

Tørring af korn i lagertørringsanlæg

Drift, tørringsstrategi og energiforbrug

Erik Fløjgaard Kristensen, Forskningscenter Bygholm og Søren Gundtoft, Teknologisk Institut, Energi



Ved tørring af korn og frø i lager-tørringsanlæg, også kaldet plan-tørreri, er det vigtigt at kunne styre tørreforløbet og anvende den rette strategi. U hensigtsmæssig og manglende styring af tørreprocessen fører til uensartet tørring. Ofte ses som resultat heraf et højt vandindhold i de øverste kornlag, mens kornet i siloens bund er meget tørt. Fugtigt korn øverst i siloen kan føre til vækst af skadelige svampe, hvis kornet skal opbevares over længere tid, mens overtørring kræver unødigt stort energiforbrug.

Der findes automatiske blæser- og varmestyringer, som kan anvendes til at sikre bedst mulig drift af anlæggene. I denne Grøn Viden beskrives tørringsprincippet samt funktionen af styrings-systemerne. Mulighederne for energibesparelser ved brug af styringsautomatik og konsekvensen af forskellige tørringsstrategier beskrives ligeledes.

Tørring af korn i lagertørringsanlæg

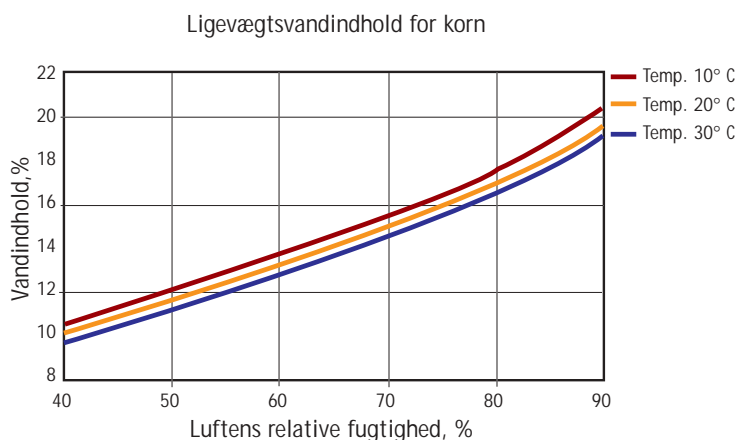
Karakteristisk for lagertørrings-anlæg er, at samme silo anvendes til både tørring og lagring. Der sker ikke nogen blanding af kornet under eller efter tørringen, og derfor er det nødvendigt at sikre et lavt vandindhold overalt i siloen ved hjælp af selve tørreprocessen. Ved tørringen udnyttes, at udeluften i driftsperioden har en tørrende effekt på kornet. I perioder med fugtig luft, eksempelvis om natten, kan eventuelt anvendes en svag varmetilsætning, typisk 3-6 °C. Er der ikke mulighed for varmetilsætning, vælges det ofte

at stoppe blæseren i perioder med fugtigt vejr.

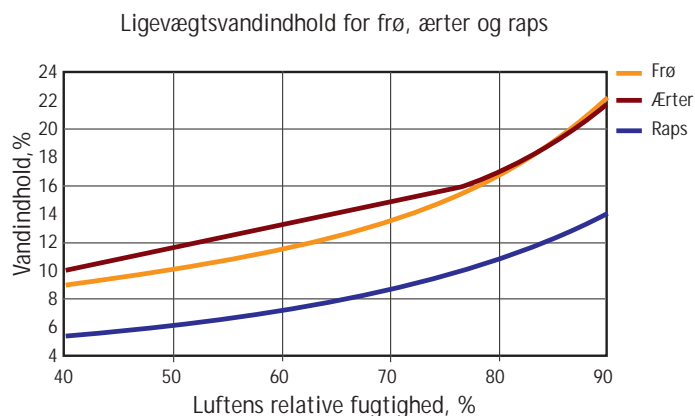
Lagertørringsanlæg har en række fordele, bl.a. en stor indlægningskapacitet, anlægget kan anvendes til både korn og frø, forskellige partier kan håndteres adskilt og der er mulighed for et lavt energiforbrug. Omvendt kan tør-

retiden i år med ugunstige vejrforhold, og specielt hvor der ikke anvendes varmetilsætning, være lang.

