

## Bakgrund

Under svenska klimatförhållanden måste spannmålen nästan alltid konserveras innan slutlagring. Detta sker i huvudsak genom varmluftstorkning, vilket är den säkraste konserveringsmetoden och därför bäst lämpad för spannmål som är avsedd som livsmedel eller foder (Jonsson & Pettersson, 1999). Metoden kännetecknas dock av hög energiförbrukning, vilken till övervägande del är baserad på fossil olja. Ett normalår åtgår det lika mycket olja att torka spannmålen med varmluft som förbrukningen av drivmedel för odling och skörd (Edström m.fl., 2005). Det har också varit svårt att räkna hem nyinvesteringar i gårdsanläggningar för varmluftstorkning för arealer upp till 200-300 ha (Jonsson, 2006; Westlin m. fl., 2006). En miljövänligare metod är kallluftstorkning med möjlighet till tillsatsvärme där man eftersträvar att utnyttja luftens egen energi vid torkningen av spannmålen. Investeringskostnaderna kan hållas nere genom självbygge med egenproducerat virke. Kallluftstorkningsmetodens omfattning har minskat i Sverige sedan 1980-talet på grund av att anläggningarna har varit små och orationella. Det har också förekommit kvalitetsproblem med metoden vissa år. Internationellt förekommer det dock en omfattande kallluftstorkning av spannmål, oftast vid höga lagringshöjder. I England, som har skördehalten jämförbara med södra Sverige, torkas över 50 % av spannmålen i planlagertorkar med körbara golv oftast utrustade med tillsatsvärme och emellanåt också med omrörarskruvar (Hodges, 1989; McLean, 1993; Nellist, 1998). De körbara golven möjliggör en rationell hantering och även torkning av andra material som hö, halm och flis. Anläggningen kan också användas som maskinhall när den inte används som lager för jordbruksgrödor. I en svensk variant, den s.k. Östgötatorken, är torken dimensionerad enligt JTI:s rekommendationer beträffande specifika luftmängder, varför spannmålen lagras vid maximalt drygt 1 m. Den svenska rekommendationen utgår från att spannmål med 20 % vattenhalt bör tillföras 600-1000 m<sup>3</sup>/ton och timma medan den engelska rekommendationen förespråkar 180 m<sup>3</sup>/ ton och timme vid motsvarande vattenhaltsnivå (Aniansson m.fl., 1968; ADAS, 1982). Därför medger den engelska rekommendationen betydligt högre lagringshöjder än den svenska, upp till 3m, vilket leder till lägre investeringskostnader.

Vid torkning i tjocka skikt sker torkningen inte likformigt i hela skiktet på en och samma gång utan i en torkzon, vilken rör sig genom spannmålen i samma riktning som luftströmmen. På grund av att spannmålen vid torkens fränluftssida torkar sist är det där som risken för en försämrad hygienisk kvalitet är störst. Ju högre vattenhalt och temperatur hos spannmålen desto snabbare sker förskämningprocesserna. Hur snabbt en önskad slutvattenhalt uppnås i hela torkskiktet bestäms av specifika luftmängden, mängden vatten som skall torkas bort samt hur mycket vatten luften kan ta upp. Kalluftstorkning utan tillsatsvärme är direkt beroende av väderleksförhållandena, vilka kan variera från timme till timme. Framförallt under hösten varierar luftens temperatur och därmed relativ fuktighet mycket under dygnet. Luftens vattenupptagande förmåga avtar också snabbt under hösten, varför tidpunkten för skörd kan ha stor betydelse. Till detta kommer att väderleken kan variera mycket mellan åren och även geografiskt. Detta innebär också att heltäckande systematiska studier i full skala måste pågå under många år, vilket skulle bli mycket kostsamma. Torkningsprocessen följer dock fysikens lagar och kan modelleras matematiskt under förutsättning att nödvändiga egenskaper hos torkningsanläggningen och materialet som skall torkas är kända. Modellstudier gör det därför möjligt att studera förutsättningarna för kalluftstorkning i ett område genom simuleringar baserade på historiska väderleksdata. Historiska väderleksdata ger dock bara en indikation på framtida förhållanden, därför skall resultaten av simuleringstudier alltid betraktas som en bästa möjliga gissning. Kalluftstorkningens komplexitet medför att det är svårt att ta fram framgångsrika torkningsstrategier i form av enkla riklinjer (Ryniecki & Nellist, 1991). Genom upprepade simuleringar kan man dock studera olika förutsättningar för kalluftstorkning under

rådande klimatförhållanden för att så småningom kunna ta fram riktlinjer för hur man bör gå till väga för att kallluftstorka spannmålen med acceptabel kvalitet till en låg kostnad och energinsats. Innan eventuella tänkta riktlinjer baserade på modellstudier publiceras bör de utvärderas under praktiska förhållanden. I torkningsmodellen måste det också ingå delmodeller av hur spannmålets kvalitet påverkas av torkningsförloppet. JTI har i EU-projektet "Prevention of ochratoxin A in grain" utvecklat en modell av säker lagringstid innan mögelväxt och bildning av mögelgiftet ochratoxin A baserat på spannmålets vattenaktivitet och temperatur (Jonsson m.fl., 2003).

