



TØRRING OG LAGRING AF KORN OG FRØAFGRØDER

DRYING AND STORAGE OF GRAIN AND SEEDS

DJF RAPPORT MARKBRUG 145 · JANUAR 2010
ERIK FLØJGAARD KRISTENSEN



DET JORDBRUGSVIDENSKABELIGE FAKULTET
AARHUS UNIVERSITET



TØRRING OG LAGRING AF KORN OG FRØAFGRØDER

DRYING AND STORAGE OF GRAIN AND SEEDS

Erik Fløjgaard Kristensen

Institut for Biosystemteknologi
Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet
Aarhus Universitet
Blichers Allé 20
Postboks 50
8830 Tjele

Rapporterne indeholder hovedsagelig forskningsresultater og forsøgsopgørelser rettet mod danske forhold. Endvidere kan de beskrive større samlede forskningsprojekter eller fungere som bilag til temamøder.

Rapporterne udkommer i serierne:
Markbrug, Husdyrbrug, Havebrug.

Forsidefoto: Korntørringsanlæg, DanCorn A/S

Abonnenter opnår 25% rabat, og abonnement kan tegnes ved henvendelse til:

Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet
Aarhus Universitet
Postboks 50, 8830 Tjele
Tlf. 8999 1028

Alle publikationer kan bestilles på nettet:
www.agrsci.au.dk

Tryk: www.digisource.dk
ISBN 87-91949-50-5

Forord

Korn og frøafgrøder repræsenterer store værdier for landbrug og samfund. For at sikre afgrødernes kvalitet er der behov for effektive anlæg til tørring samt gode lagringsfaciliteter. Ifølge WHO/FAO går ca. 10 procent af verdens kornproduktion tabt på grund af mangelfuld tørring og dårlige lagringsforhold.

Denne rapport giver en oversigt over de grundlæggende principper for tørring af korn og frø, samt en beskrivelse af, hvilke forhold der er bestemmende for, hvornår afgrøden kan lagres uden risiko for beskadigelse på grund af angreb af svampe og skadedyr. Desuden gennemgås funktionsprincippet og nogle dimensioneringsregler for traditionelle tørringsanlæg anvendt under danske forhold.

Rapporten er baseret på viden opbygget ved Institut for Jordbrugsteknik, Århus Universitet, gennem forsknings- og udviklingsprojekter indenfor området korn- og frøteknologi, suppleret med viden fra den internationale litteratur om emnet.

Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet
Institut for Jordbrugsteknik
December 2009

Indhold

	<i>Side</i>
Sammendrag	6
Summary	8
Introduktion	10
Sikker lagring af korn og frø	11
Tørringens grundprincip	14
<i>Luften som tørremiddel</i>	
<i>Ligevægtsvandindhold</i>	
<i>Opvarmning af tørreluft</i>	
<i>Kondensering</i>	
Tryktab ved gennemblæsning af afgrøder	22
Blæser til korntørringsanlæg	27
<i>Blæsertyper</i>	
<i>Nødvendig luftmængde</i>	
<i>Modtryk</i>	
<i>Valg af blæser</i>	
Lagring og overvågning	31
Hovedtyper af tørringsanlæg	27
<i>Lagertørringsanlæg</i>	
<i>Portionstørreri</i>	
<i>Gennemløbstørreri</i>	
<i>Tromletørreri</i>	
<i>Udendørs stålsiloer</i>	
Referencer	44
Tables	45

Sammendrag

Tørring og opbevaring af korn og frø er en kompleks opgave, som kræver løbende overvågning og kontrol. En lang række faktorer spiller sammen og har betydning for, hvordan den optimale kvalitet sikres.

Afgrøden kan få ødelagt spireevne eller på anden måde beskadiges på grund af vækst af svampe og mug eller angreb af insekter og mider. Både vandindhold, opbevaringstemperatur og tilgængelig ilt til afgrøden er afgørende.

For at gøre afgrøden lagerstabil kan der ofte være behov for tørring. Grundlaget for tørring af korn og frø er, at tør luft kan optage fugt fra afgrøden. Fugtigheden i luften mellem de enkelte frø og fugtigheden i selve frøet udligner sig til et bestemt ligevægtsforhold. Dette ligevægtsforhold er forskellig for de forskellige frøarter. I litteraturen findes en række matematiske formler til beregning af ligevægtsvandindholdet. Afgrøden tørres, når den gennemblæses med luft med en fugtighed, som er lavere end ligevægtsvandindholdet.

Atmosfærisk luft er en blanding af tør luft og vanddamp. Hvor meget vand, luften er i stand til at optage, og dermed luftens tørreevne, er afhængig af luftens mætningsgrad, også kaldet den relative luftfugtighed samt temperaturen. Varm luft er i stand til at indeholde langt mere vanddamp end kold luft. Eksempelvis kan luft ved 0 °C kun indeholde 4 gram vanddamp, mens luft opvarmet til 30 °C kan indeholde 27 gram vanddamp. Dette bevirker, at opvarmet luft kan optage mere fugt, men omvendt også, at afkøles luften til under en vis temperatur, dugpunktet, kondenseres vanddamp og vandet afgives. Trænger forholdsvis varm, fugtig luft ind i koldt frø eller korn kan der derfor være risiko for afkøling af luften og deraf følgende kondensering af vand i afgrøden.

Til at bestemme, hvor meget vand der kan fjernes pr m³ luft, der blæses gennem afgrøden, anvendes et ix-diagram. Ved hjælp af diagrammet bestemmes luftens temperatur, relativ fugtighed, vanddampindhold og energiindhold før, under og efter tørreprocessen.

Der kræves et vist tryk for at gennemblæse korn og frø. Modtrykket kan beregnes på grundlag af afgrødeafhængige værdier, luftens hastighed samt tykkelsen af det lag, som gennemblæses. Generelt er modtrykket størst ved gennemblæsning af små, aflange frø og mindst ved gennemblæsning af store, afrundede frø. Gennemblæses hvede med en luftmængde svarende til en lufthastighed på 0,1 m pr sekund er modtrykket ca. 450 Pa pr meter afgrøde. De tilsvarende værdier for bøtner og engrapgræs er henholdsvis ca. 110 Pa og 1900 Pa.

Ved valg af blæser til et tørreanlæg er det vigtigt at kende både det modtryk, blæseren skal overvinde, samt den nødvendige specifikke luftmængde. Til tørring af græsfrø i et lagertørringsanlæg kræves 1.000 – 1.600 m³ pr time pr tons frø, mens der til tørring af korn i lagertørringsanlæg kræves 150 – 500 m³ pr time pr tons korn.

Der findes forskellige hovedtyper af tørringsanlæg til korn og frø, hver med deres fordele og begrænsninger. De mest udbredte typer under danske forhold er lagertørringsanlæg, portionstørrerier, gennembløbstørrerier og tromletørrerier.

Lagertørringsanlæg er meget alsidige og kan anvendes til både korn og frø samt mange forskellige typer specialafgrøder. Der anvendes uopvarmet eller svagt opvarmet (opvarmning maks. 5 °C) ude-

luft som tørreluft. Anlæggene anvendes også ofte til efterfølgende køling og lagring af afgrøden. Tørreprocessen tager forholdsvis lang tid, og specielt ved fugtige afgrøder kræves stor omhu og kontrol for at sikre kvaliteten.

Portionstørrerier findes i mange forskellige udformninger. De er karakteriserede ved, at et parti ad gangen fyldes i anlægget og tørres. Mange portionsanlæg er forsynet med en eller anden omrøringsmekanisme, som løbende opblander afgrøden. Tørrelufttemperaturen er traditionelt 35- 50 °C, og tørretiden for en portion er fra få timer til få døgn.

Gennemløbstørrerier er opbygget således, at der kontinuerligt fyldes korn eller frø i anlægget. Afgrøden passerer så først gennem en tørrezone med opvarmet tørreluft, og til slut gennem en kølezone, hvor den gennemblæses med kold udeluft. Anlæggene kan have stor kapacitet, og der findes kontrol- og styresystemer, som kan sikre en præcis og ensartet nedtørring. Tørrelufttemperaturen er traditionelt 60 – 100 °C. De færreste gennemløbsanlæg egner sig til tørring af græsfrø.

Tromletørring er karakteristisk ved en meget høj tørrelufttemperatur i kombination med en kort behandlingstid. Tørrelufttemperaturen er 150 – 1.000 °C, og tørretiden 3 – 15 minutter. Den høje temperatur kan dræbe svampe på overfladen af korn og frø og dermed reducere risikoen for efterfølgende vækst af skadelige svampe. Den høje temperatur kræver præcis styring af processen, idet der ellers er risiko for beskadigelse af afgrødens spireegenskaber og andre kvalitetsparametre. Tromletørring er mindre egnet til tørring af græsfrø.

Summary

Drying and storage of grain and seeds is a complex task demanding continuous monitoring and control. A number of factors must work together and are important for ensuring optimal quality.

The germinability of the seeds may be damaged or the seeds may be damaged otherwise due to growth of fungus and mould or infestation of insects and mites. Moisture content, storage temperature as well as oxygen available to the seeds are decisive.

In order to make the seeds sufficiently dry for storage, artificial drying may often be needed. The basis for drying grain and other seeds is that dry air is able to absorb moisture from the seeds. The moisture in the air between the individual seeds and the moisture in the seed itself equals the equilibrium seed-air humidity. This equilibrium humidity differs depending on the different types of seed. In literature, a number of mathematical models for calculating the equilibrium seed-air humidity exist. The seeds are dried when ventilated with air having a relative humidity that is lower than the equilibrium seed-air humidity.

Atmospheric air is a mixture of dry air and water vapour. The amount of water the air is capable of absorbing, i.e. the drying capacity of the air, depends on the saturation degree of the air, the relative air humidity and the temperature. Warm air is able to contain far more water vapour than cold air. For instance, air at a temperature of 0 °C is only able to contain 4 grams of water vapour, while air heated up to a temperature of 30 °C is able to contain 27 grams of water vapour. Consequently, heated air is able to contain more moisture. However if the air is cooled down to below a certain temperature, i.e. the dew point, the water vapour is condensed and changes into liquid water. If relatively warm and humid air penetrates a bed of cold seed or grain, there may be a risk of cooling the air and thereby a following condensation of water in the seed.

For determining how much water can be removed per m³ air that is ventilated through the seeds, an ix-diagram is applied. By means of the diagram, the air temperature, the relative air humidity, the water vapour content and the energy content before, during and after the drying process are determined.

A certain air pressure is required in order to ventilate the grain and seeds. The counter pressure can be calculated on the basis of seed dependent values, air velocity and the thickness of the ventilated layer. Generally, the counter pressure is largest when ventilating small, oblong seeds and smallest when ventilating large, round seeds. If wheat is ventilated with an air flow rate corresponding to an air velocity of 0.1 m per second, the counter pressure is 450 Pa per meter layer of grain. The corresponding values for beans and smooth-stalk meadow grass are app. 110 Pa and 1900 Pa respectively.

When selecting a ventilator for a drying plant, it is important to know the counter pressure that the ventilator must overcome as well as the required specific air volume. For drying grass seeds in an on-floor dryer, an airflow rate of 1.000-1.600 m³ per hour per ton seed is required whereas drying grain in an on-floor dryer only requires an airflow rate of 150-500 m³ per hour per ton grain.

Several main types of plants for drying of grain and seeds exist; each with its advantages and limitations. The most common types for Danish conditions are on-floor dryers, batch dryers, continuous flow dryers and drum dryers.

On-floor dryers are very comprehensive and can be applied for grain crops as well as grass seeds and several types of other crops. Unheated or slightly heated (max. 5 °C) outdoor air is applied as drying air. The plants are also often used for subsequent cooling and storage of the seeds. The drying process is relatively long and especially in the case of seeds with a high moisture content great precision and control is required in order to ensure the quality.

Batch dryers are seen in many different versions. Their main characteristics are that one batch at a time is filled into the plant and dried. Most batch dryers are provided with some kind of stirring mechanism that continuously mixes the seeds. The drying air temperature is traditionally 35-50 °C and drying time for one batch varies from a few hours to a few days.

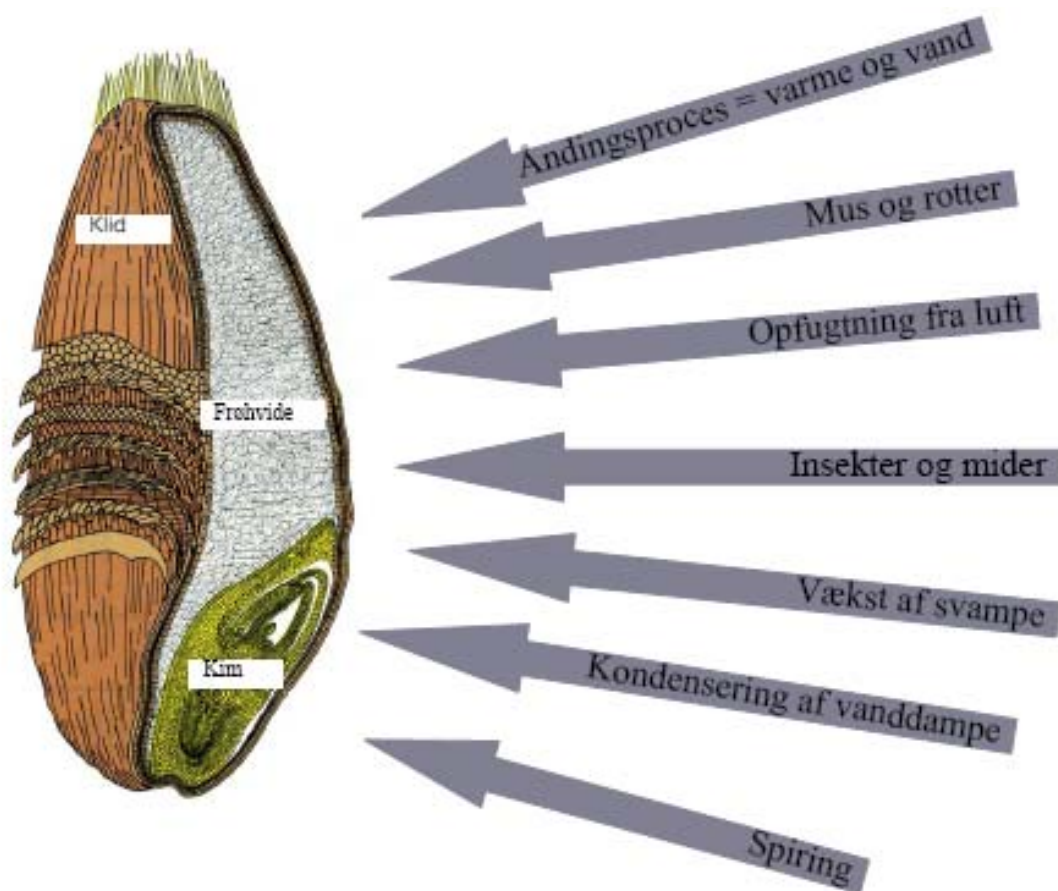
Continues flow dryers are constructed such that grain or seeds are continuously filled into the plant and pass through the plant in a continuous flow. Firstly, the seeds pass through a drying zone with heated drying air and finally through a cooling zone where they are ventilated with cold outdoor air. The drying plants have a high capacity and automatic control and monitoring systems to ensure a precise and consistent moisture removal are available. The drying air temperature is traditionally 60-100 °C. Most continues flow dryers are not suited for drying of grass seeds.

Drum drying is characterised by a very high drying air temperature in combination with a short processing time. The drying air temperature is 150-1.000 °C and drying time is 3-15 minutes. The high temperature is able to kill fungus on the surface of the grain and seeds, thereby reducing the risk of subsequent growth of poisonous fungi. The high temperature requires a very precise control of the process; otherwise there will be a risk of damaging the germinability of the seeds and other quality parameters. Drum drying is less suited for drying of grass seeds.