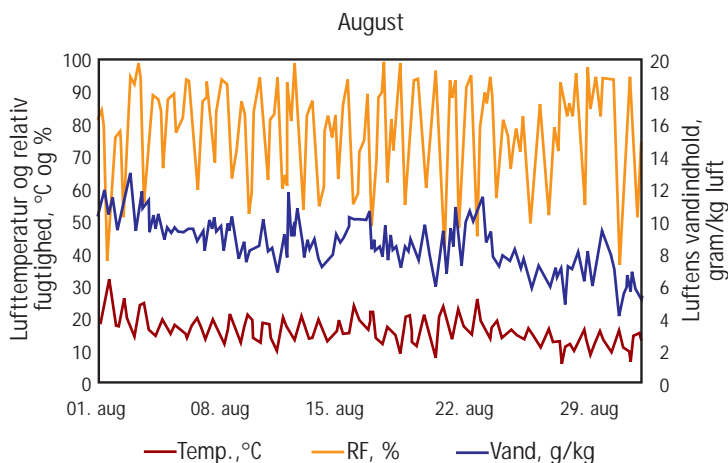
For at udnytte luftens tørreevne således at der opnås den ønskede tørring, skal blæsere og kanalsystem dimensioneres rigtigt. Grundlæggende dimensione-



Figur 1. Ligevægtsforhold mellem luftens fugtighed og vandindholdet i korn. Den viste kurve er for byg. I praksis kan kurven også anvendes for hvede, da der kun er minimale forskelle i ligevægtsforholdet gældende for byg og hvede.



Figur 2. Ligevægtsforhold mellem luftens fugtighed og vandindholdet i raps, ærter og frø (Kilde: Landskontoret for Bygninger og Maskiner)



Figur 3. Luftens temperatur, relative fugtighed og vandindhold i august måned. Værdierne er gennemsnitsværdier for Danmark (kilde: DRY = Design Reference Year)

ringsregler for anlæg og blæser er beskrevet i Grøn Viden Markbrug nr. 203.

Grundlaget for tørringsprocessen er, at kornets vandindhold og luftens relative fugtighed indstiller sig i et bestemt ligevægtsforhold. Kornet tørres ved at blive gennemblæst af luft, som har en relativ luftfugtighed, der er lavere end hvad der svarer til kornets vandindhold (se figur 1 og 2).

Det ses af figur 1, at det ved en temperatur på 20°C og en relativ luftfugtighed på 70% er muligt at tørre korn til et slutvandindhold på 15%.

I figur 2 er vist ligevægtsvandindhold for en række andre danske afgrøder.

Afgørende for tørringsøkonomien og nedtørringshastigheden er ► udeluftens tørreevne

- styring af anlægget med hensyn til start og stop af blæser
- brug af varmetilsætning.

I en varm og tør periode kan tørringen ske med et lavt energiforbrug. Omvendt vil energiforbrug og tørringsomkostninger stige i perioder med koldt og fugtigt vejr. Udeluftens temperatur og fugtighed i Danmark for august er vist i figur 3. Middelværdier af temperatur og relativ luftfugtighed for månederne juli til december fremgår af tabel 1.

Tabel 1. Vejrdata for perioden juli til december. Værdierne er gennemsnitsværdier for Danmark (kilde: DRY = Design Reference Year)

Måned	Temperatur, °C	Relativ luftfugtighed, %
Juli	16,4	79,5
August	16,2	76,0
September	12,5	87,1
Oktober	9,1	80,9
November	4,8	91,1
December	1,5	83,1

Tørrekapacitet

Det fremgår af figur 3 at der kun er et begrænset antal timer, hvor udeluftens relative fugtighed er under 70% og korn dermed kan tørres til et slutvandindhold på under 15% uden opvarmning af luften. Hvor meget vand, der kan fjernes pr m³ luft, der blæses gennem kornet, bestemmes i et IX-diagram som vist i figur 4.