Syftet med studien har varit att med hjälp av en genomgång av litteraturen, modellstudier baserat på historiska väderleksdata och studier i full skala:

- undersöka potentialen för kallluftstorkning av etanolspannmål och bränslespannmål med eller utan tillsatsvärme med en bevarad kvalitet acceptabel ur biprodukts, process- och arbetsmiljösynpunkt och om resultaten medger ta fram riktlinjer för planbottentorkning av energispannmål vid höga lagringshöjder,
- jämföra energiförbrukning och kostnader vid kallluftstorkning och torkning med varmluft,
- utvärdera JTI:s hygienmodell under de dynamiska förhållanden som råder i en kallluftstork.

## Material och metoder

### Simuleringsstudie av kallluftstorkning

Modellstudien genomfördes med STOREDRY, en validerad modell av torkning av spannmål i tjocka skikt utvecklad vid Silsoe Research Institute (SRI), England (Ryniecki & Nellist, 1991; Bruce & Ryniecki, 1991). Detta möjliggjordes genom ett samarbete med David Bruce Consulting Ltd. Simuleringsmodellen kompletterades med karaktäristiska för svenska kallluftstorkar och fläktar samt med en enklare modell av solfångare som ett av alternativen beträffande tillsatsvärme, tabell 1. Modellen kompletterades också med väderleksdata från SMHI:s väderstationer i Borlänge, Uppsala, Norrköping, Såtenäs/Hällum (Västergötland) och Lund belägna i de viktigaste odlingsområdena för spannmål i Sverige. Den historiska väderleksinformationen utgjordes av timvisa data om temperatur, relativ luftfuktighet och lufttryck. För att öka säkerheten hos resultaten av simuleringarna användes väderleksdata för en tjugoförårsperiod (1987-2006) istället för en tioårsperiod enligt ansökan.

Tabell 1. *Prestanda kallluftstork*

Torkyta	100 m <sup>2</sup>
Hållarea	20%
Fläkt	Akron 110, 11 kW
Max lufthastighet kanaler	< 5 m/s
Volymvikt spannmål vid 20% v <sub>h</sub>	750 kg/m <sup>3</sup>
Luftmotstånd vid 1 m	ca 540 Pa
Specifik luftmängd vid 1 m	ca 600 m <sup>3</sup> /ton, tim
Solfångare, yta & verkningsgrad	450 m <sup>2</sup> & η=40 %

För att kunna studera solfångare som värmekälla ingick också globalinstrålning från en av stationerna (Lund). Modellen, vilken från början var utrustad med en hygienmodell utvecklad av Fraiser and Muir (1981) (F&M) baserad på data om förluster av grobarhet och synbar mögelförekomst, kompletterades med JTI:s modell av maximal säker lagringstid (Jonsson m.fl., 2003). Enligt modellens beräkningar är maximal säker lagringstid uppnådd när skadeindex= 1.0. Valet av skördetid-

punkt och skördevattenhalter vid simuleringarna baserades på medianvärden respektive medelvärden för höstvetete åren 1987-2006 enligt SLU:s sortförsök. De torkningsstrategier som utvärderades i simuleringstudien (se tabell 2) var kontinuerlig fläktning (1a), vilken fungerar bäst under torra förhållanden (Brook, 1987), kontinuerlig fläktning och tillsatsvärme påslagen när  $rf \geq 75\%$  (1b), vilken motsvarar JTI:s förenklade torkningsstrategi (Jonsson, 1991), fläktning efter väderlek och spannmålets vattenhalt (2), kontinuerlig fläktning utan (3a) eller med tillsatsvärme ( $+3^\circ\text{C}$  (3b) eller  $+6^\circ\text{C}$  (3c) och högre lagringshöjder) enligt JTI (Gustafsson & Ekström, 1980), fläktning endast när torkluftens  $rf$  var 5% lägre än jämviktsluftfuktigheten för den fuktigaste spannmålen vid lagringshöjder enligt JTI (4) samt fläktning efter väderlek och spannmålets vattenhalt i kombination med solfångare (5). Dessutom gjordes beräkningar av energiåtgång för fläkt och tillsatsvärme (oljeeldad varmluftspanna).

Tabell 2. Simuleringarna baserades på följande förutsättningar beträffande geografiskt område, slutvattenhalt, lagringshöjder, fläktning, förvärmning av torkluft och modell av säker lagringstid.

