

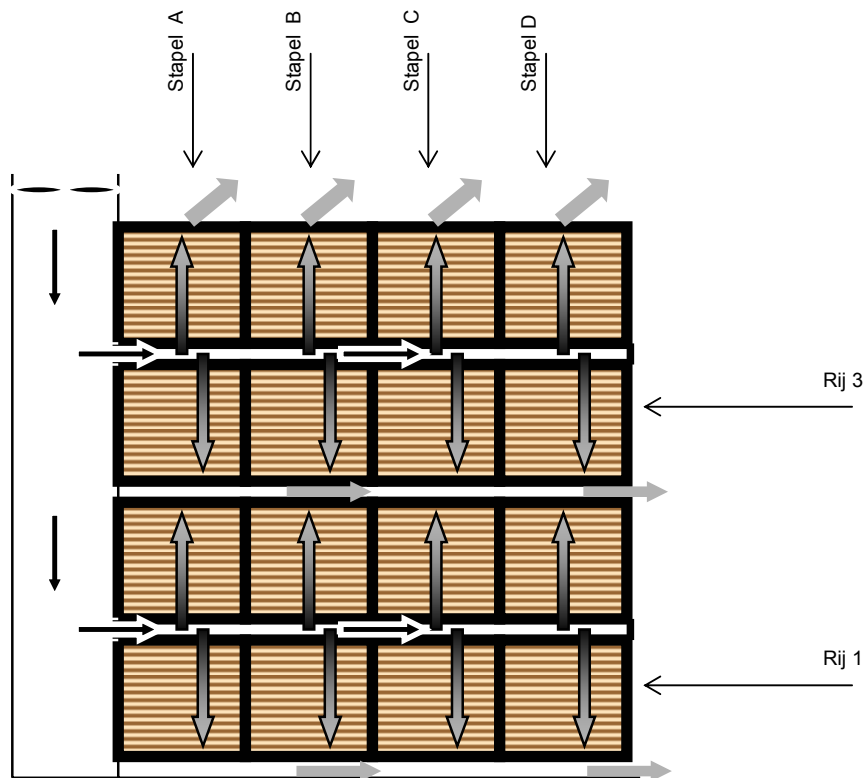


Energiezuinig drogen van bloembollen en ontvochtigen van drooglucht

IMAG project 54202

NOVEM 348219 9208

Eindverslag



Mei 2002
Aangepast november 2002

G.P.A. Bot
W.K.P. van Loon
J.C. Campen

**Inhoud:**

	Blz.
Samenvatting	3
1 Inleiding	4
2 Achtergrondinformatie	4
3 Gevolgde werkwijze	5
4 Drogen	
4.1 Eenvoudig droogmodel	5
4.2 Afwijking eenvoudig droogmodel	8
4.3 Metingen van het droogverloop	9
4.3.1 Metingen 1999 aan één kist	9
4.3.2 Metingen aan verschillende kuubskisten (seizoen 2000)	16
5 Luchtstroming	18
6 Warmteterugwinning	19
7 Algemene conclusies	19
Bijlage 1: Voorbeeld ter illustratie eenvoudige droogmodel	21

Samenvatting:

Het droogproces van bloembollen (tulpen) is modelmatig en experimenteel onderzocht. Het laagste energiegebruik treedt op bij droging met buitenlucht maar dit vraagt ook de langste droogtijd. Het hangt van de cultivar af of dit verantwoord is. Een kortere droogtijd wordt verkregen bij voorverwarmen, hierdoor wordt echter meer energie gebruikt.

Bij de in de praktijk gebruikelijke droogwanden treedt inhomogene droging op. Deze wordt vooral veroorzaakt door een niet gelijkmatige doorstroming van de verschillende kisten in de kistenstapeling voor de droogwand. Door de langere droogtijd van de langzaam drogende kisten blijven deze te lang vochtig terwijl de sneller drogende kisten lang worden blootgesteld aan warme drooglucht. Beide aspecten hebben een negatieve invloed op de kwaliteit. Verbetering van de homogeniteit van de doorstroming zal de droogpotentieel van de drooglucht beter benutten en de totale droogtijd verkorten waardoor zowel met als zonder bijverwarming van de drooglucht energie wordt bespaard.