For august måned er middeltemperaturen 16,2°C og den relative luftfugtighed i gennemsnit 76%. Opvarmes luften 5°C, og er kornets vandindhold 19%, kan vandmængden som fjernes pr m³ luft ved brug af IX-diagrammet beregnes til 1,6 gram/kg luft (10,3 – 8,7), svarende til 1,9 gram pr m³ luft (se det indtegnede procesforløb). Den samlede vandmængde, som fjernes ved tørringen, svarende til tørresvindet, beregnes efter formlen:

$$N = \frac{M \times (u1 - u2)}{100 - u2}$$

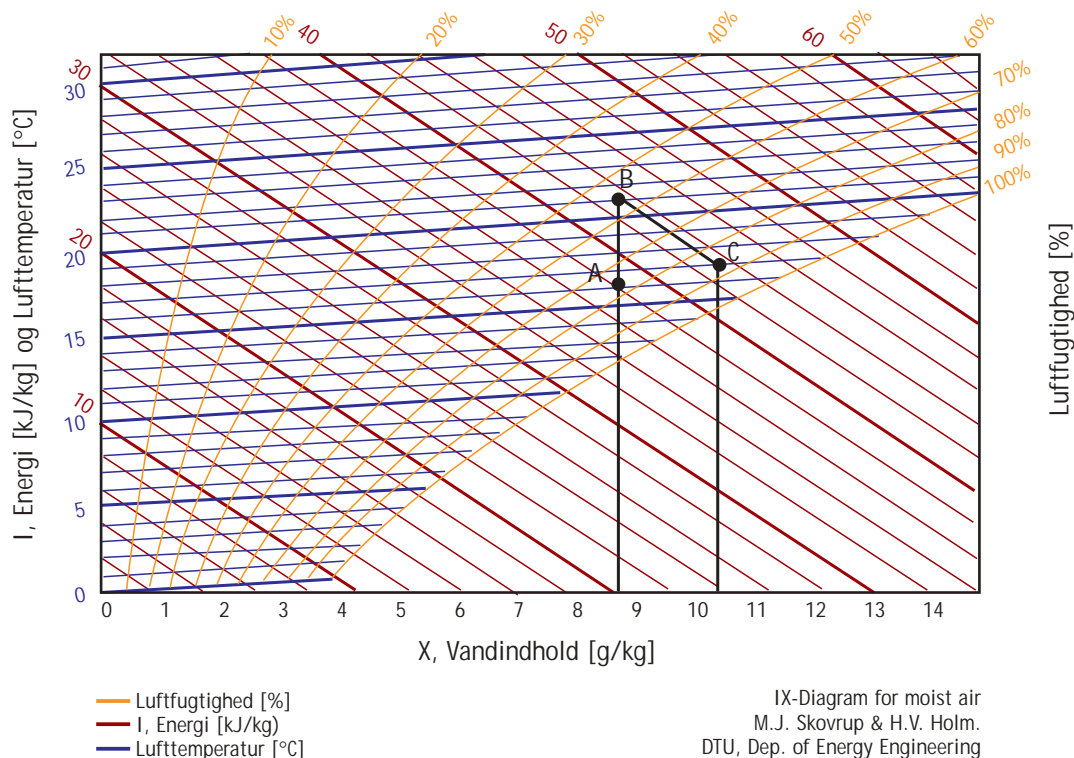
hvor

N = Fjernet vandmængde (tørresvind), kg

M = Vægt af korn før tørring, kg

u1 = Vandindhold før tørring, %

u2 = Vandindhold efter tørring, %



Figur 4. IX-diagram, som viser luftens vandindhold afhængig af temperatur og relativ luftfugtighed. Også luftens energiindhold kan aflæses. I det indtegnede eksempel på et tørringsforløb svarer punkt A til udeluften i august måned (16,2 °C og 76 % relativ luftfugtighed). Fra A til B opvarmes luften 5 °C og B er den tørreluft, som blæses ind i kornet (21,2 °C og 56 % relativ luftfugtighed). Fra B til C passerer tørreluften gennem kornet, og der optages fugt indtil ligevægtsvandindholdet mellem luft og korn nås. For byg med 19 % vand sker det ved 86 % relativ luftfugtighed (Punkt C: 17,0 °C og 86 % relativ luftfugtighed)

Luftens tørreevne afhænger både af luftens relative fugtighed, temperaturen og vandindholdet i kornet. Tørreevnen forringes ved lave temperaturer, hvorfor tørreevnen bliver dårligere jo længere hen på året man kommer. I figur 5 er luftens tørreevne vist, afhængig af årstid. Kurverne er gældende for en opvarmning af tørreluften på 5°C og med middelvejrdato i henhold til tabel 1.