Experiment	Väderleksstationer	Slutvattenhalt %		Lagringshöjd, m	Fläktning	Tillsatsvärme, °C or kW	Hygienmodell
		Medel	Max				
1a.	Samtliga	14 15	15 16	0.6-3.0	Kontinuerlig	0	JTI:s/ F&M
1b.	Samtliga	14 15	15 16	0.6-3.0	Kontinuerlig	>75% $rf \square$ 90kW	JTI:s/ F&M
2.	Samtliga	14.5	15.5	0.6-3.0	Anpassad efter sp. vh & $rf$ luft	0	JTI:s
3a.	Uppsala	14 15	15 16	Efter vh % enligt JTI	Kontinuerlig	0	JTI:s
3b.	Uppsala	14 15	15 16	Efter vh % enl. Gustafsson & Ekström, 1980	Kontinuerlig	Kontin. $+3^\circ\text{C}$	JTI:s
3c.	Uppsala	14 15	15 16	Efter vh % enl. Gustafsson & Ekström, 1980	Kontinuerlig	Kontin. $+6^\circ\text{C}$	JTI:s
4.	Uppsala	14 15	15 16	Efter vh % enligt JTI	När $rf$ luft är 5% lägre än $rf$ för sp	0	JTI:s
5.	Lund	14.5	15.5	0.6-3.0	Anpassad efter sp. vh & $rf$ luft	solfångare	JTI:s

### Utvärdering av JTI:s hygienmodell

För att bedöma om JTI:s hygienmodell för spannmål framtagen under statiska förhållanden även är giltig under de dynamiska förhållanden som råder i en kallluftstork genomfördes parallella lagringsstudier med spannmål från samma parti dels i JTI:s respirometer och dels i en kallluftstork i pilotskala. JTI:s respirometer finns beskriven i Johnsson, et al. (2008) medan pilotstorken som byggdes i studien är av samma typ som finns redovisad i JTI-rapport 112 "Kallluftstorkning av ärter" (Jonsson, 1990). Torkbehållarna rymde ca 150 kg. Studien genomförs med nyskördat höstvetete vid tre (i ansökan två) olika vattenhalter, vilka tillfördes ca 50-150 m<sup>3</sup> luft per ton och timma. De olika behandlingsleden samt provtagningsintervallen redovisas i tabell 3. För

att säkerställa närvaro av skadeorganismer ympades spannmålen förutom 0-ledet med 1000 CFU/g kärna av en väldokumenterad stam av *Penicillium verrucosum* (OTA11) tillhandahållen av Livsmedelsverket (SLV). Inokulatet tillsattes spannmålen i en vertikalblandare (1 m<sup>3</sup>). I kallluftstorken registrerades spannmålets temperatur och luftfuktighet 40 cm respektive 70 cm ovan botten med hjälp av loggande instrument (Hydrolog, Rotronic AG, Bassersdorf, Schweiz) försedd med sensorer för både temperatur och luftfuktighet (Hygroclip, Rotronic Hygromer C94, Pt 100 RTD, 1/3 DIN). Angiven noggrannhet vid 23°C för Hygroclip var +/- 1,5 % RF och +/- 0,3°C.

Tabell 3. Behandlingsled och provtagningsintervall i respirometer och pilotstork.

Led	Vattenhalt, %	Tidpunkt för provtagning, dygn				
Oinfekterat 0-led	23.9	0	2.8	4.5	6.5	10.5
Hög vattenhalt	23.9	0	2.8	4.5	6.5	10.5
Mellanvattenhalt	21.6	0	4.5	6.5	9.5	13.5
Låg vattenhalt	19.3	0	8.5	12.5	18.5	

Tre prov togs av spannmålen i den övre delen av varje torkbehållare med hjälp av provtagare. Även spannmålen lagrad i respirometern analyserades med tre upprepningar. Sammanlagt analyserade SLV 93 spannmålsprover beträffande förekomst av mögelsvampar.

### Kallluftstorkning i full skala

För att utvärdera modellstudien var avsikten att följda torkningsförloppet i tre fullskaleanläggningar av typen Östgötatorken. Tre anläggningar valdes samtliga belägna i Östergötland (utanför Vikingstad, Norrköping respektive Linköping). Torkningsförloppet följdes genom registreringar av relativ luftfuktighet och temperatur med hjälp av loggande instrument (Hydrolog, Rotronic AG, Bassersdorf, Schweiz), se ovan. Luftflödet mättes med hjälp av en luftflödesmätare (LM-2240 från Berggrens Maskiner AB, mätområde 0.04-0.16 m/s, noggrannhet ej angiven) och vattenhaltsförändringarna fasställdes genom provtagning av den översta 1.5 m av torkskiktet med hjälp av ett provtagningsspett samt vattenhaltsbestämning med hjälp värmeskåp.

### Analys

Den mikrobiella floran analyserades genom bestämning av totala antalet kolonibildande enheter (CFU) av mögelsvampar, antalet kolonibildande enheter (CFU) av *Penicillium verrucosum*, *Penicillium*, *Apergillus*, *Eurotium* och av jästsvampar samt noteringar om förekomst av fältflora (Samson et al, 2000). Odlingen gjordes främst med MEA och DG18 vid 25°C men även vid 37°C. Analyserna genomfördes av Biologiska enheten vid Livsmedelsverket. Vattenhalten hos spannmålen bestämdes av JTI med hjälp av värmeskåpsmetoden för hel kärna (10 g triplikat) vid 130°C under 19 timmar (Anon., 1983). Spannmålets vattenaktivitet,  $a_w$ , bestämdes av JTI vid 20°C med hjälp av en Aqua Lab serie 3 TE (Decagon Devices Inc., Pullman, Washington, USA).