Om de stroming door de kistenstapeling nader te bestuderen is gebruik gemaakt van computational fluid dynamics (CFD). Hiermee kan het complexe stromingsproces modelmatig worden berekend. Dit model is met experimenten gevalideerd. Vervolgens is het model gebruikt om te bepalen hoe de homogeniteit van de stroming kan worden verbeterd en hoe drukverliezen kunnen worden verkleind. Dit modelonderzoek is verricht voor zowel het onderzoek naar energiezuinige bewaring als naar energiezuinige droging. Uit de berekeningen blijkt dat de homogeniteit van de stroming met redelijk eenvoudige maatregelen sterk kan worden verbeterd. Verder kunnen drukverliezen in de droogwand worden verkleind waardoor ventilatorenergie wordt bespaard. De voorgestelde maatregelen zijn in de conclusies weergegeven.

Verder bleek dat de energiebesparing door warmteterugwinning in principe mogelijk is maar niet realiseerbaar door de korte gebruiktijd van de drooginstallaties.

1 Inleiding

De eerste doelstelling van het project Energiezuinig drogen van bloembollen is het verbeteren van de energie-efficiëntie van het drogen van bollen zowel van het droogproces zelf als van de op te wekken luchtstroming. Verbetering van het droogproces richt zich op inzicht en modellering van het droogproces en op een meer homogene droging waardoor de droogtijd kan worden verkort zodat zowel energiebesparing als kwaliteitsverbetering wordt bereikt. Daarnaast worden de energiebesparende potenties van het ontvochtigen van drooglucht verkend. De resultaten van de studie kunnen worden toegepast op de verbetering van droogwanden en op andere processen waarbij drogen en ontvochtigen aan de orde zijn (b.v. heetstook hyacint).

2 Achtergrondinformatie

Bloembollen worden veelal na de oogst met of zonder tarra gedroogd. Ook na onderdompeling of besproeiing, b.v. ter ontsmetting of voor een betere pelbaarheid, moet worden gedroogd. Hiervoor zijn droogwanden ontwikkeld die op brede schaal in combinatie met kuubskisten in de praktijk worden toegepast. In principe zijn dit wanden met openingen waardoor met behulp van een of meerdere ventilatoren een luchtstroom wordt opgewekt en druk wordt opgebouwd. Voor de openingen wordt een stapeling van kuubskisten met de te drogen bollen geplaatst. Het is de bedoeling dat de beluchting, ofwel de luchtstroom, door de verschillende kisten gelijk is zodat de droging in de verschillende kisten gelijkmatig plaats vindt. Er zijn sterke aanwijzingen dat de druk niet gelijkmatig is zodat niet alle kisten gelijk drogen met als consequentie dat de droogtijd moet worden aangepast op de langzaamst drogende kist. Hierdoor wordt de droogtijd verlengd zodat de bollen in het nablijvende deel van de stapeling lang nat blijven en de snelst gedroogde bollen lang worden blootgesteld aan een hoge luchttemperatuur waardoor sterke nadroging plaats vindt. Daarnaast kan in één kist verschil in stapelingsdichtheid optreden door het fenomeen stortkegel of door het optreden van dode hoeken. Zodoende zal de luchtstroming om de bollen in een kist niet gelijkmatig zijn en kan achterblijven van de droging in de stortkegel of dode hoeken optreden. Ook nu moet weer gewacht worden op de laatst gedroogde bollen met de al eerder beschreven problemen. Het droogprobleem is dus sterk gekoppeld met een stromingsprobleem. Om de energie-efficiëntie van het geheel te verbeteren is een combinatie van praktijkgericht en fundamenteel onderzoek nodig. Fundamentele kennis is nodig over zowel het droogproces gekoppeld met de stroming rondom en door een poreuze stapeling, zoals die van bloembollen. Door deze kennis kan gericht gezocht worden naar verbetering van de drukverdeling en stromingsverdeling tussen de verschillende kisten en in de individuele kisten. De praktijkkennis is nodig om de eisen te bepalen die aan het droogtraject worden gesteld uit het oogpunt van behoud van bolkwaliteit en over de inpassing van het droogproces in de bedrijfsvoering.

DLV heeft kennis en –ervaring vanuit haar adviesfunctie over de praktische aspecten van het drogen van bloembollen. LBO proefbedrijf De Noord heeft kennis over de inpassing van het droogproces in de bedrijfsvoering. Zij past de droogproeven in tijdens de oogst. IMAG-DLO heeft fundamentele kennis over het droogproces, de

luchtstroming en energiezuinige ontvochtiging die in eerdere onderzoeksprojecten over drogen van agrarische producten en energiezuinige ontvochtiging is verzameld.

