄNDRINGAR AV ASKHALT OCH VÄRMEVÄRDE I FÄLT .....	64



# 1. INLEDNING

## 1.1. Bakgrund

När halm används som bränsle har logistiken från fält till panna mycket stor betydelse för både kostnaderna och kvaliteten. Ofta utgör kostnaderna för olika logistikrelaterade arbetsoperationer (bärgning, lastning/avlastning, transport, lagring, m m) upp till 4/5 av de totala kostnaderna (Bernesson & Nilsson, 2005). Kvaliteten, uttryckt i termer av vattenhalt, värmevärde, askhalt, asksmält-temperatur, m m, påverkas också av logistiken genom vilka val som görs när det gäller maskintyp, maskinkapacitet, lagringsmetod, etc.

Generellt spelar logistik i dess olika former en mycket viktig roll i dagens samhälle. Begreppet logistik har dock många olika betydelser, beroende på i vilket sammanhang det används. En allmän uppfattning är ofta att begreppet handlar om att leverera ”rätt produkt i rätt tid till rätt plats med rätt kvantitet och rätt kvalitet till rätt pris”. Detta betyder att begrepp som leveranssäkerhet, ruttplanering, lagerstyrning, m m, ingår i logistikbegreppet. Council of Logistics Management (CLM) i USA definierade logistik som ”the process of planning, implementing and controlling the efficient, cost-effective flow and storage of raw materials, in-process inventory, finished goods and related information from point of origin to point of consumption for the purpose of conforming to customer requirements” (Blanchard, 1992). I denna definition framgår det tydligt att det är konsumentens/användarens önskemål som står i fokus. Dessutom framgår det att man alltid har ett systemperspektiv när man arbetar med logistikfrågor.

Halmens bärgning och logistik är beroende av en mängd olika faktorer, både sådana som kan klassificeras som icke påverkbara och sådana som kan klassificeras som påverkbara. Exempel på icke påverkbara är väderförhållandena (som bl a styr halmens och markens vatteninnehåll), markförhållandena (t ex när fälten är körbara med tanke på risken för markpackning), geografiska förhållanden (t ex fältstorlek, fältens lokalisering och koncentration, vägnät, m m), och faktorer relaterade till halmgrödorna (t ex avkastning och skördetidpunkter) (observera att dessa s k icke påverkbara faktorer *de facto* till viss del kan påverkas, t ex skiftesstorleken, men dettas bortses från här). Exempel på påverkbara faktorer är organisation och styrning av de olika arbetsoperationerna (både på strategisk, taktisk och operationell nivå), samt val av teknisk utrustning för att utföra själva arbetsoperationerna.

Med hjälp av moderna simuleringsprogram kan man på datorn ta hänsyn till både påverkbara och icke påverkbara faktorer för att analysera olika logistiksystem i syfte att öka halmens konkurrenskraft som bränsle. En stor fördel med simulering är att man kan testa och analysera olika systemlösningar utan att först behöva realisera dem i verkliga maskiner, byggnader, m m. En förutsättning för tillförlitliga resultat är dock att modellen är validerad, d v s att den verkligen avbildar systemets relevanta egenskaper, och att den är verifierad, d v s att den fungerar så som det var avsett (d v s att den inte har några ”buggar”).

I litteraturen finns några enstaka tillämpningar beskrivna när det gäller simulering av stråbränslehantering. Nilsson (1999a; 1999b) analyserade t ex olika hanteringssystem för halm på tre olika platser i landet med hjälp av en dynamisk simuleringsmodell kallad SHAM (i dessa referenser finns också en genomgång av tidigare halmmodeller i litteraturen). Nilsson och Hansson (2001) inkluderade också rörfen i den dåvarande modellen för att studera eventuella samordningsvinster. Senare anpassade Nilsson (2006; 2007a) modellen även för hantering av linhalm. Utomlands har dynamisk simulering nyligen bl a använts i Nordamerika för simule-

ring av hanteringssystem för ”switch-grass” (Sokhansanj m fl, 2006; Kumar & Sokhansanj, 2007).

## **1.2. Syfte**

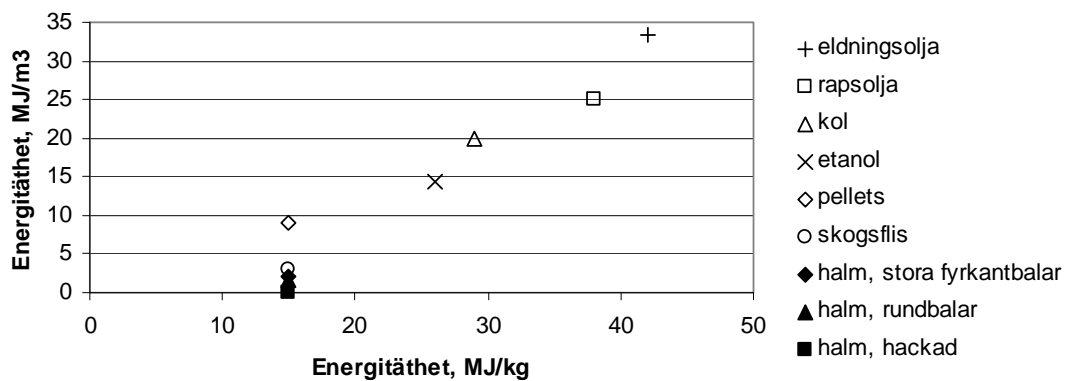
Syftena med denna studie var a) att identifiera och vid behov modellera viktiga faktorer som påverkar kostnaderna och kvaliteten vid halmens väg från fält till panna, b) att vidareutveckla den simuleringsmodell som tidigare har använts av Nilsson (1999a; 1999b; 2006; 2007a) för hantering av halm, och c) att därefter tillämpa modellen på ett system för leverans av bränslehalm till ett mindre värmeverk i Sölvesborgs kommun i Blekinge. Som indata kommer bl a resultaten från tidigare delstudier i detta projekt att användas, dels när det gäller halmens tillgångar och skördetidpunkter (Nilsson & Bernesson, 2009a), och dels när det gäller halmens fukttegenskaper (Nilsson & Bernesson, 2009b).

## **1.3. Läsanvisning**

I kapitel 2 ges en beskrivning av det studerade systemet, i kapitel 3 presenteras hur olika yttre faktorer såsom väder, halmens vattenhalt, markvattenhalt, geografiska förutsättningar, m m, hanteras i modellen, och i kapitel 4 beskrivs hur själva maskinarbetet modelleras. Kapitlen 3 och 4 innehåller ganska detaljerad information om själva modellen, och den som enbart är intresserad av hur systemet ser ut och hur modellen kan tillämpas på ett specifikt system, hänvisas till kapitlen 2, 5 och 6.

## 2. SYSTEMBESKRIVNING

Halm har flera särdrag jämfört med många andra bibränslen. Halmens energitäthet, uttryckt som MWh per volymsenhet, är mycket låg (se figur 1) (däremot är halmens energitäthet per viktsenhet ungefär samma som för andra fasta bibränslen). Vidare är dess yttäthet, uttryckt i MWh per hektar, förhållandevis lågt. Typiska värden kan vara 10-20 MWh/ha, vilket endast motsvarar 0,1-0,2 % av det infallande solljuset under ett år. Detta innebär att transportarbetet blir omfattande och kostsamt. Även om halmen kompakteras med högdensitetspressar med ett tryck på 0,3-0,5 MPa, blir densiteten ofta inte högre än  $150 \text{ kg/m}^3$ , vilket motsvarar mer än 90 % luft i balen (Wolf, 1986).

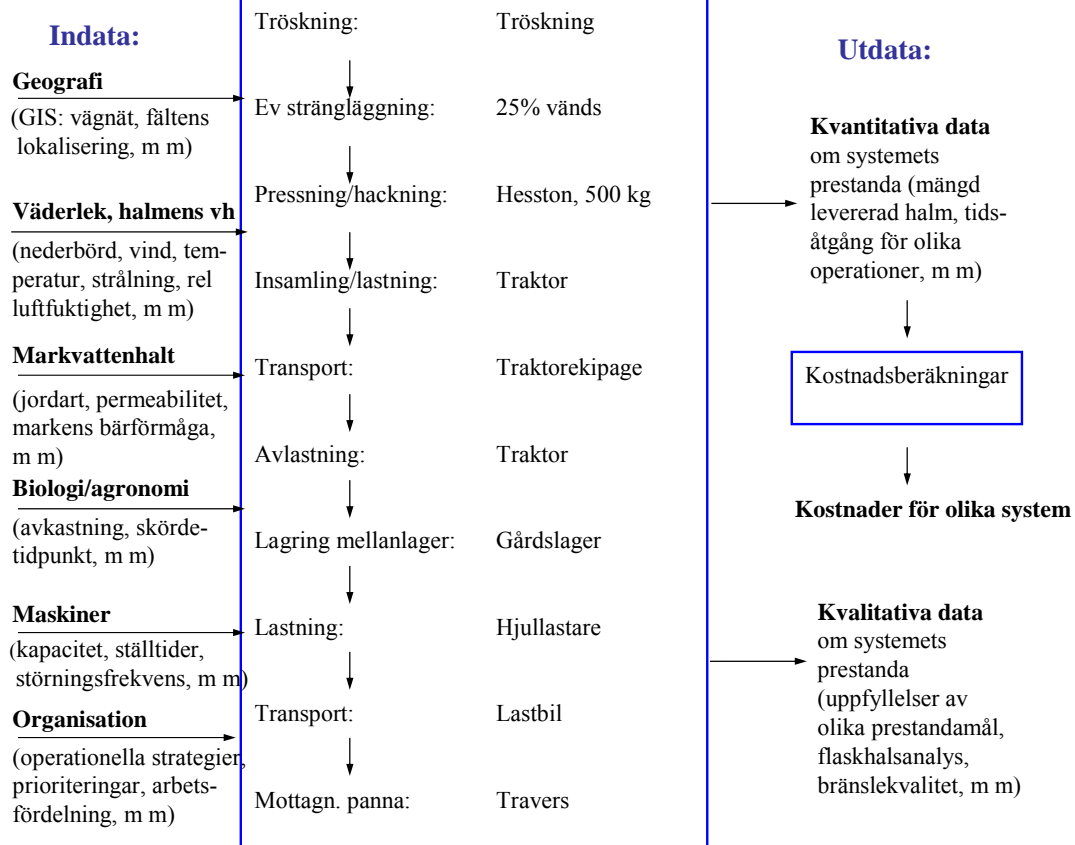


Figur 1. Halmens energitäthet, uttryckt som MJ/kg och MJ/m<sup>3</sup>, jämfört med andra bränslen. Ritat efter Hartmann (1998).

Halm har också en kort bärgningsperiod; ibland kanske endast någon eller några veckor per år beroende på rådande väderlek. Detta betyder i princip att hela mängden halm måste lagras, och dessutom blir det årliga utnyttjandet av specialmaskiner mycket kort, vilket fördyrar deras användning. Halm är även ett hygroskopiskt och biologiskt nedbrytbart material, och måste därför både ha en tillräckligt låg vattenhalt vid pressningen och skyddas från fukt under lagringen. Slutligen har halm speciella bränsleegenskaper (hög askhalt, låg asksmälttemperatur, stor korrosionsbenägenhet, m m), vilka bl a påverkas av vilken gröda halmen härrör från, vilken jordart som finns på växtplatsen, hur mycket nederbörd som fallit på halmsträngarna och därmed hur mycket av olika problematiska ämnen (t ex alkali och klor) som har lakats ut, m m (Nikolaisen, 1998).

Av det ovanstående framgår att hanteringen från fält till panna har en mycket stor betydelse för halmens kostnader och kvalitet som bränsle. I figur 2 visas en principskiss över hur ett hanteringssystem kan se ut, tillsammans med de utdata som är relevanta för att utvärdera systemets prestanda och kostnader. Viktiga indata som påverkar utfallet är geografi, väder (som bl a påverkar halmens vattenhalt), markegenskaper och växtrelaterade egenskaper för den specifika platsen för värmeverket/upptagningsområdet, samt utformningen av maskinkedjor och organisation. Kvantitativa utdata, t ex hur mycket halm som det valda hanteringssystemet lyckades bärga per år, eller hur många timmar en viss maskin var i tjänst, kan användas för att beräkna kostnaderna. Data av mer kvalitativ karaktär, t ex hur länge halmen fick ligga på fälten mellan tröskning och pressning, kan vara ett mått på hur väl systemet var dimensionerat, men också ett indirekt mått på halmens bränslekvalitet (om den var ”gul” eller ”grå”).

### Exempel på logistikoperationer och maskinkedja:



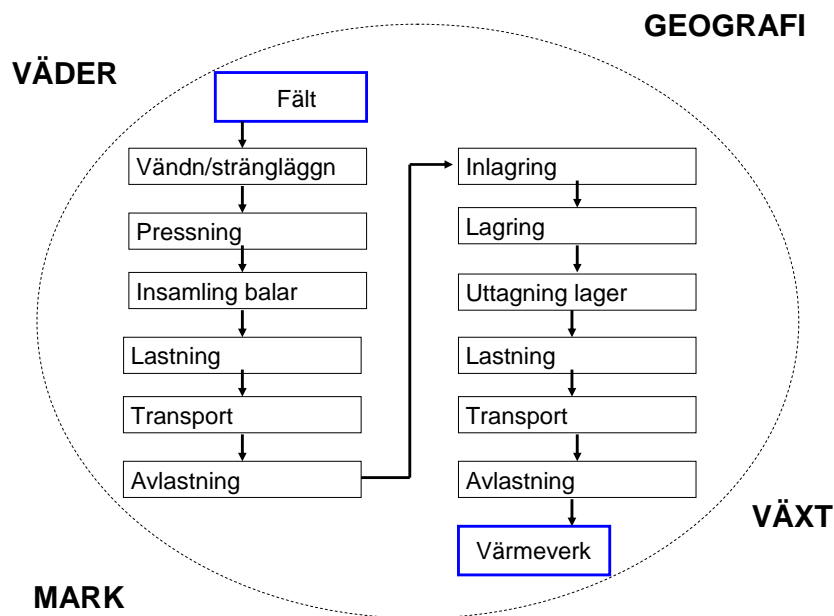
Figur 2. Exempel på faktorer som påverkar halmens logistiksystem (t v), exempel på arbetsoperationer och maskinkedja för hantering av halm från fält till panna (mitten), samt exempel på prestandadata som kan användas för att utvärdera olika system med avseende på bl a kostnader (t h).

Ett användbart hjälpmedel för att analysera komplexa hanteringssystem är datorsimulering. Några fördelar med att simulera är att man kan analysera en stor mängd olika alternativ med hjälp av datorn utan att först behöva bygga upp verkliga maskinsystem. En annan fördel är att man kan finna ”optimala” strategier där olika yttre faktorer som inte går att kontrollera i verkligheten, t ex väder och geografiska förhållanden, kan varieras på ett kontrollerat sätt. En förutsättning för att resultaten ska vara tillförlitliga och omsättbara i praktiken är att modellen har tillräckligt hög validitet (d v s efterliknar det verkliga systemets relevanta egenskaper i så hög grad som möjligt) och att den är verifierad (d v s att själva modellen fungerar som det är avsett).



### 3. MODELLERING AV ICKE PÅVERKBARA SYSTEMFAKTORER

Som nämnts tidigare, kan väder, markegenskaper, geografiska förhållanden och olika växtrelaterade egenskaper anses vara exempel på icke påverkbara systemegenskaper. Dessa faktorer sätter de yttre ramarna för bärningen och hanteringen av halm från fält till panna (se figur 3). Nedan beskrivs hur dessa faktorer kan modelleras. Själva modelleringen görs i datorprogrammet Arena, som beskrivs i kapitel 4.



Figur 3. Exempel på yttre icke (oftast) påverkbara faktorer som har stor inverkan på valet av logistiksystem för halmbränslets väg från fält till panna.

#### 3.1. Väder

Vädret har en avgörande betydelse vid utformningen av logistiksystemet, exempelvis bestämmer det när olika maskinoperationer kan utföras. Dessutom kan olika väderparametrar användas som indata för att bli beräkna markens vatteninnehåll och halmens vattenhalt. Genom att använda historiska väderdata från så många år som möjligt bakåt i tiden, kan man få en uppfattning om hur vädrets årliga variationer under skördeperioden påverkar logistikkostnaderna, bränslekvaliteten och leveranssäkerheten.

De väderparametrar som används i den framtagna simuleringsmodellen är lufttemperatur, relativ luftfuktighet, vindhastighet, globalstrålning, molnmängd och nederbörd (se tabell 1). Dessa data kan erhållas från SMHI, och mätstationerna bör ligga så nära det aktuella halm-bärningsområdet som möjligt. I modellen görs simuleringarna för perioden 15 juli till 30 september under totalt 20 år (1990-2009), och data inhämtas alltså för totalt 1 560 dygn. När det gäller lufttemperaturen, den relativa luftfuktigheten, vindhastigheten, globalstrålningen och molnmängden, används observationer (eller beräknade värden) för var tredje timme (kl 01.00, 04.00, 07.00, 10.00, 13.00, 16.00, 19.00 och 22.00; svensk normaltid), och linjär interpolation görs sedan för att få timvärden. Nederbördsobservationerna är gjorda kl 07.00 och kl 21.00 (svensk normaltid). Totalt används alltså 65 520 väderobservationer vid simuleringarna.

I modellen benämns vädret under en specifik skördesäsong för en vädersekvens, och om man gör 20 simuleringar är det lämpligt att ta med alla vädersekvenser i en följd. Om man vill göra färre eller fler simuleringar för varje scenario, kan de olika vädersekvenserna väljas ut slumpmässigt.

*Tabell 1. Beskrivning av de olika väderparametrarna som används i simuleringarna*

Parameter	Sort	Mätinfo
Lufttemperatur	°C	Mäts på 1,5 m höjd
Relativ luftfuktighet	%	Mäts på 1,5 m höjd
Vindhastighet	m/s	10 minuters medelvind på 10 m höjd
Globalstrålning	W/m <sup>2</sup>	Direkt och diffus strålning mot en yta
Molnmängd	oktas	Anges i åttondelar (oktas)
Nederbörd	mm	Mäts via kanna i vindskärm på 1,5 m höjd

### 3.2. Markens vatteninnehåll

I simuleringarna används en enkel modell för att ta hänsyn till markvattenhalterna. Om marken är för blöt, tillåts inga maskinoperationer i syfte att bli undvika fastkörningar och packningsskador. Modellen baseras på en markvattenmodell utvecklad av Witney m fl (1982) och Witney (1995). Som indata används uppgifter om vädret (t ex nederbörd och avdunstning) och markens egenskaper (t ex vattengenomsläpplighet).

Markvattenhalterna beräknas vid två tidpunkter per dygn; kl 7.00 och kl 19.00 (svensk normaltids). Markens aktuella vatteninnehåll  $w_a$  (uttryckt i mm) beräknas med hjälp av följande balansekvation

$$w_a = w_f + P - R - D - E_a \quad (1)$$

där  $w_f$  är markvattenhalten vid föregående beräkning (mm), i detta fall för 12 timmar sedan, och där  $P$  (mm) är nederbörden,  $R$  (mm) ytavrinningen,  $D$  (mm) markavrinningen via infiltration/perkolation och dränering, samt  $E_a$  (mm) den aktuella evapotranspirationen (mm) under samma tidsperiod. I denna studie gäller ekvation 1 för en markprofil som är 30 cm djup.

Värdet på  $P$  erhålls från SMHI:s mätningar så nära den aktuella platsen som möjligt.

Ytavrinningen  $R$  är beroende av nederbörden ( $P$ ) och ett index ( $I_m$ , ”antecedent soil moisture index”) enligt

$$R = P - \frac{P(615 - 2,85I_m)}{P + 529 - 2,44I_m} \quad (2)$$

$I_m$  (mm) tar hänsyn till markens vatteninnehåll före påfyllningen via nederbörd och beräknas från

$$I_m = w_f - w_v h / 100 \quad (3)$$

där  $w_v$  är vattenhalten vid vissningsgränsen (%) och  $h$  markprofilens djup (mm). Observera att ytavrinningen  $R$  endast får betydelse vid mycket höga värden på  $P$  och  $I_m$ .

Värdet på  $D$  beräknas med hjälp av

$$D = K_{fk} \left( \frac{w_f}{w_{fk}} \right)^\alpha \quad (4)$$

där  $K_{fk}$  (mm/dygn) är markens genomsläpplighet för vatten ("hydraulic conductivity") och  $w_{fk}$  (mm) är vatteninnehållet i det aktuella lagret. Dessa värden gäller för vattenhalter vid fältkapacitet (index  $fk$ ), dvs när markprofilen är i jämvikt vid "normala" förhållanden. Termen "fältkapacitet" är egentligen ett något diffust begrepp, och det definieras därför här som vattenhalten vid dräneringsjämvikt, dvs när jämvikt råder mot en på ett bestämt djup stående grundvattenyta (1 m djupt). Exponenten  $\alpha$  beräknas enligt

$$\alpha = \frac{\ln K_{sat} - \ln K_{fk}}{\ln w_{sat} - \ln w_{fk}} \quad (5)$$

där  $K_{sat}$  (mm/dygn) och  $w_{sat}$  (mm) är vattengenomsläppligheten respektive vatteninnehållet vid mättnad för det aktuella marklagret. Vid val av värden på  $K_{fk}$  och  $K_{sat}$  är det viktigt att man tar hänsyn till hur dessa parametrar ser ut även för lägre markskikt.

Avdunstningen från marken beräknas med hjälp av

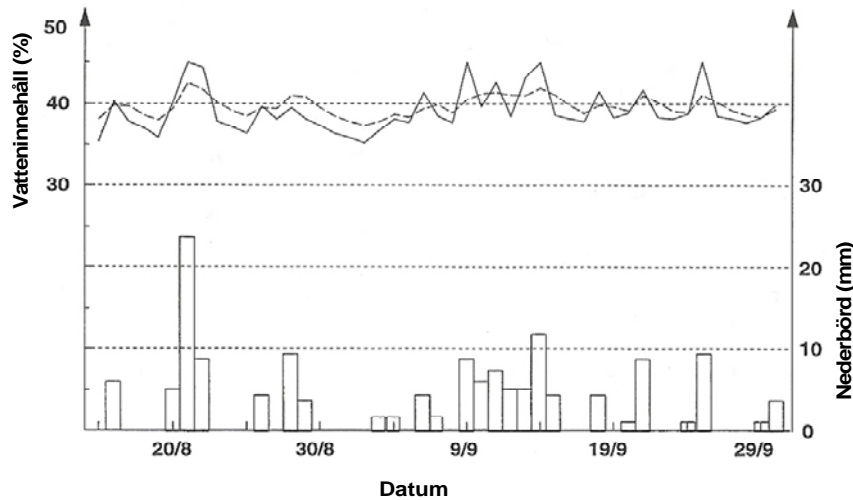
$$E_a = E_p K_d K_g K_s \quad (6)$$

Här är  $E_p$  den ackumulerade potentiella avdunstningen (mm/12 tim), samt  $K_d$ ,  $K_g$  och  $K_s$  faktorer som tar hänsyn till markens aktuella fuktighet, grödans tillväxt och markytans täckning av tex växtmaterial. Dessa faktorer beaktar de begränsningar i avdunstning som finns vid verkliga fältsituationer. I denna modell beräknas  $E_p$  utifrån de formler som redovisas av Nilsson och Bernesson (2009b). Lämpliga värden på  $K_d$ ,  $K_g$  och  $K_s$  presenteras av Witney (1995). I modellen användes  $K_d = 1,25 * F$  för  $F < 0,8$  och  $K_d = 1$  för  $F > 0,8$ , där  $F$

$$F = (w_a - w_v) / (w_{sat} - w_v) \quad (7)$$

För övriga faktorer kan  $K_g$  sättas till 0,5 och  $K_s$  till  $1 - 0,005 * Y$ , där yttäckningsgraden  $Y$  kan antas vara 15 %.

Modellens tillförlitlighet för olika typer av jordar har bl a testats av Witney m fl (1982). Nilsson och Hansson (2001) jämförde modellens utdata med en annan mark-modell (SOIL), och konstaterade att vattenhaltsvärdena låg på samma nivå, även om resultaten från SOIL-modellen var mindre oregelbunden (figur 4). SOIL (Jansson, 1998) är en komplex och mycket använd modell för simulering av hydrologiska och termiska processer i mark.



Figur 4. Resultat från simulering med modellen av Witney m fl (1982) (heldragen linje) och med SOIL-modellen (Jansson, 1998) (streckad linje), samt nederbörden under samma tid (staplar). Källa: Nilsson & Hansson, 2001.