Introduktion

Fra høst og frem til at korn og frø skal anvendes til fødevarer, foder eller udsæd, er der risiko for forringelse af kvaliteten. Umiddelbart efter høst kan der være behov for tørring, og den efterfølgende lagring kræver gode lagerfaciliteter, eventuelt med mulighed for beluftning. Gennem hele processen er der behov for kontrol og overvågning for at foretage den korrekte behandling og for at kunne gribe ind, før kvaliteten forringes. Det er vigtigt at kunne styre tørreforløbet og anvende den rette strategi.

Korn og frø er levende organismer og indeholder en mængde mikroorganismer og diverse urenheder. Kvalitetsforringelse i et sådant system skyldes fysiske, biologiske og kemiske processer.



Figur 1. En lang række faktorer kan forringe kvaliteten under lagring af korn

Figure 1. A number of factors may damage quality during storage

Der er således en lang række forhold at tage højde for i hele perioden fra høst indtil kornet skal anvendes. Forkert eller manglende styring af tørrings- og lagringsprocessen fører til tab på grund af kvalitetsforringelser. Dårlig styring af tørringsprocessen medfører uensartet tørring, hvor dele af afgrødepartiet bliver tørret for kraftigt, mens andre dele forbliver fugtige. Fugtigt korn fører til vækst af skadelige svampe, hvis kornet skal opbevares over længere tid, mens en eventuel overtørring har krævet et unødigt stort energiforbrug.

Sikker lagring af korn og frø

Ved høst vil et parti korn eller frø altid indeholde en vis mængde svampe og sporer. For at opnå en sikker lagring er det nødvendigt at begrænse kornets og mikroorganismernes livsaktivitet.

Tre faktorer er afgørende for, om korn og frø kan lagres uden at kvaliteten forringes:

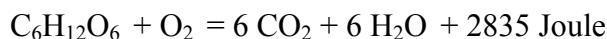
- **Vandindhold**
- **Temperatur**
- **Ilt**

For alle faktorer gælder, at et højt niveau øger livsaktiviteten. Dette har dannet grundlag for tre principielt forskellige konserveringsmetoder:

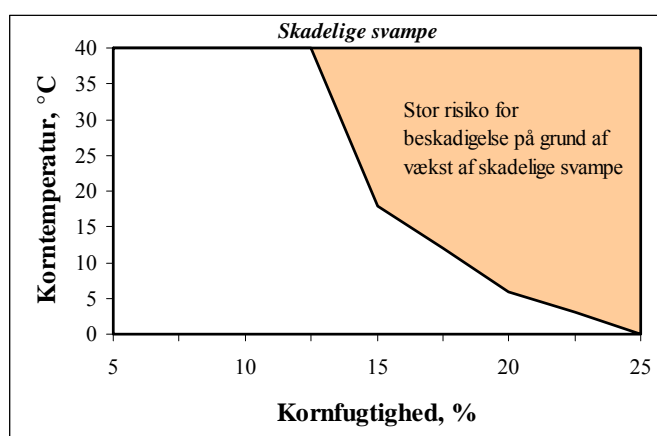
1. Vand fjernes ved tørring
2. Varme fjernes ved køling eller beluftning
3. Ilt fjernes ved gastæt lagring.

Dertil kommer muligheder for kemisk konservering ved tilsætning af eksempelvis propionsyre, ammoniak eller lignende. Gastæt lagring og kemisk konservering er ikke aktuel, hvis spireevnen skal bevares.

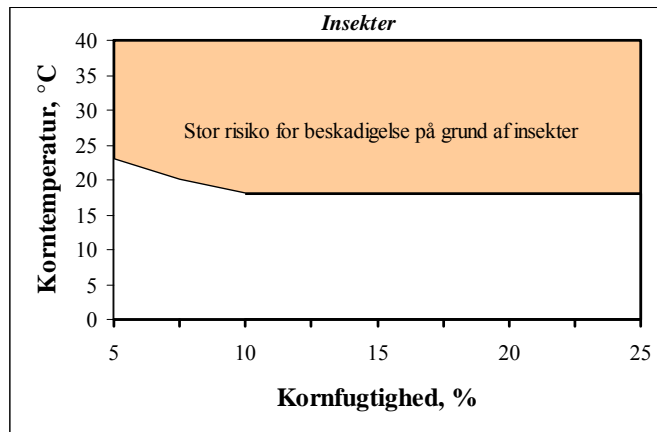
Både ved afgrødens og mikroorganismernes livsprocesser udvikles vand og varme. Herved skabes grobund for øget aktivitet, og der startes således en ond cirkel. Ved åndingen nedbrydes sukkerstofferne i frøhviden under forbrug af ilt og frigivelse af kultveilde og vand. Processen kan beskrives ved formelen (Christensen et al 1969):



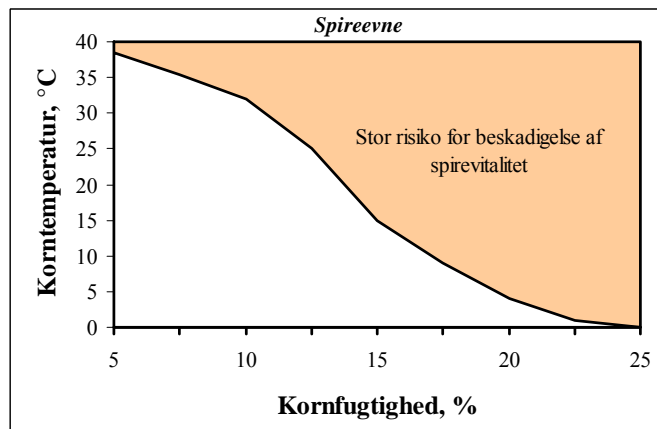
I fig 2, 3 og 4 er vist sammenhæng mellem kornets fugtindhold, kornets temperatur og risiko for beskadigelse på grund af henholdsvis svampevækst, angreb af insekter og reduceret spireprocent. (Hall, 1970, Brooker et al. 1974).



Figur 2. Risiko for vækst af svampe, afhængig af temperatur og vandindhold i korn
Figure 2. Risk of growth of fungi depending on temperature and grain moisture content



Figur 3. Risiko for insekter i kornet, afhængig af temperatur og vandindhold i korn
 Figure 3. Risk of insects in the grain depending on temperature and grain moisture content

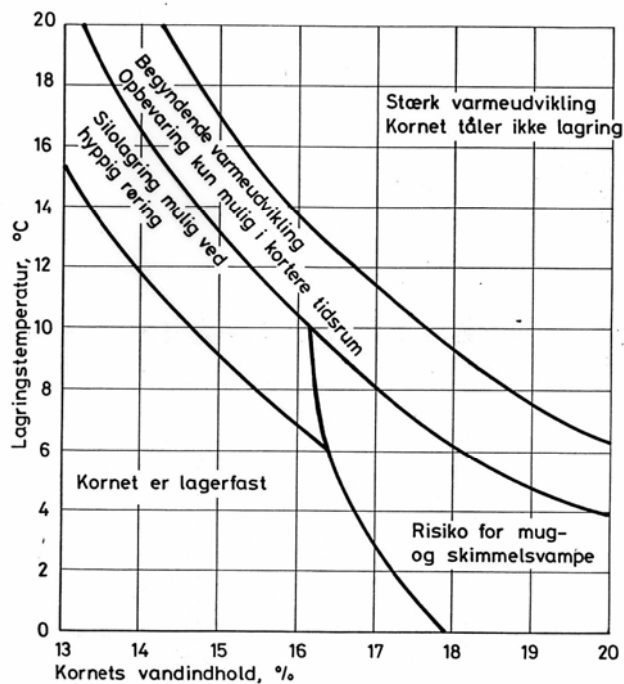


Figur 4. Risiko for ødelagt spireevne, afhængig af temperatur og vandindhold i korn
 Figure 4. Risk of damaging germinability depending on temperature and grain moisture content

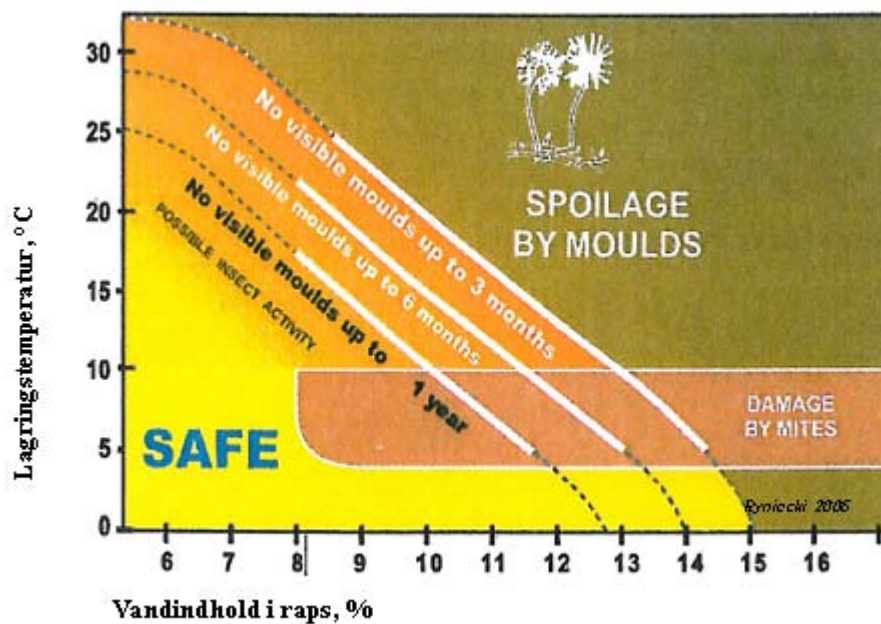
Der er således flere krav, som alle skal være opfyldt for at kornet kan opbevares uden kvalitetsforringelse. For de traditionelle danske kornafgrøder hvede, byg, rug og havre er der udarbejdet et diagram, som viser betingelserne for sikker silo-lagring uden varmeudvikling og anden beskadigelse af kornet. Diagrammet er vist i figur 5.

Under danske forhold er det i efterårsperioden sjældent muligt at køle og holde en lagringstemperatur under 10-12 grader. Det fremgår af figur 5, at sikker lagring af korn under disse forhold kræver en nedtørring til ca. 14% vandindhold.

Der er udarbejdet tilsvarende diagrammer for andre afgrøder. Figur 6 viser et lagringsdiagram for raps (Ryniecki, 2005). Området for sikker lagring er i diagrammet markeret med gul baggrundsfarve. Det fremgår, at sikker lagring af raps ved en temperatur på 10-12 grader kræver nedtørring til ca. 8% vandindhold.



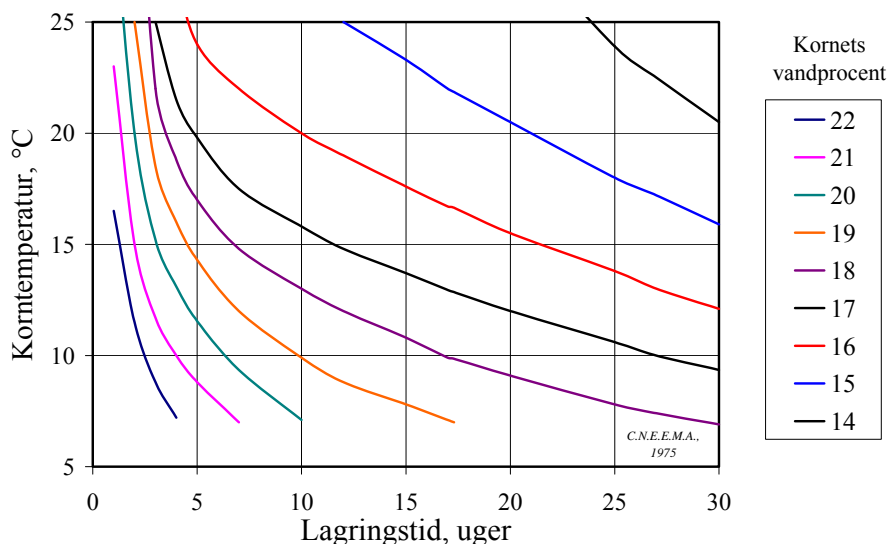
Figur 5. Lagringsdiagram for korn
 Figure 5. Storage diagram - grain



Figur 6. Lagringsdiagram for raps (Ryniecki, 2005)
 Figure 6. Storage diagram – rape seed (Ryniecki, 2005)

Da der er tale om selvforstærkende processer, og det i særlig grad er varmeudviklingen som accelererer processerne, er lagringstiden vigtig. Det kan således godt være muligt at korttidslagre en afgrøde med forholdsvis højt vandindhold, uden kvaliteten ødelægges. Maksimal lagringstid uden

væsentlig reduktion af spireprocenten i kornet (svarende til at spireprocenten reduceres til under 95 i sundt og spiredygtigt korn), afhængig af vandindhold og temperatur, er vist i figur 7 (CNEEMA, 1975). Det fremgår af figuren, at eksempelvis spireprocenten i korn med 17% vandindhold ved lagring ved 20 grader efter 5 ugers lagring vil være faldet til under 95%.



Figur 7. Maksimal lagringstid uden væsentlig kvalitetsforringelse i form af reduceret spireevne (spireprocent reduceret til mindre end 95%) for korn ved forskellig temperatur og kornfugtighed

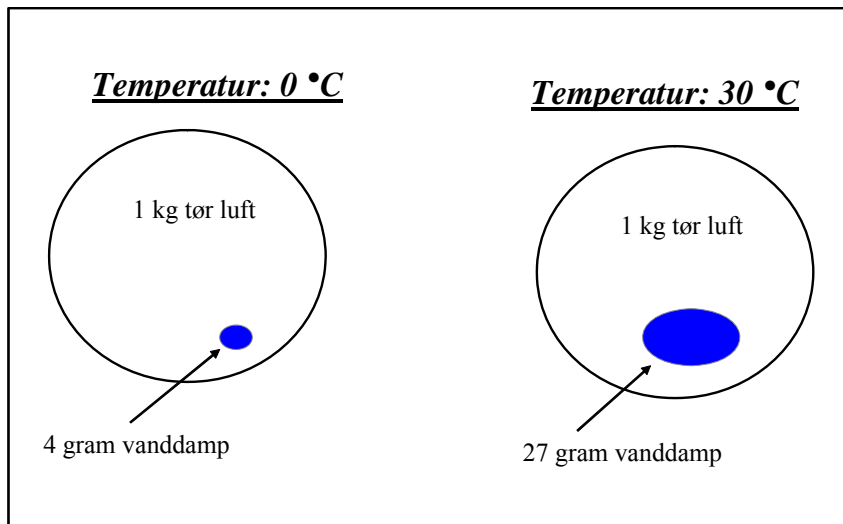
Figure 7. Maximum storage time without substantial quality deterioration stated as reduced germinability (germinability percent reduced to less than 95%) for grain at different temperature and grain moisture content

Tørringsprocessens grundprincip

Luften som tørremiddel

Grundlaget for tørring af korn og frø er, at afgrødens vandindhold og fugtigheden i den omgivende luft udligner sig til et bestemt ligevægtsforhold. Dette balanceforhold er forskellig for de forskellige afgrødetyper. Vandfordampningen drives af forskel i fordampningstrykket fra vandmolekylerne på kerneoverfladen og vanddamptrykket i den omgivende luft (P_v). Ved at gennemblæse afgrøden med luft med en anden fugtighed end den, hvor vanddamptrykkene er i balance, er det derfor muligt at ændre afgrødens vandindhold. Er luftens vanddamptryk lavest, vil der ske en tørring. Omvendt kan afgrøden opfugtes, hvis luftens vanddamptryk er det største.

Atmosfærisk luft er en blanding af tør luft og vanddamp. Luftens evne til at bære eller indeholde vanddamp er meget afhængig af temperaturen. Varm luft kan indeholde langt mere vanddamp end kold luft. Et eksempel på dette forhold er vist i figur 8.