## Beräkningar av torkningskostnader

I tabell 4 redovisas de faktorer som användes vid beräkningarna av årskostnaden för torkning, vilka gjordes med hjälp av annuitetsmetoden.

*Tabell 4. Faktorer använda vid beräkningarna av årskostnader för torkning av spannmål och energikostnader vid kalluftstorkning i samband med simuleringarna (2009).*

Faktor	Värde
Kalkylränta	6 %
Arbetskostnad	180 kr/h
Avskrivningstid panna	10 år
Avskrivningstid byggnad	25 år
Avskrivningstid lagringsbehållare och tork	20 år
Eldningsolja	5,50 kr/liter <sup>1</sup>
Underhållskostnad	0,3 % av återanskaffningsvärdet per år
Arbetsåtgång	0,5 min/dt <sup>2</sup>
Elpris	0,56 kr/kWh <sup>3</sup>
Odlarpris höstvetete	1.50 kr/kg

1. Priset beräknat efter restitution
2. Modifierat efter Ekström 1972
3. Medelpris, Vattenfall exkl. abonnemangsavgifter

## Resultat

### Simuleringsstudie av kalluftstorkning

I samtliga simuleringsexperiment var kalluftstorken dimensionerad enligt JTI:s rekommendationer, vilka framgår av tabell 1. I tabell 5 redovisas resultaten av simuleringsexperimenten 1 och 2 översiktligt. En lyckad torkning definierades som att spannmålen hade torkats till 14-15 % medelvattenhalt utan att skadeindex passerat 1.0 i någon del av torken. I dessa fall beräknades också vid vilken högsta höjd mellan 0.6 m till 3.0 m som torkningen var lyckad. Det framgår av tabellen att den genomsnittliga tidpunkten för skörd av höstvetete inte varierade så mycket mellan områdena, som mest drygt en vecka och att skördevattenhalten genomsnittligt var högst i Svealand. Med den enklaste strategin kontinuerlig fläktning utan tillsatsvärme (experiment 1a) kunde dock spannmålen färdigtorkas med bra kvalitet 75-90 % av åren i Borlänge, Uppsala och Norrköping medan motsvarande andel för Lund och Såtenäs endast var 40-45% beroende på ett fuktigare klimat. Skillnaden i torkningsresultat mellan områdena minskade dock betydligt när fläkten endast var påslagen när omgivningsluften medgav torkning (experiment 2). Vid låga lagringshöjder gav denna torkningsstrategi även ett lyckat torkningsresultat 1987 i de östra och sydligaste delarna av Sverige trots en extremt sen skörd under besvärliga förhållanden. Kontinuerlig fläktning och tillsatsvärme påslagen när torkluftens relativa fuktighet var 75 % eller högre (1b) gav dock lyckat resultat alla år i samtliga områden och medgav en högre genomsnittlig lagringshöjd. Denna metod var dock mer energikrävande, i snitt 3.0-5.4 MJ/kg borttorkat vatten. Den nästan lika säkra strategin med enbart fläktning styrd efter luftens och spannmålets fuktighet förbrukade endast ca 1 MJ/kg borttorkat vatten. Vid varmluftstorkning under praktiska förhållanden brukar energiförbrukningen uppgå till 5-6 MJ/kg borttorkat vatten. Diagrammet i bild 1 redovisar vid vilken högsta lagringshöjd som torkningen genomgående var framgångsrik vid olika skördevattenhalter i experiment 1 och 2. Av diagrammet framgår att för samtliga år och områden kunde spannmål med upp till 20 %

vattenhalt torkas vid lagringshöjder upp till 3 m när tillsatsvärme användes (1b). Däremot medgav inte fläktning efter luftens relativa fuktighet och spannmålets vattenhalt utan tillsatsvärme (2) lika höga lagringshöjder.

Tabell 5. Resultat från simuleringsexperimenten med kontinuerlig fläktning utan tillsatsvärme (1a), med tillsatsvärme när torkluftens  $rh \geq 75\%$  (1b) samt utan tillsatsvärme och fläktning endast när luften är torkande (2). Maximal lagringshöjd 3.0 m.

Väder- leks- station	Vh,% medel skörd	Datum skörd, medel	Vh,% medel skörd	Andel år tork- ningen lyckas, %			Lagringshöjd medelvärde, m			Skadeindex, medelvärde			Specifik energi- åtgång medel, MJ/kg H2O		
				1a	1b	2	1a	1b	2	1a	1b	2	1a	1b	2
Bor- länge	22.0	30/8	22.0	70	100	90	1.9	2.4	2.3	0.3	0.4	0.5	1.4	3.0	0.9
Upp- sala	19.4	24/8	19.4	65	100	100	1.5	1.8	2.3	0.2	0.3	0.4	1.4	4.2	1.0
Norr- köping	17.9	26/8	17.9	75	100	100	2.1	2.9	2.7	0.1	0.2	0.3	1.5	3.3	0.9
Såte- näs	18.4	26/8	18.4	40	100	85	1.4	2.8	2.4	0.1	0.3	0.4	2.8	5.4	1.2
Lund	17.5	21/8	17.5	45	100	95	2.2	2.9	2.4	0.1	0.2	0.4	1.4	4.5	0.8