### 3.3. Halmens vattenhalt

I detta kapitel presenteras hur väderdata kan användas för att simulera halmens vattenhalt timme för timme när den ligger i strängar på fälten. Syftet är att man ska kunna beräkna när vattenhalten är tillräckligt låg så att halmen kan pressas till balar. Modellen presenteras mer utförligt av Nilsson och Bernesson (2009b). Utgångspunkten i modellen är att den totala vikten per  $m^2$  av en halmsträng ( $q_{tot}$ ) kan skrivas

$$q_{tot} = q_{ts} + q_v, \text{ där} \quad (8)$$

$$q_v = q_b + q_f \quad (9)$$

där  $q_{ts}$  är torrsubstansvikten ( $kg/m^2$ ),  $q_v$  är totala mängden vatten i halmen ( $kg/m^2$ ),  $q_b$  är mängden bundet (hygroskopiskt) vatten ( $kg/m^2$ ) och  $q_f$  mängden fritt vatten ( $kg/m^2$ ). Mängden torrsubstans  $q_{ts}$  kan anses vara konstant, även om det kan bli vissa förluster i praktiken p g a att en del material hamnar på marken, p g a biologisk nedbrytning, m m. Om  $q_v$  och  $q_{ts}$  är kända, kan alltså halmens vattenhalt, uttryckt antingen i torr bas  $M_{torr} = q_v/q_{ts}$  eller i våt bas  $M_{våt} = q_v/(q_v + q_{ts})$ , beräknas.

#### 3.3.1. Förändringar i mängden bundet vatten

Förändringarna i mängden bundet vatten antas ske i två faser. I den första fasen strax efter tröskningen minskar mängden bundet vatten i halmen tills den närmar sig jämviktsvattenhalten. I den andra fasen följer mängden bundet vatten, med en viss eftersläpning, efter variationerna i den beräknade jämviktsvattenhalten.

För den första fasen används följande ekvation

$$q_{b,2} = q_{eq} + (q_{b,1} - q_{eq})e^{-aE(t_2-t_1)} \quad (10)$$

där  $q_{eq}$  är mängden vatten vid jämvikt ( $\text{kg/m}^2$ ),  $a$  en empirisk konstant,  $E$  den potentiella evapotranspirationen ( $\text{kg/m}^2\text{tim}$ ) och  $q_{b,2} - q_{b,1}$  förändringen av bundet vatten under tidsintervallet  $t_2 - t_1$ , vilket här sattes till 1 timme. Under denna första torkningsfas modelleras alltså mängden bundet vatten stegvis med en timmes intervall utifrån den beräknade jämviktsvattenhalten, den potentiella avdunstningen och en empirisk konstant. Övergången från fas ett till fas två antas ske när mängden bundet vatten har kommit tillräckligt nära mängden vatten vid jämvikt, vilket här antogs ske det dygn (kl 13) när  $q_b \leq 1,2q_{eq}$ .

I modellen sattes värdet på  $a$  till 0 när dagg började bildas, och detta värde kvarstod tills all dagg var avdunstad. Vid regn ökar mängden nederbördsvatten  $q_n$  i materialet, och därför sattes  $a = 0$  så länge som  $q_n/q_{ts} > 0,15$ . Anledningen till att värdet på  $a$  inte kvarstod tills  $q_n = 0$  var att det är rimligt att anta att torkningen av  $q_b$  och  $q_n$  kan ske parallellt när  $q_n$  är litet. Gränsen på 0,15 användes av Nilsson & Karlsson (2005) för torkning av linhalm, och bör rimligen även kunna användas för spannmålshalm.

Under den andra fasen följer mängden bundet vatten mängden vatten vid jämvikt med en viss eftersläpning, d v s värdet av  $q_b$  beräknades som medelvärdet av  $q_{eq}$  vid tidpunkterna  $t$ ,  $t-1$ , och  $t-2$ , med ett tidssteg om en timme. Ett maxvärde för  $q_b$  på  $0,25q_{ts}$  sattes dock, bl a beroende på trögheten att följa  $q_{eq}$  vid höga värden.

Mängden vatten vid jämvikt beräknades med hjälp av Halsey's (temperaturoberoende) ekvation enligt resultaten från Nilsson och Bernesson's studie (2009b). Eftersom höstvetete normalt är den viktigaste halmgrödan, användes de framtagna parametervärdena för Halsey's ekvation för denna gröda (Nilsson och Bernesson, 2009b). Eventuella avvikelser som kan uppkomma p g a andra halmgrödor bortsågs från i denna studie. I modellen beräknades  $q_{eq}$  med hjälp av den relativa luftfuktigheten ( $RF$ ) observerad var tredje timme, som sedan omvandlades till timvärden med hjälp av linjär interpolation. Vid höga värden på  $RF$  blir jämviktsvattenhalten alltmer osäker (Nevander & Elmarsson, 1994), och ett maximalt värde på  $q_{eq}/q_{ts}$  sattes därför till 0,30 (se bl a Nilsson & Bernesson, 2009b).

### 3.3.2. Avdunstning och kondensation

Vatten avdunstar och kondenserar, uttryckt i  $\text{kg per m}^2$  och timme, enligt (Monteith, 1965):

$$E = 3600 \frac{(R_n - G)\Delta + \rho c_p (e_s - e_a) / r_a}{L_v (\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a))} \quad (11)$$

där  $R_n$  är nettostrålningen ( $\text{W/m}^2$ ),  $G$  är markvärmeflödet ( $\text{W/m}^2$ ),  $\Delta$  är lutningen på kurvan mätnadsångtryck *versus* temperatur ( $\text{Pa/K}$ ),  $\rho$  är luftens densitet ( $\text{kg/m}^3$ ),  $c_p$  är det specifika värmets vid konstant lufttryck ( $\text{J/kgK}$ ),  $e_s$  är mätnadsångtrycket ( $\text{Pa}$ ),  $e_a$  är det aktuella ångtrycket ( $\text{Pa}$ ),  $r_a$  är den areodynamiska resistansen ( $\text{s/m}$ ),  $L_v$  är förångningsvärmets ( $\text{J/kg}$ ),  $\gamma$  psykrometerkonstanten ( $\text{Pa/K}$ ),  $r_c$  är grödresistansen ( $\text{s/m}$ ), och där tidsomvandlingskonstanten 3600 är antalet sekunder per timme. Om  $E > 0$  avdunstar vattnet och om  $E < 0$  kondenserar det. I denna studie representerar  $E$  den potentiella evapotranspirationen med  $r_c = 0$ , vilket innebär avdunstning från en ständigt våt yta.

De använda väderparametrarna för att beräkna  $E$  observerades var tredje timme, och linjär interpolation görs därför av  $E$  för att få timvärden.

### 3.3.3. Förändringar av mängden fritt vatten

Mängden fritt vatten  $q_f$  antas vara beroende av mängden dagg  $q_d$  och av mängden nederbörd  $q_n$  som fångas upp av halmen (s k interception). Vid en viss tidpunkt  $t$  gäller alltså att

$$q_f(t) = q_d(t) + q_n(t) \quad (12)$$

där  $q_d(t) \geq 0$  och  $q_n(t) \geq 0$ . Ändringen av  $q_d$  antas vara beroende av  $E$  enligt  $\Delta q_d = -Et$ , då det blir daggutfällning (kondensation) om  $E < 0$  och daggavdunstning om  $E > 0$ .

När nederbörd har observerats vid en viss tidpunkt, antas det i modellen att den absorberade mängden vatten  $\Delta q_n$  ( $\text{kg/m}^2$ ) ökar till ett slutvärde på

$$\Delta q_n = I_c(t)(1 - e^{-bP/I_c(t)}) \quad (13)$$

där  $I_c(t)$  är den maximala interceptionskapaciteten ( $\text{kg/m}^2$ ),  $P$  den uppmätta nederbördsmängden i mm (eller  $\text{kg/m}^2$ ), och  $b$  en empiriskt bestämd konstant. Den maximala interceptionskapaciteten  $I_c(t)$  beräknas enligt

$$I_c(t) = q_{is}(M_{max} - M(t)) \quad (14)$$

där  $M_{max}$  är den maximala vattenhalten i halmen och  $M(t)$  den aktuella vattenhalten.  $M_{max}$  bestäms empiriskt.

För att beskriva upptorkningen av nederbörden används följande ekvation (Nilsson & Bernesson, 2009b)

$$\Delta q_n = Et(1 - e^{-cq_n}) \quad (15)$$

där konstanten  $c$  bestäms empiriskt, och där  $E \geq 0$  och tidssteget  $t = 1$  timme. Anledningen till att använda en ekvation av denna typ är att torkningsresistansen ökar när mängden fritt vatten minskar, särskilt i senare skeden när större delen av det fria vattnet har avdunstat. Därför antas torkningshastigheten vara beroende av den aktuella vattenmängden.

### 3.3.4. Använda modellparametrar

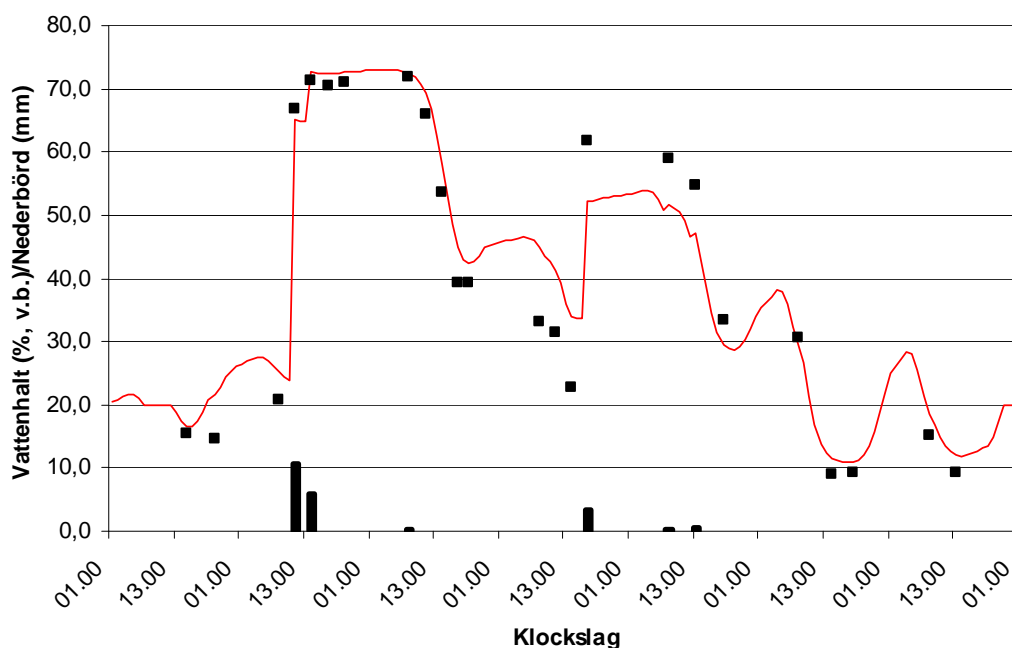
Den initiala vattenhalten, d v s vattenhalten strax efter tröskning, kan variera ganska kraftigt beroende på väderlek, gröda, etc. Nilsson (1999b) refererar till en undersökning där den initiala vattenhalten mättes för 19 fält med höstvetete (4 fält i Uppland och 15 i Skåne). När fälten delades upp i två kategorier, en där grödan hade fått vara regnfri i två dygn eller mindre, och en där grödan hade varit regnfri under tre dygn eller mer, kunde initialvattenhalten beskrivas med hjälp av en triangulär sannolikhetsfördelning

$$M_0 \in \text{TRIA}(\text{min}, \text{mode}, \text{max}) \quad (16)$$

där  $\text{min}$ ,  $\text{mode}$  (d v s typvärdet) och  $\text{max}$ -värdena för respektive kategori var 19, 30, 56 respektive 14, 28, 51 (uttryckt i våt bas). För exempelvis den andra kategorin, var alltså den lägsta vattenhalten i den refererade undersökningen 14 %, den vanligaste 28 % och den högsta 51 %. Vid simulering av halmhantering kan denna modell anses vara tillräckligt noggrann (vid kännedom om de verkliga initialvattenhalten används dock naturligtvis dessa).

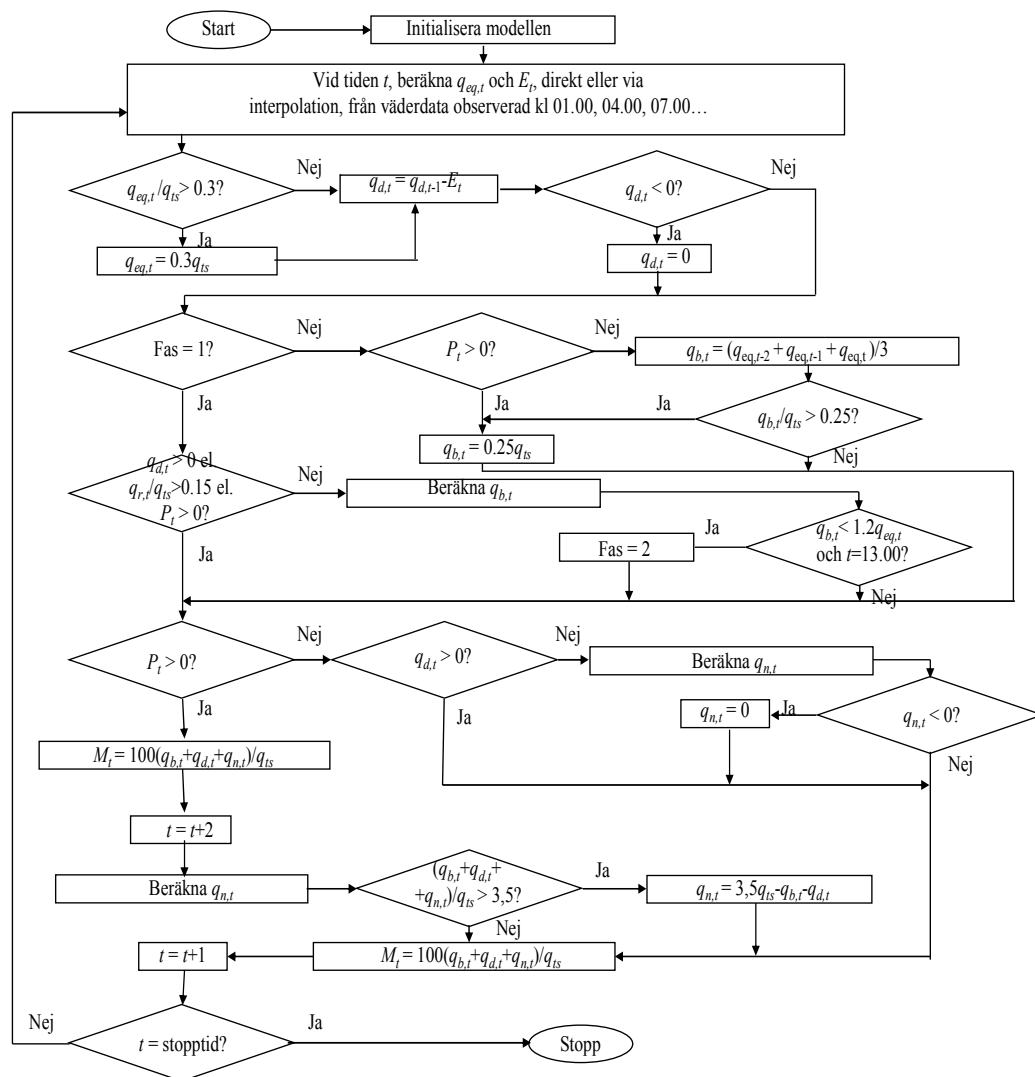
Den maximala vattenhalt ( $M_{max}$ ) som halmen kan hålla i fält under praktiska förhållanden uppskattades till 350 % (torr bas) eller ca 77,5 % uttryckt i våt bas. Detta var det högsta värde som uppmättes i fältförsök i studien av Nilsson och Bernesson (2009b), och även i en undersökning av Nilsson (1999b).

Modellparametrarna  $a$ ,  $b$  och  $c$  kan sättas till 1,0, 0,45 respektive 0,85 (Nilsson & Bernesson, 2009b). Värdena på  $b$  och  $c$  togs fram genom mätning av vattenhalten i strängar i fält under åren 2007 och 2008. I figur 5 visas ett exempel på uppmätta och simulerade vattenhalter för en halmsträng utanför Uppsala under 2007. Värdet på  $a$  kunde inte bestämmas i försöken (bl a beroende på för få upprepningar), men utifrån andra undersökningar (Nilsson, 1999a; Nilsson & Karlsson, 2005), har värdet skattats till 1,0.



Figur 5. Uppmätta vattenhalter (punkter), simulerad vattenhalt (linje) och nederbörd (staplar) för en sträng med höstvetehalm utanför Uppsala under hösten 2007. Källa: bearbetning av data från Nilsson och Bernesson (2009b).

Nederbörden mäts kl 07.00 och 19.00 (svensk normaltids) vid landets väderstationer. Om nederbörd har observerats kl 07.00, antas det i modellen att den faller under två timmar kl 01.00-03.00, och om nederbörd observerades kl 19.00, antas att den faller under två timmar kl 13.00-15.00. Enligt SMHI:s statistik, är sannolikheten något större att regn som kommer under dagtid, faller under eftermiddagen. Om nederbörd observerades både kl 07.00 och 19.00, antas det dock i modellen att den faller kl 10.00-12.00. I flödesdiagrammet i figur 6 visas modellen i sin helhet.



Figur 6. Flödesschema för simulering av halmens vattenhalt.

Modellens och de framtagna parametrarnas giltighet för andra halmgrödor än höstvetete, eller för mycket tunna eller mycket tjocka strängar, eller för olika typer av tröskor har inte undersökts. Trösktyp, d v s om det är skakar-, hybrid- eller rotortröskor, kan ha en viss betydelse för halmens upptorkning eftersom det finns indikationer på att halmens packningsgrad kan påverkas (se resultat i bilaga 1 från gjorda försök i projektet). Normalt dominerar dock de förhållanden som gällde vid framtagandet av modellen och dess parametrar (höstvetehalm, strängtjocklek ca 2 kg/m, liten bearbetningsgrad av halmen), varför modellen kan anses vara representativ för de allra flesta fall.



### 3.4. Geografiska förhållanden

De geografiska förhållandena, t ex vägnätets beskaffenhet, fältstorleken, transportavstånden, m m, har stor betydelse för de totala kostnaderna. I modellen är alla fält, mellanlager och värmeverk inlagda i ett koordinatsystem, där  $x$  beskriver läget i öst-västlig riktning och  $y$  läget i nord-sydlig riktning (lämplig plats för origo väljs utifrån de förutsättningar som gäller för det aktuella området). Lagrens placering och storlek bestäms beroende på vilka scenarier som simuleras. De enskilda fälten kan lokaliseras ut med hjälp av verkliga data om deras placering, eller slumpmässigt om antalet fält är stort (se bilaga 2).

Transportavstånden mellan varje fält och lager, mellan lagren, samt mellan lagren och värmeanläggningen, mäts upp med GIS-verktyg; exempelvis kan man använda företaget Eniros hemsida. Transportavståndet  $d$  mellan fälten  $i$  och  $j$  kan beräknas med hjälp av

$$d_{ij} = \tau \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (17)$$

där  $\tau$  är slingerfaktorn ("turtousity factor"), d v s hur lång den verkliga sträckan är i förhållande till "fågel"-vägen. Värdet på  $\tau$  bestäms genom att ett antal punkter placeras ut slumpvis på en karta över området, och sedan beräknas de verkliga avstånden och "fågelvägen" mellan dessa punkter. Om antalet fält är litet, kan man direkt mäta avstånden med hjälp av GIS-verktyg och lägga in dem i en avståndsmatris i simuleringsprogrammet. När antalet fält ökar, ökar dock antalet noder och antalet vägkombinationer mycket snabbt, och därför kan den ovan beskrivna metoden med en slingerfaktor vara lämplig för att förenkla arbetet med indata. I modellen är det tiden det tar att förflytta sig mellan två fält som är den avgörande faktorn, och denna tid kan alltså med tillräcklig noggrannhet uppskattas med hjälp av slingerfaktorn.

Fältens storlek och form har betydelse för hur effektivt de olika maskinoperationerna utförs. Vid små fält får exempelvis transportavstånd och ställtider större inverkan på de totala kostnaderna. Uppgifter om skiftesstorleken för olika grödor i det område där halmbärgning ska simuleras kan exempelvis erhållas från Jordbruksverket. Om antalet skiften är stort för de aktuella simuleringarna, kan sannolikhetsfördelningar användas för att bestämma skiftesstorleken (användning av sannolikhetsfördelningar ökar också flexibiliteten i simuleringarna, exempelvis för att studera vilken inverkan skiftesstorleken har på kostnaderna). Nilsson (2010) visade t ex att en gammafördelning beskrev fältarealen ( $A_f$ ) för ett område i Skåne på ett bra sätt;

$$A_f \in GAMM(\beta, \alpha) \quad (18)$$

där medelvärdet är  $\alpha\beta$  och variansen  $\alpha\beta^2$ .

### 3.5. Växtrelaterade förhållanden

De viktigaste växtrelaterade faktorerna som påverkar logistikkostnaderna och bränslekvaliteten är halmavkastningen per hektar, starten för halmgrödornas skörd och skördens varaktighet, samt halmens "gråhet", d v s i vilken utsträckning strängarna har varit exponerade för nederbörd innan pressning.

### 3.5.1. Avkastning

I modellen beräknas halmavkastningen för varje enskilt fält utifrån den beräknade avkastningen av kärna/frö. För att på ett realistiskt sätt kunna uppskatta hur stor kärnavkastningen är för den aktuella grödan, och hur den varierar mellan olika fält och mellan olika år, används normalfördelningskurvor. En normalfördelad variabel har värden som ofta ligger nära medelvärdet och mer sällan värden med stora avvikelser. Denna egenskap gäller för de flesta naturliga och biologiska system, och kan alltså även antas gälla här för variationerna i kärnavkastning mellan olika fält och mellan olika år.

Halmavkastningen ( $Y_h$ , ton/ha) på ett visst fält antas beskrivas av  $Y_h = \alpha_g Y_g$  där  $\alpha_g$  är halm:kärna-kvoten för gröda  $g$ , och där  $Y_g$  är kärn/frö-avkastningen (ton/ha) av gröda  $g$ . Aktuella värden för olika halm:kärna-kvoter  $\alpha_g$  finns redovisade i tabell 4. Avkastningen av en viss gröda  $Y_g$  varierar något mellan olika skiften, och om det är relevant att ta hänsyn till dessa variationer, kan  $Y_g$  antas beskrivas av en normalfördelning enligt

$$Y_g \in NORM(\bar{Y}_{g,i}, s(Y_{g,i})) \quad (19)$$

där  $\bar{Y}_{g,i}$  är medelvärdet av avkastningen för gröda  $g$  under år  $i$ , och där  $s(Y_{g,i})$  är standardavvikelsen. Genom att jämföra data från SLU:s sortförsök för åren 1994-96 i bl a Malmöhus län, visade Nilsson (1999a) att det är rimligt att anta att standardavvikelsen är ca 0,15 x medelvärdet, dvs att  $s(Y_{g,i}) \approx 0,15 \bar{Y}_{g,i}$ . Den genomsnittliga avkastningen kan i sin tur beskrivas av

$$\bar{Y}_{g,i} \in NORM(\bar{Y}_{g,obs}, s(Y_{g,obs})) \quad (20)$$

där  $\bar{Y}_{g,obs}$  är medelvärdet av de observerade (uppmätta) hektaravkastningarna, och där  $s(Y_{g,obs})$  är standardavvikelsen. Uppgifter om medelvärden och standardavvikelser för olika halmgrödor i olika län finns bl a redovisade i en rapport av Nilsson och Bernesson (2009a).

### 3.5.2. Skördetidpunkter

Som nämnts tidigare, har tidpunkten för tröskningen betydelse för kostnaderna. Om grödorna börjar tröskas tidigt, och om tröskningssäsongen är mer utdragen, behövs en mindre maskinkapacitet för att hinna bärga en viss mängd halm. Dessutom ökar möjligheterna att bärga grå halm med högre bränslekvalitet. Tidig tröskning innebär också att lantbrukarnas acceptans för försäljning av halm ökar, eftersom de i så fall inte behöver känna lika stor press på att hinna bearbeta fälten inför höstsådden.