Figur 8. Luftens evne til at indeholde en vanddamp er meget afhængig af temperaturen. Figuren viser forskellen på mættet luft (relativ luftfugtighed 100%) ved 0 °C og 30 °C

Figure 8. The ability of the air to contain water vapour is highly dependent on the temperature. The figure shows the difference between saturated air (relative air humidity 100%) at 0 °C and 30 °C

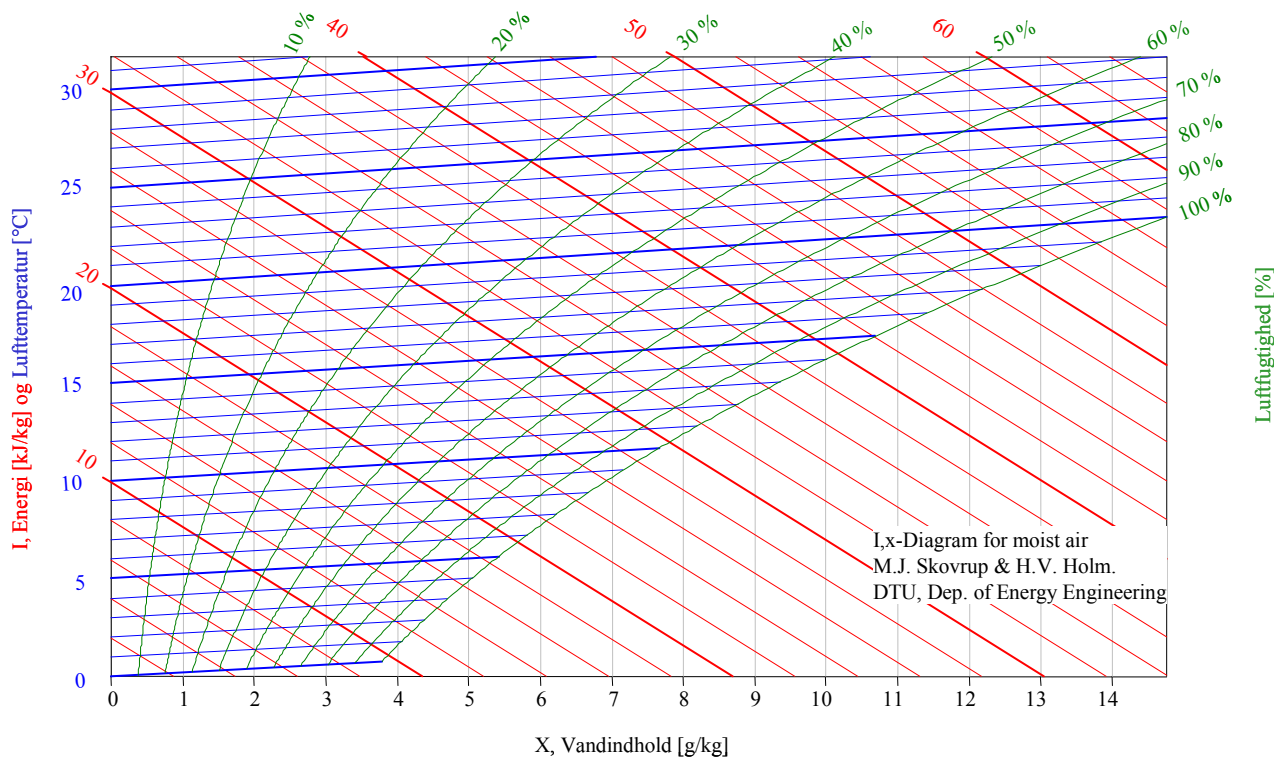
Dette fænomen bevirker, at når fugtig luft opvarmes kan den optage yderligere fugt, men omvendt også, at afkøles luften til under en vis temperatur (dugpunkt) kondenseres vanddampene, og vandet afgives.

Luftens relative fugtighed (RH) kan beskrives som forholdet mellem den mængde vanddamp, luften indeholder, i forhold til den maksimale mængde vanddamp, luften kan indeholde ved den aktuelle temperatur og lufttryk. Definitionen på relativ luftfugtighed er:

$$RH = P_v/P_{vs}$$

RH	Luftens relative fugtighed
P_v	Vanddamptryk i luft
P_{vs}	Vanddamptryk i mættet luft

Værdier for luftens relative fugtighed ved forskelligt vandindhold, dugpunkt, energiindhold mm. kan findes i et Mollier eller ix-diagram, se figur 9.



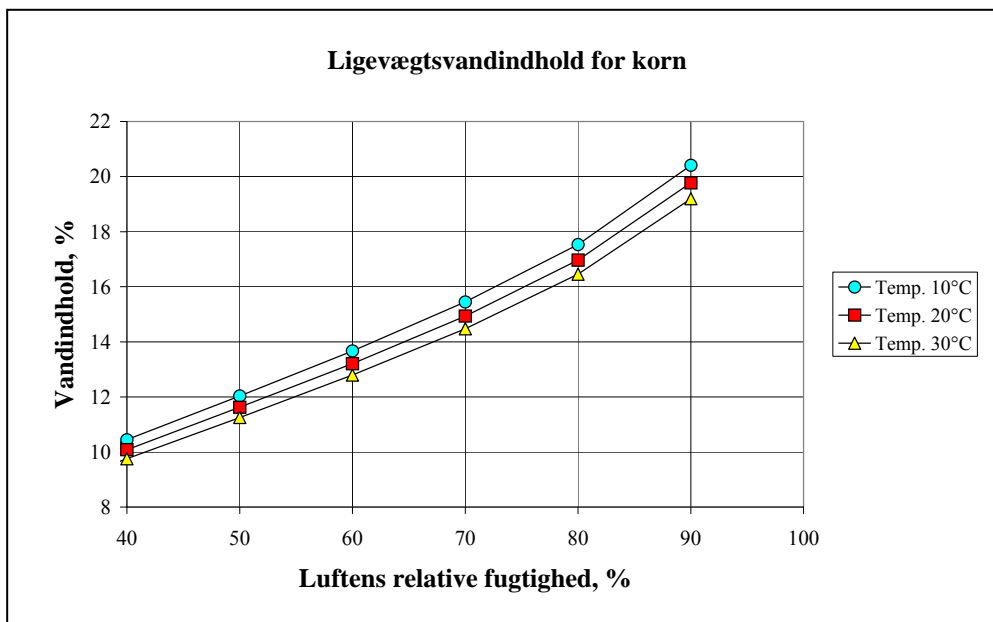
Figur 9. Ix-diagram for fugtig luft i temperaturintervallet fra 0 til 30 °C

Figure 9. Ix-diagram for humid air in the temperature interval 0 – 30 °C

Ligevægtsvandindhold

I tørringsprocessen udnyttes det forhold, at afgrødens vandindhold og fugtigheden i den omgivende luft udlignes i et ligevægtsforhold.

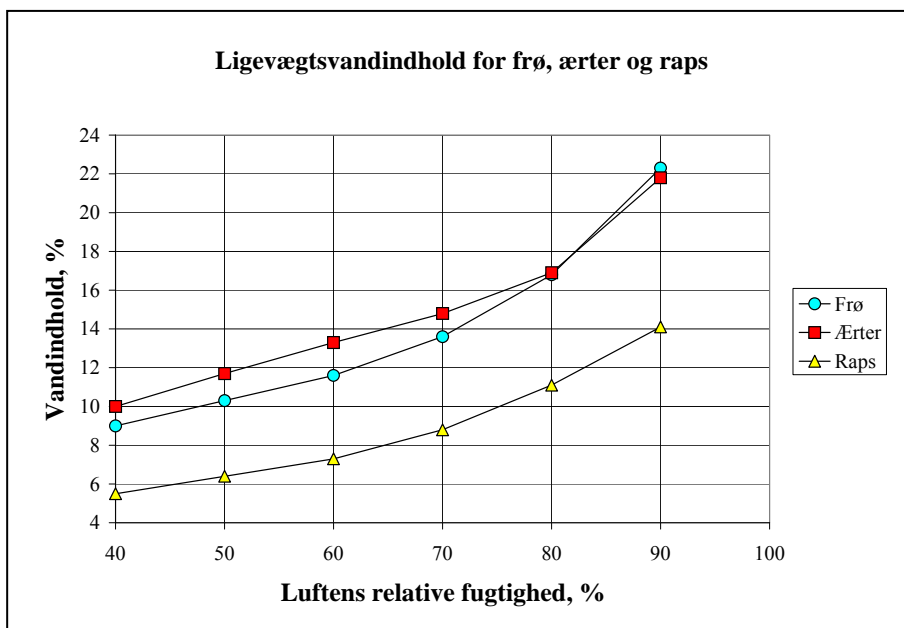
Ligevægtsforholdet for byg og hvede ved forskellige temperaturer er vist i figur 10 (Kristensen et al., 2003). Ligevægtsforholdet er vist ved forskellige temperaturer, da forholdet ændres lidt ved ændret temperatur.



Figur 10. 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

Figure 10. Equilibrium between relative humidity of air and grain moisture content. The illustrated curve is for barley. In practice, the curve may also be applied for wheat as only small differences in the equilibrium moisture content for barley and wheat exist

Af figur 10 fremgår, 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 11 er vist gennemsnitlige ligevægtsvandindhold for andre danske afgrøder - raps, ærter og græsfrø - ved en temperatur på 20 °C. Kurven for græsfrø er gennemsnitsværdier for traditionelle græsfrøarter som rajgræs, hundegræs, timothe, engsvingel og lignende.



Figur 11. Ligevægtsforhold mellem luftens fugtighed og vandindholdet i frø, ærter og raps (Kilde: Landskontoret for Bygninger og Maskiner)

Figure 11. Equilibrium between a relative humidity of air and water content in rape seed, peas and grass seeds (Source: Landskontoret for Bygninger og Maskiner)

For andre afgrøder, herunder også for de enkelte specifikke arter af græsfrø, findes i litteraturen tilsvarende kurver og tabeller over ligevægtsvandindhold (Brooker et al., 1974) (Henderson et al., 1997) (Pabis et al., 1998). I håndbogen ASAE Standards (American Society of Agricultural Engineers, 1998) findes en oversigt over en lang række eksperimentelt fundne værdier for ligevægtsforhold for traditionelle landbrugsafgrøder. Desuden er der her vist en række forskellige beregningsformler til bestemmelse af ligevægtsværdierne.

En meget anvendte beregningsmodel er den såkaldte modificerede "Henderson equation", hvor:

$$RH = 1 - \exp(-A \times (T + C) \times (MC_D)^B)$$

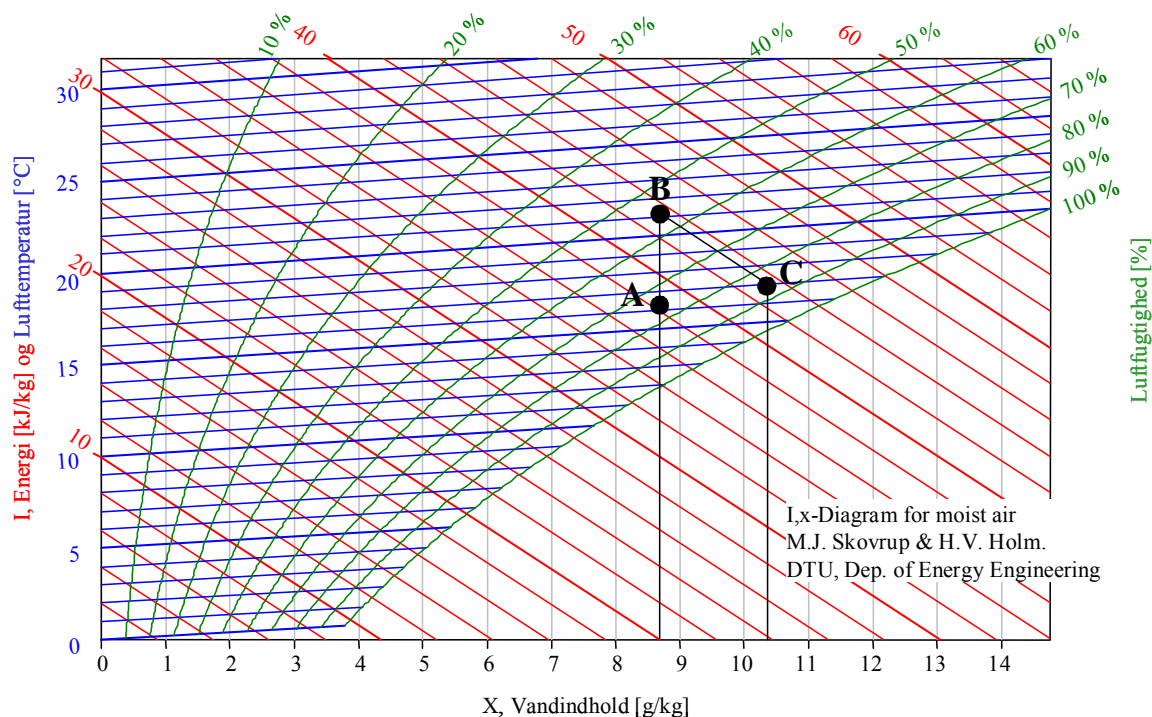
RH	Luftens relative fugtighed
T	Temperatur, °C
MC _D	Afgrødens fugtindhold beregnet på tør-basis
A, B og C	Konstanter afhængig af afgrøde

I tabel 1 er angivet de tilhørende konstanter for udvalgte afgrøder.

Tabel 1. Værdier til beregning af ligevægtsvandindhold efter modificerede "Henderson equation" (American Society of Agricultural Engineers, 1998)

Afgroede	Beregningskonstant ($RH = 1 - \exp(-Ax(T+C)x(MC_D)^B)$)		
	A	B	C
Majskerner	$6,6612 \times 10^{-5}$	1,9677	42,143
Ris (langkornet)	$4,1276 \times 10^{-5}$	2,1191	49,828
Ris (brune ris/korte korn)	$3,2301 \times 10^{-5}$	2,2482	34,267
Solsikke	$3,1 \times 10^{-4}$	1,7459	66,603
Hørfro	$1,76 \times 10^{-4}$	1,9054	56,228

Hvor meget vand, der kan fjernes pr m³ luft der blæses gennem afgrøden, afhænger således primært af luftens relative fugtighed og temperatur samt afgrødens vandindhold. Til at bestemme, hvor meget vand der kan fjernes pr m³ luft, anvendes ix- diagrammet og ligevægtsvandindholdet. Et eksempel på et tørringsforløb er skitseret i figur 12.



Figur 12. Tørringsforløb vist i IX-diagram. Pkt. A er udeluften. Fra pkt. A til B opvarmes tørreluften 5 °C. Fra pkt. B til C passerer tørreluften gennem afgrøden, og der optages fugt indtil ligevægtsvandindholdet nås (pkt. C). Luften har i alt optaget 1,6 gram vand pr kg luft (10,3 g/kg - 8,7 g/kg)

Figure 12. Drying process illustrated in IX-diagram. A is the ambient air. From A – B the drying air is heated 5 °C. From B – C, the drying air passes through the grain and moisture is absorbed until the equilibrium seed-air humidity is reached (C). The air has absorbed 1.6 grams of water per kg air (10.3 g/kg - 8.7 g/kg)

Figuren viser tørreluftens indgangstilstand (A, 16 °C og 75% relativ luftfugtighed), tørreluften efter en svag opvarmning (B, 21 °C og 55% relativ luftfugtighed) inden den blæses ind i afgrøden, og tørreluftens tilstand efter at have passeret gennem en fugtig afgrøde, hvor den har optaget fugt (C, 17

°C og 86% relativ luftfugtighed). Det viste ligevægtsvandindhold – punkt C – svarer ifølge figur 11 til byg med 19% vandindhold. Den vandmængde, der fjernes pr kg tørreluft, kan på figur 13 beregnes til (10,3 - 8,7 gram/kg) 1,6 gram pr kg. Luftens massefylde er ca. 1,2 kg pr m³, og vandmængden, som fjernes pr m³ luft er således ((1,6g/kg) × (1,2kg/ m³)) 1,9 gram pr m³.