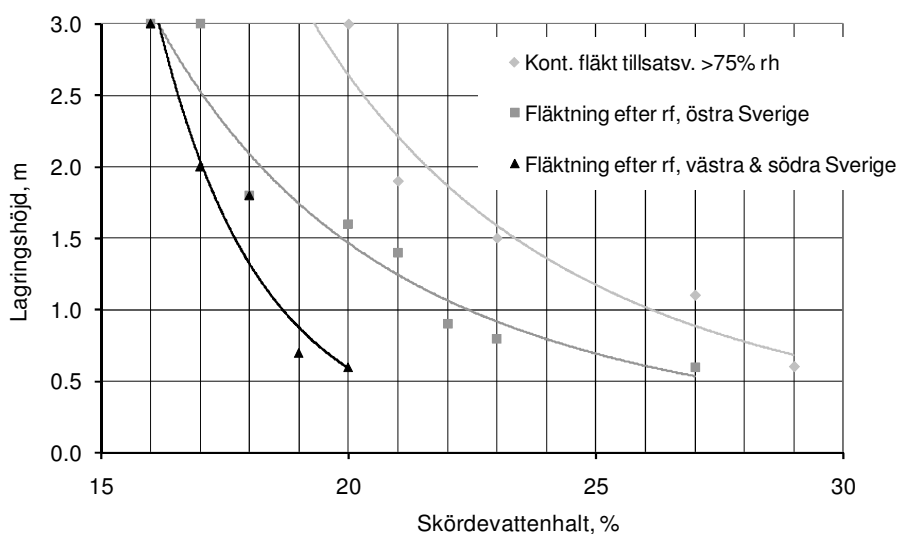


Bild 1. Skördevattenhaltens inverkan på högsta lagringshöjd med genomgående lyckat konserveringsresultat i experiment 1b och 2.

I östra Sverige kunde dock högre lagringshöjder användas jämfört med i väst och sydväst. I experiment 3 och 4 genomfördes ett antal simuleringar baserade på JTI:s rekommendationer beträffande lagringshöjder och tillsatsvärme baserade på väderleksstatistik för Uppsala. Bland annat studerades effekten av kontinuerlig fläktning och tillsatsvärme med en tempera-

turökning av +3 alternativt +6°C samtidigt som specifika luftmängden vid 20 % vattenhalt minskades med en tredjedel i första fallet respektive halverades i andra fallet (Gustafsson & Ekström, 1980). Det lägre kravet på specifik luftmängd med tillsatsvärme innebar att lagringshöjderna kunde ökas från 1.0 m till 1.3 m respektive 1.6 m vid 20 % vattenhalt. Vid båda tillsatsvärmennivåerna uppnåddes önskad slutvattenhalt samtliga år. Bortsett från det besvärliga året 1987 erhöles lika bra resultat när tillsatsvärme inte användes och fläktningen var anpassad efter relativa fuktigheten hos torkluft och spannmål. I experiment 5 undersöktes effekten av solfångare på torkningsresultatet baserat på väderleksdata för Lund. Fläktningen var anpassad efter spannmålets vattenhalt och torkluftens relativa fuktighet. Till skillnad från i experiment 2 lyckades torkningen samtliga år och vid ca 10 % högre genomsnittliga lagringshöjd (2.6 m) när solfångare användes. Nackdelen var en övertorkning med ca 2 %.

### Utvärdering av JTI:s hygienmodell

Utvärderingen av JTI:s hygienmodell genom parallella studier i en kalluftstork i pilotskala och i JTI:s respirometer genomfördes med höstvet (Olivin) skördat av JTI på Ultuna Egen- dom. Vattenhalterna (23.8, 21.5 och 19.3 %) var i stort konstant under hela lagringsperioden i respirometern medan de sjönk med 0.7-1.0 % i pilottorkarna i samband med att kylfronten passerade spannmålen under det första dygnet. I respirometern var lagringstemperaturen i allmänhet också högre, 20.0°C, jämfört med 17°C, 16°C samt 20°C vid den låga, mellersta respektive höga vattenhalten i pilottorkarna. Vid samtliga vattenhalter överensstämde den begynnande tillväxten av mögelsvampar i både respirometern och pilottorkarna med beräkningarna av maximal säker lagringstid med hjälp av JTI:s hygienmodell. Detta gällde även för 0-ledet utan inokulering med *P. verrucosum* i vilket tillväxten av lagerskadesvampar (andra arter av *Penicillium*) inträffade ungefär vid samma tidpunkt som hos de inokulerade leden. I ledet med den lägsta vattenhalten hade dock torkfronten hunnit passera det översta skiktet i pilottorken innan en tillväxt av lagerskadesvampar hunnit inträffa.