Tröskningssäsongens start och varaktighet beror både på var i landet man befinner sig och på vilka halmgrödor som odlas där. Ofta tröskas höstoljeväxterna först, sedan höstkorn och tidigt vårkorn, och därefter höstråg, rågvete, vårkorn, höstvetete, havre, vårvete och våroljeväxter (i ungefärlig tidsordning). Antalet dagar från ett visst referensdatum fram till tröskningssäsongens början för de olika grödorna kan modelleras med hjälp av sannolikhetsfördelningar. I de sk objektiva skördeuppskattningarna, som genomfördes fram till år 1993 och i SCB:s regi, registrerades när skörden av olika grödor inleddes i olika delar av landet. Nilsson och Bernesson (2009a) tog med hjälp av dessa data bl a fram lämpliga sannolikhetsfördelningar för när skörden av höstvetete inleddes i f d Malmöhus län, f d Skaraborgs län och Uppsala län. De visade att tröskningens starttidpunkt kan beskrivas av triangulärfördelningar. Nilsson (2010) visade också att även Erlang-fördelningar kan vara lämpliga.

Eftersom höstvetete är den dominerande halmgrödan, och eftersom det vanligen finns en korrelation mellan starttidpunkterna för tröskning av olika halmgrödor under en given säsong, relateras starttidpunkten för de andra grödorna till starten för höstvetete. I simuleringarna erhålls startdatum för tröskning av höstvetete alltså först enligt en lämplig sannolikhetsfördelning för det aktuella området, och därefter beräknas t ex startdatum för höstraps som *StartHöstvetete - x* (d v s *x* dygn tidigare). Data till dessa uppskattningar för övriga grödor redovisas bl a av Nilsson och Bernesson (2009a).

I modellen antas ”ankomsten” av färdigtröskade fält, d v s tillfällena då lantbrukarna ringer och anmäler sina fält som klara för halmbärgning, kunna beskrivas som en sk poisson-process. I en sådan process inträffar godtyckliga händelser slumpmässigt i tiden, d v s de kan inträffa när som helst under en viss tidsperiod, helt oberoende av varandra. Teoretiskt gäller att tiden mellan två händelser i en poisson-process är exponentialfördelad. I denna modell beskrivs därför tiden  $T$  mellan ankomsten av två färdigtröskade fält med grödan  $g$  enligt

$$T_g \in EXPO(\lambda_g) \quad (21)$$

där  $\lambda_g$  är medelvärdet av väntetiden, d v s

$$\lambda_g = TL_g / AF_g \quad (22)$$

där  $TL_g$  är tröskningsperiodens längd för gröda  $g$ , och där  $AF_g$  är antalet fält med denna gröda. Baserat på data för åren 1985-92, visade Nilsson och Bernesson (2009a) att tröskningssäsongens längd för exempelvis höstvetete var drygt 100 timmar i f d Malmöhus län.

### 3.5.3. Halmens ”gråhet” (kvalitet)

Halmens bränslekvalitet kan beskrivas i termer av vattenhalt, effektivt värmevärde, askhalt, asksmälttemperatur, innehåll av alkalimetaller och klor, m m. Dessa egenskaper kan i sin tur påverkas av vilken gröda halmen kommer ifrån, och även av sort, jordart, årsmån, gödsling, bekämpningsinsatser, m m. En faktor som påverkar halmens egenskaper är om den är ”gul” eller ”grå”, d v s om den är nytröskad (gul) eller har legat ute ett tag och blivit utsatt för regn (grå). Grå halm har vanligen något lägre askhalt, högre värmevärde och lägre innehåll av alkalimetaller och klor som ett resultat av utlakning av vattenlösliga substanser (t ex kalium och klor) (Rexen, 1970; Hadders, 1994; Jenkins m fl, 1996; Nikolaisen, 1998). Gråfärgningen beror på kolonisation av svampar (mycel och sporer), vilka bl a bryter ned pektinet som fungerar som ett limämne i växterna (Rexen, 1970). Grå halm föredras av de flesta värme-/kraftvärmeverken i bl a Danmark, även om priset är samma för gul och grå halm.

I samband med fältförsöken i detta projekt (se Nilsson & Bernesson (2009b)), gjordes några mätningar av hur askhalten och värmevärdet förändrades som funktion av halmens liggtid på fälten. Även detta enstaka försök indikerade att askhalten har en sjunkande tendens och värmevärdet en ökande tendens ju längre halmen får ligga (se bilaga 3).

I simuleringsmodellen görs en indirekt uppskattning av halmens ”gråhet” med hjälp av följande mått, som gäller skiftesvis (d v s från det att grödan anmäls som tröskad tills sista balen har pressats för varje enskilt skifte):

- Den totala tiden som halmen har legat på fälten från tröskning till balning. Resultatet anges i antalet timmar.
- Mängden regnvatten som har kommit på halmen under tiden den legat på fälten mellan tröskning och balning. Resultatet anges som antalet mm.
- Tiden från tröskning till balning som mängden dagg var större än 0,01 mm eller mängden regnvatten i halmen var större än 1 % (uttryckt i torr bas som  $q_r/q_{ts}$ ). Resultatet anges som antalet timmar.
- Tiden från tröskning till balning som mängden dagg var större än 0,01 mm eller mängden regnvatten i halmen var större än 1 % (uttryckt i torr bas som  $q_r/q_{ts}$ ), och temperaturen högre än 10°C. Resultatet anges som antalet gradtimmar.

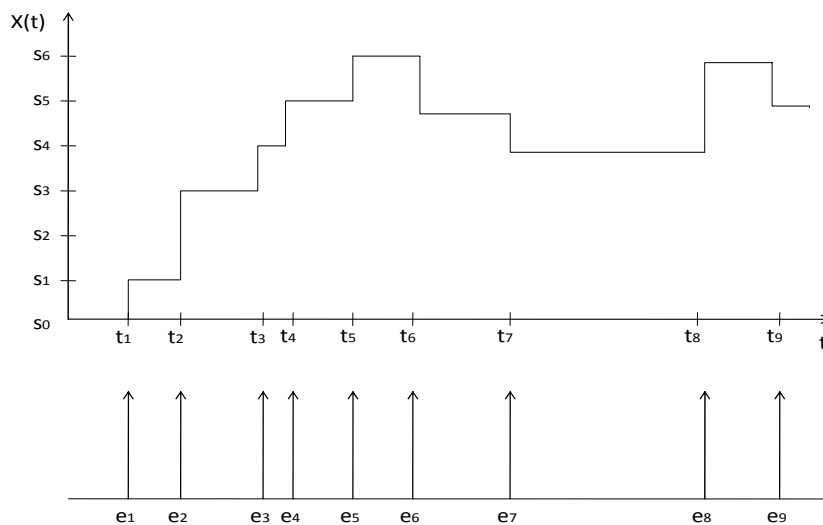
För samtliga mått redovisas min-, max- och medelvärden samt standardavvikelse. Den fjärde systemegenskapen ovan beaktar att temperaturen eventuellt kan ha en inverkan, då mikroorganismernas aktivitet blir högre vid högre utetemperaturer. Ingen särskild prioritetssupplering görs dock mellan de olika måtten, eftersom kunskaperna om hur halmens kvalitet påverkas av dessa faktorer är alltför osäker. I modellen beaktas inga andra faktorer som kan påverka bränslekvaliteten, t ex jordart, gödsling, bekämpningsinsatser, m m.

## 4. MODELLERING AV MASKINSYSTEM

### 4.1. Händelsestyrd simulering

Modelleringen av maskinsystemen baserar sig på sk dynamisk händelsestyrd simulering ("dynamic discrete event simulation"). Vid denna typ av simulering antar varje tillståndsvariabel  $X$ , vilken beskriver tillståndet i systemet med avseende på en viss egenskap (t ex antalet fält med halm som väntar på att bli pressade), ett visst diskret värde  $s$  i en viss specifik mängd (se även figur 7):

$$X = \{s_0, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6\} \quad (23)$$

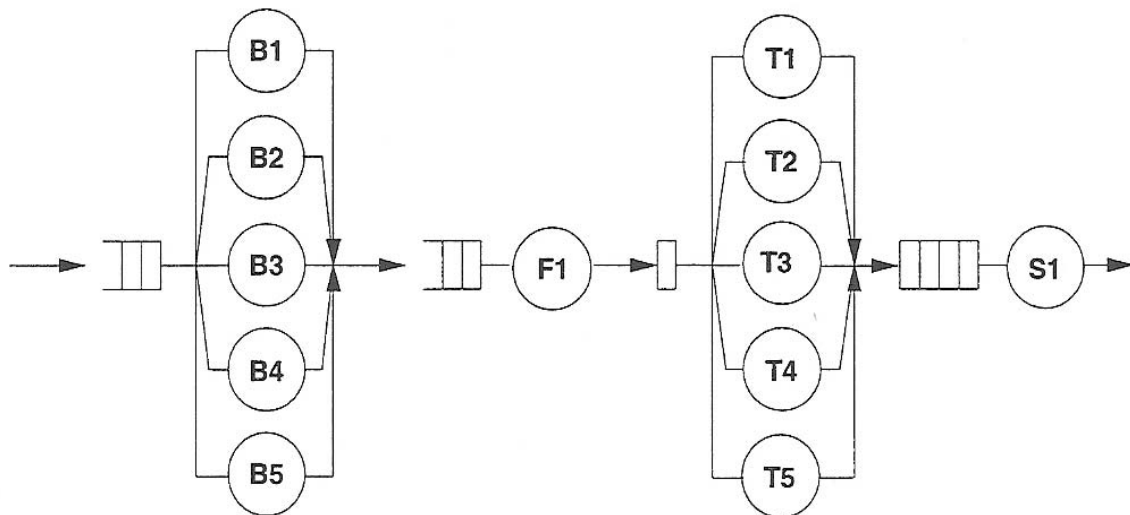


Figur 7. En viss tillståndsvariabel  $x(t)$  får olika värden  $s_0$ - $s_6$  beroende på olika händelser  $e$  som inträffar vid tidpunkterna  $t$ . Tillståndsvariabeln kan  $t$  ex beskriva antalet fält som väntar på halmbärgning, där händelserna tröskning respektive pressning innebär att kön ökar respektive minskar.

Händelsestyrd simulering är dynamisk till sin natur (Kelton m fl, 2007). Detta innebär att om, och i så fall när, en viss händelse inträffar, så beror detta av de händelser som inträffat tidigare. Händelsen "påbörjandet av pressning av en halmbal" kan  $t$  ex endast inträffa om händelsen "halmens vattenhalt har nått under tröskelvärdet 18 %" har inträffat.

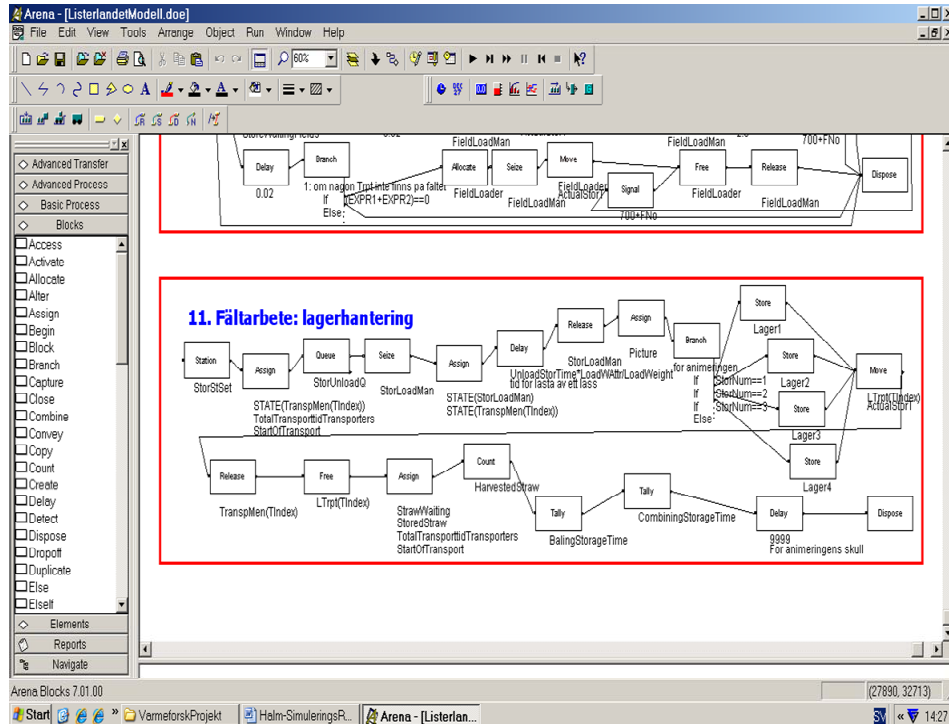
Det finns olika typer av händelsestyrd simulering. I denna studie har simuleringarna gjorts med simuleringsprogrammet Arena (Rockwell Automation Inc.) (Kelton m fl, 2007). Den simuleringstyp som används i Arena kallas för processororienterad. Detta innebär att sk entiteter "flödar" genom ett system och genomgår olika processer. En entitet kan representera konkreta begrepp,  $t$  ex ett ton halm, eller mer abstrakta begrepp, som  $t$  ex en viss typ av information. Varje entitet bär med sig vissa egenskaper som kallas attribut. Attributen för en halmbal kan  $t$  ex vara "fältet halmen kommer ifrån", "halmgröda", "tidpunkt för pressning", "aktuell vattenhalt", "mängd nederbörd som fallit på halmen innan pressning", "tid mellan tröskning och inlagring", m m. Entiteterna genomgår olika processer utförda av olika resurser. Exempel

på resurser är balpressar som utför processen pressning, eller lastmaskiner som utför processen lastar. För att en viss aktivitet eller process ska kunna genomföras, måste vissa villkor vara uppfyllda. Dessa villkor benämns ”global variables” i Arena, och de kan t ex representera klockslag (”inget arbete får utföras om klockan är senare än 20.00”), olika väderparametrar (”just nu regnar det och då är inte pressning tillåten”), ”driftledning” av arbetet (”ett fält är klart för pressning i Halmby, skicka dit press nr X”), etc. Om entiteterna konkurrerar om resurserna uppstår köer i simuleringarna. I figur 8 visas ett förenklat exempel på flödet för en processororienterad händelsestyrd simulering.



Figur 8. Flödet av halm från fält till lager. Cirkelarna representerar resurser och boxarna framför dem representerar köer. Varje väntande individ, eller entitet, t ex ett fält eller en viss mängd halm, representeras av rektanglarna i boxarna. Kölängden kan vara begränsad, vilket visas av de stängda boxarna. I sådana fall kan det uppstå väntetider för de olika resurserna bakåt i systemet. I systemet ovan ”betjänas” halmen av fem pressar (B1-B5), en frontlastare på fältet (F1), fem transportekipage (T1-T5) och en lastare (S1) vid lagret. Källa: Nilsson, 1999b.

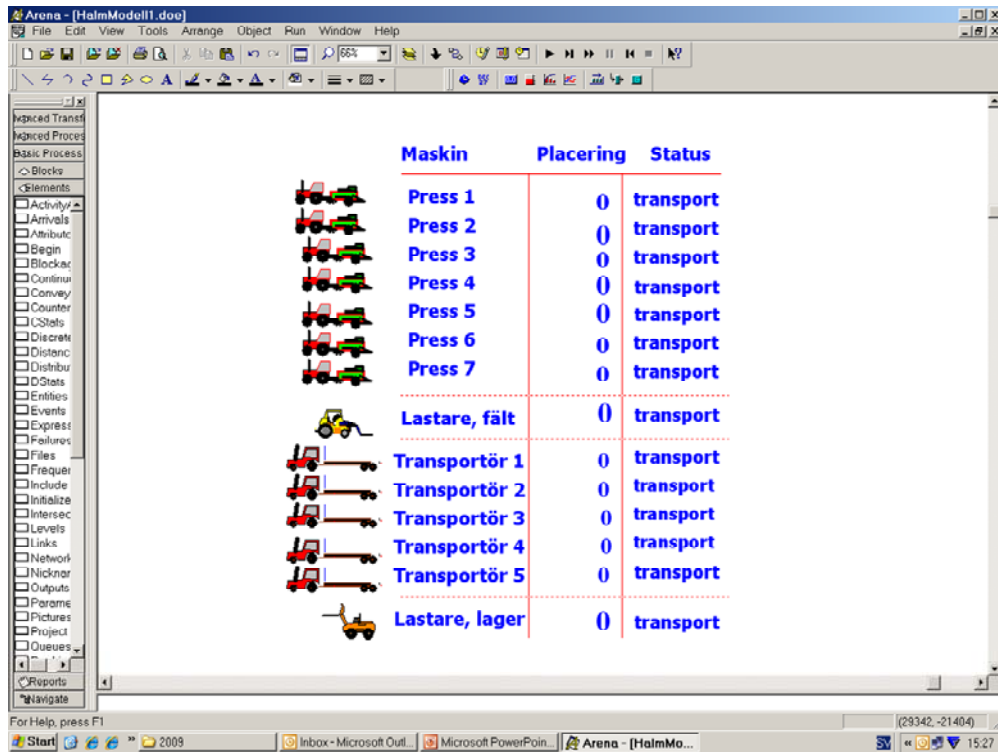
Rent praktiskt har modellen i denna studie byggts upp med hjälp av s k SIMAN-”block” i Arena (se figur 9). Entiteterna går från block till block och får då olika uppgifter. När en entitet exempelvis kommer till ett SEIZE-block ”bokar” den upp en viss maskin om den är ledig, när den kommer till ett DELAY-block väntar den en viss specificerad tid (t ex för att bli processad av maskinen), och när den sedan kommer till ett RELEASE-block frigör den maskinen.



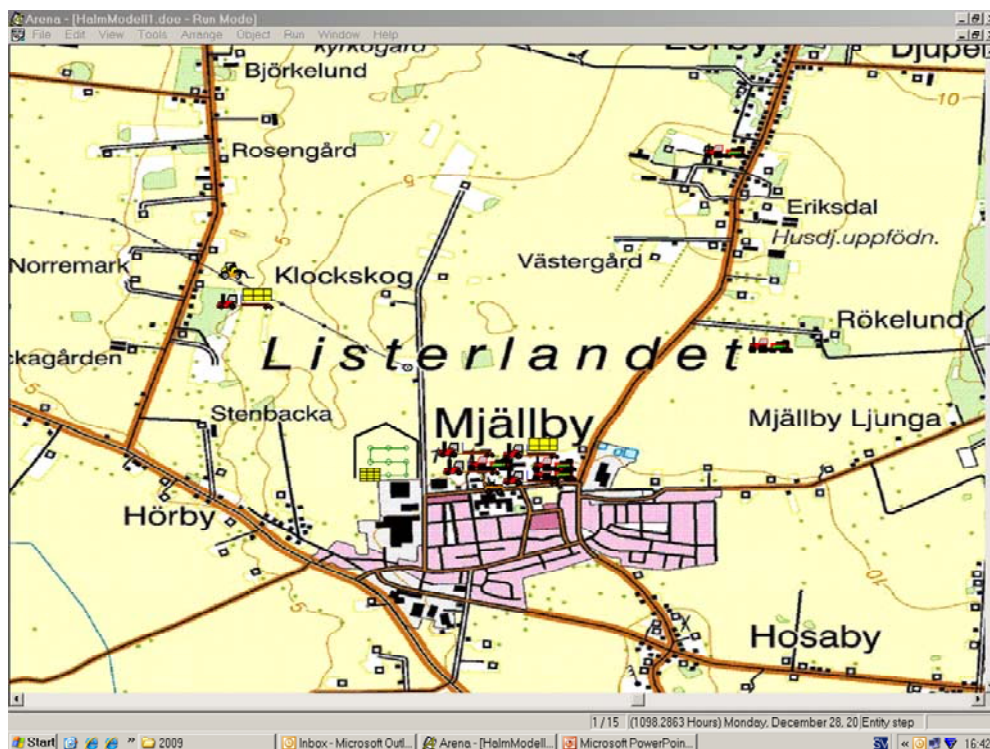
Figur 9. Simuleringsprogrammet kan byggas upp med hjälp av s k SIMAN-block i Arena. Här visas hur entiteterna genomgår olika block i en modellmodul som styr arbetet vid halmlagren.

Alla händelser som man tycker är relevanta i simuleringarna registreras av en slags ”statistik-insamlare”, och när man simulerat färdigt kan man få en mängd olika uppgifter om systemets prestanda. Exempel på prestandamått är antalet ton som bärgades under året; antalet timmar som balpress X arbetade i strängen, stod stilla p g a sönderkörning, och var under transport till de olika fälten; tiden halmen låg på fältet före pressning och den mängd nederbörd den då fick, vilket ger en indikation på halmens bränslekvalitet; tiden som transportekipage X fick vänta för att bli avlastad vid lager Y, m m (se även tabell 2).

Simuleringarna kan visualiseras genom animering, vilket innebär att man t ex kan följa bärgningsarbetet på datorskärmen. Detta har stora fördelar då man lättare både kan verifiera modellen och kommunicera dess användningsområden och resultat till andra. I figurerna 10-13 visas exempel på animering av halmbärgning i Sölvesborgs kommun (se även kapitel 5).

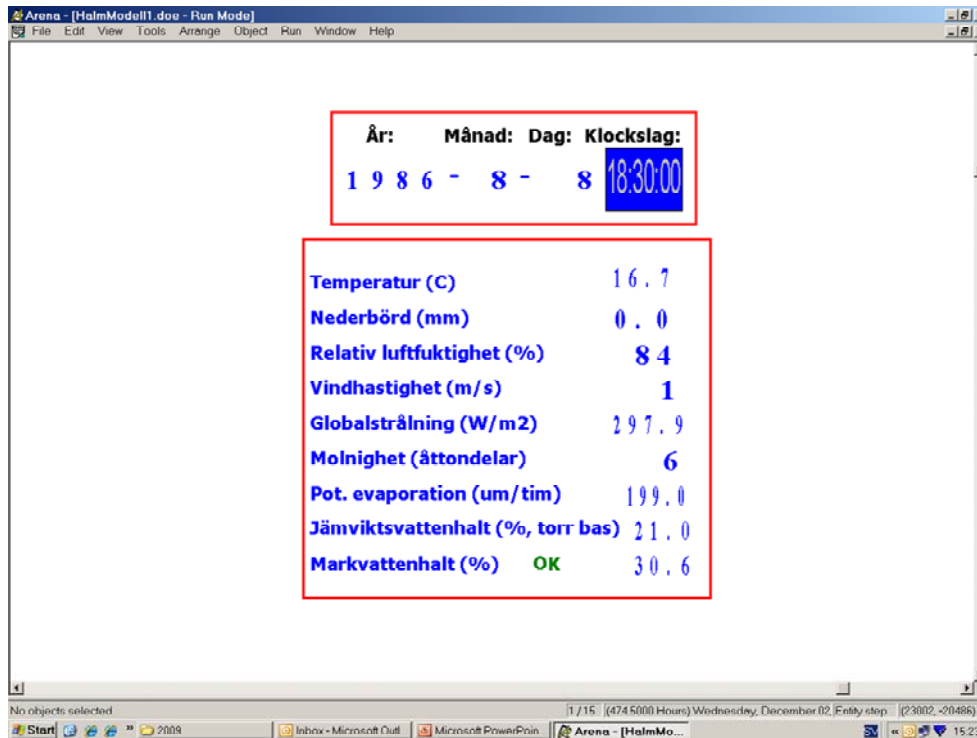


Figur 10. På datorskärmen kan man bl a få information om var de olika maskinerna befinner sig (fälten och lagren är numrerade) och vad de för tillfället är sysselsatta med ("status").

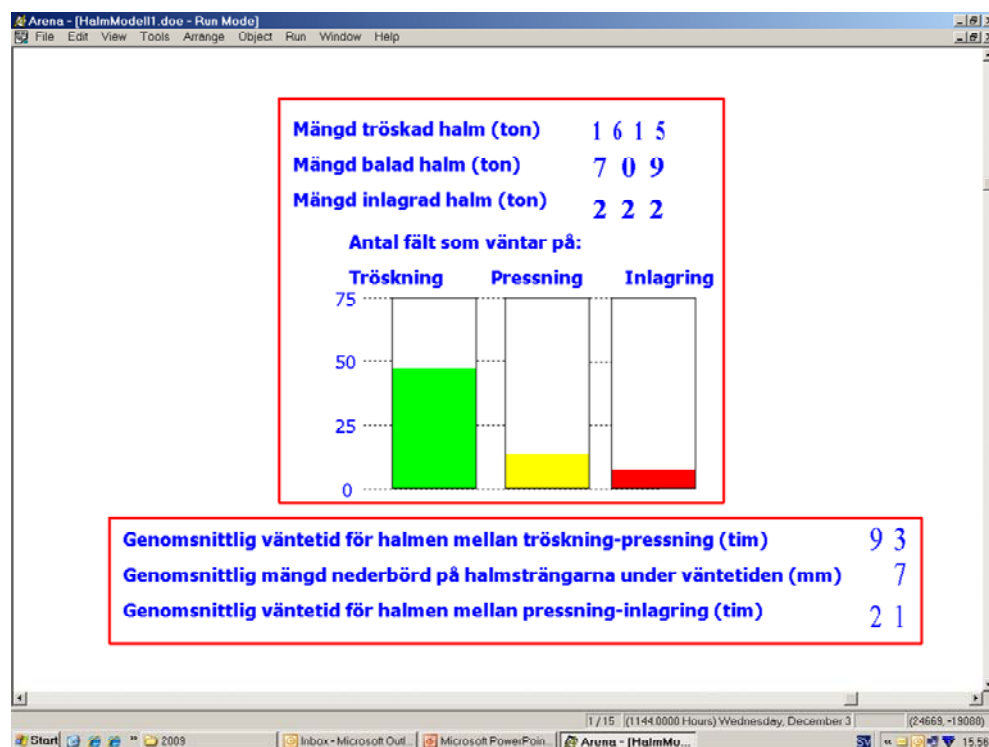


Figur 11. Animering av halmbärgning på Listerlandet i Blekinge. Nordöst om Mjällby syns balpressar som arbetar på två fält, och nordväst om samhället finns ett fält där en lastmaskin lastar en vagn med halmbalar. Strax norr om Mjällby syns ett lager, och några maskiner som för tillfället är lediga.