Den samlede vandmængde, som skal fjernes ved tørringen af et korn- eller frøparti, kan beregnes efter formlen:

$$N = \frac{M \times (u_1 - u_2)}{100 - u_2}$$

N	Fjernet vandmængde (tørresvind), kg
M	Vægt af korn eller frø før tørring, kg
u ₁	Vandindhold før tørring, %
u ₂	Vandindhold efter tørring, %

Den mængde vand, som fordampes og fjernes (N), svarer til tørresvindet ved processen.

Det er således luftens relative fugtighed og temperatur, der er afgørende for, om luften er i stand til at tørre afgrøden. I visse tilfælde er udeluften tilstrækkelig tør til at kunne anvendes direkte til tørring, men ofte er der behov for at reducere luftens relative fugtighed. Dette kan ske enten ved at reducere vandindholdet i luften eller ved at hæve luftens temperatur, jf. ix- diagrammet figur 9.

Princippet med at sænke luftens relative fugtighed ved at fjerne vanddamp fra luften udnyttes i en tørluftgenerator, også kaldet en affugter. Her kondenseres vandet i luften, og procesvarmen fra kondenseringsanlægget anvendes til efterfølgende opvarmning af luften. I Danmark anvendes metoden kun i meget begrænset omfang og udelukkende i lagertørringsanlæg.

Opvarmning af tørreluften

Langt den mest anvendte teknik til at øge luftens tørreevne er at hæve temperaturen. Hvor meget temperaturen kan og bør hæves er afhængig af, hvilken type tørringsanlæg der anvendes. Til lager- tørringsanlæg opvarmes luften 0 – 5 °C, i portionsanlæg anvendes normalt en temperatur på 35 – 45 °C, i gennemløbstørrerier anvendes normalt temperaturer på 60-100 °C, mens der i højtemperatur tørringsanlæg som tromletørringsanlæg anvendes temperaturer fra 150 til 1.000 °C.

Varmekildens kapacitet (Q) bestemmes af tørringsanlæggets luftydelse og hvor stor en opvarmning, der ønskes:

$$Q = L \times c_p \times \Delta t$$

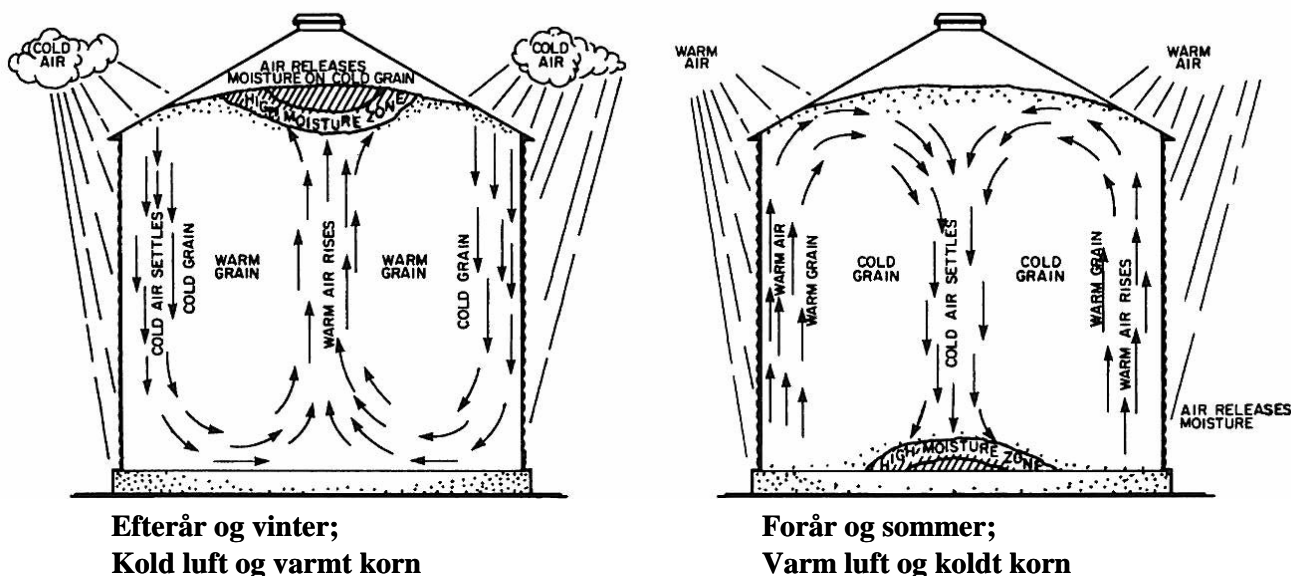
Q	Varmekapacitet, W
L	Luftmængde, m ³ /s
c _p	Luftens varmekapacitet, J/(m ³ × °C) (for atm. luft er c _p ca.1,2 kJ/(m ³ × °C))
Δt	Temperaturstigning (°C).

Eksempelvis kræver et anlæg med en luftydelse på 10.000 m³ pr time, ved en opvarmning af luften på 20°C, således en varmekilde med en kapacitet $Q = ((10000\text{m}^3/\text{h}/3600\text{s}) \times 1200 \text{ J}/(\text{m}^3 \times ^\circ\text{C}) \times 20 ^\circ\text{C}) = 67 \text{ kW} (57.000 \text{ kcal/h})$.

Kondensering

Luftens evne til at indeholde meget vanddamp ved høj temperatur og modsat kun lidt vanddamp ved en lav temperatur skaber risiko for opfugtning, og direkte kondensering af vand når luftens temperatur falder til dugpunktet. Selv efter korrekt behandling i forbindelse med høst, i form af tørring og køling, er der risiko for beskadigelse på grund af opfugtning og kondensering af vanddamp.

Lagringsbetingelserne kan give problemer med kondensering og fugt på grund af forskellig temperatur i afgrøde og omgivelser. Ved 5 °C temperaturforskel kan der måles luftbevægelser i et kornparti (Ryniecki, 2005). Figur 13 viser, hvorledes temperaturforskelle kan starte luftbevægelser og afkøling af luften med deraf følgende problemer med opfugtning og kondens. Problemet er skitseret for en udendørs stålsilo i henholdsvis en vinter- og en sommersituation. Om vinteren er afgrøden typisk varmere end luften, og de temperaturredrevne luftbevægelser kan her forårsage opfugtning af top-laget centralt i siloen. Situationen om foråret og sommeren er omvendt, idet luften er varm og afgrøden forholdsvis kold. Her kan luftbevægelserne forårsage opfugtning ved siloens bund.



Figur 13. Risiko for opfugtning og kondens på grund af temperaturforskelle og de deraf skabte luftstrømninger (Friesen, 1980)

Figure 13. Risk of increasing humidity and condensation due to differences in temperature and the following air movements (Friesen, 1980)

Tryktab ved gennemblæsning af afgrøder

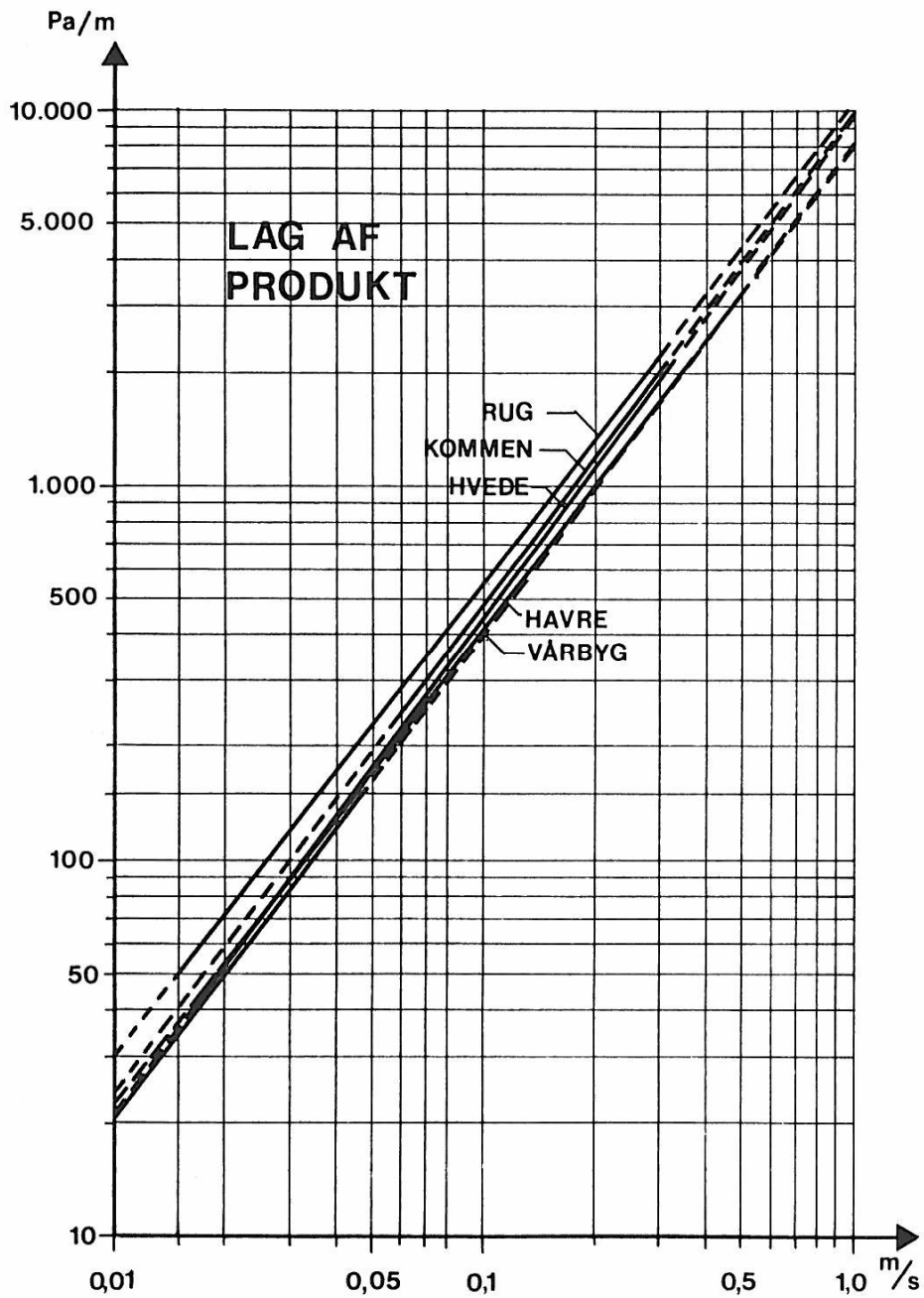
For almindelige landbrugsafgrøder er tryktabet ved gennemblæsning med tørreluft afhængig af en række fysiske forhold. De vigtigste parametre er geometrisk form af de enkelte frø, størrelse, indhold af urenheder, fugtindhold, sammenpakning og komprimering mm. (Christensen, 1991).

Til beregning af tryktabet ved gennemblæsning af en afgrøde med en given luftmængde anvendes i de fleste tilfælde en model beskrevet af L.K. Rasmin. Tryktabet kan her beregnes efter formlen:

$$\Delta P = k \times h \times v^a$$

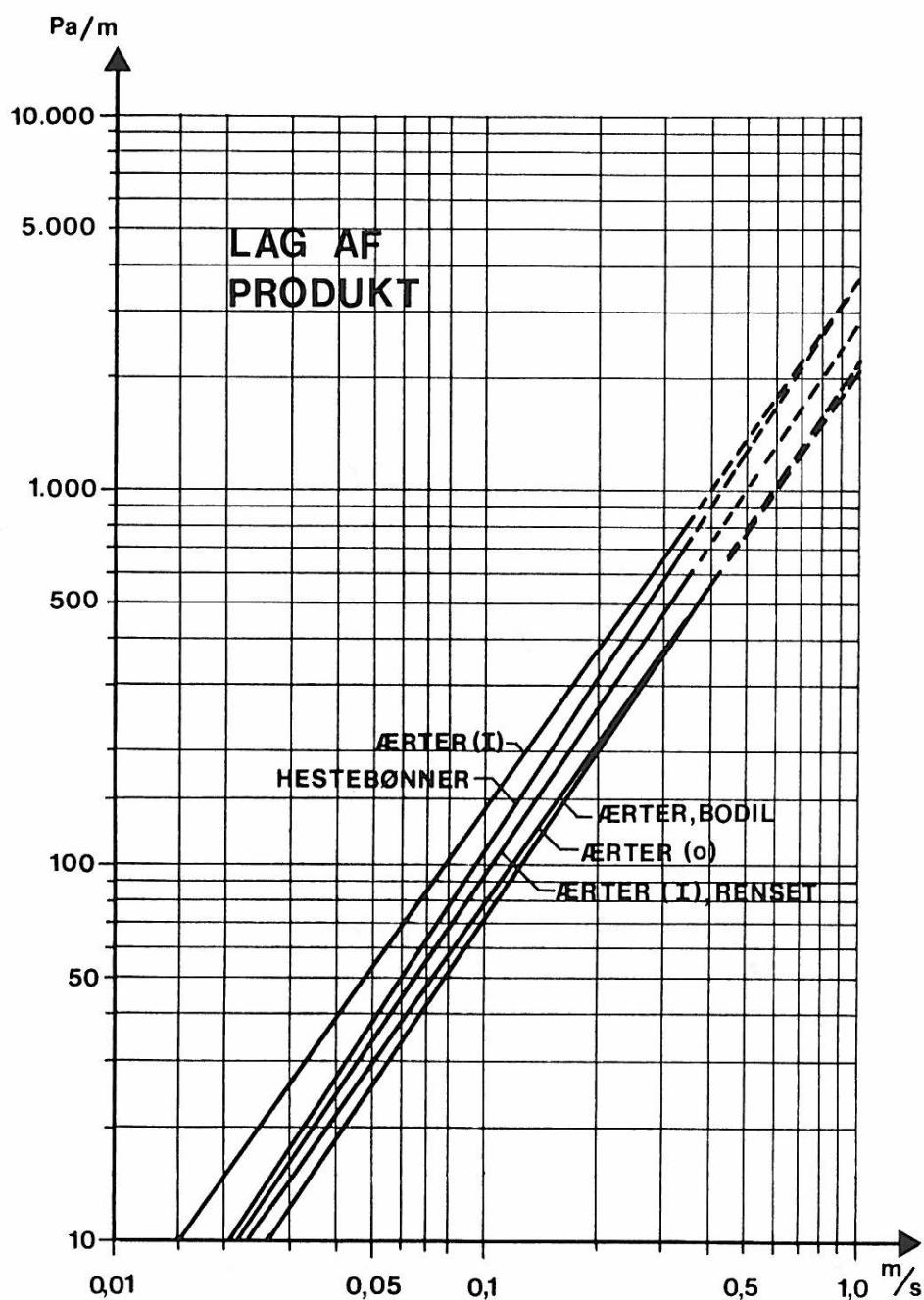
ΔP	Tryktab, Pa
k og a	Konstanter afhængig af produkt
h	Lagtykkelse, m
v	Luftens hastighed, m/s, (luft hastighed beregnet på basis af tværsnitsarealet for gennemblæsningen uden reduktion for produkt)

For danske afgrøder findes en række eksperimentelle data for tryktab. En systematisk opgørelse af forsøgsdata med bestemmelse af konstanterne k og a i Rasmin formlen er vist grafisk i figur 14, 15, 16 og 17, hvor afgrøderne er delt i grupper efter størrelse og form af de enkelte frø (Christensen, 1991). Resultaterne er gældende for løst indlagte afgrøder uden væsentligt indhold af urenheder. Tryktabet er målt ved lodret luftgennemgang.