Under tørringen starter tørreprocessen i kornet i siloens bund, hvor tørreluften afkøles og optager fugt svarende til ligevægtsvandindholdet. I takt med, at det nederste kornlag tørres, bevæger tørrezone sig op gennem kornlagene, og ved afslutningen af tørringen vil den relative luftfugtighed i luften, som blæses ud af kornet, falde til værdien for ligevægtsvandindholdet for tørt

korn. Ved en temperatur på 15°C vil afgangsluftens relative fugtighed således være 70%, når vandindholdet i det øverste kornlag er 15-16% (se figur 1).

Styringsmetoder og -automatik Koldlufttørring

Ved at udnytte de perioder, hvor den relative luftfugtighed i ude-

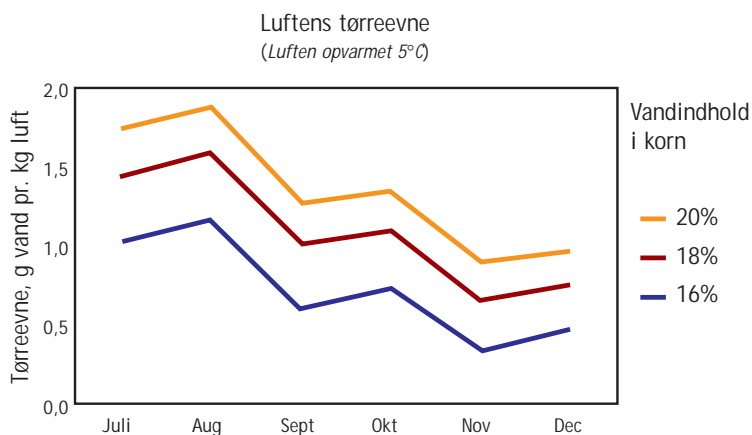
luften er lav, er det muligt at tørre korn uden opvarmning af tørreluft. Blæseren kan her manuelt startes og stoppes afhængig af, hvornår ligevægtsforholdet mellem kornets vandindhold og den aktuelle luftfugtigheden giver mulighed for tørring. I praksis vil det være tidskrævende og besværligt at sikre en effektiv drift, og derfor bruges ofte en automatisk styring af blæseren. Blæseren startes og stoppes her på baggrund af et signal fra en hygrostat, indstillet til en værdi svarende til det ønskede vandindhold i kornet. Hygrostaten placeres i det fri, således at den måler fugtigheden i den luft, blæseren suger ind.

En ulempe ved koldlufttørring er, at tørretiden bliver lang. I år med sen høst og ugunstige vejrforhold kan det være meget vanskeligt at få tørret kornet ned til et vandindhold svarende til basisafregningsvandprocenten ved handel. Metoden er derfor primært aktuel, hvor kornet er til eget forbrug, og hvor der kun er behov for at tørre et enkelt eller få partier på anlægget.

Varmetilsætning

Ved anlæg med varmetilsætning er det muligt at nå det ønskede slutvandindhold uafhængigt af udeluftens fugtighed. Ved ukritisk opvarmning af tørreluft er der risiko for, at kornet i bunden af siloen overtørres, inden kornet øverst i siloen er tørret ned til et lagerfast vandindhold.

En opvarmning af luften med 1°C vil sænke den relative luftfugtighed med ca. 5 procenthe-



Figur 5. Luftens tørreevne ved tørring af korn med 16, 18 og 20% vandindhold (1 kg luft svarer til ca. 1,2 m³ luft). Den viste tørreevne er gældende ved en opvarmning af udeluftens med 5°C, og er gennemsnitsværdier for de viste måneder.

der, se diagrammet i figur 4. Er udeluftens relative fugtighed f.eks 90%, vil en 5°C opvarmning sænke luftfugtigheden til 65%, svarende til et ligevægtsvandindhold i korn på ca. 14%.

Manuel styring af varmetilsætningen i forhold til luftens relative fugtighed vil være mulig, men i endnu højere grad end ved koldlufttørring vil det i praksis være besværligt og tidskrævende. Derfor anvendes i stor udstrækning styringsautomatik: Via et signal fra en hygrostat starter varmetilsætningen, når luftfugtigheden overstiger en forudindstillet værdi. Systemet fungerer på den måde, at blæseren er i drift hele tiden, og kun i de perioder, hvor udeluftens relative fugtighed er for høj, opvarmes tørreluft, hvorved luftfugtigheden sænkes til det ønskede niveau. Varmekilden skal kunne

opvarme luften ca. 5°C for at sikre tørreevnen i de fugtige perioder.