Figur 12. Datum, klockslag, aktuella väderparametrar, m m, visas också på datorskärmen. Vid detta tillfälle var det den 8 augusti 1986 kl 18.30, och temperaturen var 16,7°C, relativa luftfuktigheten 84 % och markvattenhalten i det översta 30 cm lagret 30,6 %.



Figur 13. På skärmen kan man också följa hur arbetet framskrider när det gäller hur mycket halm som har pressats, lagrats in, m m, och hur långa köerna är för de olika operationerna.

## 4.2. Modellering av maskinoperationer

Nedan beskrivs hur de olika maskinoperationerna modelleras. Den dynamiska delen av Arena-modellen omfattar alla arbetsoperationer fram till mellanlagret. Ett skäl till att inte gå längre än till mellanlagret är t ex att väderleken har underordnad betydelse när lagren töms och halmen kontinuerligt transporteras till värmeverket. Det är också sällan som några flaskhalsar eller konkurrenssituationer uppstår i hanteringssystemet mellanlager - värmeverk (om man ser det som ett isolerat system). Däremot ingår även detta delsystem i kostnadsberäkningarna.

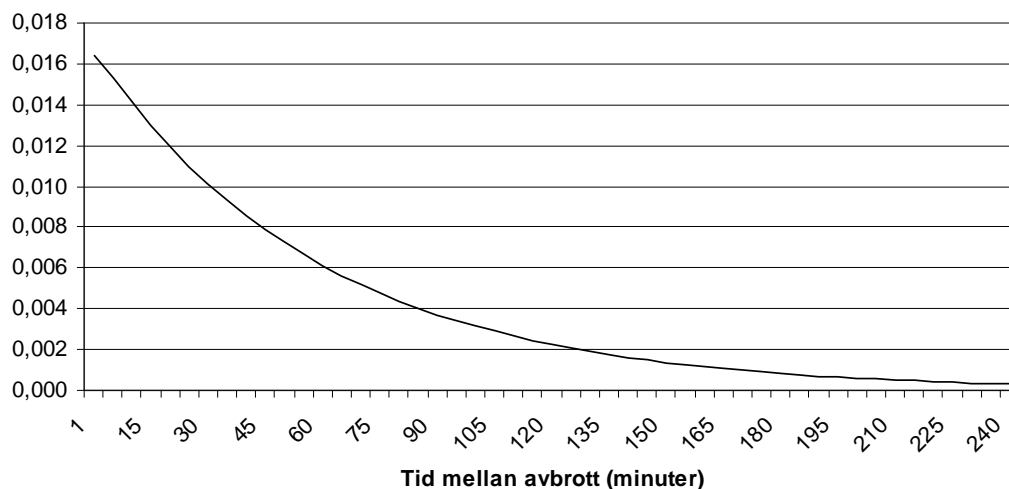
Själva tröskningsmomentet har ingen direkt inverkan på kostnaderna för halmen, eftersom det är först när grödan tröskats som halmens hanteringskedja börjar. Tröskningen har dock en viktig indirekt betydelse, eftersom tidpunkten när den utförs påverkar kostnaderna. Om grödorna börjar tröskas tidigt, och om tröskningssäsongen är mer utdragen, behövs en mindre maskinkapacitet för att hinna bärga en viss mängd halm. Tröskningssäsongens start och varaktighet beror både på var i landet man befinner sig och på vilka halmgrödor som odlas där. Antalet dagar från ett visst referensdatum fram till tröskningssäsongens början för de olika grödorna kan modelleras med hjälp av sannolikhetsfördelningar. Eftersom höstvetete i de flesta fall är den dominerande halmgrödan, och eftersom det vanligen finns en korrelation mellan starttidpunkterna för tröskning av olika halmgrödor under en given säsong, relateras starttidpunkten för de andra grödorna till startdatum för höstvetete. I modellen antas ”ankomsten” av färdigröskade fält, dvs tillfällena då lantbrukarna ringer och anmäler sina fält som klara för halmbärgning, kunna beskrivas som en sk poisson-process. Denna typ av process har, tillsammans med de ekvationer som används i modellen, beskrivits tidigare i kapitel 3.5.2.

Vändning/strängläggning görs ofta av halmen, bl a i syfte att få en snabb och jämn upptorkning av strängen. Ofta undviker man dock att vända eller stränglägga halmen, eftersom strängen blir mer kompakt, vilket kan ha en negativ inverkan på både upptorkningen (om det sedan kommer mer regn) och pressningskapaciteten. Dessutom ökar risken för inblandning av föroreningar, t ex stenar, träbitar och järnföremål. Om vändning eller strängläggning blir nödvändig, rekommenderas vid storskalig bärgning av bränsehalm i Danmark att man väntar med detta tills vattenhalten har sjunkit till 20 % (Hinge, 2009).

I simuleringarna vänds all halm som har varit ”genomblöt”, dvs all halm som varit på väg att nå mättnadsvattenhalten (haft en vattenhalt över ca 70 % (våt bas) (motsvarande 250 %, torr bas)). Vändningen kan ske då vattenhalten exempelvis har sjunkit till 23 % (våt bas; 30 % i torr bas) och då regn inte väntas inom de närmaste 2 timmarna. Efter vändningen antas allt kvarvarande fritt vatten (dvs vatten från regn och dagg) i halmen i princip torka bort omedelbart. Vändning kan bli aktuell flera gånger om pressarna inte hinner med och halmen återigen blir mycket blöt. I simuleringarna tas också hänsyn till att halmen ibland enbart vänds på delar av fälten, t ex om pressarna redan hunnit pressa en del av halmen. I praktiken kan även hopslagning av två eller flera strängar bli aktuell i vissa fall, t ex vid låg halmavkastning och om tröskor med liten skärvidd används. Eftersom vändare och strängläggare är en vanlig maskin inom jordbruket, antas att det finns fri tillgång till dessa. Denna operation begränsar alltså inte systemkapaciteten i simuleringarna, utan påverkar enbart kostnaderna, vilka beräknas utifrån antalet timmar maskinerna är i arbete.

I modellen kan halmen pressas av ett valfritt antal pressar. Pressarnas arbetstider kan också väljas, men i modellen är de vanligen tillgängliga för arbete från kl 9.00 till kl 21.00, med avbrott för lunch kl 12.30-13.15 (alla tider anges som svensk sommartid). Övriga raster antas ingå i ställ- och underhållstiderna (se nedan). Pressarna inkl traktorer är uppställda vid lager-

depåerna när de inte används. När ett fält har blivit klart för pressning, kör maskinerna dit med en viss genomsnittshastighet, och vid fältet antas sedan att de ägnar en viss tid för klar- göring, inställningar/justeringar, underhåll, m m (d v s ställtiden). När maskinerna sedan arbetar i halmsträngen, antas att de har en viss avbrottsfrekvens (t ex i genomsnitt en gång per timme, med en genomsnittlig varaktighet på 0,1 tim). Tiden mellan avbrotten, samt deras varaktighet, modelleras med hjälp av exponentialfördelningar (EXP(medelvärde), se figur 14), som generellt är lämplig att användas för att modellera tiden mellan slumpmässiga händelser av denna typ (Kelton m fl, 2007). Tiden som pressarna tillbringar på fälten kan alltså delas upp i tre kategorier; reguljärt arbete, deterministiska (planerade) avbrott, och stokastiska (slumpmässiga) avbrott.



Figur 14. Täthetsfunktionen för en exponentialfördelning som antas beskriva tiden mellan avbrott vid t ex pressning av halm. Medelvärdet är i detta fall 60 min (1 timme). Sannolikheten för korta tider mellan avbrotten är stor, men det kan också förekomma mycket långa tider mellan dem.

Pressarnas prioriteringsordning kan variera, men vanligast är följande. Enbart halm med en vattenhalt understigande 18 % (våt bas) är aktuell för pressning. Höstvetete sås ofta efter oljeväxter, och därför kan man prioritera bärgning av oljeväxthalm före bärgning av all annan halm för att lantbrukarna ska kunna förbereda sådden av höstvetete eller annan höstsådd spannmål. De övriga grödorna tillhör då samma lägre prioritetsklass. För varje prioritetsklass, av- verkar varje press ett maximalt antal fält runt sin lagerdepå, innan köerna för de andra lagren kontrolleras. Om det finns längre köer runt något annat lager, kör pressen dit och börjar arbeta. Det första fältet väljs enligt FIFO-principen, d v s ”first in first out”, eller den som har väntat längst tid pressas först. Därefter väljs de fält som ligger närmast geografiskt sett, oberoende av fältets placering i kön, tills ett specificerat antal fält har pressats, eller så länge som de andra köerna är kortare, eller så länge som det finns fält i den aktuella kön.

Alla pressmaskiner arbetar oberoende av varandra, men om det finns lediga pressar, kan två allokeras till ett fält om där t ex finns mer än 15 ha att pressa, eller tre om där finns mer än 25 ha, o s v. En ”global” variabelvektor i modellen håller reda på mängden halm som återstår att pressa på varje fält, och på så sätt kan man styra vart lediga pressar ska köra.

Balpressarna slutar att arbeta om vattenhalten överstiger den godkända nivån, vanligen 18 %, och de kör sedan hem till sin lagerdepå. På kvällarna slutar de också i tid så att de hinner hem till depån före det klockslag som satts som slutet på arbetsdagen. Om det återstår mindre än ett visst antal ton på fältet, kan de dock pressa all halm innan de återvänder hem. Om halmens vattenhalt stiger över den godkända nivån på kvällen, kan pressarna ändå arbeta färdigt på fälten om det endast återstår mindre mängder.

Så snart halmfälten är färdigpressade, placeras de i köer för transport av halmen till närmaste mellanlager. Varje lager har en egen kö. Om det finns ett fält i en kö, om lastmaskinen är ledig, om det finns minst ett transportekipage ledigt, om det inte regnar, om marken inte är för blöt, och om klockan är efter 8.30, så kör maskinerna dit för att arbeta. Arbetet upphör om det kommer regn, om det är dags för lunch eller för att sluta för dagen, eller om maskinen går sönder. Last- och transportmaskinerna arbetar runt ett lager så länge där finns halmbalar att transportera, och sedan väljs den lagerkö som är längst. För varje lagerkö väljs först det fält som har väntat längst enligt FIFO-principen, och därefter de fält som ligger närmast det fält som just är avslutat.

Maskinen som samlar in balarna på fälten och lastar transportekipagen kan vara en traktor med frontlastare, en hjullastare eller en teleskoplastare. Tiden det tar att samla in balarna är beroende av om pressarna exempelvis har balsamlingsvagnar efter sig. Eftersom det i modellen är en "lastmaskin" i generell mening som gör arbetet, kan man själv ge maskinen de kapacitetsattribut man vill beroende på vilket alternativ man väljer. Lastmaskinens genomsnittliga transporthastighet är vanligen 20 km/tim. Den antas inte ha någon ställtid vid fälten, och dess avbrottsfrekvens antas kunna beskrivas av exponentialfördelningen  $EXP(x \text{ tim})$ , med varaktigheten  $EXP(y \text{ tim})$ , där  $x$  och  $y$  är de genomsnittliga tiderna för respektive egenskap. Tillåten arbetstid kan vara mellan kl 8.30 till kl 20.30, med avbrott för lunch kl 12.30-13.15. Under nätterna är lastmaskinerna stationerade vid det lager som de arbetar runt.

Transporterna mellan fält och mellanlager utförs oftast av traktorekipage, och i modellen kan man ge dem en genomsnittlig transporthastighet på exempelvis 20 km/h. Liksom för lastmaskinerna, består dock transportekipagen i modellen av en generell maskintyp, hos vilka man kan välja attributen för transporthastighet, transportvolym, etc.

Transportekipagens arbetstid är vanligen kl 8.30 till kl 21.00, med avbrott för lunch kl 12.30-13.15. De antas inte ha några ställtider, och inte heller några stokastiska avbrott för sönderkörningar, m m. De väntetider som finns vid lastning och lossning antas kunna utnyttjas för eventuellt underhåll, m m. De sträckor som transportekipagen kör styrs av var maskinerna för lastning respektive lossning befinner sig (eller dit de är på väg). Antalet transportekipage som allokeras till ett enskilt fält är beroende av mängden balar på fältet. Det maximala antalet transportekipage som är tillgängligt under en säsong bestäms vid varje scenariosimulering. Upp till detta antal är transportekipagen en fri resurs som kan sättas in vid behov (vilket inte alltid är fallet vid verkliga förhållanden).

För lossning av transportekipagen vid lagren och för inlastning i lagerbyggnaden kan en frontlastare, en hjullastare eller en teleskoplastare användas. Maskinen bör ha hög kapacitet för att undvika köbildning. I modellen ser maskinförarens arbetsschema likadant ut som för transportekipagens, och avbrottsfrekvensen, avbrottsvaraktigheten och transporthastigheten är ofta samma som för lastmaskinerna på fälten. Kapaciteten är ofta något högre jämfört med lastarna på fälten, bl a eftersom maskinen antas ta två balar på en gång.

En mycket stor mängd utdata kan fås från simuleringarna. De data som bedömts som relevanta för denna studie och som bl a används för de ekonomiska beräkningarna beskrivs nedan. Dessa data erhålls för varje simulering, d v s för varje bärningssäsang med dess specifika vädersekvens.

*Tabell 2. Exempel på utdata vid simuleringarna*

---

- vald vädersekvens
- datum då tröskningssäsangen inleds
- genomsnittlig kärn/frö-skörd under året
- mängd halm som tröskas varje år
- mängd halm som pressas med godkänd vattenhalt (t ex max 18 %)
- mängd halm som lagras in före den 1 oktober
- antalet hektar som vänds/strängläggs
- antalet timmar som pressarna transporteras till/från fälten, har ställtid, m m
- antalet timmar som pressarna ej är igång p g a slumpmässiga stopp
- antalet timmar som pressarna arbetar i strängen
- antalet timmar som fältlastaren kör till/från fälten
- antalet timmar som fältlastaren ej är igång p g a slumpmässiga stopp
- antalet timmar som fältlastaren lastar transportekipagen (inkl insamling av balar)
- antalet timmar som fältlastaren väntar på att lasta
- antalet timmar som transportekipagen kör på vägarna
- antalet timmar som transportekipagen väntar på fälten för att bli lastade
- antalet timmar som transportekipagen väntar på fälten medan de blir lastade
- antalet timmar som transportekipagen väntar vid lagren för att bli avlastade
- antalet timmar som transportekipagen väntar vid lagren medan de blir avlastade
- antalet timmar som lastaren vid lagret kör mellan lagren
- antalet timmar som lastaren vid lagret ej är igång p g a slumpmässiga stopp
- antalet timmar som lastaren vid lagret lastar av transportekipagen
- antalet dygn från tröskning till balning; genomsnitt, standardavvikelse och max-värde för alla fält under året
- antalet dygn från balning till inlagring; genomsnitt, standardavvikelse och max-värde för alla fält under året
- antalet timmar från tröskning till balning som halmsträngarna var blöta av regn eller dagg; genomsnitt och standardavvikelse för alla fält under året
- antalet gradtimmar från tröskning till balning när halmsträngarna var fuktiga; genomsnitt och standardavvikelse för alla fält under året
- mängd nederbörd på halmen från tröskning till balning; genomsnitt och standardavvikelse för alla fält under året
- nederbörd på halmen mellan tröskning och balning; andel av fälten som fick < 0,5 mm, 0,5-5 mm, 5-10 mm, 10-15 mm, 15-20 mm, 20-25 mm och > 25 mm.

---

#### **4.3. Verifiering, validering, variansreduktion, m m**

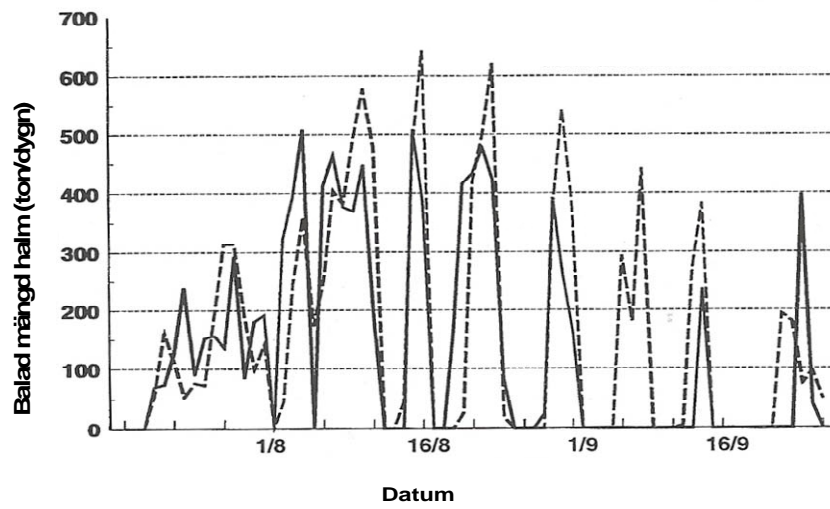
För att vara ett tillförlitligt redskap, ska en simuleringsmodell alltid verifieras. Verifiering innebär att man kontrollerar att modellen fungerar så som det var avsett, eller mer vardagligt uttryckt: man kollar att den inte innehåller några buggar. Verifiering kan vara ett mycket tidsödande arbete, och även om man har ägnat mycket tid åt detta, kan man ändå inte vara helt säker på att modellen är helt fri från oavsiktliga aktiviteter. Detta gäller speciellt komplexa modeller där parallellt pågående processer i olika delmoduler kan orsaka interaktioner som inte var avsedda från början (Kelton m fl, 2007).

I denna studie har varje delmodell verifierats genom att följa flödet av entiteter genom de sk SIMAN-blocken, vilka utgör strukturen i Arena-modellen. Detta har gjorts både manuellt och med hjälp av de verktyg ("watch", "highlight active module", m m) som finns i Arena för olika typ- och extremfall. Därefter har verifieringen av både delmodeller och modellen som helhet gjorts genom de animeringsmöjligheter som finns i Arena. Genom att ingående studera simuleringarna på datorskärmen, kan man steg för steg analysera modellens arbete och upptäcka eventuella avvikelser. Exempel på aktiviteter som tyder på buggar är en traktor som plötsligt kör till "fel" fält, en kö vid ett lager som växer oavbrutet, eller ett arbete som sker under "otillåtna" förhållanden.

Validering innebär att man kontrollerar hur väl modellen beskriver de relevanta egenskaperna hos den "verklighet" eller det system som ska studeras (Kelton m fl, 2007). I denna studie har modellen som helhet inte kunnat valideras, eftersom det inte finns några data från liknande storskaliga halmbärgningssystem i landet som man kan jämföra resultaten mot. Däremot finns det undersökningar där validiteten hos vissa delmodeller har testats (se t ex i kapitel 3).

Validiteten hos en tidigare version av den dynamiska delen med pressning av halmen har testats vid ett halmvärmeverk i Svalöv (Nilsson, 1999a), se figur 15. Under år 1994 registrerades hur mycket halm som totalt pressades dag för dag under hela bärgningssäsongen av fem pressar av "Hesston"-typ, och dessa värden jämfördes sedan med simulerade värden. Totalt pressades drygt 11 400 balar i verkligheten, medan simuleringarna gav en bärgad mängd på 9 700 balar. Generellt fanns en god överensstämmelse för enskilda dagar. Skillnaden i total mängd kan eventuellt ha berott på att högre vattenhalter accepterades i verkligheten under vissa dygn, och även på förekomsten av lokala skurar (i de indata som användes i modellen). Denna tidigare version har också verifierats/validerats genom medverkan av experter på systemet.

För varje scenario simuleras vanligen 40 bärgningssäsonger, med två simuleringar för varje vädersekvens (1990-2009). Resultaten från simuleringarna är beroende av slumpmässiga variationer, eftersom olika sannolikhetsfördelningar används vid generering av olika systemparametrar (t ex start för skörden, avkastningsnivåer, stopp/sönderkörningar, m m). För att få ett acceptabelt antal simuleringar och samtidigt få en bra precision vid jämförelserna av de olika scenarierna, har variansreduktion enligt metoden med gemensamma slumpantal använts. Denna metod innebär att man har samma slumpantal för varje replikation (i detta fall en säsong med dess specifika vädersekvens) för varje scenario som simuleras. På så sätt får man en mer "rättvis" jämförelse mellan olika alternativ.



Figur 15. Uppmätt balad mängd halm per dygn (streckad linje) och simulerad mängd (heldragen linje) vid bärgning runt Svalöv under år 1994. Källa: Nilsson, 1999a.

## 5. TILLÄMPNING FÖR ETT MINDRE VÄRMEVERK I SÖLVESBORGS KOMMUN

### 5.1. Tillgängliga halmmängder

Först görs en uppskattning av mängden bränslehalm i kommunen. Syftena är bl a att ta reda på vilken skala det rör sig om när det gäller hanteringssystem/panna, och även att ta reda på vilka halmgrödor som kan bli mest aktuella. I tabell 3 visas odlingsarealerna för olika halmgrödor i kommunens församlingar under år 2008. Som jämförelse finns även de totala arealerna under åren 2003 och 1999 medtagna. Av tabellen framgår bl a att odlingen av höstvetete har ökat ganska kraftigt. I tabellen visas också normskördarna för de olika grödorna.

Tabell 3. Odlingsarealer (ha) för olika halmgrödor i Sölvesborgs kommuns församlingar under år 2008, och totalt för åren 2003 och 1999, samt normskördar (kg/ha) för samma kommun (avseende skördeområde 1011 år 2009). Källa: Jordbruksverket, 2009a; SCB, 2009a

	Höst- vete	Höst- råg	Råg- vete	Höst- korn	Vår- vete	Vår- korn	Havre	Höst- raps	Vår- raps
Mjällby	180	57	140	17	85	984	17	19	10
Sölvesborg	45		11		50	81			
Ysane	258	21	106	68	638	649	46	9	13
Totalt 2008	483	78	257	85	773	1 714	63	28	23
Totalt 2003	350	109	301	27	751	1 347	129		
Totalt, 1999	245	152	243	17	896	1 447	90		
Normskörd, kg/ha	6 206	4 094	4 821	4 500 <sup>1)</sup>	5 382	4 226	4 353	3 310	2 119

<sup>1)</sup> Uppgifter saknades, värdet har skattats.

För att uppskatta mängden halm som finns tillgänglig i kommunen, används de halm:kärna-kvoter som finns i tabell 4. Genom att multiplicera dessa kvoter med arealerna och normskördarna i tabell 3, erhålls den fysiska mängden halm som produceras. Eftersom all halm av praktiska skäl inte kan bärgas alla år, reduceras de framräknade värdena med en sk bärgningskoefficient. Denna koefficient tar hänsyn till det faktum att det vissa år blir alltför regnigt under skördeperioden för att man skall kunna bärga all halm, och att perioden mellan tröskning och efterföljande höstsådd ibland blir alltför kort för att man ska hinna med att bärga halm av god kvalitet. Henriksson och Stridsberg (1992) gjorde bedömningen att i genomsnitt 80 % av höstvetehalmen i Blekinge län är bärgningsbar under en längre period, medan motsvarande värden är 65 % för vårvete, 80 % för råg och korn, 75 % för havre, 85 % för höstraps, samt 75 % för vårraps. Dessa värden har använts i denna studie, samt 80 % för rågvete och höstkorn.

Resultaten för beräkningarna visas i tabell 5. De totala fysiska tillgångarna var ca 8 800 ton/år. Den totala mängden bärgningsbar halm var ca 6 600 ton/år, varav ca 2 500 ton/år var höstsädeshalm, ca 4 000 ton/år var vårsädeshalm och ca 100 ton/år var oljeväxthalm.