Figur 14. Tryktab ved gennemblæsning af byg, hvede, rug, havre og kommen (aflange, kornede produkter). Tryktab vist som funktion af lufthastigheden

Figure 15. Pressure drop when ventilating barley, wheat, rye, oat and cumin (oblong, granular products). Pressure drop illustrated as a function of the air velocity

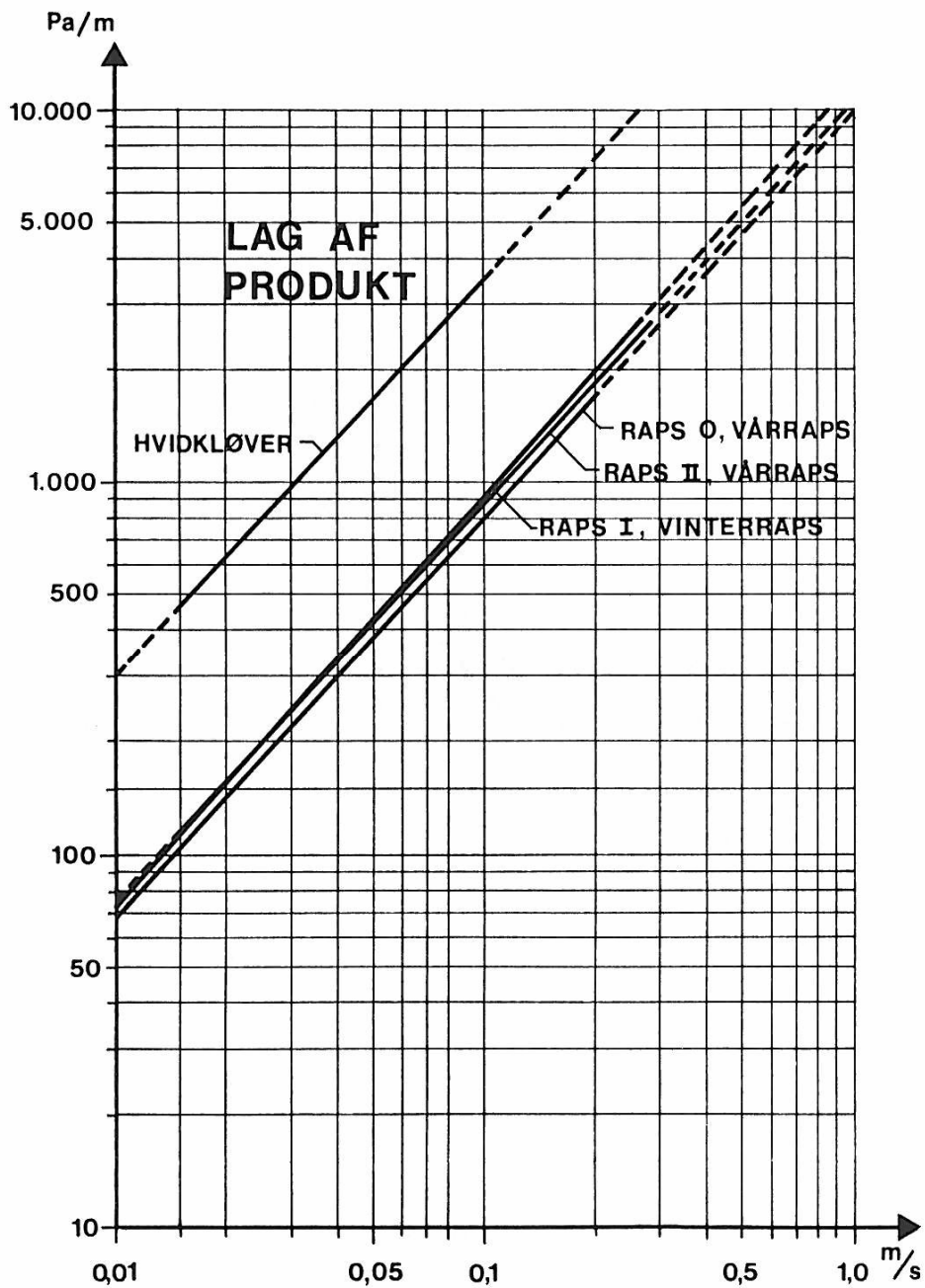


Figur 15. Tryktab ved gennemblæsning af ærter og hestebønner (runde/afrundede store frø).

Tryktab vist som funktion af lufthastigheden

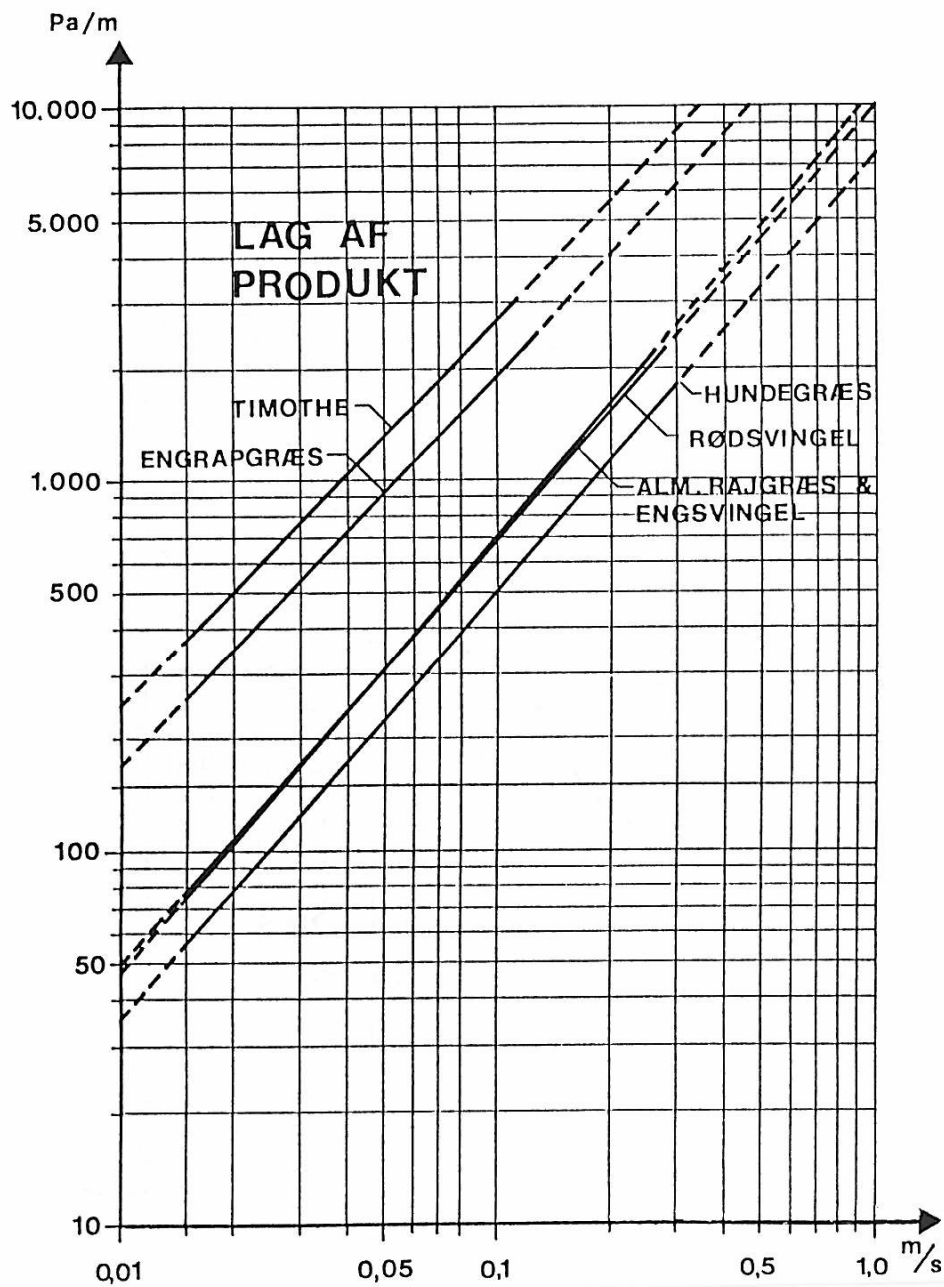
Figure 15. Pressure drop when ventilating peas and horse beans (round/ rounded off large seeds).

Pressure drop illustrated as a function of the air velocity



Figur 16. Tryktab ved gennemblæsning af raps og hvidkløver (små runde frø). Tryktab vist som funktion af lufthastigheden

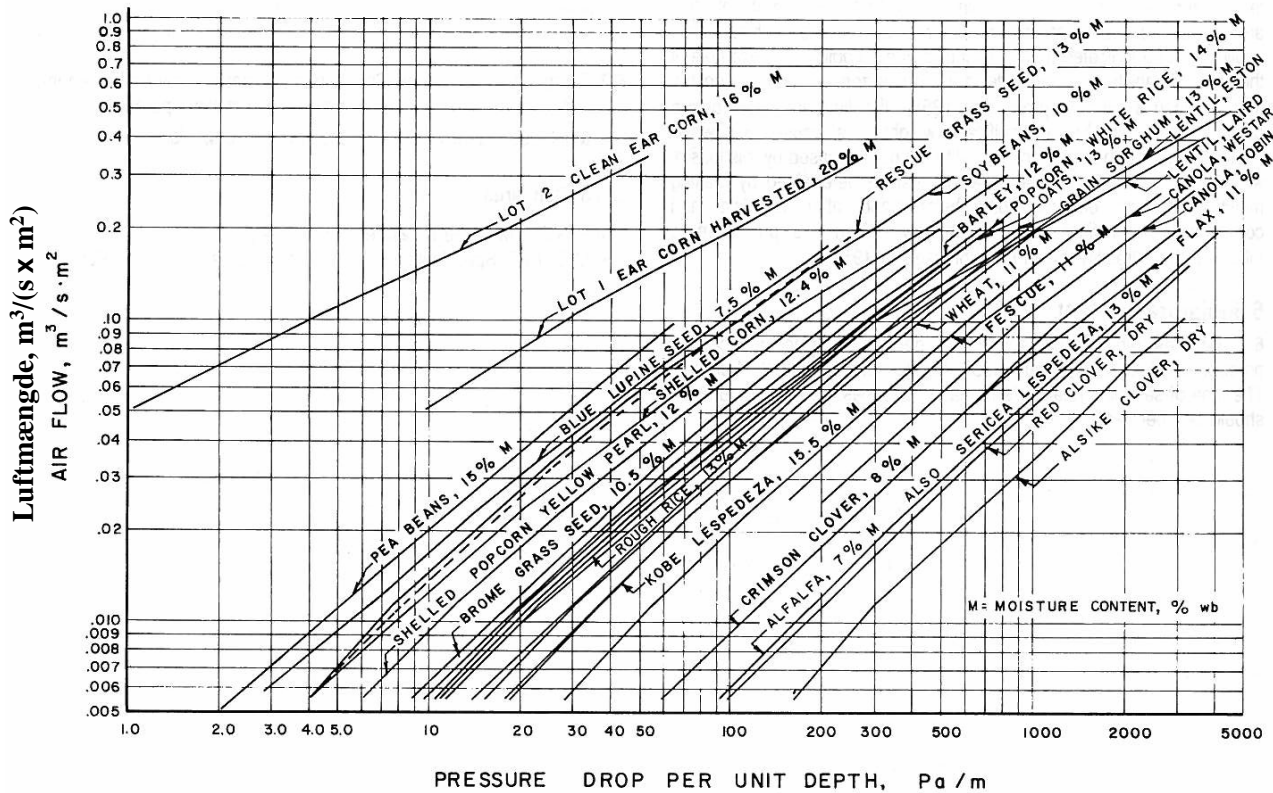
Figure 16. Pressure drop when ventilating rape seed and white clover (small round seeds). Pressure drop illustrated as a function of air velocity



Figur 17. Tryktab ved gennemblæsning af rajgræs, hundegræs, engsvingel, rødsvingel, timothe og engrapgræs (små aflange frø). Tryktab vist som funktion af lufthastigheden
 Figure 17. Pressure drop when ventilating rye-grass, cocksfoot, meadow fescue and red fescue, timothy and meadow grass (small oblong seeds). Pressure drop illustrated as a function of air speed

Internationalt er der lavet studier over tryktab ved gennemblæsning af mange forskellige arter af afgrøder, herunder majs, ris, lupin, lucerne, rødkløver. I håndbogen ASAE Standards (American Society of Agricultural Engineers, 1998) er samlet en lang række resultater fra disse studier, og figur 18 viser grafisk et uddrag heraf. Værdierne er gældende for løst indlagte produkter, dvs. ikke pakkede eller specielt komprimerede afgrøder. Pakning eller komprimering kan øge tryktabet med indtil 50%. Som ved værdierne for danske afgrøder vist i figur 14-17 er tryktabet bestemt ved lod-

ret lufttransport op gennem afgrøden. Ved *vandret* lufttransport på tværs af et kornlag kan tryktabet være lidt lavere. I hvede og byg har forsøg vist 30 procent lavere tryktab ved *vandret* lufttransport (Kumar et. al., 1986). Forskellen kan skyldes måden, de enkelte kerner pakkes i forhold til hinanden.



Tryktab pr meter afgrødelag, Pa/m

Figur 18. Tryktab ved gennemblæsning af korn og frø (ASAE 1998). Diagrammet er gældende for løst lagrede produkter uden væsentligt indhold af urenheder. Pakning/komprimering af materialet i siloen kan resultere i en forøgelse af tryktabet (modtrykket) med indtil 50%
 Figure 18. Pressure drop when ventilating grain and seeds (ASAE 1998). The diagram gives values for loose filled (not packed) products without substantial content of impurities. Compression of the material in the silo may result in an increase of the pressure drop (counter pressure) by up to 50%

Blæser til tørringsanlæg

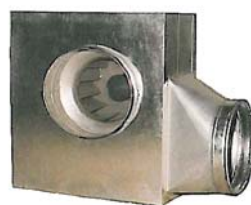
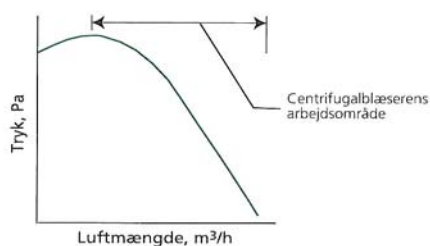
Til at levere den nødvendige luftmængde til tørreprocessen kræves en blæser. En god og korrekt dimensioneret blæser yder et tilstrækkeligt tryk til at presse tørreluft gennem anlæg og afgrøde, og giver den nødvendige luftmængde til at klare tørreopgaven. De sammenhørende værdier for tryk og luftmængde skal være indenfor blæserens optimale arbejdsområde, og blæseren skal have en høj virkningsgrad for at sikre lavest muligt energiforbrug.

For at vælge den rette blæser skal man kende den nødvendige luftmængde og det modtryk/tryktab, som skal overvindes, samt blæserens egenskaber.

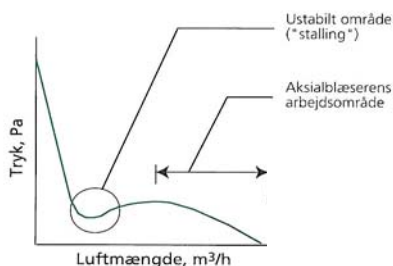
Blæsertype

Tørreblæsere opdeles i to hovedtyper, centrifugal- og aksialblæsere. Karakteristikken, dvs. sammenhæng mellem luftmængde og –tryk, er generelt forskellig for de to typer. Det er dog ikke muligt alene ud fra karakteristikken at klassificere blæsere, da karakteristikken kan ændres ved indbygning af ledeskovle, diffusor, ændret udformning af blæservinger eller skovle (Guul-Simonsen et al., 1999).

Centrifugalblæsere med blæserhjul med bagudbøjede vinger har ofte en forholdsvis stejl blæserkarakteristik. Dette gør blæseren velegnet til anlæg med varierende modtryk, eksempelvis lagertør-ringsanlæg, som anvendes til forskellige afgrøder og med forskellige laghøjder. Aksialblæsere er specielt velegnede til at yde en stor luftmængde ved moderat modtryk. Generelt er aksialblæsere mere følsomme for ændring i modtrykket end centrifugalblæsere. Figur 19 viser princippet for de to blæsertyper.