Traditionelt placeres hygrostaten, som styrer varmetilsætningen i anlæggets hovedkanal, således at der måles på og styres efter luftfugtigheden i luften umiddelbart inden den blæses ind i kornet. Herved er der automatisk taget højde for den opvarmning af luften, som sker i blæseren.

Varmekilden kan være en olie- eller gasovn, eller en varmtvandskalorifere tilsluttet et varmeanlæg, hvor der fyres med olie, træ eller halm. Afhængig af type og fabrikat kan der i styringen være indbygget ekstra funktioner. Eksempelvis kan systemet opbygges således, at blæseren stoppes hvis den ønskede luftfugtighed i tørreluft ikke kan oprettholdes (pga. ekstrem fugtig ude-

Tabel 2. Energiforbrug, tørretid og omkostninger ved tørring af korn i lagertørringsanlæg for forskellige styringsmetoder.

Blæser Varmekilde Hygrostatindstilling	I drift I drift	I drift Start / stop	I drift Start / stop	I drift Start / stop	Start / stop - 70%
	-	60%	70%	80%	
Tørretid, dage	6	8	9	10	28
Blæser driftstid, timer	149	181	208	238	172
Varmer, timer	149	87	43	12	0
Vandindhold efter tørring (toplag / gennemsnit), %	16,0 / 12,4	16,0 / 13,6	16,0 / 14,2	16,0 / 14,8	16,0 / 13,5
El-forbrug, MJ ¹⁾ pr hkg korn	4,9	5,9	6,8	7,8	5,6
Varmer, MJ pr hkg korn	21,2	12,4	6,2	1,7	0
Energiforbrug i alt, MJ pr kg fordampet vand	3,4	2,9	2,3	1,9	0,9
Omkostninger pr hkg korn, kr/hkg	2,28	1,85	1,56	1,41	0,94

¹⁾ 1 MJ = 0,28 kWh

luft eller for lille varmekilde), eller anlægget kan automatisk stoppes, når den relative fugtighed i afgangsluften fra kornet kommer under en indstillet værdi, svarende til at kornet er tørt.

Køling

Efter tørring er det vigtigt at kornet køles. Det er både vandprocent og temperatur der er afgørende for, om der kan ske en sikker lagring således at kvaliteten bevares. Som hovedregel bør der blæses med kold udeluft når lufttemperaturen er 5°C under korntemperaturen. Ved en luftmængde på den anbefalede værdi på 360 m³/time/m² kan køletiden beregnes til ca. 3 timer pr. meter korn, der skal nedkøles.

Driftsstrategi

Energiforbrug og tørretid er afhængig af vejrforholdene, hvordan anlægget styres og hvilken tørringsstrategi der anvendes, herunder om der anvendes varmetilsætning. De her gennemregnede eksempler er baseret på vejrforhold for et gennemsnitsår (DRY-data), som for august er vist i figur 3. I øvrigt er beregningerne gældende for:

- Korn med 19% vandindhold før tørring
- Kornlagets højde er 2,5 m
- Rumvægt af korn: 680 kg/m³
- Tørreluftmængde: 212 m³/time/tons korn, svarende til 360 m³/time/m² gulv
- Blæser nyttevirkningsgrad: 60%
- Efter tørring må vandindholdet i det øverste kornlag maksimalt være 16%
- Ved varmetilsætning anvendes

des olieovn med 80% nyttevirkningsgrad

- Energifriser: El 60 øre pr kWh og olie til opvarmning 2,50 kr. pr liter.