Tabell 4. Halm:kärna-kvoter och bärgningskoefficienter enligt Nilsson & Bernesson (2009a) respektive Henriksson & Stridsberg (1992)

Gröda	Halm:kärna-kvot	Bärgningskoefficient
Höstvete	0,60	0,80
Höstråg	0,78	0,80
Rågvete	0,65	0,80
Höstkorn	0,57	0,80
Vårvete	0,66	0,65
Vårkorn	0,37	0,80
Havre	0,52	0,75
Höstraps	1,02	0,85
Vårraps	0,94	0,75

Tabell 5. Beräknade tillgångar på halm i Sölvesborg kommun

	Höst- vete	Höst- råg	Råg- vete	Höst- korn	Vår- vete	Vår- korn	Havre	Höst- raps	Vår- raps
Fys. tillg., ton/år	1 800	250	820	220	2 720	2 680	130	100	50
Bärgn.bart, ton/år	1 440	200	660	170	1 770	2 140	100	80	30

Inom djurhållningen utnyttjas halm som strö och foder, och oftast prioriteras denna halm före annan användning. Genom att känna till hur många djur det finns i kommunen, kan man göra en uppskattning av hur stor mängd som behövs för detta ändamål. Data om antalet husdjur har erhållits från Jordbruksverket (2009b) och gäller för år 2007. Antalet kor för mjölkproduktion var 388 st, antalet kor för uppfödning av kalvar 532 st, antalet kvigor, tjurar och stutar 788 st, antalet kalvar under 1 år 768 st, antalet baggar och tackor 808 st, antalet lamm 1 021 st, antalet suggor och galtar för avel 1 029 st och antalet slaktsvin över 20 kg 20 174 st. När det gäller antalet hästar, så finns det ingen samlad officiell statistik. SCB gjorde dock en uppskattning av antalet under år 2004 (SCB, 2009b), och med hjälp av dessa siffror och siffror givna av Nilsson (2007b), uppskattades antalet till 300 st. För övriga djurslag antas halmförbrukningen vara försumbar.

I en studie av Hansson m fl (2006) redovisas uppskattningar av halmförbrukningen för olika djurslag med utgångspunkt från rapporter utgivna av Jordbruksverket (Jordbruksverket, 1995; Jordbruksverket, 2001) och från samråd med rådgivare på Hushållningssällskapet. I tabell 6 redovisas denna förbrukning för de olika djurslagen. I denna studie har användningen inom hästnäringen minskats med en tredjedel från 1,8 (Hansson m fl, 2006) till 1,2 ton/år (denna siffra har använts av bl a Nilsson & Kangro, 1992).

Tabell 6. Halmförbrukning för olika djurslag. Källa: Hansson m fl, 2006

Djurslag	Halmbehov (kg/dag)	Stallperiod (dagar)	Total halmförbrukning (kg/djur och år)
Häst	6	300	1 800
Mjölkkö	1,5	270	405
Diko	5,5	180	990
Nöt > 1 år	3,5	240	840
Nöt < 1 år	5	210	525
Får inkl lamm			100
Avelssvin	1,5	365	548
Slaktsvin	0,07	365	26

Resultaten visar att användningen inom djurhållningen var 3 600 ton/år, och att mängden överskottshalm var 3 000 ton/år (observera att hänsyn inte har tagits till annan användning inom t ex trädgårdsnäringen eller i eventuella befintliga pannor). Normalt föredras höstsädes-halm för förbränning, bl a beroende på att bränsleegenskaperna ofta är bättre. Havrehalm innebär t ex ofta problem med sintring. Det är därför rimligt att anta att behovet för djuren i första hand täcks med vårsädes-halm. Rapshalm är däremot endast intressant som bränsle.

Med utgångspunkt från ovanstående beräkningar, antogs det att målet för simuleringarna var att i genomsnitt bärga 2 000 ton bränslehalm per år, motsvarande ca 8 GWh. En lämplig fördelning skulle kunna vara 60 % höstvetehalm (1 200 ton/år), 25 % rågvetehalm (500 ton/år), 10 % råghalm (200 ton/år) och 5 % rapshalm (100 ton/år).

## 5.2. Indata

### 5.2.1. Väderdata

För simuleringarna används 20 vädersekvenser (åren 1990-2009) för perioden 16 juli till 30 september. Som nämnts tidigare, innehåller de 20 vädersekvenserna totalt 65 520 observationer. Huvuddelen av mätdata har tagits från stationen i Bredåkra, vilken är den station som är närmast och samtidigt har de mest kompletta dataserierna (Hanö ligger närmare, men denna station återspeglar mer hur vädret är i Hanöbukten). Den närmaste stationen när det gäller globalstrålning finns i Lund, och dessa data har därför inhämtats för denna station. Globalstrålningsdata saknades dock för år 2002, och data för detta år har istället tagits från den s k STRÅNG-modellen. När det gäller molnighet och nederbörd, saknades också vissa data, och därför användes beräknade värden från den s k MESAN-modellen.

I tabell 7 visas statistik för de använda vädersekvenserna. Av tabellen framgår bl a att bärgningsförhållandena torde ha varit svåra under år 1993, som hade lägst genomsnittlig temperatur och lägst genomsnittlig globalstrålning, samt under år 2007, som hade högst genomsnittlig relativ luftfuktighet och högst antal halvdygn (12-timmarsintervall) med nederbörd. Exempel på ett år med goda förhållanden är 2002, då det var varmt och soligt. Under bärgningssäsongen 1994 var det en mycket hög nederbördsmängd, men detta beror till stor del på en skur som innehöll hela 104 mm.

Tabell 7. Mätstationer för de olika väderparametrarna, medel-, min- och max-värden, samt åren som min- och max-värdena inträffade (inom parentes), för den aktuella tidsperioden (16/7-30/9) under åren 1990-2009

Väderparameter	Station	Medel	Min	Max
Temperatur, °C	Bredåkra	15,1	12,5 (1993)	16,8 (2002,-06)
Rel. luftfuktighet, %	Bredåkra	81,3	71,0 (1990)	90,6 (2007)
Vindhastighet, m/s	Bredåkra	2,9	2,4 (2006)	3,2 (2008)
Globalstrålning, W/m <sup>2</sup>	Lund 1990-2001, 2003-2009, STRÅNG <sup>1)</sup> 2002	164	129 (1993)	190 (2002)
Molnighet, oktas	Bredåkra 1990-2001, 2005-2008, MESAN <sup>1)</sup>			
	2002-2004, 2009	4,4	3,3 (2006)	5,4 (1998)
Total nederbörd, mm	Bredåkra 1990-2001, MESAN <sup>1)</sup> 2002-2009	139	70,7 (2000)	330 (1994)
Antal halvdygn med nederbörd		53,7	29 (1997)	80 (2007)

<sup>1)</sup> Beräknade värden med hjälp av STRÅNG- respektive MESAN-modellerna.

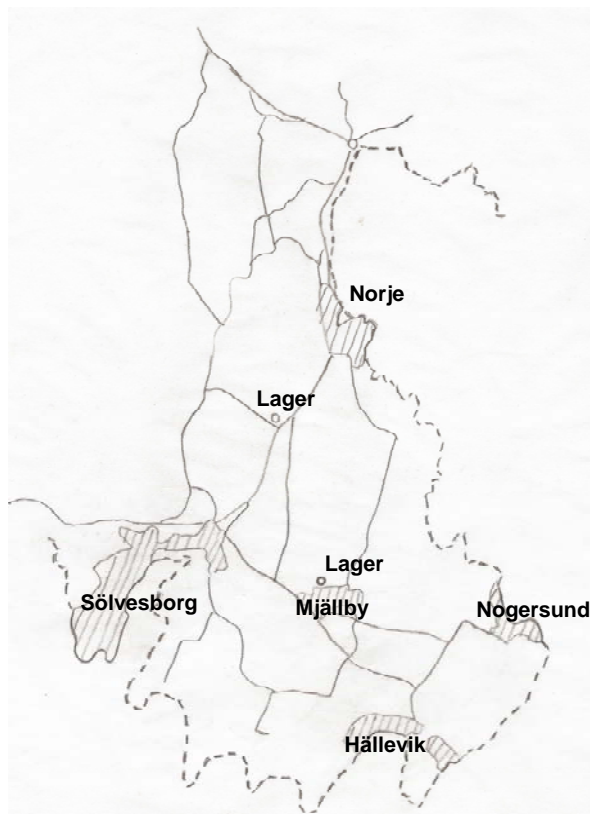
### 5.2.2. Markdata

Inom kommunen dominerar lättare jordarter (ett undantag är bl a Vesan-området, där mullhalten och lerhalten är högre). Några uppgifter om markens fysikaliska egenskaper i det aktuella området har inte hittats i litteraturen. Däremot redovisas markegenskaper för bl a de östra delarna av Kristianstads län i en sammanställning av svenska jordars fysikaliska egenskaper av Wiklert m fl (1983). Dessa data antogs vara någorlunda representativa även för jordarna i Sölvesborgs kommun.

I modellen användes följande värden: profildjup  $h = 300$  mm, vatteninnehåll vid vissningsgräns  $w_v = 8$  %, vatteninnehåll vid fältkapacitet  $w_{fk} = 23$  %, vatteninnehåll vid mättnad  $w_{sat} = 40$  % (uppskattat efter Wiklert m fl, 1983), samt  $K_{fk} = 1,0$  mm/dygn och  $K_{sat} = 38,2$  mm/dygn enligt Witney (1995). Det antogs i modellen att fälten inte var körbara när vatteninnehållet  $w_a$  var högre än  $1,05 \times$  vattenhalten vid fältkapacitet, d v s när  $w_a > 1,05 \times 23$  %.

### 5.2.3. Geografiska data

I figur 16 visas en karta över det område där halmen samlas in. Den totala landarealen för kommunen är 18 650 hektar, varav 7 060 hektar (38 %) är åkermark och där odlingen av halmgrödor under år 2008 utgjorde 3 500 hektar (19 %).



Figur 16. Skiss över halmens upptagningsområde (två lager på vardera 1 000 ton har här ritats ut).

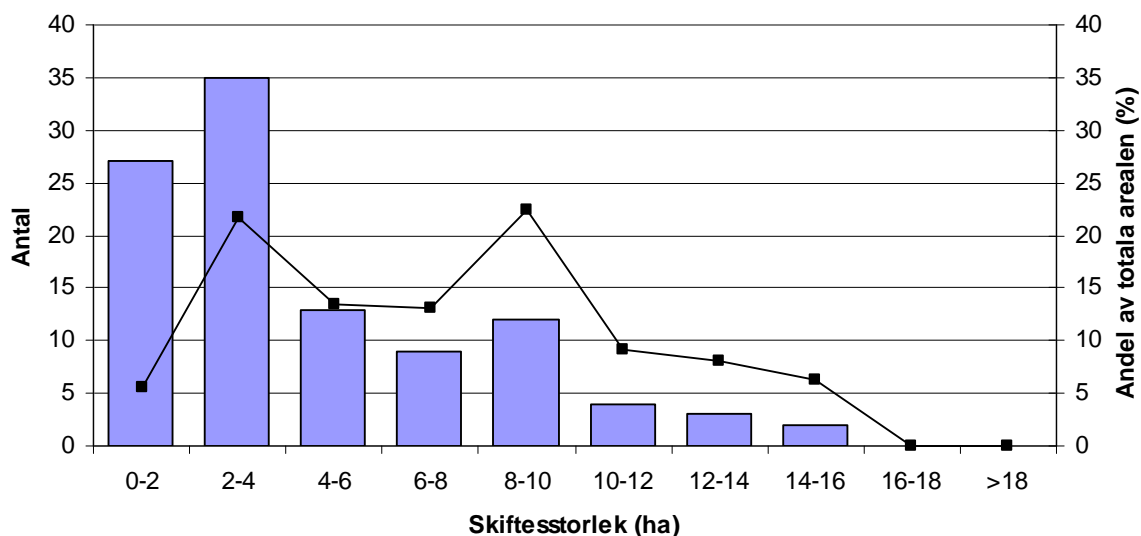
Värmeverket antogs vara placerat vid Mjällby samhälle, medan lagrens placering och storlek bestämdes beroende på vilka scenarier som simulerades. Fälten med halm lokaliserades slumpvis ut med hjälp av en karta och en viss lokalkännedom. Transportavstånden mellan fält och lager, mellan lagren, samt mellan lagren och värmeverket, mättes upp med hjälp av mät-

verktyget på företaget Eniros hemsida (Eniro, 2010). För transportavstånden mellan enskilda fält användes en slingerfaktor ( $\tau$ ) på 1,5 (genomsnitt av 20 st mätningar av fågelvägen respektive verkliga transportavstånden). Vid val av transportvägar, antogs att alla vägar som var utsatta på Lantmäteriets vägkarta var lämpliga för traktortransport (trafik inne i större samhällen undveks dock).

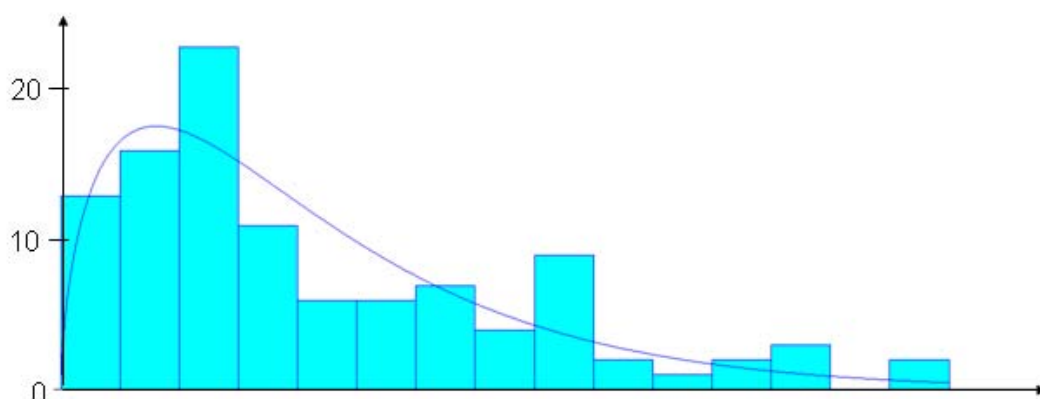
Som nämnts tidigare, har fältens storlek och form betydelse för hur effektivt de olika maskinoperationerna utförs. I figur 17 visas skiftesstorleken indelade i klasser om 2 ha för alla höstveteodlingar i kommunen under år 2009. Antalet skiften med höstvete var 105 st, med den genomsnittliga arealen 4,6 ha, standardavvikelsen 3,6 ha, medianvärdet 3,3 ha, min-värdet 0,3 ha och max-värdet 15,2 ha. Den vanligaste storleksklassen var 2-4 ha, medan storleksklassen 8-10 ha hade störst andel av den totala arealen. För att beräkna arealen  $A_f$  (ha) för varje enskilt skifte i simuleringarna, användes en gammafördelning enligt

$$A_f \in GAMM(\beta, \alpha) \quad (24)$$

där medelvärdet är  $\alpha\beta$  och variansen  $\alpha\beta^2$ . Vid analyserna blev  $\alpha = 2,88$  och  $\beta = 1,59$ , där medelfelet ("square error") var 0,011 och antalet observationer  $n = 105$  (se också figur 18) (kurvanpassningen gjordes med hjälp av Arena-programmets "input analyzer"). Andelen små fält var förhållandevis stor, och av kostnads- och effektivitetsskäl, antogs det i simuleringarna att man inte bärgade bränslehalm på fält som var mindre än 3,0 ha.



Figur 17. Antalet skiften med höstvete i Sölvesborgs kommun under år 2009 indelat efter olika storleksklasser (staplar), samt andelen av den totala höstvetearealen (heldragen linje) för dessa klasser. Källa: bearbetning av data erhållet från Jordbruksverket.



Figur 18. Histogram med 15 intervall (varje intervall motsvarar drygt 1,0 ha) och gamma-fördelning ( $\alpha = 2,88$ ,  $\beta = 1,59$ , medelfel = 0,011) för skiftesstorleken för höstvetete i Sölvesborg kommun under år 2009. Källa: bearbetning av data erhållet från Jordbruksverket.

#### 5.2.4. Växtdata

För att beräkna halmavkastningen på varje enskilt fält används de data som finns i tabell 8, samt ekvationerna 19-20. Kärnavkastningens medelvärde motsvarar de normskördevärden som finns i tabell 3, och standardavvikelsena har hämtats från studien av Nilsson och Bernesson (2009a) (för höstråg skattades standardavvikelsen till 0,65).

Tabell 8. Data för beräkning av de enskilda skiftenas halmavkastning. Källor: SCB, 2009a; Nilsson & Bernesson, 2009a

	Höstraps	Höstråg	Rågvetete	Höstvetete
Kärnavkastn., medelv (ton/ha)	3,31	4,09	4,82	6,21
standardavvikelse	0,44	0,65	0,53	0,65
Halm:kärna-kvot	1,02	0,78	0,65	0,60

När det gäller tröskningens starttidpunkt och varaktighet, har det antagits att samma förhållanden gäller här som de som användes av Nilsson (2010) för f d Malmöhus län. Han använde en s k Erlang-fördelning för att bestämma när skörden av höstvetete börjar för varje enskilt år enligt

$$ST_{\text{höstvetete}} \in (24 + ERLA(9,3;2)) \quad (25)$$

där  $ST_{\text{höstvetete}}$  beskriver antalet dygn från den 1 juli fram till startdatum för tröskning av höstvetete. Denna fördelning grundar sig på resultat från en studie av Nilsson och Bernesson (2009a). Sambandet i ekvation 25 säger bl a att skörden som tidigast börjar den 24 juli, som oftast börjar den 3 augusti, och i genomsnitt börjar den 12 augusti (genomsnittet anger medelvärdet av antalet dagar från 1 juli; det blir högt eftersom extremt sena år får stor inverkan relativt sett).

Eftersom höstvetete är den dominerande halmgrödan i denna studie, och eftersom det vanligen finns en korrelation mellan starttidpunkterna för tröskning av olika halmgrödor under en given säsong, relateras starttidpunkterna för de andra grödorna enligt sammanställningen i tabell

9. I simuleringarna erhålls startdatum för tröskning av höstvetete först enligt ekvation 25, och därefter beräknas t ex startdatum för höstraps som  $ST_{höstvetete} - 17$  (d v s 17 dygn tidigare, dock med restriktionen  $ST_{höstraps} > 15$ , d v s tröskningen kan som tidigast inledas den 16 juli). Data till dessa uppskattningar för övriga grödor kommer från Nilsson (1999a) och Nilsson och Bernesson (2009a).

Baserat på data för åren 1985-92, visade Nilsson och Bernesson (2009a) att tröskningssäsongens längd för höstvetete var drygt 100 timmar i f d Malmöhus län. Det är rimligt att anta att förhållandena är likartade för upptagningsområdet i denna studie. Eftersom halmbärgningsområdet är relativt enhetligt och geografiskt begränsat, antogs det att  $TL_{höstvetete}$  här utgör  $\frac{3}{4}$  av ovanstående värde, d v s 75 tröskningstimmar. Samma värde på  $TL$  användes för samtliga halmgrödor.

Tabell 9. Data om tröskningens starttidpunkt och tröskningssäsongens längd för grödorna höstvetete, höstraps, höstråg och rågvete

Gröda	Tröskstart (antal dagar från 1 juli)	Tröskningssäsongens längd $TL_g$ (antal timmar)
Höstvetete	$ST_{höstvetete}$ (enligt ekvation 25)	75
Höstraps	$ST_{höstraps} = ST_{höstvetete} - 17$ ( $ST_{höstraps} > 15$ )	75
Höstråg	$ST_{höstråg} = ST_{höstvetete} - 9$ ( $ST_{höstråg} > 17$ )	75
Rågvete	$ST_{rågvete} = ST_{höstvetete} - 4$ ( $ST_{rågvete} > 19$ )	75

När det gäller modellering av halmens vattenhalt, antogs det att de modellparametrar som presenteras i kapitel 3 var tillämpliga även här. Visserligen har dessa parametrar tagits fram för höstvetehalm, men de antogs alltså vara användbara även för halm från höstraps, höstråg och rågvete.

### 5.2.5. Maskindata

För alla simuleringar förutsattes att systemet hade en centraliserad styrning av de olika operationerna; exempelvis antogs att de enskilda lantbrukarna inte själva utför pressningen på sina fält, utan syftet var istället att försöka efterlikna de förutsättningar som gäller för en specialiserad entreprenör.

För traktorer och lastmaskiner har timkostnader använts (tabell 10). Dessa maskiner används i stor utsträckning även för andra arbeten, och det har därför antagits att användningen för halmbärgning inte påverkar de årliga kostnaderna. Anskaffningsvärden och årliga användningstider för olika maskiner redovisas i tabell 10. I de totala hanteringskostnaderna från vändning och pressning till leverans vid värmeverket gjordes för samtliga scenarier ett tillägg på 10 %, vilket antogs täcka entreprenörernas vinstkrav och övriga kostnader, t ex för driftledning och administration. I kostnadsberäkningarna ingår också ersättning till lantbrukaren för halmen med 70 kr/ton, vilket kan anses vara en grundnivå för att bli kompensera för växtnäring förlusterna (Mattsson, 2006).

Det antogs att hopslagning av strängarna före pressning generellt görs på 20 % av bärgningsarealen. Vidare har all halm som haft en vattenhalt på över 70 % vänts/strängluftats. Vändningen gjordes när vattenhalten hade sjunkit till 23 % och då regn inte väntades inom de närmaste två timmarna.

Halmen antogs generellt ha ett effektivt värmevärde på 4,0 MWh/ton för vattenhalter < 20 % (våt bas) (i praktiken varierar vattenhalten, och därmed det effektiva värmevärdet, bl a beroende på hur vädret var den dagen halmen pressades, men här användes alltså samma värde för all halm med godkänd vattenhalt).

I studien simulerades bärgning av halm för två olika typer av balar: stora fyrkantbalar med måtten (bredd x höjd x längd) 1,22 m x 1,29 m x 2,40 m, vikten 530 kg och densiteten 140 kg/m<sup>3</sup>, samt mellanstora fyrkantbalar (mediumbalar, medibalar) med måtten (bredd x höjd x längd) 0,80 m x 0,80 m x 2,15 m, vikten 220 kg (pressen antas grovhacka halmen) och densiteten 160 kg/m<sup>3</sup>. De antagna kapaciteterna och kostnaderna för de olika presstyperna visas i tabell 10. Den ”kontrakterade” mängden tröskad halm som pressarna inte lyckades bärga med godkänd vattenhalt före den 1 oktober antogs vara ett kvittblivningsproblem som belastade de totala kostnaderna. Om en lantbrukare anmäler sitt skifte för bärgning, och entreprenören sedan inte hinner med att pressa halmen p g a att han exempelvis har för låg maskinkapacitet, måste halmen bärgas med för hög vattenhalt och föras bort (eller hackas och nedmyllas på fälten). Denna ”straffkostnad” ingår alltså också i de beräknade kostnaderna.

Balarna samlades in på fälten med traktorer försedda med frontlastare. Dessa traktorer användes också för att lasta och transportera halmen till mellanlagren. Transporten av storbalar antogs ske med vagnar som rymde 12 balar, eller 6,36 ton halm per lass. Balarna staplades i två rader och i två lager på vagnen. Medibalarna staplades så att 27 balar rymdes per lass, vilket gav en lastvikt på 5,94 ton. Ett alternativ simulerades också där vagnarna rymde 36 medibalar per lass (7,92 ton/lass); antingen med vagnar som var 9 m långa d v s 4 balar på längden, och tre balar högt, eller tre balar på längden och fyra balar högt med lågbyggda vagnar. Vid lagren fanns en teleskoplastare som lastade av vagnarna och lastade in balarna i lagren. Avlastningen utfördes av föraren som transporterade hem balarna.

Halmen lagrades i fyra plåthallar med en lagringskapacitet på vardera 500 ton (bredd x längd 20 m x 45 m). I grundscenariot användes två lagerplatser, vilka antogs vara belägna strax norr om Ysane och strax norr om Mjällby (se även figur 16). Lagerhallarna antogs ha en investeringskostnad på 1,4 miljoner kr. Med en ränta på 4 %, en avskrivningstid på 35 år och kostnader för underhåll, försäkring, m m på 1,5 % av investeringskostnaden, blev kostnaden 107 kr per m<sup>2</sup>. Lagringsförlusterna antogs vara försumbara för denna byggnad. De totala kostnaderna beräknades också när halmen lagrades i befintliga byggnader/lador och utomhus i stackar. Kostnaden i befintliga byggnader antogs vara 70 kr/m<sup>2</sup> enligt beräkningar av Maskinkalkylgruppen (2009) (värdet avser egentligen den genomsnittliga förvaringskostnaden för maskiner). Balarna staplades här 3,9 m högt. I alternativet med utomhuslagring antogs storbalarna vara staplade i sex lager, där det översta lagret fungerade som ”tak” och som kunde användas som sådant under två säsonger. Lagringsförlusterna antogs här vara 10 %. Vidare antogs att den hårdgjorda ytan, eventuell plasttäckning, tillsyn, m m, kostade 20 kr per m<sup>2</sup> och år.