### Kalluftstorkning i full skala på Östgötatorkar

I samband med skörden 2007 genomfördes en komplett mätserie på ett parti malkorn som torkades på en gård utanför Vikingstad. Skördevattenhalten var 16-18 % och torkningen genomfördes i stort i enlighet med JTI:s rekommendationer vid ca 1.3 m lagringshöjd på en anläggning för 2 x 75 ton spannmål utrustad med tillsatsvärme. Torkningen avslutades efter 5 dagar med en medelvattenhalt av 12.8 % (11.0-14.7 %). Mätningar av luftflödet genom spannmålen indikerade dock på att det förekom stora läckage av luft. Enligt mottrycket i tor- ken och fläktens karaktäristika bör fläkten ha gett ca 48 000 m<sup>3</sup>/h, men enligt mätningar av luftflödet genom spannmålen var den tillförda luftmängden endast 21 000 m<sup>3</sup>/h. Dessutom var luftflödet i snitt 25 % högre efter kanterna än längre in i torken trots att spannmålen be- dömdes var jämnt fördelad.

På gården utanför Linköping gjordes inga mätningar på grund av att spannmålen (havre) hade fälttorkat innan skörd, varför den endast kylde.

Gården utanför Norrköping, vilken torkade höstvet avsedd som etanolråvara, hade lagt in tre gånger så mycket spannmål jämfört med anläggningen utanför Vikingstad trots samma di- mensionering. Lantbrukarens avsåg att färdigtorka spannmålen med hjälp av gårdens varm- luftstork efter skördeperioden. Spannmålen fylldes på via en horisontaltransportör och tre störtrör. Spannmålen var ojämnt fördelad med en lagringshöjd av ca 2 m i kanterna och med tre toppar i mitten av torken på 4-5 meter för att inte belasta väggarna för mycket. Mätningar av luftflödet visade på ett tillfredställande luftflöde i kanterna medan den låg under detek- tionsgränsen bara ett par meter in i torken. Efter tre veckors torkning hade spannmålen när- mast väggen torkats från 17 % till 15 % i snitt medan spannmålen halvvägs till toppen fortfa-

rande var otorkad (17 %). Analys av mögelförekomst hos spannmålen som inte hade torkat visade på en begynnande mögelväxt (CFU log 2.7 av *Penicillium*).

En uppföljning gjordes av gården utanför Norrköping 2008, vilket inte ingick i ansökan. Året kännetecknades av normala till något fuktiga skördeförhållanden och spannmålen började skördas med 20 % vattenhalt 21 augusti, vilken mot slutet (efter 4 dygn) hade sjunkit till ca 16 % . Väggarnas förmåga att klara av laster hade förbättrats i torken med hjälp av ställinor. Därmed kunde spannmålen lagras jämnare jämfört med föregående år. Lagringshöjden var i snitt drygt 3 m, vilket bör ha inneburit att den sektion som merparten av mätningarna utfördes på rymde minst 240 m<sup>3</sup> (≥ 185 ton). Mottrycket i kanalerna uppgick till 62 mmvp, vilket var lägre än beräknat och indikerade förekomst av läckage. Luftflödet varierade från under detektionsnivå (0.04 m/s) upp till 0.1 m/s. Dålig luftgenomgång förekom bland annat under utloppet från störtrören. Enligt beräkningar med simuleringsmodellen skulle luftflödet ha varit 0.08 m/s i snitt med aktuell fläkt. Torkningen pågick under sammanlagt 280 timmar under perioden 27 augusti till 6 oktober. På grund av att fläktnigen inte kom igång redan under inläggningen och att den var manuellt styrd utnyttjades uppskattningsvis inte mer än drygt hälften av den tillgängliga torkningstiden. Fläktningsstiden begränsades också av att endast två fläktar av tre kunde vara påslagna samtidigt på grund av bristande kapacitet hos elnätet. Provtagningen av den övre halvan av torkskiktet visade att vattenhalten efter avslutad torkning i början av oktober hade sänkts från drygt 18 % till 16-17 % 0.9-1.4 m under ytan, medan spannmålen 0.0- 0.4 m under ytan hade uppfuktats från 16-17 % till 17-18 % vattenhalt. Enligt analyser av samlingsprover tagna i början av november av den övre halvan sist torkade spannmålen visade på en begynnande förekomst av lagerskadesvampar, dock inte på någon ökning av totala antalet CFU av mögelsvampar. Hygienindex, beräknat med hjälp av loggade data och JTI:s hygienmodell, varierade mellan 1.3-1.7. I ett prov taget under ett av störtrören (vattenhalt 17.8-18.5 %) förekom det en uppenbar tillväxt av lagerskadesvampar både endogent (78 %) och enligt analys av totala antalet CFU (ökning från log 4.7 till log 5.3).