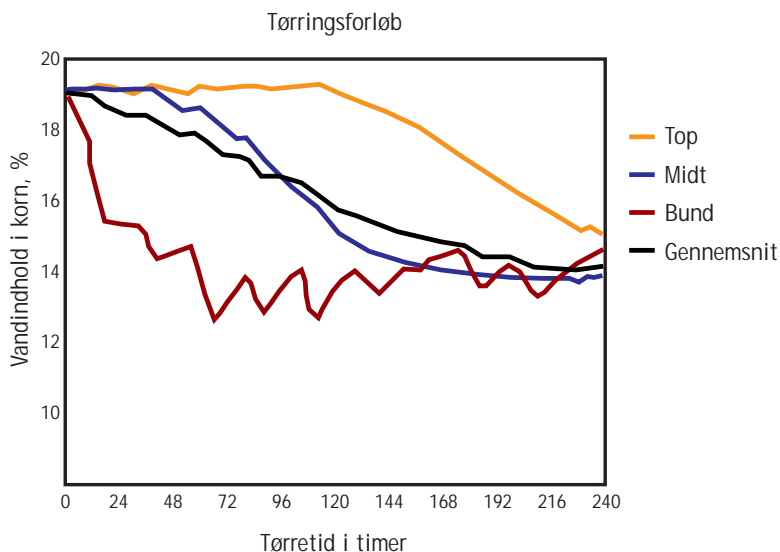
I tabel 2 er vist resultater for tørring af et kornparti, hvor tørringen påbegyndes den 18. august. Der opnås det laveste energiforbrug og den billigste tørring, hvor der udelukkende anvendes styret koldlufttørring. Et andet væsentligt forhold er imidlertid tørretiden, som ved koldlufttørring er meget lang, 3-4 gange tiden når der anvendes hygrostatstyret varmetilsætning. I det viste eksempel er tørringen startet midt i august. Ved en sen høst, hvor tørringen først påbegyndes i september, er antallet af gunstige tørretimer væsentlig mindre end i august. Det vil

yderligere forlænge tørretiden for koldlufttørring, og i praksis vil det nogle år ikke være muligt at færdigtørre kornet til et slutvandindhold på 15 % uden varmetilsætning (basisværdi ved salg af foderkorn).

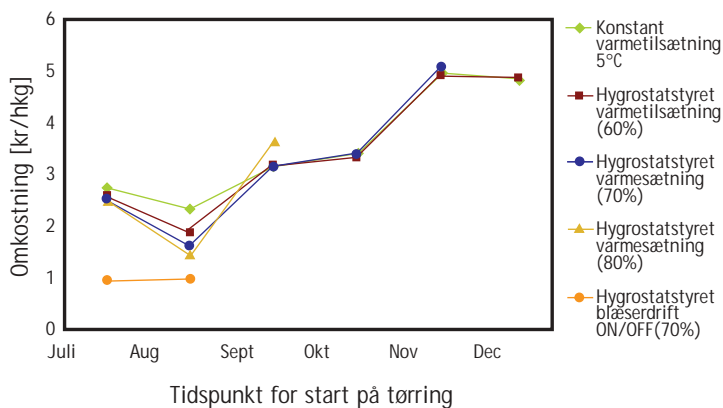
For at sikre kornets kvalitet under den efterfølgende lagring stoppes tørringen ikke, før vandindholdet i toppen af kornlaget er under 16 %. Det betyder, specielt ved metoden med konstant varmetilsætning, at der sker en overtørring af kornet i bunden af siloen. Det gennemsnitlige vandindhold bliver derved lavere end ønsket før toplaget er tilstrækkelig nedtørret. Dette er uhenigtsmæssigt tørringsøkonomisk set, og ved salg af kornet er det vanskelig at få betaling for det ekstra høje tørstofindhold. Ved en hygrostatindstilling på 80% relativ fugtighed er der energimæssigt sparet 44% ved anvendelse af den automatiske styring i forhold til konstant varmetilsætning. I kr. er besparelsen med de anvendte energipriser 38%.

Tørringsforløbet ved hygrostatstyret varmetilsætning under de nævnte forudsætninger er vist i figur 6. Hygrostaten er indstillet på 70%, og blæseren er i drift hele tiden. Det ses, at først efter ca. 120 timer (5 dage) begynder der at ske en tørring i det øverste kornlag. Kornet nederst i siloen er tørret ned til 14-15% vandindhold efter ca. 48 timer. Herefter sker der skiftevis en svag tørring og opfugtning af det nederste kornlag.

I perioder midt på dagen er udeluftens relative luftfugtighed meget lav, og her vil kornet tør-



Figur 6. Tørringsforløbet i en silo med 2,5 m kornlag. Tørringen starter den 18. august, hvor kornets vandindhold er 19%. Der anvendes hygrostatstyret varmetilsætning. Hygrostaten er placeret i hovedkanalen og stillet til 70% relativ luftfugtighed.