Lagren fylls på under några veckor under bärgningssäsongen, medan de töms kontinuerligt under eldningssäsongen. Vissa lager kanske därför endast utnyttjas några veckor för lagring av halm, medan andra är fyllda fram till försommaren, och kanske under hela året om de används som buffertlager för att utjämna skillnader i tillgång/efterfrågan mellan olika år. I simuleringarna har det antagits att 1/5 av utrymmet enbart var avsett för lagring av halm (inkl buffertlager). För övriga utrymmen antogs att de var användbara för andra ändamål, t ex för förvaring av maskiner, foder, andra bränslen (t ex energigräs, hampa, m m som skördas sen höst/tidig vår), m m efterhand som de tömdes. I beräkningarna var den andel av de totala

lagerkostnaderna som allokerades till halmen sålunda 3/5 (60 %). Den totala lagringskostnaden per år beräknades först, varefter den multiplicerades med den antagna allokeringens andelen. Därefter dividerades kostnaden med antalet ton halm per år som maskinerna hann lagra in före den 1 oktober. Kostnaden per ton antogs alltså vara beroende av kapaciteten hos de maskiner som transporterar och lagrar in halmen.

Transporterna mellan lagren och pannan utfördes med traktorekipage som tog 24 stora fyrkantbalar per lass. Vagnarna lastades med teleskopplastare, medan avlastningen antogs ske i värmeverkets regi. Lastbilstransporter hade också varit ett alternativ, men med tanke på de korta avstånden (0,5 respektive 7,9 km), ansågs traktortransporter vara lämpligast (se t ex Nilsson (2010)).

*Tabell 10. Kapacitets- och kostnadsdata för hantering av bränslehalm. Kapacitetsdata inom parentes avser medibalar. Uppgifterna har sammanställts med hjälp av data från Maskinkalkylgruppen (2009), Nielsen (1985), Nielsen & Mortensen (2001) och Nielsen (2003)*

Maskin	Återanskaffningsvärde (kr)	Användning (tim/år)	Kalkylperiod (år)	Kapacitet	Timkostnad (kr/tim)
<i>Vändning/strängläggning</i>					
Traktor, 2WD, 50 kW, inkl förare	250 000	600	12		342
Strängluftare/strängläggare	70 000	50	15	3 ha/tim	<u>250</u>
Summa					592
<i>Pressning, storbalar</i>					
Traktor, 120 kW, inkl förare	830 000	850	10		514
Press (utan snittaggr.)	1 100 000	150	11	20 ton/tim	<u>1 221</u>
Summa					1 735
<i>Pressning, medibalar</i>					
Traktor, 110 kW, inkl förare	765 000	850	10		491
Press (med snittaggr.)	1 100 000	200	8	17 ton/tim	<u>1 056</u>
Summa					1 547
<i>Insamling/lastning</i>					
Traktor, 80 kW, inkl förare	570 000	850	10		423
Frontlastare	80 000	350	12	18 (24) min/lass	39
Vagn	100 000	150	20	6,36 ton/lass	<u>98</u>
Summa					560
<i>Transport</i>					
Som ovan				20 km/tim	560
<i>Avlastning/inlagring</i>					
Teleskopplastare, lyfthöjd ca 5 m, exkl förare	700 000	900	15	14 (18) min/lass	184
<i>Hackning</i>					
Fälthack, självgående, 370 kW, inkl förare	2 475 000	400	8	16 ton/tim	1 671
Traktor, 70 kW, inkl förare	510 000	850	10		401
Vagn	120 000	70	15	30 m <sup>3</sup>	244



Vid bärgning av halm i mindre skala kan fälthackad halm vara ett alternativ till balad halm (Nikolaisen, 1998; Nielsen & Mortensen, 2001; Nielsen, 2003). I denna studie gjordes en översiktlig analys för denna hanteringsform. Halmen antogs bli hackad av självgående fälthackar (tabell 10), som blåste över hackelsen till bredvidgående traktorekipage (tabell 10), vilka sedan transporterade det hackade materialet till lagerhallarna. Dessa vagnar antogs rymma 30 m<sup>3</sup> (1,5 ton halm). Beroende på den lägre skrymdensiteten hos hackad halm (antaget värde 75 kg/m<sup>3</sup>), behövdes här sex lagerbyggnader, förutom antagandet att 25 % av halmen lagrades i direkt anslutning till pannan. När lagren tömdes användes en lastmaskin, vilken lastade vagnar som rymde 50 m<sup>3</sup> (2,5 ton halm).

### **5.3. Resultat och diskussion**

#### **5.3.1. System med balad halm**

Först simulerades ett grundscenario med en press för stora fyrkantbalar och två transportekipage som transporterade halmen från fälten till mellanlagren. Därefter simulerades några alternativa scenarier i syfte att förbättra prestanda och minska kostnaderna.

I tabell 11 visas några resultatmått för grundscenariot och för ett scenario när antalet pressar ökade till två. Mängden balad halm med godkänd vattenhalt (18 %) och mängden inlagrad halm före 1 oktober ökade kraftigt (30 % respektive 35 %) med två pressar, samtidigt som halmens liggtid, mängden regn på strängarna, samt kostnaderna, sjönk kraftigt. Fler pressar hade således ganska stor betydelse för hur resultatet blev. Generellt gäller att ju fler pressar som används, desto färre timmar kommer de att arbeta per år, och desto högre blir timkostnaden. Med en press var den totala genomsnittliga arbetstiden 100 timmar (inkl förflyttningar mellan fält, ställtider, oplanerade stopp och arbete i sträng), medan den var 66 timmar per press för två pressar. I dessa beräkningar användes en timkostnad baserad på en årlig användningstid på 150 timmar per år (se tabell 10). Med två pressar kan det bli svårt att nå upp till detta antal, och kostnaderna skulle därför bli ännu högre i verkligheten. Det ska också noteras att en press var tillräcklig under de flesta bärgningssäsonger, medan två pressar behövdes under åren med svåra bärgningsförhållanden. En bra lösning torde alltså vara att ha en press inom upptagningsområdet, och sedan ha möjligheter att hyra in ytterligare en press under besvärliga bärgningssäsonger.

I tabell 11 visas också resultatet om man behåller en press enligt grundscenariot, men istället höjer gränsen för halmens maximala vattenhalt från 18 % till 20 %. Effekten på de olika resultatmåttarna blir nästan lika stor som när man använder två pressar. Även här sker de stora procentuella förbättringarna under de regniga bärgningssäsongerna (ett fall med extremt svåra förhållanden var en simulering med vädersekvensen 1994 och tröskningsstarten den 25 augusti då endast 81 ton halm pressades med en godkänd vattenhalt på 18 % i grundscenariot och 102 ton när gränsen var 20 %). En slutsats är att om värmeverket kan acceptera vattenhalter upp till 20 %, är detta en bra lösning ur kostnadssynpunkt (tabell 11). I simuleringarna sjönk den genomsnittliga andelen halm med en vattenhalt på max 18 % från 100 % i grundscenariot till 71 % när vattenhaltsgränsen var 20 %. Andelen halm med en vattenhalt mellan 18 % och 20 % var alltså 29 %. I simuleringarna var dock gränsen 20 % satt för alla år, och alltså även för de goda åren, vilket betyder att andelen halm med max 18 % troligen blir betydligt högre än 71 % om man under verkliga förhållanden anpassar vattenhaltsgränsen efter hur bärgningsförhållandena ser ut.

Tabell 11. Genomsnittlig mängd halm balad med godkänd vattenhalt, genomsnittlig mängd halm inlagrad före 1 oktober, genomsnittlig tid mellan tröskning och balning, genomsnittlig mängd regn på halmsträngarna mellan tröskning och balning, samt de totala kostnaderna för grundscenariot och några alternativa förändringar av det

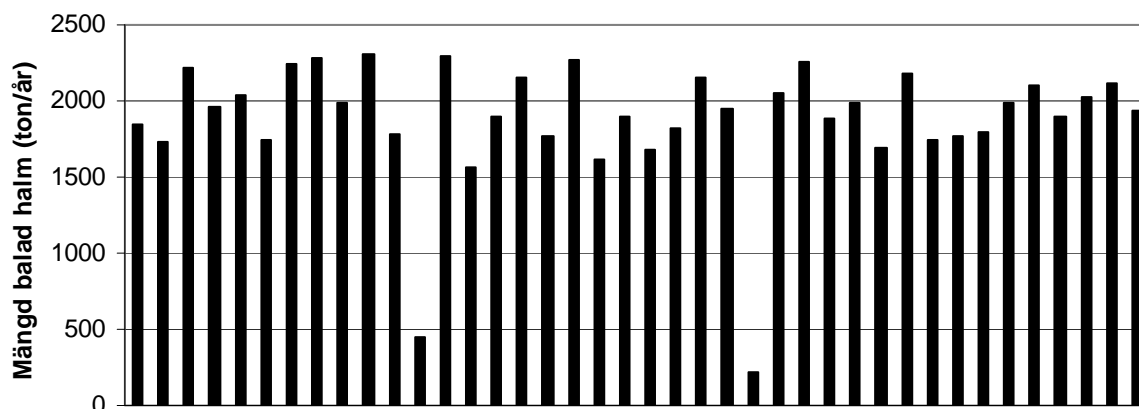
Scenario	Balad mängd (ton/år)	Inlagrad mängd (ton/år)	Tid tröskning-balning (dygn)	Mängd regn på sträng (mm)	Kostnad (kr/MWh)
1. Grundscenario	1 340	1 260	15,0	20,3	217
2. Två pressar	1 740	1 700	10,1	13,9	159
3. Max vattenhalt = 20 %	1 720	1 690	12,6	17,4	160
4. Min areal 4,0 ha	1 370	1 350	15,1	21,1	201
5. Arbetstid kl 07-23	1 400	1 370	14,2	19,3	198
6. Alla förändringar samtidigt	1 880	1 830	6,1	9,4	145

En ökning av den minsta acceptabla skiftesarealen från 3,0 ha till 4,0 ha hade en ganska liten inverkan på resultatet. Antalet skiften för att kunna bärga samma mängd halm minskade på motsvarande sätt från 93 till 83. Den största skillnaden fanns för kostnaderna, som minskade med ca 8 %. Detta berodde bl a på att pressen ägnade mindre tid åt förflyttningar, varigenom något mer halm kunde pressas, samtidigt som något mer halm också kunde lagras in före 1 oktober. En orsak till att denna ändring av skiftesstorleken hade en relativt liten betydelse var att skiftena ligger ganska koncentrerade inom ett väl avgränsat område. Man ska också komma ihåg att man riskerar att gå miste om ganska stora kvantiteter halm om minimigränsen sätts alltför högt (se figur 17).

En förändring av arbetsschemat, så att pressen kan köras alla timmar mellan kl 07 och kl 23, gav ungefär samma resultat som ökningen av minsta skiftesstorleken. Skillnaden var alltså ganska liten (förutom för kostnaderna), och detta tyder på att pressens utnyttjandegrad är hög även med mer ”normala” arbetstider. Med det nya arbetsschemat kan man behöva fler förare, och det kan även bli mer övertidsarbete, men detta har inte beaktats i timkostnaderna för balpressen.

När alla ovanstående förändringar gjordes samtidigt, ökade den balade halmmängden med ca 40 % och den inlagrade halmmängden före 1 oktober med ca 45 % (tabell 11). Samtidigt minskade exempelvis de totala kostnaderna för halmen med ca 33 % till 145 kr/MWh. Å andra sidan minskade den genomsnittliga tiden mellan tröskning och balning från 15,0 dygn till 6,1 dygn, och den genomsnittliga mängden nederbörd på halmsträngarna före balning från 20,3 mm till 9,4 mm. Detta indikerar att halmen nu blev mindre ”grå”, och att bränslekvaliteten därmed kan ha försämrats något. Samtidigt som den genomsnittliga tiden mellan tröskning och balning mer än halverades, ökade andelen halm som blev balad inom en vecka från 35 % till 71 %. Detta återspeglas också i minskningen av den areal med halmsträngar som vänder/luftades, vilken sjönk från i genomsnitt 230 ha/år till 60 ha/år.

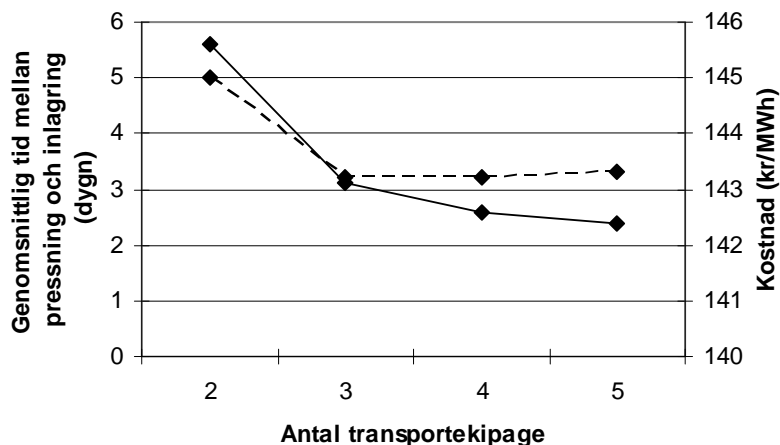
Den mängd halm som pressades med godkänd vattenhalt under varje simulerad säsong för scenario 6 i tabell 11 visas i figur 19. Av de fyrtio säsongerna, var det två som utmärkte sig med mycket låga mängder (vädersekvens 2001 med skördestart för höstveten den 25 augusti och vädersekvens 1994 med skördestart för höstveten den 25 augusti). Genomsnittet för alla säsongerna var 1 880 ton/år.



Figur 19. Mängd balad halm under de 40 simulerade bärningssäsongerna.

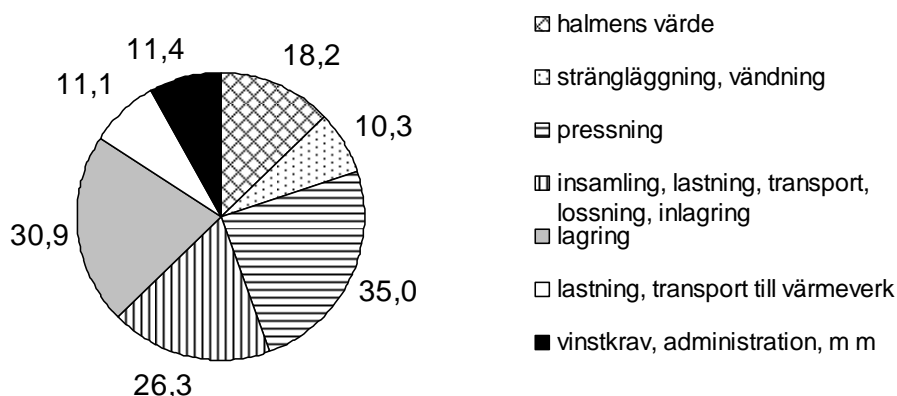
Pressningen av balar och transporten av dem till mellanlagren är två operationer som kan utföras oberoende av varandra. Det är dock önskvärt att tiden mellan pressning och inlagring är så kort som möjligt, bl a för att förhindra att balarna blir uppfuktade av regn och för att frigöra fälten så att lantbrukaren kan påbörja jordbearbetningen inför nästa gröda. En hög pressningskapacitet innebär därför också att insamlings- och transportkapaciteten bör vara hög. I figur 20 visas det genomsnittliga antalet dygn mellan pressning och inlagring, samt de totala kostnaderna, när antalet transportekipage ökades från två till fem (för pressarna gällde samma förutsättningar som för scenario 6 i tabell 11). Som väntat sjönk antalet dygn mellan pressning och inlagring ju fler ekipage som användes. Däremot var inverkan på de totala kostnaderna mycket liten. Kostnaderna sjönk något när antalet ekipage ökade från två till tre, främst beroende på att mer halm hann lagras in före den 1 oktober. Kostnaderna ökade sedan något när antalet ekipage ökade från fyra till fem, vilket bl a berodde på att väntetiderna för att bli lossade vid lagren ökade (från totalt 7,5 timmar per år till 13,3 timmar per år).

När en press användes i scenario 1, var den genomsnittliga tiden mellan balning och inlagring endast 0,9 dygn för två transportekipage. Endast ett transportekipage skulle eventuellt kunna räcka, men transportkapaciteten riskerar då att bli otillräcklig under vissa omständigheter, t ex om skiften som ligger långt borta från lagren snabbt behöver frigöras från balar, eller om man får avbrott p g a sönderkörningar, punktering, etc. En slutsats är därför att om en press används, så bör minst två transportekipage vara tillgängliga, och om man har två pressar, så bör minst tre ekipage användas.



Figur 20. Genomsnittlig tid mellan pressning av balar och inlagring av balarna (heldragen linje), samt de totala kostnaderna (streckad linje), som funktion av antalet transportekipage.

Fördelningen av de totala kostnaderna för leverans av bränslehalm till det fiktiva värmeverket framgår av figur 21 (kostnaderna gäller för ett system som är uppbyggt enligt scenario 6 i tabell 11, med tre transportekipage enligt figur 20). De två viktigaste posterna var pressning (24 %) och lagring (22 %), följda av insamling, lastning, transport, lossning och inlagring (18 %), ersättning till lantbrukarna för halmen på fälten (13 %), kostnader för administration, vinstkrav, m m (8 %), transport till värmeverk (8 %) och strängläggning/vändning (7 %). Alternativa metoder för att pressa och lagra halmen har därför störst potential när det gäller att minska kostnaderna.



Figur 21. Kostnadernas fördelning (kr/MWh) vid leverans av halm till ett fiktivt mindre värmeverk i Sölvesborgs kommun. De totala kostnaderna var 143 kr/MWh.

När maskiner som pressar medibalar simulerades, blev kostnaden 153 kr/MWh (i simuleringarna var pressningsförutsättningarna enligt scenario 6 i tabell 11, och dessutom användes tre transportekipage). Detta kan jämföras med kostnaderna för storbalar (och tre transportekipage) i figur 21, som var 143 kr/MWh. De lägre timkostnaderna enligt tabell 10 väger alltså inte upp den lägre pressningskapaciteten och de längre lastnings- och lossningstiderna (tabell 10). I en efterföljande simulering antogs att man staplade 36 balar på lassen (vilket kan göras genom att man exempelvis använder lågbyggda vagnar så att fyra balar kan staplas ovanpå

varandra), samtidigt som tiderna för lastning och lossning av lassen ökade på motsvarande sätt med 33 %. Kostnaderna för detta scenario blev nu 149 kr/MWh. Ett viktigt skäl till de sänkta kostnaderna var att den genomsnittliga tiden som transportekipagen ägnade åt förflyttningar minskade från 150 till 119 timmar per år. En fördel med medibalarna är att lagerutrymmet kan minskas något p g a högre densitet, vilket inte har beaktats här. I kombination med att dessa pressar numera har en stor användning inom lantbruket för pressning av ensilage, strö-halm, m m, och att man därmed kan sänka timkostnaderna ytterligare, utgör de ett mycket intressant alternativ för pressning av halmbalar till mindre värmeverk.

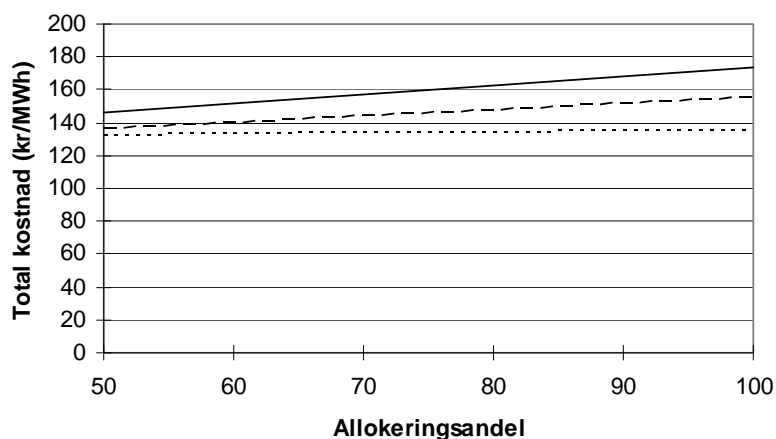
### **5.3.2. Lagring**

När antalet lager minskades från två till ett ökade de totala kostnaderna från ca 143 kr/MWh till knappt 150 kr/MWh. Lagret lokaliserades i detta fall strax norr om Mjällby samhälle i nära anslutning till pannan (på samma plats som lager 1 i tidigare simuleringar). Avståndet mellan mellanlager och värmeverk var 0,5 km, till skillnad mot scenarierna med två lager, där avstånden var 0,5 km respektive 7,9 km. Det genomsnittliga avståndet mellan fält och lager var 4,3 km när två lager användes, och 7,2 km när antalet lager var ett. Transportekipagen var under förflyttning under totalt 234 timmar per år med ett lager, medan värdet för två lager var 145 timmar/år, samtidigt som halmbalarnas liggtid på fälten var 4,7 respektive 3,1 dygn.

Att minska ned antalet lager till ett, och att placera detta nära pannan i syfte att reducera transportarbetet under eldningssäsongen, var i detta fall således inte ekonomiskt lönsamt (observera att samma transportsystem användes både mellan fälten och lagren och mellan lagren och pannan i simuleringarna). Att ha tre eller fler lager har inte undersökts i denna studie. Nilsson (2010) visade dock att inga större kostnadsbesparingar görs när antalet lager når en viss brytpunktsnivå. Några skäl är att de genomsnittliga transportavstånden tenderar att plana ut ju fler lager som används (de blir aldrig noll), och att kostnaden för själva transporten relativt sett blir liten i förhållande till kostnaderna för lastning och lossning när fler lager används.

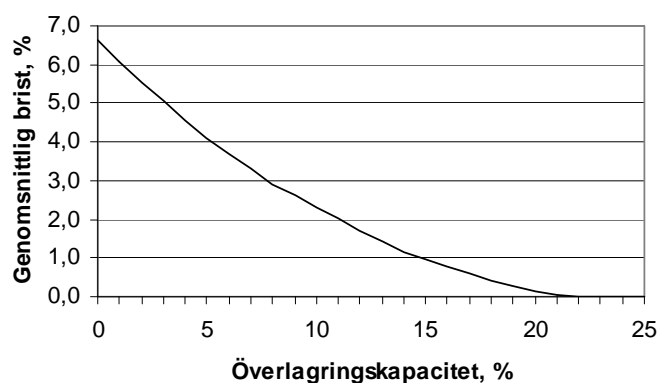
I simuleringarna antogs det att man byggde totalt 4 nya hallar för halmen från det simulerade upptagningsområdet, och att lagringskostnaderna sedan beräknades som den totala årskostnaden för byggnaderna dividerat med den mängd halm som hanteringssystemet lyckades leverera i genomsnitt per år. Vissa år kunde några hallar stå tomma p g a låga skördar, eventuellt i kombination med låg kapacitet hos hanteringssystemet, medan alla hallar var fyllda andra år, och kanske även användes som buffertlager under efterföljande år. Efterhand som lagren tömdes, antogs det vidare att hallarna kunde användas för andra ändamål, t ex för förvaring av maskiner, foder, m m. I simuleringarna allokerades schablonmässigt 60 % av byggnadernas kostnader till halmen. I figur 23 visas resultatet för andra allokeringsandelar (följande förutsättningar gällde: pressningsscenario 6 i tabell 11, tre transportörer, två mellanlager). I många fall kanske det inte finns någon alternativ användning av hallarna då de står tomma, och vid en sådan allokeringsandel på 100 % blev de totala kostnaderna 174 kr/MWh.

I figuren visas även de totala kostnaderna när halmen lagras i ”genomsnittslador” och utomhus. Även om det är mindre relevant att tala om allokeringsandelar för dessa lagringsätt, har de ändå ritats ut i figuren som jämförelse. De totala kostnaderna vid en andel på 100 % var 155 kr/MWh för ”genomsnittsladan” och 136 kr/MWh för utomhuslagring. Skillnaden mellan lagring i hallar och utomhus var kanske mindre än väntat, men man ska inte glömma att kostnaderna för lagringsförluster, tillsyn, uppstädning, vändplaner, m m, är högre för utomhuslagring.