Centrifugalblæser



Aksialblæser

Figur 19. Typisk karakteristikforløb for blæser af centrifugal- og aksialtypen
Figure 19. Typical characteristics for centrifugal fans and axial flow fans

Nødvendig luftmængde

Luftmængden er afhængig af anlægstype og afgrødeart. Vejledende luftmængder pr ton afgrøde er vist i tabel 2.

Tabel 2. Vejledende luftmængde

Anlægs type	Specifik luftmængde, m ³ pr time pr tons		
	Korn	Raps og ærter	Græsfrø
Beluftsanlæg	20 ¹⁾ - 50		
Lagertøringsanlæg	150 - 500	300 - 500	1.000 - 1.600
Portionsanlæg	500 - 1.000		

¹⁾ Anbefalet til beluftning af korn med under 15% vandindhold. ISO standard anbefaling for europæiske lande (ISO 34/4/2 N125)

For at omregne til luftmængde i forhold til volumen skal afgrødens rumvægt benyttes, og en oversigt over standardværdier for en række afgrøder er vist i tabel 3 (Guul-Simonsen et al., 1999, Dansk Landbrugsrådgivning, Landscentret, 2008 og Christensen, 1991)

Tabel 3. Rumvægt af danske afgrøder

Afgrøde	Råvare, kg/m ³	Renvare, kg/m ³
Byg	-	670
Havre	-	500 - 530
Hvede	-	750 - 780
Rug	-	700 - 760
Raps	700	640 - 700
Ærter	800	780 - 840
Hestebønner	-	650 - 830
Kløverfrø	700	800 - 860
Hundegræs, engsvingel og rødsvingel	200	260 - 320
Rajgræs og rapgræs	200	330 - 375
Timothe	450	340 - 550
Kommen	-	470
Kartofler	-	790

Herefter kan den nødvendige luftmængde beregnes. Tages udgangspunkt i et lagertøringsanlæg med gulvareal på 10 x 7 meter, fyldt med byg indlagt i 2 meters højde og med en rumvægt på 670 kg/m³, specifik luftmængde på 250 m³ pr time pr ton, kan luftmængden (L) som blæseren skal yde, beregnes som:

$$L = \frac{7m \times 10m \times 2m \times 670kg / m^3 \times 250m^3 / time}{1000kg} = 23.450 m^3/time$$

L Luftmængde til tørring, m³/time

Modtryk

Det modtryk (tryktab), som blæseren skal overvinde, bestemmes først og fremmest af tykkelsen af det afgrødelag, luften skal presses igennem, og af luftens hastighed. Tryktabet i afgrøden findes ved

brug af figurene 14-18. Desuden forekommer der et tryktab i selve tørreanlæggets kanalsystem og ved overgangen fra tørreluftkanal til afgrøden. I et veldimensioneret lagertørningsanlæg vil dette tryktab udgøre 200-300 Pa.

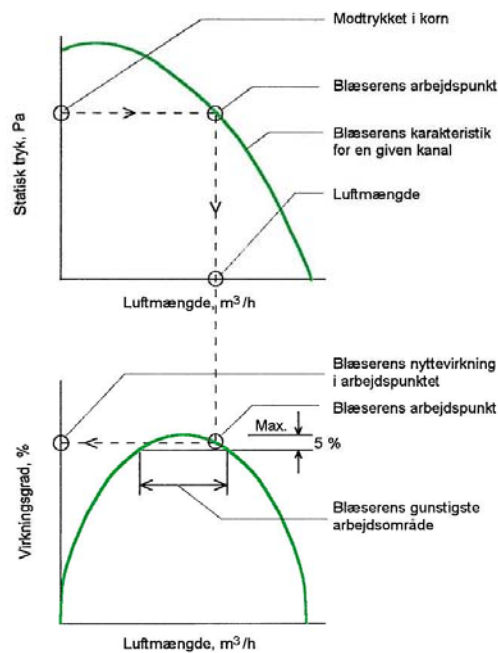
Valg af blæser

Blæserkarakteristikken viser forholdet mellem modtryk og luftmængde. Modtrykket opdeles i et statisk og et dynamisk tryk:

$$P_t = P_s + P_d \quad \text{hvor } P_d = \frac{1}{2} \rho v^2$$

P_t	Totaltryk, Pa
P_s	Statisk tryk, Pa
P_d	Dynamisk tryk, Pa
ρ	Luften massefylde, kg/m ³
v	Luftens hastighed, m/s

Det statiske tryk er trykket mod kanalsider og afgrødelag, og således trykket, som skal modsvare tryktabet i afgrøden, jf. figur 14-18. Det dynamiske tryk er trykket, som vedrører luftens bevægelse. Det betyder, at ændres det statiske tryk, f.eks. ved ændret afgrødelag eller anden kanaludformning, ændres også dynamisk tryk og luftmængde. I praksis kan det statiske tryk i en given kanal regnes som total tryk minus 0,6 gange kvadratet på lufthastigheden, angivet i m/s, i kanalen. Blæserkarakteristikens statiske tryk korrigeres til de aktuelle forhold, og arbejds punkt og tilhørende virkningsgrad for den aktuelle blæser kan fastlægges, se figur 20.



Figur 20. Modtrykkets skæring med karakteristikkurven angiver blæserens arbejds punkt, der er bestemmende for luftmængde og virkningsgrad (Gul-Simonsen et al., 1999)

Figure 20. Point of intersection for counter pressure and fan characteristics shows the operation point of the fan, and thereby air flow rate and efficiency (Gul-Simonsens et al. 1999)

Arbejds punktet bør være indenfor blæserens gunstigste arbejdsområde, dvs. hvor der opnås den bedste virkningsgrad. Gode blæsere har i det gunstigste arbejdsområde en virkningsgrad på 65 – 75%.

Lagring og overvågning

Køling af afgrøden er særligt vigtig lige efter høst. Den fysiologiske modning af frø og kerner er i slutfasen, men åndningsprocessen og aktivitet af tilknyttet mikrobiologisk aktivitet er stadig intensiv. Så længe afgrødens temperatur er højere end udeluftens temperatur er der meget lille risiko for kondensering eller opfugtning af afgrøden ved gennemblæsning med kold luft. Dette skyldes, at afgrøden varmer køleluften op og derved sænker den relative fugtighed i luften.

Under hvilke forhold, der kan ventileres og køles uden opfugtning af afgrøden, er beskrevet i en såkaldt Theimer tabel (Ryniecki, 2005). Det ses af tabellen, at når luften er koldere end afgrøden kan der uden risiko ventileres/køles i tørt korn med forholdsvis fugtig luft. Som eksempel fremgår det af tabellen, at når korn er 5 grader varmere end luften, kan der ved køling af en afgrøde med 14% vandindhold accepteres indtil 93% relativ fugtighed i luften uden risiko for opfugtning.

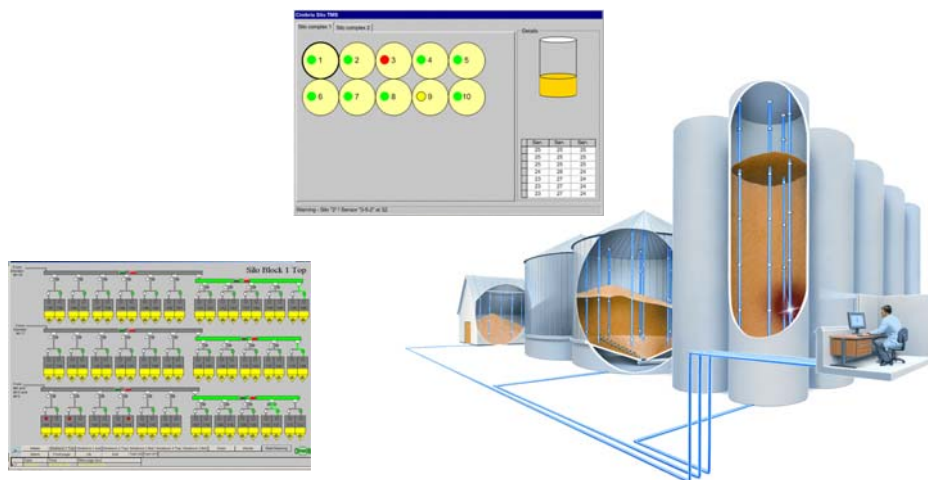
Tabel 4. Højest tilladelig relativ luftfugtighed for ventilation af korn og raps uden risiko for opfugtning af afgrøden

Temperaturforskel ¹⁾ mellem luft og afgrøde, °C	Afgrødens vandindhold, %											
	Korn	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	Raps		6,5		8		10		12		15	
-8		78	90									
-7		73	84	96								
-6		68	79	90	100							
-5		63	74	84	93							
-4		59	69	78	87	95						
-3		55	64	73	82	89	96					
-2		52	60	68	76	83	90	95	100			
-1		48	56	64	71	78	84	89	94	97	100	
0		45	53	60	67	73	79	83	88	91	93	95
1		42	49	56	63	68	74	78	82	85	87	89
2		40	46	53	59	64	69	73	77	80	82	83
3		37	43	49	55	60	65	69	72	75	77	78
4		35	41	46	52	56	61	64	68	70	72	73
5		33	38	44	48	53	57	60	63	66	67	69
6		31	36	41	45	50	53	57	60	62	63	65
7		29	34	38	43	47	50	53	56	58	59	61

¹⁾ Negativ værdi betyder, at luftens temperatur er lavere end afgrødens temperatur

Manuel overvågning, kontrol og styring af eventuel køling af den lagrede afgrøde er mulig, men i praksis besværlig og utilstrækkelig ved større anlæg. Kontrollen er meget vigtig, idet der også ved en lagerfast afgrøde er tale om levende organismer. En ændring/stigning i temperaturen kan være forårsaget af for høj fugtighed i afgrøden, svampevækst eller angreb af insekter. Derfor skal som minimum temperaturen kontrolleres løbende under lagringen.

På markedet findes en række fabrikater af kontrolsystemer baseret på måling af temperatur og i enkelte tilfælde fugtighed. Systemerne er med faste måleceller indbygget i siloanlægget, eventuelt suppleret med løse temperaturspyd, som placeres i afgrødedyngen. Figur 21 viser princippet i et lagerovervågningssystem, hvor der registreres temperatur og fyldningsgrad i de enkelte siloer.



Figur 21. Automatisk overvågning af temperatur og fyldningsniveau. Anlægget kan udover diverse alarmer styre køling/ventilering i de enkelte siloer på grundlag af forudindstillede temperaturdifferencer

Figure 21. Automatic monitoring of temperature and filling up level. In addition to various alarms, the plant is also able to monitor and control the cooling/ventilation in the individual silos on the basis of pre-set temperature values

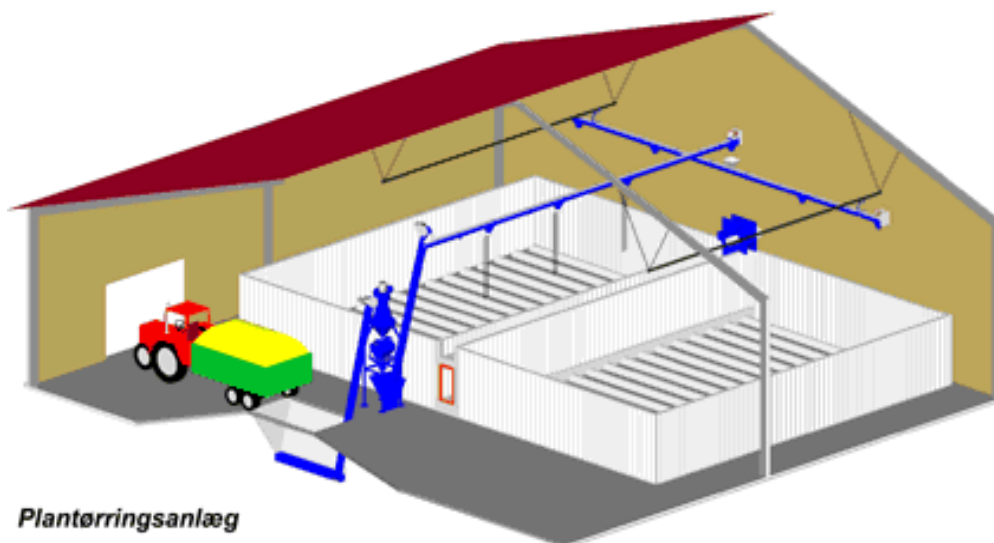
Ny teknik med relativt billige, trådløse sensorer vil med stor fordel kunne anvendes til måling og kontrol af afgrødens kvalitet under lagring. Trådløse sensorer vil kunne placeres vilkårligt og uafhængigt af den fysiske udformning af lagerfaciliteter.

Hovedtyper af tørringsanlæg

Der anvendes en række forskellige typer tørringsanlæg til korn og frø. Anlægstyperne har hver deres styrker og svagheder. Visse typer er kun egnet til korn, mens andre er mere alsidige og kan anvendes til en lang række forskellige afgrøder. Hovedtyperne er:

- Lagertørringsanlæg (plantørringsanlæg)
- Portionstørrerier
- Gennemløbstørrerier
- Tromletørrerier (højtemperaturtørring)

Lagertørringsanlæg



Lagertørringsanlæg (også kaldet plantørringsanlæg) har en række fordele. De har en stor indtagningskapacitet, de kan anvendes til tørring af både korn, raps, ærter, græsfrø samt en lang række specialafgrøder, de kan anvendes til efterfølgende køling og lagring af afgrøden og endelig er de af en forholdsvis enkel opbygning. Men forkert dimensionering eller forkert brug kan forårsage store tab i form af ødelagte afgrøder. Meget fugtige afgrøder kan være vanskelige og arbejdskrævende at håndtere i lagertørringsanlæg.

Karakteristisk for lagertørringsanlæg er, at samme silo anvendes til både tørring og lagring. Der sker ikke nogen blanding af afgrøden under eller efter tørringen, og det er derfor nødvendigt at sikre et lavt vandindhold overalt i siloen ved hjælp af selve tørreprocessen. U hensigtsmæssig og manglende styring af tørreprocessen fører til uensartet tørring. Ofte ses som resultat heraf et højt vandindhold i de øverste afgrødelag, mens afgrøden i siloens bund er meget tør. Fugtigt korn eller frø øverst i siloen kan føre til vækst af skadelige svampe, hvis afgrøden skal opbevares over længere tid, mens overtørring kræver et unødigt stort energiforbrug (Kristensen et al., 2003).

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.

For at udnytte luftens tørreevne skal blæsere og kanalsystem dimensioneres korrekt. Blæseren skal kunne yde et tilstrækkeligt tryk og en luftmængde, som passer til tørreopgaven, således at det rette forhold mellem afgrødemængde og tørreluft sikres, og luftens tørreevne udnyttes bedst muligt. For at undgå et unødigt strømforbrug skal blæserne have en høj nyttevirkningsgrad.

Kanaldimensioner

Den specifikke luftmængde i lagertøringsanlæg bør jf. tabel 2 være 150 - 500 m³/h pr tons korn og 1.000 – 1.600 m³/h pr tons frø. De højeste værdier er gældende for meget fugtige afgrøder. Til anlæg, hvor korn indlægges i 2-3 meters højde og vandprocenten er under 20 %, er en luftmængde svarende til 360 m³/h pr m² gulv passende. Det svarer til en lufthastighed på 0,1 m/s. Som tommelfingerregel er en lufthastighed på 0,1 m/s hensigtsmæssig, både ved anlæg til korn og frø.

For at sikre en ensartet luftfordeling i tørreriet bør der anvendes forholdsvis lave lufthastigheder i kanalerne. Dette opnås ved at vælge kanaler med stort tværsnitsareal. I hovedkanalen bør lufthastigheden ikke overstige 6 m/s. Yder blæseren eksempelvis 24.000 m³/h betyder det, at kanalens tværsnitsareal skal være mindst 1,1 m² $[(24.000 \text{ m}^3/\text{h}) / (3600\text{s} \times 6\text{m/s}) = 1,1\text{m}^2]$. Af praktiske årsager bør hovedkanalen i øvrigt altid vælges så stor, at det er muligt at gå oprejst derinde.