3 Gevolgde werkwijze

De eerste fase van het onderzoek is gericht op analyse van droging in huidige drooginstallaties. Hiertoe is bij een algemeen type droogwand, waar al redelijke resultaten mee worden behaald, het droogproces gevolgd op basis van metingen. Daartoe zijn in het seizoen 1999 en 2000 metingen verricht van het droogproces van de bloembolsoort tulp. Daarbij is in het rooiseizoen 1999 in een kuubskist de inhomogeniteit van het droogproces in één kist nagegaan door deze kist halverwege het droogtraject te bemonsteren op vochtgehalte in afhankelijkheid van de locatie in de kist. Zodoende kan het effect van de z.g. stortkegel worden nagegaan. Daarnaast is in het rooiseizoen 2000 het droogproces in verschillende kisten voor een droogwand nagegaan. Ook zijn uitgebreide metingen uitgevoerd aan de luchtstroming door kuubskisten bollen en door gestapelde kuubskisten voor een droogwand zodat de stromingskarakteristieken konden worden vastgesteld. Om het effect van veranderingen aan de droogwand en/of de kisten te kunnen nagaan is een geavanceerd model voor de berekening van de luchtstroming door de droogwand en de kistenstapeling geschreven. Hiervoor is Computational Fluid Dynamics (CFD) toegepast, een modelleertechniek voor luchtstromingen die ontwikkeld is voor de lucht- en ruimtevaartindustrie maar nu brede toepassing heeft gevonden.

In samenhang met de luchtstroming is een eenvoudig droogmodel opgezet en de metingen aan het droogproces zijn vergeleken met de hiermee gegenereerde uitkomsten. De metingen in combinatie met de modeluitkomsten zijn gebruikt om voorstellen ter verbetering van de droogwanden te ontwikkelen. Daarnaast is vastgesteld hoe of het systeem kan worden geoptimaliseerd en of energiezuinige ontvochtiging met warmteterugwinning en toepassing van een warmtepomp een optie is bij het energiezuiniger maken van de energiekringloop.

4 Drogen

4.1 Eenvoudig droogmodel

Bij het drogen van agrarische producten kan de droogperiode in enkele fasen worden onderscheiden.

1. In de eerste periode wordt het "aanhangend" of "vrij" water gedroogd. Dit is het water dat niet intern aan het product is gebonden en dat verdampt vanaf het productoppervlak met de verzadigingsdampconcentratie die hoort bij de producttemperatuur. Deze zal zich in dit droogtraject instellen op de natte bol temperatuur. In deze periode wordt de droogsnelheid begrensd door het vochtopnemend vermogen van de drooglucht. Bij constante condities van de drooglucht wordt dus in deze fase met constante droogsnelheid gedroogd. Deze fase zal met veel drooglucht moeten worden doorlopen. Daarvoor is de beluchtingcapaciteit van droogwanden dan ook hoog.
2. Als het ongebonden water vanaf het oppervlak is verdampt moet het in het product gebonden water vanuit het inwendige van het product naar het oppervlak diffunderen en daar verdampen. In de tweede fase wordt dus een deel van het gebonden water gedroogd tot een gewenst niveau. Gedurende deze fase wordt de droging begrensd



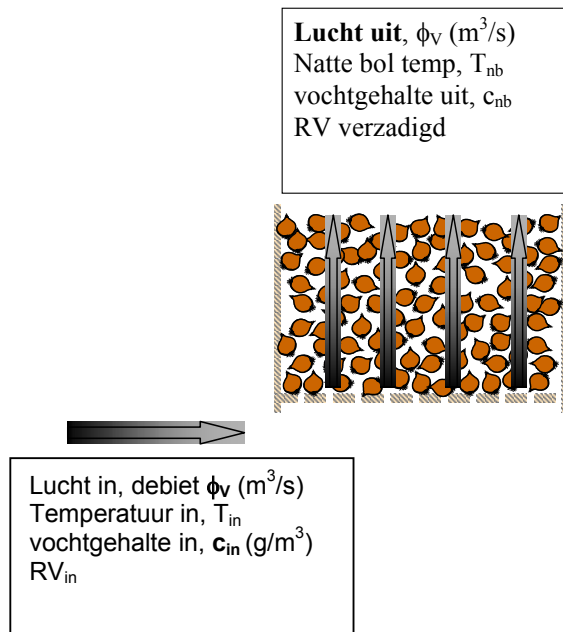
Energiezuinig drogen van bloembollen

door het langzame diffusieproces in het inwendige van het product en door de dampweerstand van de bolhuid. Omdat het product langzaam indroogt zal het steeds moeilijker worden het gebonden water te verdampen zodat de droogsnelheid afneemt. Om de doordroging aan het oppervlak niet te snel te laten verlopen zal de hoeveelheid drooglucht beperkt moeten worden.