Figur 23. Totala kostnaderna som funktion av halmens allokeringssandel av lagringskostnaderna för plåthallar (heldragen linje), "genomsnittslada" (streckad linje) och utomhus i stackar (punktmarkerad linje).

För scenario 6 (med tre transportörer) var medelvärdet för den balade mängden halm med godkänd vattenhalt 1 880 ton/år (se även figur 19). I figur 24 visas den genomsnittliga brist på lagringsutrymme som uppstod per år i förhållande till detta medelvärde när lagrens buffert- eller överlagringskapacitet varierade. När överlagringskapaciteten var 10 %, d v s när totala lagringskapaciteten var 2 070 ton (1 880 + 190 ton), blev det i genomsnitt en brist på lagringsutrymme på 43 ton/år. Denna brist, som motsvarade knappt 2,3 % (figur 24) av den genomsnittligt bärgade mängden (1 880 ton/år), innebar att mängden halm som man skulle ha kunnat bärga under mycket goda år inte bärgades eftersom det inte fanns mer plats i lagren. Med de förutsättningar som gällde vid simuleringarna, behövs därför en viss buffertkapacitet för att säkerställa leveranserna under alla år (den genomsnittliga bristen blev 0 % vid en överlagringskapacitet på 22 % enligt figur 24, vilket innebär att lagren, med en utrymmeskapacitet på 2 300 ton, i genomsnitt härbärgerade 1 880 ton/år).

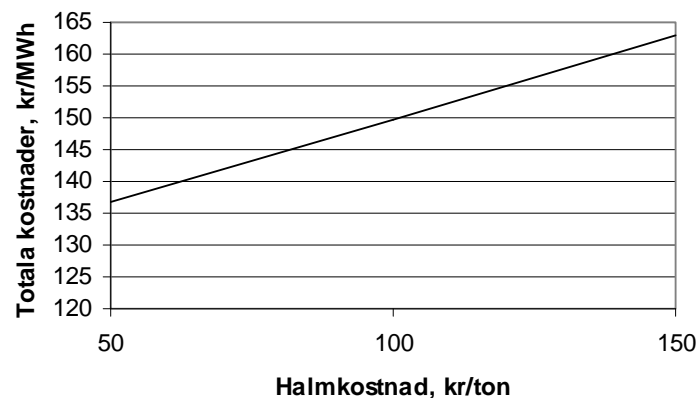


Figur 24. Genomsnittlig utrymmesbrist per år som funktion av överlagringskapaciteten.

### 5.3.3. Några känslighetsanalyser

Känslighetsanalyser har gjorts när det gäller kostnaden för halmen på fälten och valet av väderdata/väderstationer.

I figur 25 visas de totala kostnaderna för halmen som funktion av den ersättning som lantbrukaren får när halmen ligger på fälten. I beräkningarna används scenario 6 med tre transportekipage och två lagerplatser. I analyserna hittills har halmkostnaden varit 70 kr/ton, men av figuren nedan framgår att denna kostnadspost har stor betydelse för bränslets ekonomiska konkurrenskraft. Vid ett halmpris på 100 kr/ton, blir de totala kostnaderna ca 150 kr/MWh, och vid ett pris på 150 kr/ton, blir kostnaderna ca 163 kr/MWh.



Figur 25. Totala kostnader för halmen som funktion av kostnaden när den ligger på fälten.

I simuleringarna har väderdata i huvudsak hämtats från väderstationen i Bredåkra i Ronneby kommun. Ett skäl till att inte använda data från t ex Hanö väderstation, som ligger betydligt närmare det aktuella upptagningsområdet, var att väderdata inte var komplett, bl a när det gäller molndata. För att undersöka vilken betydelse valet av väderstation har för resultaten, har simuleringar gjorts med väderdata som gäller för sydvästra Skåne (se även studien av Nilsson (2010)).

Kostnaderna var praktiskt taget samma för båda alternativen. Däremot var exempelvis mängden regn på strängarna mellan tröskning och balning i genomsnitt drygt 13 mm för ”Skånealternativet” jämfört med knappt 10 mm för ”Bredåkraalternativet”. Den genomsnittliga tiden mellan tröskning och pressning var dock 15 % kortare, medan tiden mellan pressning och inlagring var 26 % längre. De genomsnittliga värdena för några väderparametrar under den aktuella perioden för ”Skånealternativet” var 155 mm när det gäller nederbörden, 46 st när det gäller antalet halvdygn med nederbörd, 4,7 oktast när det gäller molnigheten, samt 77,4 % när det gäller den relativa luftfuktigheten. Samma värden för Bredåkra var 139 mm, 54 st, 4,4 oktast respektive 81 % (se tabell 7). Mängden nederbörd var således större med ”Skånevädret”, men detta kompenseras till viss del med fler regnfria dagar och lägre genomsnittliga relativa luftfuktigheter.

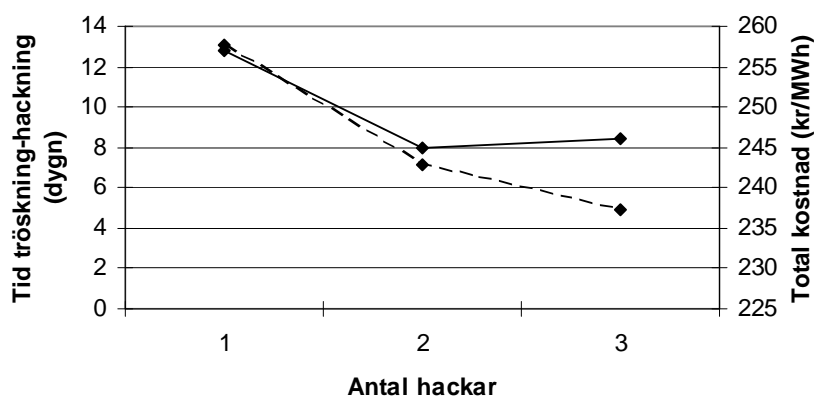
### 5.3.4. System med hackad halm

Fälthackad halm är ett alternativ som kan vara intressant för mindre värmeverk, och i denna studie gjordes därför en översiktlig undersökning av hur prestanda och kostnader kan se ut för

ett system med självgående fälthackar. Kapacitetsdata och timkostnader för ett sådant system visas i tabell 10.

Förutsättningarna var följande: ett system med en, två eller tre självgående hackar simulerades. Varje hack hade bredvidgående traktorer med vagnar ( $30 \text{ m}^3$ ), som sedan transporterade materialet till lagret. Eftersom det genomsnittliga avståndet mellan fält och lager var relativt långt (4,3 km med två lagerplatser), antogs det att fyra traktorekipage behövdes (i genomsnitt) för att hinna med hackarnas höga kapacitet (16 ton/timme). Hackelsen lagrades inomhus i plåthallar liknande dem som tidigare har använts för balad halm. Hallarna för hackelse hade dock förstärkta väggar så att halmen kunde packas till en densitet på  $75 \text{ kg/m}^3$  (totala investeringskostnaden antogs nu vara 1,6 miljoner kr/hall). Antalet lager var sex, och dessutom antogs att 25 % av hackelsen lagrades i nära anslutning till värmeverket för att minska transportarbetet mellan lager och panna. Transporten mellan övriga lager och värmeverk utfördes med vagnar som rymde  $50 \text{ m}^3$  (2,5 ton), och lastningen skedde med lastmaskin.

I figur 26 visas kostnaderna och halmens väntetid mellan tröskning och hackning som funktion av antalet hackar (i övrigt gällde de förutsättningar som är beskrivna för scenario 6 i tabell 11). Ju fler hackar som användes, desto kortare blev tiden mellan tröskning och hackning, medan kostnaderna inte blev lägre om man hade fler än två hackar. Hackens höga kapacitet innebär att en maskin bör räcka under majoriteten av åren, med tillgång till ytterligare en hack under mer besvärliga bärgningsförhållanden.

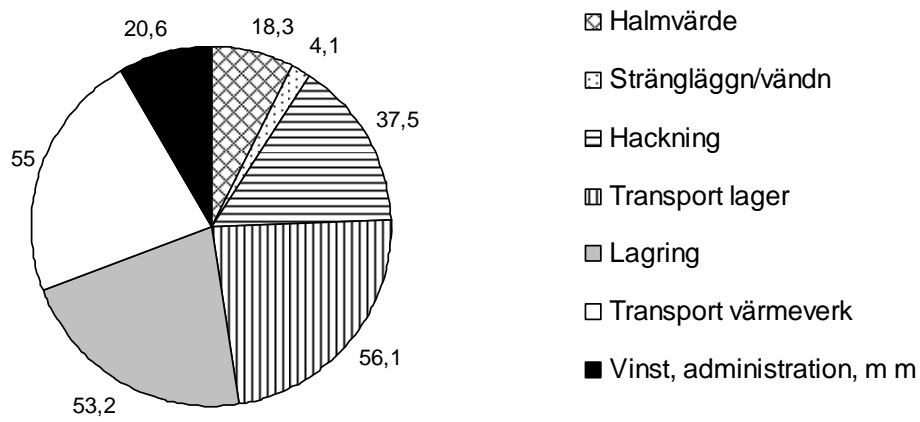


Figur 26. Genomsnittlig tid mellan tröskning och hackning (streckad linje) samt totala kostnader (heldragen linje) som funktion av antalet självgående fälthackar.

Kostnadsfördelningen med ett system med två fälthackar visas i figur 27. De dominerande posterna var transport till mellanlager, transport till värmeverk och lagring. För att minska kostnaderna för de förstnämnda transporterna, bör man använda större vagnar och dessutom ha fler lager för att korta transportavstånden. Kostnaderna för transporterna mellan lager och värmeverk kan eventuellt minskas genom hantering i t ex containrar. Lagringskostnaderna kan minskas genom att man lagrar i stora stackar utomhus, men å andra sidan riskerar man att få stora lagringsförluster och ojämn vattenhalt. Även om kostnaderna var höga för hackad halm, bör det således finnas en viss potential att sänka dessa, särskilt för småskaliga system. Man ska inte heller glömma att hackad halm har en stor fördel gentemot balad halm, då man slipper rivare m m vid själva pannan. Enligt Myringer m fl (2009) utgör merkostnaden för hantering av balad halm vid värmeverket 15-37 kr/MWh (uppskattningen gäller inklusive ask-



hantering och avser ett värmeverk på 4 MW). En annan fördel med hackad halm är att man lättare kan blanda halmen med andra bränslen, t ex flis.



Figur 27. Fördelning av kostnaderna för hackad halm (totala kostnaden var 224 kr/MWh).

## 6. AVSLUTANDE DISKUSSION

För de flesta åkerbränslen, inklusive halm, spelar logistiken mellan fält och förädlingsanläggning/värmeanläggning stor roll för bl a råvarukostnaderna och bränslekvaliteten. Skördeperioderna är ofta mycket korta beroende på olika restriktioner när det gäller vattenhalter och väder, mognadstidpunkter, m m. Ofta används specialmaskiner för skörden, och timkostnaderna kan därför bli mycket höga när antalet användningstimmar per år är litet. Bränslena samlas in från stora arealer och koncentreras sedan till en eller ett fåtal platser, vilket innebär att transportarbetet kan vara mycket omfattande. Vidare är bulkdensiteten ofta låg, och det är inte heller alltid som materialet kan hanteras som en ”fluidiserande” bulkvara, vilket bl a innebär att arbetet med lastning, lossning, påfyllning, tömning, m m, av materialet utgör en hög andel av de totala kostnaderna. Eftersom bränslena är hygroskopiska och biologiskt nedbrytbara, har vattenhalten en avgörande betydelse för deras hållbarhet och kvalitet. Detta ställer särskilda krav både vid själva skörden och under lagringen. Lagringskostnaden kan dessutom bli hög p g a låg skrymdensitet.

Den använda metoden med dynamisk simulering har visat sig fungera väl för att analysera sådana relativt komplexa logistiksystem. Det använda simuleringsprogrammet Arena har också mycket stor flexibilitet genom att man kan arbeta i olika modellhierarkier. Aktiviteter/processer som är kritiska i systemet kan modelleras mycket detaljerat, medan andra mer allmänna aktiviteter enkelt kan modelleras med färdigbyggda moduler. Genom att kombinera olika modellmoduler, kan man därför få hög flexibilitet, vilket gör det möjligt att simulera en mängd olika typer av scenarier; inte bara för halm utan också för biobränslehantering i generell mening.

För all simulering och modellering gäller dock att resultatens giltighet och tillförlitlighet beror på hur väl modellen beskriver de relevanta systemegenskaperna och på hur hög kvaliteten är hos indata. Det kan t ex vara särskilt svårt att simulera flexibiliteten hos system som styrs av mänskliga beslut, både på strategisk, taktisk och operationell nivå. Ett exempel kan vara halmbärgning under regniga höstar. I simuleringarna behandlas upptagningsområdet praktiskt taget som en isolerad ö, men i verkligheten kanske man kan hyra in maskiner från andra håll och på så sätt öka bärgningskapaciteten tillfälligt. Alternativt kanske man väljer att vända halmen oftare än vad som förutsatts i simuleringarna, och på så sätt lyckas få ned vattenhalten snabbare före pressning. Ett tredje alternativ kan vara att man jobbar övertid på kvällar de timmar när halmen fortfarande är torr, d v s utanför de tidsramar som är satta för de olika arbetena i simuleringarna. En fördel med datormodeller är å andra sidan att det ofta är lätt att ändra förutsättningarna (t ex genom att lägga till fler maskiner vid besvärliga bärgningsförhållanden, vända halmen oftare, ändra arbetstiderna, m m) och se hur resultatet blir under de nya förutsättningarna.

En väsentlig faktor vid alla typer av simuleringar och beräkningar är kvaliteten på indata, d v s hur väl de överensstämmer med verkligheten. Egenskaperna för data kan delas in i tidsrelaterad täckning (t ex hur gamla är data?), geografisk täckning (t ex är data relevanta för området ifråga?) samt teknologisk täckning (t ex är det medelvärden för dagens teknik som används eller uppskattade framtida prestanda?) (Rydh m fl, 2002). När det gäller halmhantering, så finns troligen de största bristerna när det gäller maskinernas kapacitet. Nya tidsstudier behöver därför göras för de maskiner och maskinsystem som används idag. Speciellt behöver inverkan av varierande hektarskördar och strängtjocklekar studeras, liksom frekvenser och varaktighet av oönskade avbrott, samt kapaciteten hos olika typer av insamlings- och transportsystem.

Simuleringarna för en mindre halmpanna i Sölvesborg visade att kostnaderna för halm fritt värmeverket var 140-170 kr/MWh. Detta kan jämföras med genomsnittspriset för skogsflis under tredje kvartalet 2009, som låg på 175 kr/MWh (Energimyndigheten, 2010). Fritt värmeverk så är alltså halm ett billigare bränsle, men då ska man samtidigt komma ihåg att merkostnaden för balhanteringsutrustning, askhantering, m m, är 15-37 kr/MWh enligt Myringer m fl (2009). Det är möjligt att man kan pressa ned kostnaderna ytterligare för småskaliga hanteringssystem, bl a genom att använda traktorer och vagnar med lägre kapitalkostnader, befintliga tomma lador för lagring, m m. För varje specifikt fall får man utforma sitt hanteringssystem efter de lokala förutsättningarna även i dessa avseenden.

Kostnaderna i denna studie ligger i nivå med vad andra studier har visat (Bernesson & Nilsson, 2005; Mattsson, 2006; Forsberg m fl, 2007; Nilsson & Bernesson, 2008; Nilsson, 2010). Beräkningarna i ovan nämnda studier gjordes för mer storskaliga system, där bl a volymerna var betydligt större och transportavstånden längre, men där maskineffektiviteten ofta var högre. För både små- och storskaliga system finns de största möjligheterna att sänka kostnaderna när det gäller lagring och transporter.

Ersättningen till lantbrukaren för halmen har stor betydelse för de totala kostnaderna. Mattsson (2006) uppskattade att halmens växtnäringssvärde varierar från 70 kr/ton upp till 150 kr/ton beroende på jordart m m. Idag får lantbrukare som levererar bränslehalv i södra Skåne kring 100 kr/ton (Myringer m fl, 2009), medan man i Danmark kan få runt 50-60 kr/ton (Hinge, 2009). Med stigande gödselpriser har medvetenheten om halmens alternativvärde stigit, vilket kan innebära ökade ersättningskrav i framtiden. Ett minskat utbud på halm, bl a beroende på kortare strån och högre stubb, i kombination med en ökad efterfrågan, bl a som oförädlad bränsle, för tillverkning av pellets/briketter (Nilsson & Bernesson, 2008), för tillverkning av drivmedel (t ex etanol) (Ahlgren, 2009), för användning som strömedel inom djurhållningen, för framställning av kvävegödsel via förgasning (Ahlgren, 2009), för användning inom byggbranschen (Goodhew m fl, 2004), m m, kan leda till betydande prishöjningar i framtiden. Myringer m fl (2009) refererar till en undersökning av Lunds Energi, som visar att halmpriset inom tio år kan stiga till 180-200 kr/MWh.

Kostnaderna för lagring kan variera stort och är dessutom svåra att uppskatta eftersom de beror på en rad olika faktorer. Kapitalkostnaden är vanligen som högst och kassationsförlusterna som lägst för plåthallar, medan utomhuslagring på exempelvis befintliga gamla vägar och industriplaner kan ge försumbara kapitalkostnader men höga kassationsförluster. Exempel på lagringskostnader i litteraturen är 48 kr/MWh för nya byggnader (Mattsson, 2006), 13-25 kr/MWh för lagring i plastkorv (Bernesson & Nilsson, 2005) och 4 kr/MWh för lagring utomhus (Mattsson, 2006). Fler fältstudier behövs dock för att få ett bättre underlag för olika kostnadsjämförelser.

Transportkostnaderna kan sänkas om man har högre densiteter och fler balar per lass. Nilsson (2010) visade t ex att pressar som ger stora fyrkantbalar med en vikt på 700 kg medför att de totala kostnaderna sjunker med ca 15 %. En förutsättning för de lägre kostnaderna var att investeringskostnaden inte blev för hög och att maskinerna inte hade lägre kapacitet än tidigare. En viktig potential till lägre kostnader finns alltså genom att använda balar med högre densitet, och även genom att anpassa fordonen så att fler balar får plats per ekipage. På marknaden finns ett ganska stort utbud av pressar som ger balar av varierande mått och densitet (Lantbruksnet, 2010). En vanlig balhöjd för fyrkantbalar är t ex 90 cm, vilket alltså gör det möjligt att stapla tre balar ovanpå varandra på transportekipagen. Dessutom har de flesta fabrikat snittar på sina balpressar, och en sådan grovhackning av halmen kan höja densiteten med

upp till 20 % (Bernesson & Nilsson, 2005). Vid en kraftig ökning av användningen av bränslehalt i Sverige, ligger det i entreprenörernas och maskintillverkarnas egna intressen att utveckla nya effektiva tekniska lösningar för hantering av halm.

Känslighetsanalyserna visade bl a att valet av väderstation för ett visst upptagningsområde har betydelse för resultaten. Detta har också tidigare understrukits av Nilsson (2000), som visade att nederbördens frekvens och varaktighet, liksom avdunstningen, har stor inverkan på hur mycket halm som kan bärgas och hur stora kostnaderna blir. Vid en jämförelse mellan olika orter i landet (Svalöv i Skåne, Vara i Västergötland, Enköping i Uppland), visade det sig dock att de två viktigaste faktorerna när det gäller skillnader i bärgningskostnader är transportavstånden och halmavkastningen per hektar (Nilsson, 2000). Denna jämförelse gjordes med en tidigare version av det dynamiska simuleringsprogram som har använts i denna studie. För att hålla bärgningskostnaderna på en konkurrenskraftig nivå, drog Nilsson (2000) slutsatserna att man vid valet av lokaliseringsort för ett halmeldat värmeverk bör beakta att arealen med halmfält i förhållande till den totala arean runt värmeverket bör vara större än 4 % för att transportkostnaderna inte ska bli för höga. Vidare konstaterade han att den genomsnittliga halmavkastningen bör vara högre än 4 ton/ha, och att det totala antalet dygn med nederbörd i augusti och september inte bör överstiga 25.

Hantering av hackelse är intressant för mindre anläggningar, eftersom volymerna är mindre och transportavstånden kortare. Beräkningarna i denna studie visade dock att kostnaderna ändå är för höga för att denna hanteringsform ska vara konkurrenskraftig. Om man kunde utnyttja maskinerna och lagren under en större andel av året genom hantering av t ex hackad hampa, hackat energigräs och hackad majs, vilka skördas vid andra tidpunkter än halm och som även kan användas för produktion av förädlade bränslen såsom briketter och biogas, skulle kostnaderna kunna sjunka. Kostnaderna för sådana småskaliga "bioenergikombinat" baserade på hackade råvaror bör utredas vidare.

## 7. SLUTSATSER

Följande slutsatser drogs i denna studie:

- Det finns en rad viktiga faktorer som sätter de yttre ramarna för logistiksystemen vid bärgning av bränsehalv. Exempel på sådana faktorer, som kan karakteriseras som icke påverkbara, är vädret (t ex nederbörd, temperatur, relativ luftfuktighet), geografiska förhållanden (t ex vägnät, fältens storlek, form och koncentration), markegenskaper (t ex jordart och dräneringsegenskaper) och växtrelaterade egenskaper (t ex avkastning, skördetidpunkt och materialets torkningsegenskaper). Med hjälp av data från SMHI, Lantmäteriet, Jordbruksverket, m fl, kan man modellera inverkan av dessa faktorer och på så sätt få reda på hur förutsättningarna för halv bärgning ser ut för en specifik ort/region i landet.
- Händelsestyrd simulering är ett mycket användbart redskap för modellering av hela maskinsystem från fält till panna (eller mellanlager). Olika maskinuppsättningar, lagerstrategier, organisationsmodeller, m m, kan simuleras och analyseras med hjälp av en mängd olika kvantitativa och kvalitativa resultatmått. Simuleringsprogrammet som användes i denna studie (Arena) har stor flexibilitet och kan även användas för simulering av hantering av andra åkerbränslen med liknande problemställningar (korta skördeperioder, stort beroende av vädret, omfattande transportarbeten, m m).
- Den framtagna metodiken tillämpades för analys av några hanteringssystem för ett mindre värmeverk i Sölvesborgs kommun. Resultaten visade bl a att kostnaderna för balad halv varierade från ca 140 kr/MWh till 170 kr/MWh. De största potentialerna för att minska kostnaderna fanns bl a när det gäller lagring och transporter av halmen. Fler studier behöver göras när det gäller kapaciteter och prestanda för nya maskinsystem, kassationsförluster vid lagren, m m i syfte att få bättre beräkningsunderlag till kalkylerna. Hantering av fälthackad halv blev betydligt dyrare, men för småskaliga tillämpningar bedömdes att det finns potential att minska kostnaderna om man kan ha ett system där flera grödor (energigräs, majs, hampa, m m) hackas och där eventuellt flera olika användningsområden ingår (direkt förbränning, tillverkning av briketter, biogasproduktion, m m).