I sidekanalerne kan der tillades højere hastigheder, op til 10 m/s. Ved større hastigheder vil der være en væsentlig uensartet luftfordeling på langs af kanalerne, således at der kommer størst luftmængde længst væk fra hovedkanalen. Anvendes traditionelle rundbuekanaler med et tværsnitsareal på 900 cm², en luftmængde på 360 m³/h pr m² gulv og en kanalaftand på 1 meter, bliver den maksimale kanallængde 9 m $[(10\text{m/s} \times 0,09\text{m}^2 \times 3600\text{s}) / (360 \text{ m}^3/\text{h}) = 9 \text{ m}]$.

Tørreproces og styring af anlæg

Tørringen starter i siloens bund, hvor tørreluften afkøles og optager fugt svarende til ligevægtsvandindholdet. I takt med, at det nederste afgrødelag tørres, bevæger tørrezonen sig op gennem lagene, og ved afslutningen af tørringen vil den relative luftfugtighed i luften, som blæses ud af afgrøden, falde til værdien for ligevægtsvandindholdet for tør afgrøde. Ved tørring af korn og en temperatur på 15 °C vil afgangsluftens relative fugtighed således være 70%, når vandindholdet i det øverste kornlag er 15-16% (se figur 10).

Koldlufttørring

Ved at udnytte de perioder, hvor den relative luftfugtighed i udeluften er lav, er det muligt at tørre uden opvarmning af tørreluften. Blæseren kan her manuelt startes og stoppes afhængig af, hvornår ligevægtsforholdet mellem afgrødens 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 (Kristensen et al., 2003). I år med sen høst og ugunstige vejrforhold kan det være meget vanskeligt at få tørret afgrøden tilstrækkelig ned. Under danske klimaforhold forringes udeluftens tørreevne i løbet af efteråret på grund af faldende temperatur og generelt stigende relativ luftfugtighed. Tager tørringen lang tid, er der risiko for vækst af mugsvampe i den ikke tørrede afgrøde øverst i siloen. Risikoen reduceres dog på grund af kølingen via luftgennemblæsningen.

Varmetilsætning

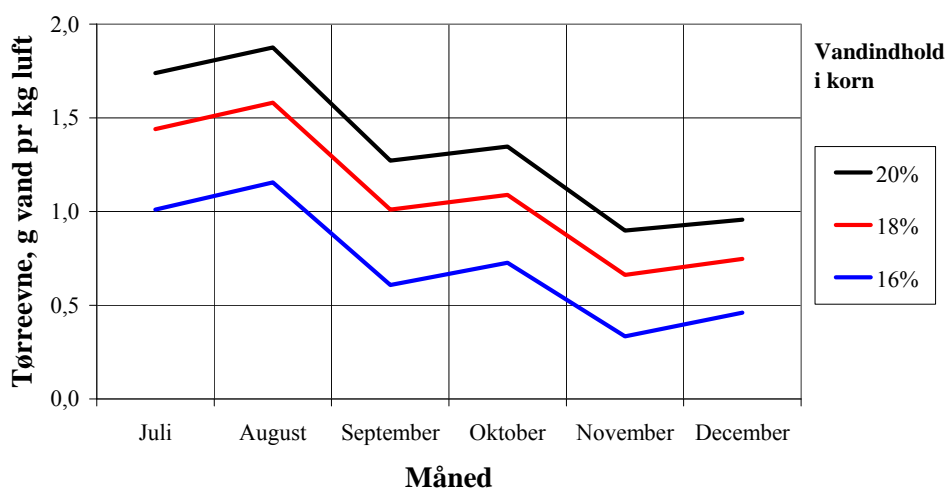
Ved anlæg med varmetilsætning er det muligt at nå det ønskede slutvandindhold uafhængigt af udeluftens fugtighed. Ved ukritisk opvarmning af tørreluften er der risiko for, at afgrøden i bunden af siloen overtørres, inden det øverst i siloen er tørret ned til et lagerfast vandindhold.

En opvarmning af luften med 1 °C vil sænke den relative luftfugtighed med ca. 5 procentenheder, se ix-diagrammet i figur 12. Er udeluftens relative fugtighed f.eks 90%, vil 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 luftfugtighed sænkes til det ønskede niveau. Varmekilden skal kunne opvarme luften ca. 5 °C for at sikre tørreevnen i de fugtige perioder. Selv ved varmetilsætning reduceres tørrekapaciteten i løbet af efteråret på grund af den generelt faldende temperatur. Figur 22 viser tørreevnen i perioden juli til december angivet som gram vand, der kan fjernes pr kg tørreluft (1 kg luft svarer til 1,2 m³ luft).

Luftens tørreevne

(Luften opvarmet 5 °C)

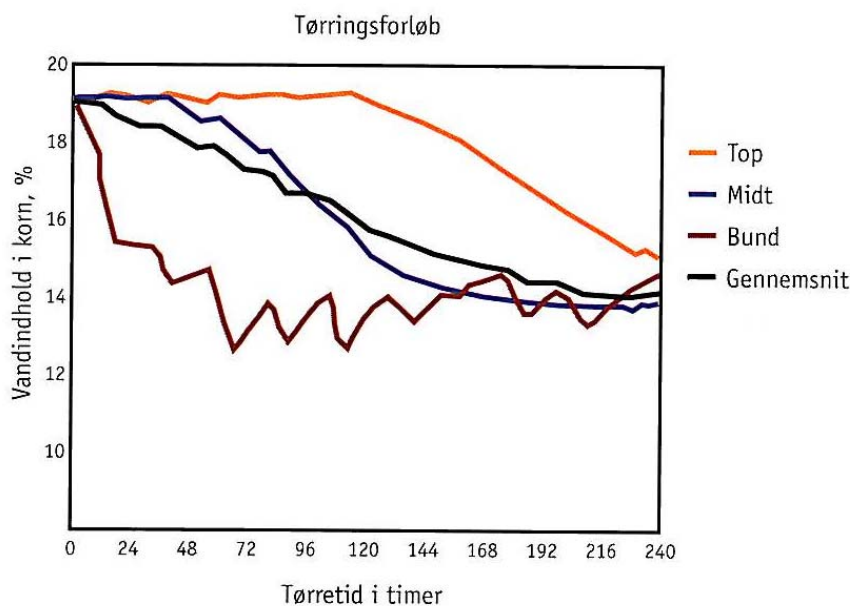


Figur 22. Luftens tørreevne ved tørring af korn. Den viste tørreevne er beregnet på grundlag af gennemsnitsværdier for vejret i Danmark (DRY) og ved en opvarmning på 5 °C (Kristensen et al., 2003)

Figure 22. The drying capacity of the air when drying grain. The illustrated drying capacity is based on average values for Danish weather conditions and at a 5 °C heating of the air (Kristensen et al., 2003)

Normalt 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 afgrøden. Her ved 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 opretholdes (pga. ekstremt fugtig udeluft eller for lille varmekilde), eller anlægget kan automatisk stoppes, når den relative fugtighed i afgangsluft fra kornet kommer

under en indstillet værdi, svarende til, at afgrøden er tør. Figur 23 viser et eksempel på tørringsforløbet i et lagertørringsanlæg, hvor der er anvendt hygrostatstyret varmetilsætning.



Figur 23. Tørringsforløb i korrekt dimensioneret lagertørringsanlæg med hygrostatstyret varmetilsætning og konstant blæserdrift. Tørring af byg lagret i 2,5 m kornlag. Tørringen startet 18. august, hvor kornets vandindhold var 19%

Figure 23. Drying process in a correctly dimensioned on-floor dryer with hydrostat controlled heat addition and ventilator in constant operation. Drying of barley stored in a 2.5 m grain layer. The drying process began on August 18 where the grain moisture content was 19%

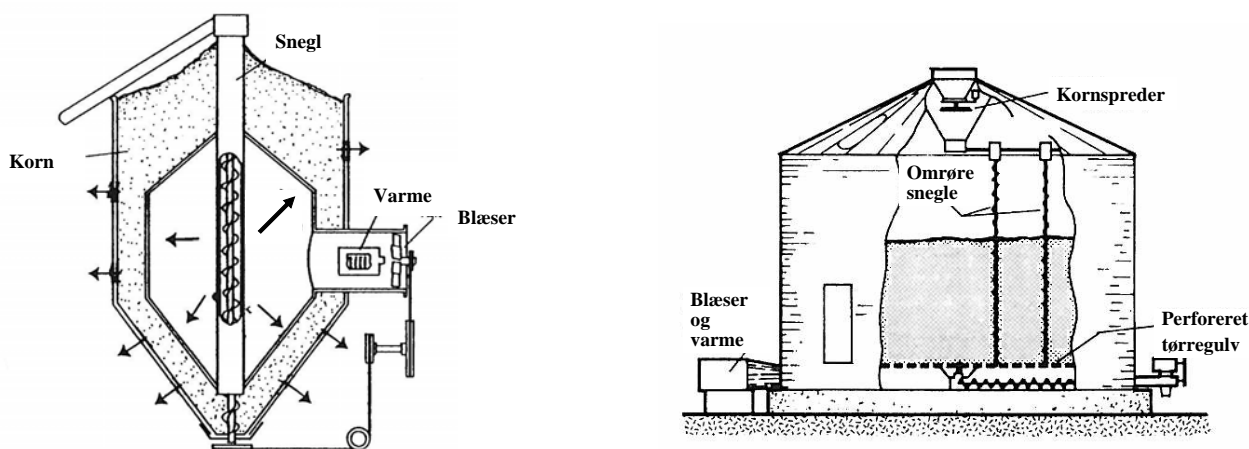
Køling

Efter tørring er det vigtigt at afgrøden køles, da både vandprocent og temperatur er afgørende for, om lagringen kan sikre kvaliteten, se figur 2-6. Som hovedregel bør der blæses med kold udeluft, når lufttemperaturen er 5 °C under temperaturen i afgrøden. Ved en luftmængde på den anbefalede værdi på 360 m³/h pr m² siloareal kan køletiden beregnes til ca. 3 timer pr. meter korn, der skal nedkøles.

Grundregler for brug af lagertørringsanlæg

- Tørringen startes straks efter høst
- For anlæg med hygrostatstyring 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 hygrostatindstilling på 80%
- I oktober/november tørres med konstant varmetilsætning
- Ved veldimensionerede anlæg kan der tilsættes svag varme fra tørringens start, uanset vandprocent (luft hastighed 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 afgangsluften er under ligevægtsvandindholdet for den ønskede vandprocent i afgrøden
- Der køles, når udetemperatur er 5 °C under afgrødens temperatur
- Køletiden er ca. 3 timer pr. meter korn ved nedkøling af korn til lufttemperaturen.

Portionstørreri



Portionstørrerier fås i mange forskellige udformninger og i vidt forskellige størrelser og kapaciteter. Fælles for anlæggene er, at et parti ad gangen fyldes i anlægget og nedtørres. Tørretiden varierer fra få timer til få dage.

Tørrelufttemperaturen er normalt 35 – 50 °C. Skal afgrødens spireevne bevares bør ikke anvendes en temperatur højere end 40 °C. Brug af højere temperatur vil øge tørringshastigheden, men også øge overtørring af afgrøden ved indblæsningen af tørreluft. Som afslutning på tørreprocessen køles afgrøden. Under kølingen udnyttes varmen i afgrøden til yderligere vandfordampning fra afgrøden. Køles korn, som har en temperatur på ca. 40 °C, kan vandindholdet reduceres 1-2 procentenheder ved køleprocessen (Friesen, 1980).

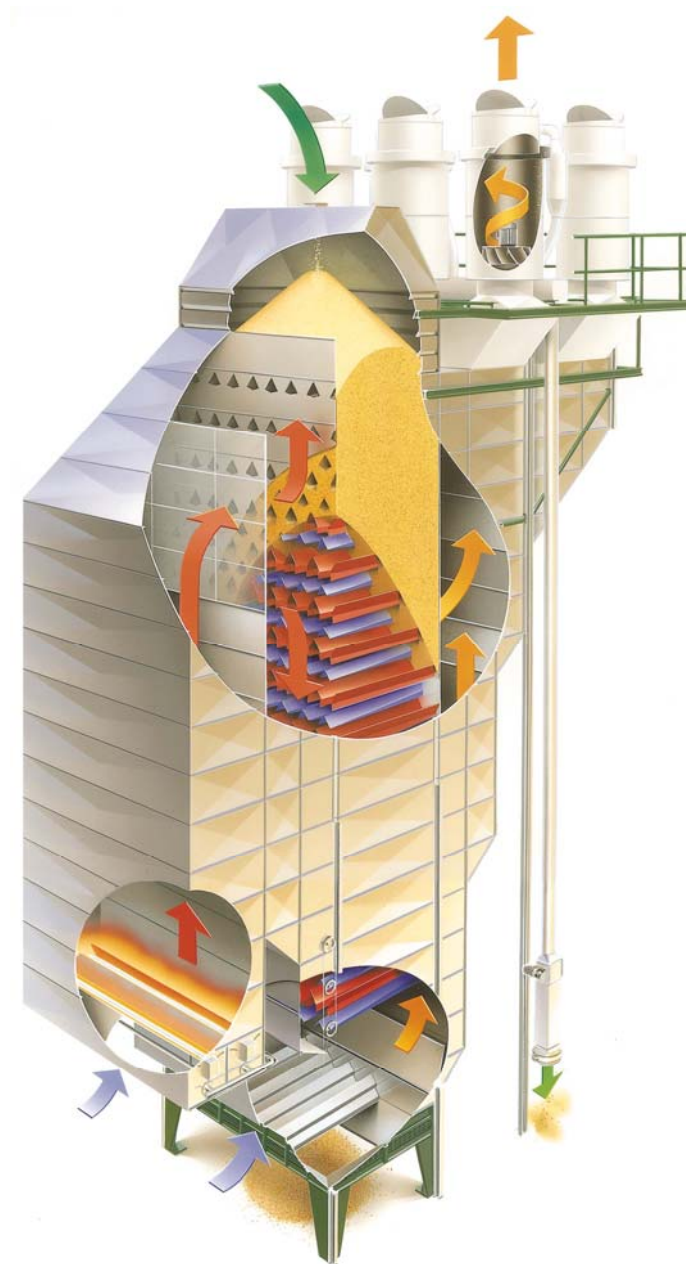
Mange portionsanlæg er forsynet med en eller anden form for omrøringsmekanisme, som løbende opblander afgrøden. Uden løbende opblanding vil tørringen blive meget uens, således at afgrøden tæt på indblæsningen af tørreluft bliver meget tør, mens afgrøden ved udblæsningen ikke tørres. Der vil her være behov for en grundig opblanding af afgrøden efter endt tørring.

Ved anlæg med omrøring kan anvendes højere tørrelufttemperatur uden at afgrøden beskadiges, da vandfordampningen fra de enkelte frø bevirker, at afgrødens temperatur holdes nede.

I runde stålsiloer med omrøresnegle kan tørres korn i lagtykkelser på indtil 4 m, mens der ved tørring af oliefrø som raps anbefales lagtykkelse på maks. 1,25 m. Denne type siloer er konstrueret til kornafgrøder, men enkelte landmænd har tørret græsfrø i dem. Tørreprocessen forløb tilfredsstillende, men fyldning og specielt tømning og rengøring var besværlig.

I stålsiloer anvendt til tørring er der risiko for kondensering på vægge og loft, specielt ved tørring i koldt vejr, og det er derfor vigtig med tilstrækkelig udluftning. Udluftningens åbningsareal bør være mindst 3% af siloens gulvareal (Friesen, 1980).

Gennemløbstørreri



I gennemløbstørrerier anvendes tørringsluft med høj temperatur. Anlæggene er opbygget således, at der kontinuerligt fyldes korn eller frø i anlægget, som så langsomt passerer gennem først en tørrezone, hvor afgrøden gennemblæses med opvarmet luft, og derefter gennem en kølezone, hvor afgrøden gennemblæses med uopvarmet udeluft.