## Ekonomiska beräkningar

Beräkningarna tyder på att årskostnaden för kallluftstorkning är betydligt lägre jämfört med kostnaderna för torkning i en nyuppförd anläggning för varmluftstorkning och den är även

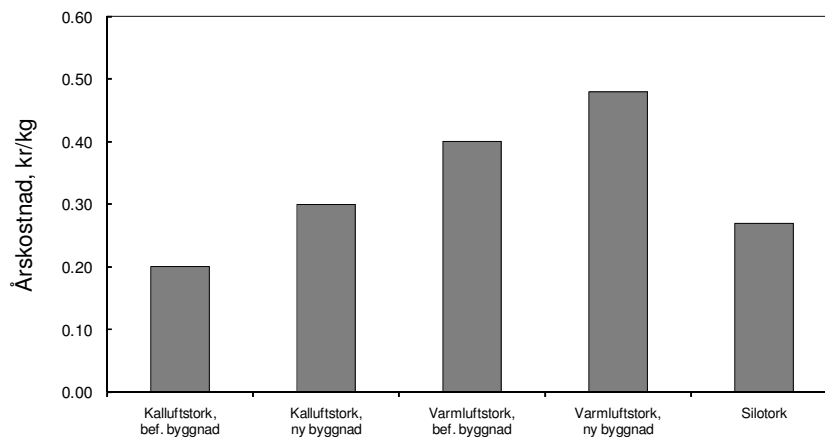


Bild 2. Beräknade årskostnader för olika typer av anläggningar för torkning av spannmål anpassad för en gård med 100 ha spannmålsodling och baserad på prisnivån för 2009. Kallluftstorken är av typen Östgötatork.



konkurrensmässigt med silotorkning när anläggningarna är anpassad för 100 ha spannmålsodling, bild 2. Kostanden för torkning i konventionell varmluftstork är dock volymkänslig och bör vara konkurrensmässig med kalluftstorkning vid 400-500 ha.

## Diskussion

Syftet med studien har varit att undersöka potentialen för att kalluftstorka spannmål med bevarad kvalitet till en låg kostnad och insats av energi samt om möjligt ta fram rekommendationer för planbottentorkning av energispannmål vid höga lagringshöjder. Den genomförda simuleringsstudien visar att även under svenska förhållanden kan kalluftstorkning i många fall ske vid högre lagringshöjder än en meter åtminstone teoretiskt, vilket minskar kostnaderna för lagring och hantering. Enligt simuleringarna skulle energiförbrukningen vid torkning med rätt strategi kunna vara i storleksordning 1 MJ/kg borttorkat vatten i snitt över åren alltså mindre än en femtedel av vad som åtgår vid varmluftstorkning, vilket skulle minska energiinsatsen för spannmålsproduktionen på gården med i storleksordning 15-20 % i form av fossil energi. Torkningsprocessen vid kalluftstorkning är komplex och väderleksberoende, vilket försvårar framtagningen av bra och tillförlitliga torkningsstrategier formulerad som enkla regler. Lättast bör det vara när tillsatsvärme används för att kompensera för variationerna hos klimatet, dock till kostnaden av en högre energiinsats. När strategi 1b användes kunde spannmål med upp till 20 % vattenhalt torkas vid 3 m lagringshöjd, först därefter behövde inläggningshöjden sänkas successivt med ökad skördevattenhalt. När tillsatsvärme inte används bör det vara betydligt svårare att formulera enkla regler. Viktiga faktorer som påverkar resultatet vid ren kalluftstorkning är spannmålets skördevattenhalt och omgivningsluftens vattenuptagande förmåga, vilken normalt avtar snabbt under hösten (Jonsson, 1990). Resultaten av simuleringarna (1a och 2) tyder på att det kan förekomma geografiska skillnader beträffande väderleksförhållandena vid skörd och att det är gynnsammare att kalluftstorka i östra Svealand och nordöstra Götaland jämfört med i västra och sydvästra Götaland. Sannolikt beror detta på att klimatet genomsnittligt är fuktigare (maritimt) i de senare fallen. Av resultaten av experiment 2 redovisade i bild 1 framgår det också att torkningsstrategierna kan behöva anpassas efter geografiskt område. Av tabell 5 framgår att den genomsnittliga tidpunkten för skörd av höstvetete inte varierade mycket mellan områdena, som mest en dryg vecka.

Enligt mätningarna på Östgötatorkarna förekom det genomgående både stora luftläckage och ojämn luftgenomgång vid samtliga mättillfällen, vilket simuleringsmodellen inte tog med i beräkningarna i vår studie. Omfattning och storlek på dessa avvikelser samt behovet av konstruktionsförbättringar behöver undersökas för att minska dessa problem. Dessförinnan behöver mätmetoder för luftflöden genom spannmålen utvärderas under kontrollerade förhållanden. Dessutom behövs studier av hur exempelvis fyllnadssätt och renhet påverkar spannmålets luftmotstånd. När kunskaper ha införskaffats om vad som kan anses som acceptabla nivåer beträffande ojämn luftfördelning och luftläckage behöver simuleringsmodellen korrigeras för detta och nya simuleringsstudier genomföras. Innan riktlinjer för torkning vid höga lagringshöjder kan tas fram behövs dessutom studier i praktiken av kalluftstorkning vid höga lagringshöjder för att utvärdera de strategier som verkar lämpliga enligt simuleringsstudierna.