Figur 7. Tørringsomkostninger ved tørring på forskellige tidspunkter i løbet af sensommer, efterår og vinter. Omkostningerne er vist for forskellige driftsstrategier.

Grøn Viden indeholder informationer fra Danmarks JordbrugsForskning.

Grøn Viden udkommer i en mark-, en husdyr- og en havebrugsserie, der alle henvender sig til konsulenter og interesserede jordbrugere.

Abonnement tegnes hos
Danmarks JordbrugsForskning
Forskningscenter Foulum
Postboks 50, 8830 Tjele
Tlf. 89 99 10 10 / www.agrsci.dk

Prisen for 2003: Markbrugsserien kr. 222, husdyrbrugsserien kr. 162 og havebrugsserien kr. 137.

Adresseændringer meddeles særskilt til postvæsenet.

Michael Laustsen (ansv. red.)
Britt-Ea Jensen (redaktør)

Lay-out: Enggaardens Tegnesteue

Tryk: Rounborgs grafiske hus

ISSN 1397-985x

res til under 14% vandindhold, selv uden varmetilsætning. Denne "overtørring" udlignes dog i løbet af natten og øvrige perioder med mere fugtig luft, hvor styringsautomatikken sikrer en relativ fugtighed i tørreluft på 70%. Efter 10 dage er hele kornpartiet tørret ned til 14-15% vandindhold, og variationen i vandindhold mellem top, midt og bundlaget er lille, ca. 1 procentenhed. Denne variation er uden betydning i praksis, og hele kornpartiet er lagerfast.

Tørringsøkonomien ved tørring på forskellige tidspunkter i løbet af sommer- og efterårsperioden er vist i figur 7. Det ses, at omkostningerne stiger væsentligt, når tørringen skal gennemføres senere på året. Årsagen er luftens mindre tørreevne ved den lavere temperatur og højere relative luftfugtighed. Ved sen tørring er besparelsen ved hygrostattyret varmetilsætning i for-

hold til konstant varmetilsætning (5° C) væsentlig mindre end ved tørring i juli og august. Det skyldes, at der bliver færre timer pr dag, hvor den uopvarmede luft kan anvendes til tørring.

Ved anlæg med automatik til blæser- og varmestyring er styringen baseret på signal fra en eller flere hygrostater. Nøjagtige og stabile hygrostater er derfor en forudsætning for optimal styring af anlægget. Målinger i praksis på 16 tilfældigt valgte hygrostater af forskellig fabrikat har vist, at der forekommer endog meget store unøjagtigheder for flere af de anvendte hygrostater. Afvigelse var i flere tilfælde på over 10 procentenheder ved måling af luftens relative fugtighed. En så stor afvigelse er meget væsentlig for tørringsforløbet. Der er således et stort behov for kontrol og eventuel kalibrering af de hygrostater, som anvendes i styringerne.

Konklusion

Målinger i praksis og teoretiske modelberegninger viser, at der er et væsentligt energisparepotentiale ved korrekt drift af lagertørringsanlæg. Automatiske styresystemer baseret på måling af den relative luftfugtighed kan ved korrekt brug sikre en god kornkvalitet og en energiøkonomisk tørring. Som hovedregel gælder

følgende:

- Tørringen startes straks efter høst
- For anlæg med hygrostattyring stilles hygrostaten som hovedregel på 70%. Ved tørring i en periode med gunstige tørreforhold – en varm og tør periode i august – kan der med fordel anvendes en hygrostattindstilling på 80%
- I oktober/november tørres med konstant varmetilsætning
- Ved veldimensionerede anlæg kan der tilsættes svag varme fra tørringens start uanset vandprocent (luftfugtighed minimum 0,1 m/s, svarende til 360 m³ pr time pr m² gulv)
- Koldlufttørring er kun aktuel ved tidlig høst, og hvor der ikke er behov for hurtigt at nedtørre mange korn- eller frøpartier på det samme anlæg
- Tørringen skal stoppes, når den relative luftfugtighed i afgangsluft er under 70%
- Kornet køles, når udetemperatur er 5°C under kornets temperatur
- Køletiden er ca. 3 timer pr. meter korn for nedkøling af kornet til lufttemperaturen.