Der anvendes normalt en tørrelufttemperatur på 60 – 100 °C. Tørrelufttemperaturen har betydning for anlæggets kapacitet og afgrødens kvalitet, herunder spirevitalitet. En lufttemperatur over ca. 65 °C vil ved de fleste gennemløbstørrerier beskadige spireevnen i korn, idet kornets temperatur her ved overstiger 43 – 48 °C, som er den øvre grænse for bevarelse af spireevne ved længere tids på-

virkning. Anvendes kornet udelukkende til foderbrug, kan tørrelufttemperaturen med fordel øges til 80 - 100°C, hvorved der opnås en større kapacitet.

Efter tørring i et gennemløbstørreri vil afgrødens temperatur være forholdsvis høj, idet temperaturen altid vil være mindst 5°C over køleluftens temperatur. Gennemløbstørrerier kan derfor med fordel kombineres med lagersiloer, hvor der er mulighed for senere beluftning og køling af afgrøden i perioder med lav udetemperatur.

Fordele ved gennemløbstørrerier er en ensartet nedtørring af afgrøden og mulighed for en stor kapacitet. Desuden kan anlægstypen fås med en høj automatiseringsgrad. Generelt er gennemløbsanlæg mindre egnet til tørring af græsfrø på grund af risiko for brodannelse i tørreskakten.

Tromletørreri

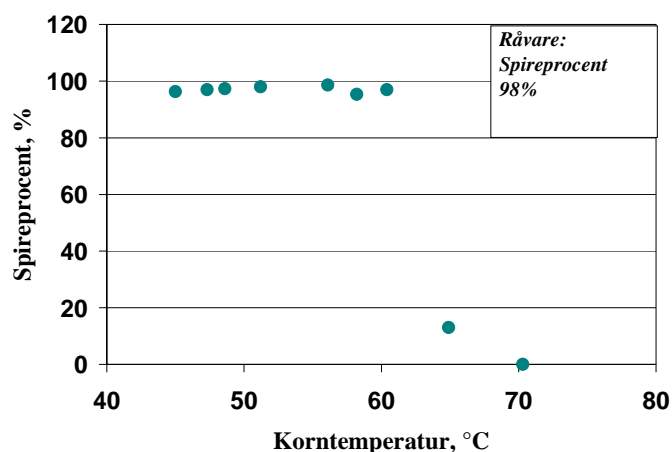


Tromletørring er et alternativ til de traditionelle korntørringssystemer. Karakteristisk for tromletørring er en meget høj tørrelufttemperatur, kombineret med en kort behandlingstid. I tromletørrerier anvendes tørreluft opvarmet til 150 – 1.000 °C og behandlingstider på 3 – 15 minutter.

Den høje behandlingstemperatur kan markant reducere svampevækst på kerneoverfladen og vil dermed kunne hindre produktion af sundhedsskadelige mykotoksiner i kornet.

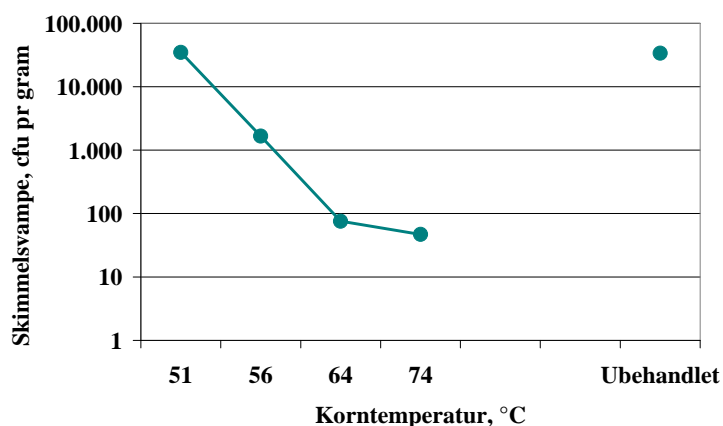
Tromletørringsprincippet er i sig selv ikke nyt, men metoden har tidligere ikke været anvendt til højværdiafgrøder som maltbyg, brødkorn og såsæd. Ny forskning har imidlertid vist, at det ved brug af nye præcise styringsmetoder er muligt at anvende metoden uden at beskadige spireevne, bagekvalitet m.m. (Kristensen et al., 2005).

Blot nogle få minutter med kraftig varmpåvirkning er nok til at dræbe svampe, som ellers kan udvikle mycotoksiner som gør kornet skadeligt for både mennesker og dyr. Ved optimal kombination af tørringstemperatur og behandlingstid er det samtidig muligt at bevare og i nogle tilfælde forbedre kornets øvrige kvalitetsegenskaber som f.eks. spirevitalitet. I brødkorn er ved forsøg opnået reduktion på 99% i indhold af gærsvampe og 98 % i skimmelsvampe uden forringelse i bagekvalitet (Kristensen et al., 2005). Effekten blev opnået ved en maks. korntemperatur på ca. 70 °C og en tørrelufttemperatur på ca. 400 °C.



Figur 24. Spireevnen i korn kan bevares ved en korntemperatur på indtil ca. 65 °C. Afhængig af kornets vandindhold og behandlingstiden svarer det til en tørrelufttemperatur på 200-400 °C

Figure 24. The germination capacity of the grain may be maintained at a grain temperature of up to app. 65 °C. Depending on the grain moisture content and drying time, this corresponds to a drying air temperature of 200-400 °C



Figur 25. Reduktion i skimmelsvampe på rug ved behandling i tromletørreri
Figure 25. Reduction of mould fungus on barley when treated in a drum dryer

Tromletørrerier anvendes primært til korn, og kan også anvendes til raps, ærter og lignende, men er mindre egnet til græsfrø.

Ved tørring af raps påvirkes olieindholdet lidt af behandlingstemperaturen, således at olieprocenten beregnet i forhold til tørstof bliver reduceret lidt ved høje behandlingstemperaturer. Forsøg har således vist en reduktion i olieindhold på en procentenhed ved en maksimal frøtemperatur på 70 °C.

Afgrøden udsættes for både mekanisk påvirkning og en varmepåvirkning ved tørring i et tromletørreri. Dette kan være uhensigtsmæssigt ved tørring af ærter. Ærter skades let, og forsøg har vist, at mængden af knækkede og halve ærter øges. Den målte beskadigelse er dog uden praktisk betydning, når ærterne skal anvendes til foder.

Tromletørring er en meget effektiv metode til bekæmpelse af angreb af skadelige insekter som eksempelvis kornsnudebiller. Ved forsøg med tørring af inficeret korn var der ingen overlevende kornsnudebiller, larver eller æg, når der blev anvendt en tørrelufttemperatur på 250 °C eller derover.

Udendørs stålsiloer

I Danmark er der de seneste år blevet etableret mange korntørrings- og opbevaringsanlæg bestående af runde, udendørs stålsiloer. Denne type anlæg har i mange år været meget anvendt i Nordamerika, og teknikken er veldokumenteret (Høy, 2002).



Figur 26. Stålsiloer findes i mange størrelser og typer. De anvendes som enkeltsiloer til lagring, evt. med beluftning, samt i store siloanlæg, hvor en eller flere siloer er med tørring (koldluft eller med høj temperatur), mens andre anvendes til lagring

Figure 26. Steel bins exist in various sizes and types. They are applied as individual silos for storage, if desired with ventilation, and in large silo plants where one or more silos are with drying (ambient air or heated air), while others are used for storage

Stålsiloerne findes i mange størrelser og varianter. Der kan være tale om siloer udelukkende til opbevaring, eller siloer med beluftning, siloer til koldlufttørring svarende til princippet i lagertørringsanlæg, siloer til portionstørring med eller uden omrøring af korn eller anlæg med kontinuerlig tørring. Siloerne til beluftning og tørring er opbygget med perforeret gulv, hvorfra luften via en blæser trykkes op gennem afgrøden. Siloer med perforeret tørrebund og omrøring kræver ved koldlufttørring en blæserkapacitet på 200-250 m³ pr. time pr. m² gulv svarende til luftmængden for lagertørringsanlæg, se tabel 2.

Stålsiloer med tørrebund, blæser og varmetilsætning kan også anvendes til kontinuerlig tørring. Som ved portionsanlæggene sker tørringen ved, at den opvarmede tørreluft blæses op gennem afgrøden. Tørringen vil starte i bundlaget, og i takt med, at afgrøden tørres, tømmes bundlaget løbende ud af siloen ved hjælp af en fejesnegl, som skraber den tørrede afgrøde over tørregulvet ind til siloens midte, hvorfra den med snegle transporteres videre ud af siloen.

Stålsiloerne anvendes ofte af svineproducenter med egen foderfremstilling. Med denne type anlæg fås en forholdsvis billig løsning med effektiv fyldning og tømning (stor kapacitet og lille arbejdsforbrug), samt tørring og lagring på niveau med de traditionelle tørrings- og lageranlæg. For at anlægget kan fungere optimalt er det vigtigt, at transportanlægget til både indlægning og udtagning har tilstrækkelig kapacitet. En mobilsnegl er en enkel, men pladskrævende løsning. Rigtig placering af siloanlægget er vigtig, og der skal tages hensyn til funktion, transport og udvidelsesmuligheder. Udendørs stålsiloer med omrøringen kan anvendes til blanding af forskellige slags korn, således at landmanden eksempelvis kan lave en byg-hvede blanding i siloen.

Referencer

- American Society of Agricultural Engineers, 1998. Standards Engineering Practices Data. ASAE Standard D245.5 OCT95
- Brooker, D. B.; Bakker-Arkema F. W.; Hall, C. V. 1974. Drying Cereal Grains. The AVI Publishing Company, INC. Westport, Connecticut
- C.N.E.E.M.A. 1972. La Conservation des grains par la ventilation. Bulletin no. 210.
- Christensen, B. 1991. Danske afgrøders beluftningstekniske parametre. Rapport nr. 91-2-3. Bioteknologisk Institut.
- Christensen, C. M.; Kaufmann, H.H. 1969. Grain Storage. University of Minnesota Press. Minneapolis
- Dansk Landbrugsrådgivning, Landscentret. 2008. Håndbog til driftsplanlægning. Landbrugsforlaget
- Friesen, O.H. 1980. Heated-air Grain Dryers. Manitoba Department of Agriculture, Manitoba Canada.
- Guul-Simonsen, F., Kristensen, E.F. 1999. Blæser til korntørring, Grøn Viden, markbrug nr.203. Danmarks JordbrugsForskning.
- Hall, D.M. 1970. Handling and storage of food grains in tropical and subtropical areas. Food and Agricultural Organization of the United Nations, FAO Agricultural Development Paper no. 90
- Henderson S.M., Perry R.L., Young J.H. 1997. Principles of Process Engineering, (4th ed.), American Society of Agricultural Engineers, New York.
- Høy, J. J., 2002. Stålsiloer til korn. Landbrugets Rådgivningscenter, Landskontoret for Bygninger og Maskiner
- ISO. 1998. Cereal and cereal products – Determination of moisture content. ISO 712. International Standard Organisation. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- ISO 34/4/2 N 125, International Organization for Standardization, Geneva
- Kristensen, E.F., (red.). 2004 Energibesparelser ved optimeret drift af gårdkorntørringsanlæg. Intern rapport nr. 192. Danmarks JordbrugsForskning.
- Kristensen E F; Elmholt S; Thrane U, 2005. High-temperature treatment for efficient drying of bread rye and reduction of fungal contaminants. Biosystems Engineering, 92(2), 183-195
- Kristensen, E.F., Gundtoft, S. 2003. Tørring af korn i lagertørringsanlæg, Grøn Viden, markbrug nr.282. Danmarks JordbrugsForskning.
- Kumar A., Muir W. E. 1986. Airflow resistance of wheat and barley affected by airflow direction, filling method and dockage. Transactions of the ASAE no. 29 (5)
- Nellist M. E., 1998. Bulk storage drying in theory and practice. J. Royal Agric. Soc. England
- Pabis S., Jayas D. S., Cenkowski S., 1998. Grain Drying: Theory and Practice. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Ryniecki A., 2005. Drying and Cooling Grain in Bulk – Handbook (Part 1). Mr Info, Poznań, Poland

TABLES

Table 1. Values for calculation of the seed-air equilibrium humidity in accordance with the modified "Henderson equation" (American Society of Agricultural Engineers, 1998)

Crop	Equation constants ($RH = 1 - \exp(-Ax(T+C)x(MC_D)^B)$)		
	A	B	C
Maize kernels	6.6612×10^{-5}	1.9677	42.143
Rice (long grain)	4.1276×10^{-5}	2.1191	49.828
Rice (brown rice/short-grain)	3.2301×10^{-5}	2.2482	34.267
Sunflower	3.1×10^{-4}	1.7459	66.603
Flax seed	1.76×10^{-4}	1.9054	56.228

Table 2. Recommended air volume

Plant type	Specific air volume, m ³ per hour per tons		
	Grain	Rape seed and peas	Grass seed
Ventilation plant	20 ¹⁾ - 50		
On-floor drying plant	150 - 500	300 - 500	1.000 – 1.600
Batch drying plant	500 – 1.000		

¹⁾ Recommended for ventilation of grain with a moisture content below 15%. ISO standard recommendation for European countries (ISO 34/4/2 N125)

Table 3. Bulk density of Danish crops

Crop	Direct from a combine harvester, kg/m ³	Clean product, kg/m ³
Barley	-	670
Oats	-	500 - 530
Wheat	-	750 - 780
Rye	-	700 - 760
Rape	700	640 - 700
Peas	800	780 - 840
Horse beans	-	650 - 830
Clover seed	700	800 - 860
Cocksfoot, meadow fescue and red fescue	200	260 - 320
Rye-grass and meadow grass	200	330 - 375
Timothy	450	340 - 550
Common caraway	-	470
Potatoes	-	790

Table 4. Maximum relative air humidity for ventilation of grain and rape seed without risk of humidifying the seeds

Difference in temperature between air and seed, °C	Moisture content of the seed, %											
	Grain	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	Rape seed		6,5		8		10		12		15	
-8		78	90									
-7		73	84	96								
-6		68	79	90	100							
-5		63	74	84	93							
-4		59	69	78	87	95						
-3		55	64	73	82	89	96					
-2		52	60	68	76	83	90	95	100			
-1		48	56	64	71	78	84	89	94	97	100	
0		45	53	60	67	73	79	83	88	91	93	95
1		42	49	56	63	68	74	78	82	85	87	89
2		40	46	53	59	64	69	73	77	80	82	83
3		37	43	49	55	60	65	69	72	75	77	78
4		35	41	46	52	56	61	64	68	70	72	73
5		33	38	44	48	53	57	60	63	66	67	69
6		31	36	41	45	50	53	57	60	62	63	65
7		29	34	38	43	47	50	53	56	58	59	61

¹⁾ A negative value means that the air temperature is lower than the temperature of the seed

RESUME

Korn og frøafgrøder repræsenterer store værdier for landbrug og samfund. For at sikre afgrødernes kvalitet er der behov for effektive anlæg til tørring samt gode lagringsfaciliteter. Ifølge WHO/FAO går ca. 10 procent af verdens kornproduktion tabt på grund af mangelfuld tørring og dårlige lagringsforhold.

Denne rapport giver en oversigt over de grundlæggende principper for tørring af korn og frø, samt en beskrivelse af, hvilke forhold der er bestemmende for, hvornår afgrøden kan lagres uden risiko for beskadigelse på grund af angreb af svampe og skadedyr. Desuden gennemgås funktionsprincippet og nogle dimensioneringsregler for traditionelle tørringsanlæg anvendt under danske forhold.

Rapporten er baseret på viden opbygget ved Institut for Biosystemteknologi, Århus Universitet, gennem forsknings- og udviklingsprojekter indenfor området korn- og frøteknologi, suppleret med viden fra den internationale litteratur om emnet.

Læs om forskningen, uddannelserne og andre aktiviteter på Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet, Aarhus Universitet på www.agrsci.au.dk, hvorfra du også kan downloade fakultetets publikationer og abonnere på det ugentlige nyhedsbrev