## Publikationer

Resultatet av denna studie kommer att redovisas utförligare i JTI:s rapportserie för lantbruk och industri, vilken kommer att finnas tillgänglig för nedladdning från JTI:s hemsida under 2011. En vetenskaplig artikel om utvärderingen av JTI:s hygienmodell är också planerad.

## Övrig resultatförmedling till näringen

Resultaten kommer att spridas som forskningsnyhet via JTI:s hemsida. Dessa nyheter skickas dessutom via e-post till 860 prenumeranter samt till drygt 60 mediaföretag som ofta publicerar texterna i dess helhet. Direktkontakter med fackpress leder ofta till artiklar och reportage.

## Referenser

- ADAS 1982 Bulk grain driers. Grain drying and storage No. 2. Booklet 2416, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, London, UK
- Aniansson G., Norén O. & Ekström N., 1968. Hur man bygger och använder plantor för spannmål. Meddelande nr 276, Jordbrukstekniska institutet, Uppsala.
- Anon, 1983. Moisture Measurement – Grain and Seeds. American Society for Agricultural Engineers Standard: ASAE S352. 2950 Niles Road, St Joseph Michigan 49085.
- Bruce, D.M.; Ryniecki, A. Economic methods of cereal grain drying to prevent spoilage and loss of quality. In "Cereal grain Mycotoxins, Fungi and Quality in Drying and Storage", Developments in Food Science 26, Ed. Chelkowski, J., Elsevier Science Publishers 1991.
- Edström M, Pettersson O, Nilsson. & Hörndahl T., 2005. Jordbrukssektorns energianvändning. JTI-rapport 342.
- Ek, B., 2006. Lantmännen, muntlig information.
- Fraser, B.M.; Muir, W.E. 1981. Airflow requirements for drying grain with ambient and solar-heated air in Canada. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 208-210
- Gustafsson G. & Ekström N., 1980. Solfångare för torkning. Aktuellt från Lantbruksuniversitet 282.
- Hodges T. P., 1989. Prediction of spoilage in grain drying and storage - a review. Divisional Note (DN 1501), Silsoe; AFRC Institute of Engineering Research, 35pp.
- Jonhsson P., Lindblad M., Thim A. M., Jonsson N., Vargas E. A., Medeiros N. L., Brabet C., Araujo M. Q. de, Olsen M. , 2008, Growth of aflatoxigenic moulds and aflatoxin formation in Brazil nuts. World Mycotoxin Journal, Volume 1, Number 2, 127-137.
- Jonsson N., 1990. Kallluftstorkning av ärter, Rapport 112, Jordbrukstekniska institutet, Uppsala.
- Jonsson N., 1991. Kallluftstorkning av spannmål. Teknik för lantbruket 26.
- Jonsson N. & Pettersson H., 1999. Utvärdering av olika konserveringsmetoder för spannmål - baserad på analyser av hygienisk kvalitet. JTI-rapport 263.
- Jonsson N., Jonhsson P., Rizzo A., Olsen M. & Gustafsson L. 2003. Modelling the growth of *Penicillium verrucosum* in cereal grain during aerobic conditions. In "Prevention of Ochratoxin A in Cereals" Final Report of Project No. QLK1-CT-1999-00433 in Quality of Life and Management of Living Resources, Fifth Framework Programme
- Jonsson N., 2006. Uppdatering av gårdens spannmålstork. SLAs publikationsserie
- McLean, K. A. 1989 Drying and Storing Combinable Crops. 2nd Edition. Farming Press, Ipswich
- McLean, K.A. 1993 The use of auger-stirring in bulk grain driers - Implications for quality. Association of Applied Biologists Conference on Cereal Quality. Aspects of Applied Biology 36 457-463
- Morey RV, Cloud HA & Nelson WW., 1979. Evaluation of the feasibility of solar energy grain drying. Trans. Am. Soc. Agric. Engrs., 22, 409-417.
- Ryniecki, A. & Nellist, M. E., 1991. Optimization of control systems for near-ambient grain drying: Part 1. The optimization simulation. J agric. Eng. Res. 48, 19-35.
- Ryniecki, A., Jayas D. S. & Muir W.E., 1993. A generalized control-strategy for near-ambient drying of wheat under Canadian-prairie climates. Transactions of the ASAE. Vol. 36(4):1175-1183.
- SCB, 2009. Jordbruksstatistisk Årsbok. SCB, Örebro.
- Sharp, J.R. 1982. A review of low temperature drying simulation models. J Agric Eng Res 27 169-
- Westlin., H. Lundin., G. Anderson., A. Andersson., H. 2006. Samverkan vid skörd, torkning och lagring av spannmål. JTI-rapport 345. Uppsala
- Samson, RA, Hoekstra, ES, Lund, F, Filtenborg, O and Frisvad, J. 2000. Methods for the detection, isolation and characterisation of Food-borne fungi. In: Samson, RA, Hoekstra, ES, Frisvad, J and Filtenborg, O. (Eds). Introduction to Food- and Airborne Fungi. CBS, Utrecht, The Netherlands. 389 pp