## REFERENSER

- Ahlgren, S. 2009. *Crop production without fossil fuel. Production systems for tractor fuel and mineral nitrogen based on biomass*. Doctoral thesis no 2009:78. Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, SLU, Uppsala.
- Bernesson, S. & Nilsson, D. 2005. *Halm som energikälla. Översikt av existerande kunskap. Rapport – miljö, teknik och lantbruk 2005:07*. Institutionen för biometri och teknik, SLU, Uppsala.
- Blanchard, B. S. 1992. *Logistics engineering and management*. Prentice Hall. Englewood cliffs, New Jersey. 555 p.
- Forsberg, M., Baky, A., Westlin, H., Ljungberg, D. & Ytterberg, P. 2007. *Jordbruket som leverantör av åkerbränsle till storskaliga värmeverk – fallstudie Värtan*. JTI-rapport Lantbruk och industri 361. Institutet för jordbruks- och miljöteknik (JTI), Uppsala.
- Goodhew, S., Griffiths, R. & Woolley, T. 2004. An investigation of the moisture content in the walls of a straw-bale building. *Building and Environment*, 39, 1443-1451.
- Hadders, G. 1994. *Förändringar under skördeperioden av bränsleegenskaperna hos halm*, JTI-rapport 186, Jordbrukstekniska Institutet (JTI), Uppsala.
- Hansson, A., Christensson, K. & Algerbo, P-A. 2006. *Kartläggning av tillgängliga mängder halm i området kring planerat kraftvärmeverk i Örtofta mellan Lund och Eslöv*. Bilaga 2 till: Mattsson, J. E. 2006. *Affärsutveckling – närodlade stråbränslen till kraftvärmeverk*. Rapport 2006:8. Institutionen för landskaps- och trädgårdsteknik, SLU, Alnarp.
- Hartmann, H. 1998. Influences of the quality of solid biofuels - causes for variations and measures for improvement. *Biomass for energy and industry. 10th European conference and technology exhibition. Proceedings of the international conference*, Würzburg, Germany, 8-11 June, 1998.
- Henriksson A. & Stridsberg S. 1992. *Möjligheter att använda halmeldning till energiförsörjningen i södra Sverige*. Rapport 161. Institutionen för lantbruksteknik, SLU, Uppsala.
- Hinge, J. 2009. *Utarbetande av ett program för ökad förbränning av halm i Sverige, baserat på danska erfarenheter*. Rapport 1117. Värmeforsk, Stockholm.
- Jansson, P-E. 1998. *Simulation model for soil water and heat conditions. Description of the SOIL model*. Communications 98:2. Division of Agricultural Hydrotechnics, Department of Soil Sciences, SLU, Uppsala.
- Jenkins, B. M., Bakker, R. R. & Wei, J. B. 1996. On the properties of washed straw. *Biomass and Bioenergy*, 10, 177-200.
- Jordbruksverket. 1995. *Gödselproduktion, lagringsbehov och djurtäthet vid nötkreaturs-hållning*. Rapport 1995:10. Jordbruksverket, Jönköping.
- Jordbruksverket. 2001. *Gödselproduktion, lagringsbehov och djurtäthet i olika djurhållningssystem med grisar*. Rapport 2001:13. Jordbruksverket, Jönköping.
- Kelton, W. D., Sadowski, R. P. & Sturrock D. T. 2007. *Simulation with Arena*. 4th edition. McGrawHill, New York.
- Kumar, A. & Sokhansanj, S. 2007. Switchgrass (*Panicum virgatum*, L.) delivery to a biorefinery using integrated biomass supply analysis and logistics (IBSAL) model, *Bioresource Technology*, 98, 1033-1044.
- Maskinkalkylgruppen. 2009. *Maskinkostnader 2009. Underlag och kalkylexempel på timkostnader för lantbruksmaskiner*. Maskinkalkylgruppen, Hushållningssällskapet Malmöhus, Malmö.
- Mattsson, J. E. 2006. *Affärsutveckling – närodlade stråbränslen till kraftvärmeverk*. Rapport 2006:8. Institutionen för landskaps- och trädgårdsteknik, SLU, Alnarp.
- Monteith, J. L. 1965. Evaporation and environment. *Proceedings Symposium of the Society for Experimental Biology*, 19, 205-234.

- Myringer, Å., Petersen, M., Olsson, J., Rönnbäck, M., Bubholz, M & Forsberg, M. 2009. *Identifiering av energiverkens merkostnader vid förbränning av åkerbränslen samt lantbrukarens möjlighet att påverka bränslekvaliteten*. Rapport 1114. Värmeforsk, Stockholm.
- Nevander, L. E. & Elmarsson, B. 1994. *Fukthandbok, praktik och teori*. Svensk Byggtjänst och författarna, Stockholm.
- Nielsen, V. 1985. *Håndtering af halm. Småbatter, rundbatter, storbatter, snittet. Arbejdsbehov og kapacitet*. SJF Beretning nr 25. Statens Jordbrugstekniske forsøg, Bygholm, Danmark.
- Nielsen, V. & Mortensen, H. 2001. *Presning og bjærgning af halm. Arbejdsbehov og kapacitet*. Grøn Viden, Markbrug nr 245. Ministeriet for Fodevarer, Landbrug og Fiskeri, Danmarks JordbrugsForskning, Danmark.
- Nielsen, V. 2003. *Teknik til halmbjærgning siden midten af det forrige århundrede*. Danmarks JordbrugsForskning, Afdelingen for Jordbrugsteknik, Forskningscenter Bygholm, Horsens, Danmark.
- Nikolaisen, L. (red.). 1998. *Straw for energy production. Technology, environment, economy*, The Centre for Biomass Technology, Danmark.
- Nilsson, D. 1999a. SHAM – a simulation model for designing straw fuel delivery systems. Part 1: model description. Part 2: model applications. *Biomass and Bioenergy*, 16, 25-50.
- Nilsson D. 1999b. *Analysis and simulation of systems for delivery of fuel straw to district heating plants*. Dissertation. Agraria 205. Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Nilsson, D. 2000. Dynamic simulation of straw harvesting systems: influence of climatic, geographical and biological factors on performance and costs. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76(1), 27-36.
- Nilsson, D. & Hansson, P-A. 2001. Influence of various machinery combinations, fuel proportions and storage capacities on costs for co-handling of straw and reed canary grass to district heating plants. *Biomass and Bioenergy*, 20, 247-260.
- Nilsson, D. & Karlsson, S. 2005. A model for the field drying and wetting processes of cut flax straw. *Biosystems Engineering*, 92, 25-35.
- Nilsson, D. 2006. Dynamic Simulation of the Harvest Operations of Flax Straw for Short Fibre Production–Part 1 Model Description. *Journal of Natural Fibers*, 3(1), 23–34.
- Nilsson, D. 2007a. Dynamic Simulation of the Harvest Operations of Flax Straw for Short Fibre Production–Part 2 Simulation Results. *Journal of Natural Fibers*, 3(4), 43–57.
- Nilsson, D. 2007b. *Biobränslen i Blekinge*. Rapport 2007:17. Länsstyrelsen i Blekinge län, Karlskrona.
- Nilsson, D. & Bernesson, S. 2008. *Pelletering och brikettering av jordbruksråvaror – En systemstudie*. Rapport 001. Institutionen för energi och teknik, SLU, Uppsala.
- Nilsson, D. & Bernesson, S. 2009a. *Halm som bränsle - Del 1: Tillgångar och skördetidpunkter*. Rapport 011. Institutionen för energi och teknik, SLU, Uppsala.
- Nilsson, D. & Bernesson, S. 2009b. *Halm som bränsle - Del 2: Fuktegenskaper*. Rapport 018. Institutionen för energi och teknik, SLU, Uppsala.
- Nilsson, D. 2010. *Simulering och kostnadsanalys av hanteringssystem för bränslehalm – tillämpning för en värmeanläggning i Skåne*. Värmeforsk, Stockholm (ännu ej publicerad).
- Nilsson, L. & Kangro, A. 1992. *Lokala bioenergitillgångar i jord- och skogsbruket. Församlingsvis prognos över bioenergitillgångar i Sverige*. Specialmeddelande 188. Institutionen för lantbrukets byggnadsteknik, Sveriges lantbruksuniversitet, Lund/Alnarp.

- Rexen, F. P. 1970. *Undersøgelser over dansk halms kemiske sammensætning*. Beretning nr 53, Forskningsinstitutet for handels- og industriplanter, Særtryk af Meddelelser fra halmafdelningen 6:1-37. Kolding, Danmark.
- Rydh, C. J., Lindahl, M. & Tingström, J. 2002. *Livscykelanalys – en metod för miljöbedömning av produkter och tjänster*. Studentlitteratur, Lund.
- Sokhansanj, S., Kumar, A. & Turhollow, A. F. 2006. Development and implementation of integrated biomass supply analysis and logistics model (IBSAL). *Biomass and Bioenergy*, 30, 838-847.
- Wiklert, P., Andersson, S. & Weidow, B. 1983. *Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. En faktasammanställning. Del X. Malmöhus och Kristianstads län*. Rapport 136, Avdelningen för lantbrukets hydroteknik, Institutionen för markvetenskap, SLU, Uppsala.
- Witney, B. D., Oskoui, K. E., & Speirs, R. B. 1982. A simulation model for predicting soil moisture status. *Soil & Tillage Research*, 2, 67-80.
- Witney, B. D. 1995. *Choosing and using farm machines*. Land Technology Ltd, Edinburgh, Skottland.
- Wolf, K. P. 1986. Rund oder eckig – klein oder gross? *Landtechnik*, 4, 169-176.

### Internetreferenser

- Energimyndigheten. 2010.  
<http://webbshop.cm.se/System/ViewResource.aspx?rl=default:/Resources/Permanent/StorageItem/ffbd2c1049724f31a3bf54b8ef762ca2/2143W.pdf> (2010-01-25). Prisblad för biobränslen, torv m m.
- Eniro. 2010. <http://kartor.eniro.se/> (januari 2010). Kartor.
- Jordbruksaktuellt. 2006. Halmens värde – näring och mull, *Jordbruksaktuellt* 2006-02-27, <http://www.ja.se/?p=25220&pt=110&m=3433>, 2010-02-01
- Jordbruksverket. 2009a.  
<http://statistik.sjv.se/Database/Jordbruksverket/Markanvandning/Markanvandning.asp> (2009-08-19). Jordbruksmarkens användning.
- Jordbruksverket. 2009b. <http://statistik.sjv.se/Database/Jordbruksverket/Husdjur/Husdjur.asp> (2009-08-19). Husdjur.
- Lantbruksnet. 2010.  
<http://www.lantbruksnet.se/lantbruksnet/kategori/utrustning.php?kid=1&aid=11>.  
 (februari 2010). Balpressar.
- SCB. 2009a.  
[http://www.scb.se/statistik/JO/JO0602/2009A01/JO0602\\_2009A01\\_SM\\_JO15SM0901.pdf](http://www.scb.se/statistik/JO/JO0602/2009A01/JO0602_2009A01_SM_JO15SM0901.pdf) (2009-08-19). Normskördar för skördeområden, län och riket 2009. Statistiska meddelanden JO 15 SM0901.
- SCB. 2009b. [http://www.scb.se/Pages/PressRelease\\_\\_\\_109642.aspx](http://www.scb.se/Pages/PressRelease___109642.aspx) (2009-07-06). Det finns 271 000 hästar i Sverige.



## BILAGA 1. Halmfraktionering från olika trösktyper

Olika typer av skördetröskor bearbetar halmen på olika sätt och olika intensivt. Traditionellt har skakare används för att skaka ut kvarvarande kärnor från halmen i skördetröskorna. Nackdelen med skakare är att dessa tar mycket plats, för mycket då tröskorna blir riktigt stora med krav på kapacitet därefter. Därför har mer kompakta och effektivare rotoror av olika typer utvecklats, både för att skilja kärnorna från halmen och för att både sköta urtröskningen och skilja kärnorna från halmen. Rotortröskor bearbetar halmen mer intensivt (i jämförelse med skakare) för att snabbare kunna skilja ut kvarvarande spannmålskärnor i halmen. Detta borde leda till att halmen trasas sönder mer från sådana tröskor och mer (en större andel) av fint material erhålls som halmpressar och andra halmbärgningsmaskiner har svårt att ta om hand. Mängden halm, som kan bärgas, borde därför bli lägre från sådana tröskor.

Neale m fl (2003) rapporterar att för att erhålla en separationsgrad på 95 %, i laboratorieförsök, behöver en avskiljare med flera cylindrar (multi-cylinder) radiellt (tangentiellt) mot flödesriktningen 60 % mindre yta, och en avskiljare där flödet går axiellt genom en stor cylinder 68 % mindre yta, jämfört med traditionella skakare.

I detta projekt gjordes en studie där ca ett kilogram halm samlades in från fem olika tröskor, med olika separeringsteknik för kärnor i halmen, i trakterna runt Uppsala, hösten år 2009. Knappt en meter halmsträng, där allt material togs med, ingick i varje prov. Denna halm skakades för hand på ett såll med maskvidden 31 mm (kvadratiska hål) under ca en halv minut. Sållet med måtten 0,8 x 1,0 m hölls mellan två personer då det skakades. Långa strån som fallit av eller imellan fördes till grovfraktionen. 400 – 600 g halm kunde skakas åt gången. Den mängd halm som gått igenom respektive inte gått igenom sållet vägdes. På så sätt erhöles ett mått på, hur intensivt halmen blivit bearbetad av skördetröskan, såsom andelen halm som gick igenom sållet vid skakningen (se tabell 1-1).

Tabell 1-1. Studerade tröskor, tröskprinciper och andelen fint material i halmen

Typ av tröska	Tröskprincip	Vikt halmprov (g)	Andel genom såll (%)
New Holland TX 36 <sup>a</sup>	Skakartröska med en fränkskiljnings-cylinder efter tröskcylindern.	1030	22,8
Claas Dominator 108 SL <sup>b</sup>	Skakartröska.	747	27,4
Claas Lexion 480 <sup>c</sup>	Hybrid: tröskcylinder följd av 2 st längsgående rotoror.	549	34,8
Claas Lexion 510 <sup>d</sup>	Skakartröska med en extra cylinder före tröskcylindern.	661	19,7
New Holland CR9080 <sup>e</sup>	2 st längsgående rotoror.	1315	27,4
New Holland CR9080 <sup>f</sup>	2 st längsgående rotoror.	880	30,2

<sup>a</sup> New Holland TX 36 (ca 20 fot); Höstvet, Olivin: Provtaget 19/8-2009 vid Högby, Lagga.

<sup>b</sup> Claas Dominator 108 SL (20 fot): Höstvet, Olivin: Provtaget 20/8-2009 vid Högby gård, Uppsala-Näs.

<sup>c</sup> Claas Lexion 480 (30 fot): Höstvet, Olivin: Provtaget 20/8-2009 vid Ulva.

<sup>d</sup> Claas Lexion 510 (ca 20 fot): Höstvet, Olivin (sannolikt): Provtaget 20/8-2009 vid vägen mot Vänge, ca 1 km fr väg 55.

<sup>e</sup> New Holland CR 9080 (30 fot): Höstvet, Olivin: Provtaget 24/8-2009 Ultuna Egendom, Danmarks Hammarby.

<sup>f</sup> New Holland CR 9080 (30 fot): Höstråg: Provtaget 19/8-2009 Ultuna Egendom, Danmarks Hammarby, ner mot Funbo Lövsta.

Resultatet från tabell 1-1 visar att 20-27 % av materialet gick igenom sållet för skakartröskorna, medan 27-30 % gick igenom för rotortröskorna och ca 35 % för hybridtröskan.

Detta tyder på att en större mängd halm borde kunna bärgas från de fält som tröskas med traditionella skakartröskor, jämfört med från de fält som tröskas med rotor- eller hybridtröskor. Då den här studien är av en ringa omfattning behövs dock fler försök innan några säkra slutsatser kan dras. Dessutom behöver försöksmetodiken utvecklas mer.

Litteratur:

Neale, M.A., Hobson, R.N., Price, J.S. & Bruce, D.M. 2003. Effectiveness of Three Types of Grain Separator for Crop Matter harvested with a Stripping Header. *Biosystems Engineering* 84(2), 177-191.

## BILAGA 2. Lokalisering av fält

Vid simuleringarna kan nedan beskrivna metoder användas för att placera ut lagren och fälten på kartan. Placeringen beskrivs av koordinater i x- (öst-västlig riktning) och y-led (nord-sydlig riktning).

1. Placera ut lagren (och ev halmens slutkonsument) ”manuellt” på kartan genom att ge dem sina koordinater i x- och y-led. Valet av placering beror på de simuleringsförutsättningar som gäller angående antalet lager, lagrens storlek, vägnät, etc.

2. Om antalet skiften är relativt litet, och om deras lokalisering kan vara samma för alla simuleringarna, kan även dessa placeras ut ”manuellt” utifrån de geografiska förutsättningar som gäller inom området.

3. Skiftena kan också placeras ut slumpmässigt med hjälp av olika sannolikhetsfördelningar och randvillkor.

a) exempel för ett rektangulärt upptagningsområde med likformig (uniform) fördelning av koordinaterna i x- och y-led:

$$x \in UNIF(x_a, x_b), x_a \leq x \leq x_b \quad (2-1)$$

$$y \in UNIF(y_c, y_d), y_c \leq y \leq y_d \quad (2-2)$$

b) exempel för ett rektangulärt upptagningsområde med likformig fördelning av koordinaterna i x- och y-led, och med ytor för annan användning (bebyggelse, sjöar, skog, m m):

$$x \in UNIF(x_a, x_b), x_a \leq x \leq x_{a1}, x_{b1} \leq x \leq x_b \quad (2-3)$$

$$y \in UNIF(y_c, y_d), y_c \leq y \leq y_{c1}, y_{d1} \leq y \leq y_d \quad (2-4)$$

c) exempel för ett rektangulärt upptagningsområde med ökande koncentration av fält ju närmare lagret ( $x_l, y_l$ ) man kommer (triangelfördelning av koordinaterna i x- och y-led):

$$x \in TRIA(x_a, x_l, x_b), x_a \leq x \leq x_b \quad (2-5)$$

$$y \in TRIA(y_c, y_l, y_d), y_c \leq y \leq y_d \quad (2-6)$$

d) exempel för ett cirkulärt upptagningsområde med ökande koncentration av fält ju närmare lagret ( $x_l, y_l$ ) man kommer:

$$x \in TRIA(x_a, x_l, x_b), (x - x_l)^2 + (y - y_l)^2 \leq (x_l - x_a)^2 \quad (2-7)$$

$$y \in TRIA(y_c, y_l, y_d), (x - x_l)^2 + (y - y_l)^2 \leq (y_l - y_c)^2 \quad (2-8)$$

### BILAGA 3. Förändringar av askhalt och värmevärde i fält

Då halm ligger ute efter tröskning påverkas den av vädret dvs fuktas upp av regn och dagg, samt torkas upp av sol, vind och temperatur. Är temperaturen och fuktigheten hög gynnas tillväxt av mikroorganismer som bryter ner det organiska materialet i halmen. Lättrörliga salter som kalium och klor lakas ut av regn men i viss utsträckning även av dagg. Detta gör att halmens askhalt varierar under upptorkningsförloppet. Urlakning leder till lägre askhalt medan nedbrytning av organiskt material leder till högre askhalt då askan blir över vid sådan nedbrytning. Den totala mängden energi som brännbar värme minskar då det organiska materialet bryts ner. Trots detta kan halmens värmevärde öka om proportionellt mer lösliga ämnen som ingår i askfraktionen lakas ut. Att halmens kvalitet påverkas, såsom t ex minskande askhalt och ökande värmevärde, då halmen ligger ute beskrivs i litteraturen bl a av Hadders (1994) och Nikolaisen (1998). Enligt Nikolaisen (1998) kan t ex askhalten minska med en fjärdedel.

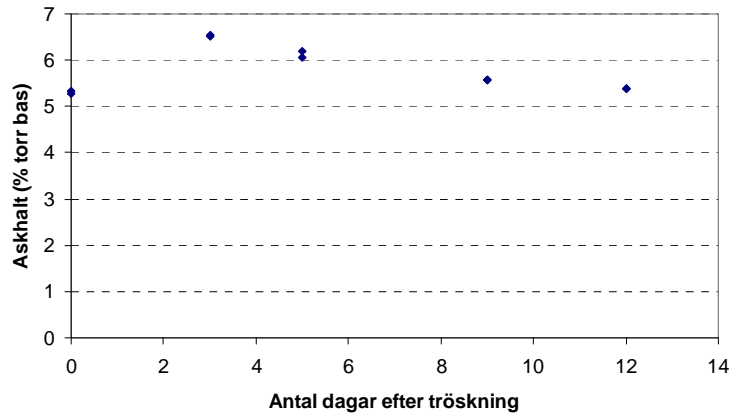
För att kunna bestämma askhalten i halmproverna samt dessas värmevärde, klipptes proverna först ner till en längd på 5-10 cm, och maldes sedan med en Retsch SM2000 laboratoriekvarn med 0,25 mm:s såll till ett fint pulver.

Provernas askhalt bestämdes i enlighet med Svensk standard SS 18 71 71 (SIS, 1984). Först vägdes 1,2-1,4 g fuktig halm in i askkopporna och dessa placerades i en varmluftsugn vid 105°C över natten för att allt vatten skulle dunsta bort och proverna bli helt torra. Askkopporna (inkl lock) med torr halm fick svalna i exsickator innan vägning skedde på analysvåg. Sedan överfördes kopporna till en ugn där temperaturen successivt höjdes till 550°C (tog 20-30 minuter). Proverna stod sedan i ugnen vid 550°C under ca 2 timmar, innan de togs ut och fick svalna i exsickatorn, innan de vägdes på analysvågen. Innan halmen fördes över till askkopporna hade dessa (inkl lock) glödgats vid 550°C i ugnen, svalnat i exsickatorn och vägts in tillsammans med sina lock på analysvågen.

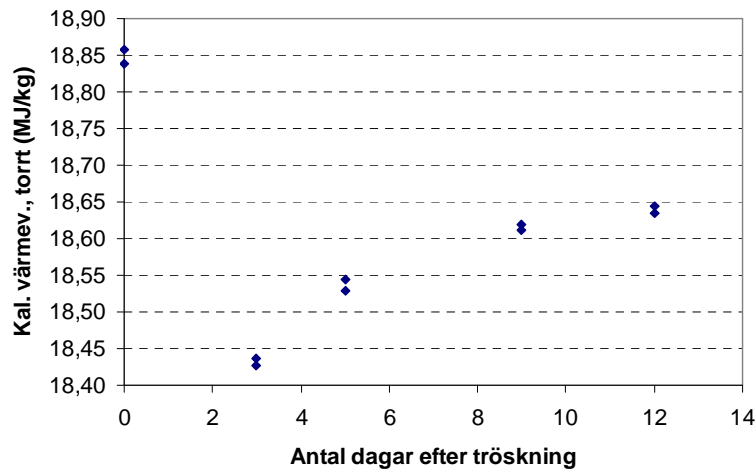
Före bestämningen av halmens värmevärde pressades en lagom mängd prov ihop till en cylinder, som en pellett, för varje prov. Dessa cylindrar torkades i en varmluftsugn vid 105°C under 4-6 timmar för att bli helt torra. De förvarades i en exsickator tills värmevärdet kunde bestämmas. Cylindrarna vägdes på en analysvåg innan de överfördes till bombkalorimetern. Pellets cylindrarna vägde 0,9410-1,1031 g. Bombkalorimetern var helautomatisk och av modell Parr 6300 Calorimeter. Det värmevärde som erhöles från bombkalorimetern var det kalorimetriska (övre).

*Tabell 3-1. Inverkan på halmens askhalt och värmevärde då denna ligger ute i väntan på bärning (medelvärden av två mätningar)*

Antal dagar ute	Askhalt (% av TS)	Kalorimetriskt värmevärde (MJ/kg TS)
0	5,30	18,85
3	6,52	18,43
5	6,12	18,54
9	5,57	18,62
12	5,39	18,64



Figur 3-1. Inverkan på halmens askhalt då denna ligger ute i väntan på bärgning (två mätvärden för varje dag).



Figur 3-2. Inverkan på halmens värmevärde då denna ligger ute i väntan på bärgning (två mätvärden för varje dag).

Askhalterna och värmevärdena har följts åt. Lägre askhalter har inneburit högre värmevärden och vice versa. Då halmen legat ute har askhalterna sjunkit en dryg procentenhet medan värmevärdet har ökat med ca 0,2 MJ/kg TS (se figur 3-1 och 3-2, samt tabell 3-1). Mot slutet av mätperioden (de tre sista dagarna) var förändringarna i både askhalt och värmevärde förhållandevis små. Det första provet, taget direkt efter skördetröskningen, var avvikande då detta prov dels innehöll mätseriens lägsta askhalt och dels dess högsta värmevärde (se figur 3-1 och 3-2, samt tabell 1-1). Förklaringar till detta kan vara att detta prov togs innan skörden var avslutad, på fältet, och därför togs på ett annat ställe på fältet med en sämre eller en bättre gröda jämfört med på det ställe där de följande proverna togs. En annan förklaring kan vara att direkt efter skörd innehöll detta prov ett ännu ej dött (levande) material, medan de följande proverna innehöll ett dött material. Det kan även ha varit en kombination av de båda förklaringarna.

#### Litteratur:

Hadders, G. 1994. *Förändringar under skördeperioden av bränsleegenskaperna hos halm*. JTI-rapport nr 186. Institutet för jordbruks- och miljöteknik (JTI), Uppsala.

- Nikolaisen (red.), L. 1998. *Straw for energy production. Technology, environment, economy.*  
The Centre for Biomass Technology, Denmark.
- SIS. 1984. *Biobränslen – Bestämning av askhalt.* Biofuels – Determination of ash content.  
Svensk Standard SS 18 71 71, SMS – Sveriges Mekanstandardisering, SIS – Standardiseringskommissionen i Sverige, Stockholm.



---

SLU  
Institutionen för energi och teknik  
Box 7032  
750 07 UPPSALA  
Tel. 018-67 10 00  
pdf.fil: [www.et.slu.se](http://www.et.slu.se)

SLU  
Department of Energy and Technology  
Box 7032  
S-750 07 UPPSALA  
SWEDEN  
Phone +46 18 671000

---