3. Er zal tussen bovengenoemde fasen een overgangperiode van nadroging plaats moeten hebben als overgang tussen de vrij water verdamping en de doordroging. Over deze overgangperiode is nog weinig bekend.

Sub 1:

Bij de aanvang van het droogproces wordt het aan de buitenkant van het product bevindende niet gebonden water verdampt. Er zal zich in het algemeen snel een thermische evenwichtssituatie instellen waarbij de temperatuur van het nog natte product en de uitgaande luchttemperatuur zich instellen op de natte bol temperatuur.



De uittredende lucht is bij goede bevochtiging verzadigd en heeft de natte boltemperatuur aangenomen. Deze natte bol temperatuur wordt bepaald door de temperatuur en de luchtvochtigheid van de intredende lucht. De door de drooglucht opgenomen hoeveelheid vocht is dus gelijk aan het luchtdebiet maal het vochtverschil tussen uitgaande en binnentredende lucht. Als bekend is hoeveel vocht moet worden gedroogd kan de benodigde hoeveelheid lucht worden uitgerekend en het luchtdebiet bepaald dan dus de droogtijd. Dit kan eenvoudig in een model worden omgezet:

De vochtopname van de ventilatielucht (kg/s) bepaalt de wateronttrekking van het product ϕ_m (kg/s) en dus de snelheid van drogen van de bloembollen (kg/s) via:

$$\phi_m = \phi_v (c_{nb} - c_{in})$$

met ϕ_v het luchtdebiet (m³/s), c_{nb} en c_{in} de waterdampconcentraties in respectievelijk de uitgaande lucht (verzadigingsconcentratie bij de natte bol temperatuur) en die in de

Energiezuinig drogen van bloembollen

ingaaende lucht (kg/m^3). Omdat de natte bol temperatuur bepaald wordt door de temperatuur en RV van de ingaaende lucht en dus van tevoren berekend kan worden uit het Mollierdiagram of de psychrometerformule, kan uit de ingangscondities al de droogtijd voor het vrije water worden geschat. Uiteraard moet dan bekend zijn hoeveel water moet worden teruggedroogd. Bij verwarmen van de ingangslucht neemt de natte bol temperatuur toe en dus het vocht opnemend vermogen van de drooglucht. Verkorten van de droogtijd voor het vrije water kan dus door verwarmen van de ingangslucht of door verhogen van het ventilatiedebiet. In bijlage 1 wordt dit aan een **voorbeeld** geïllustreerd.

Zoals uit het voorbeeld blijkt kost drogen met buitenlucht alleen ventilatorenergie en heeft het een hoog energierendement. Het vocht opnemend vermogen van de buitenlucht is in het algemeen echter laag zodat dan een lange droogtijd wordt verkregen. Als dit acceptabel is voor de productkwaliteit kan het energierendement nog verbeteren als voor de ventilatie minder energie nodig is. Verwarmen van de buitenlucht verhoogt de natte boltemperatuur en dus het vocht opnemend vermogen van de ventilatielucht, waardoor bij meer verwarmen een steeds kortere droogtijd wordt gerealiseerd. Een kortere periode kost minder ventilatorenergie maar voorverwarmen kost verwarmingsenergie waardoor het totale energiegebruik stijgt. Per eenheid droging wordt dus steeds meer energie gebruikt. Ook verhogen van het ventilatordebiet is tot zekere grenzen mogelijk maar de druk zal ongeveer lineair tot kwadratisch en het ventilatorvermogen zal wat sterker dan kwadratisch met het debiet toenemen. Als het debiet zou worden verdubbeld tot 2000 m^3 lucht per kuubskist per uur dan zou in het voorbeeld de droogtijd halveren tot ca 10 uur maar zou het ventilatorvermogen vijf tot zes maal zo hoog worden zodat over de halve periode het primaire energiegebruik met een factor 2 tot 3 zal toenemen tot ca 30 MJ. Hierbij wordt niet in beschouwing genomen dat een veel krachtiger en dus duurdere ventilator moet worden geïnstalleerd en dat de drukken in het systeem hoog worden waardoor andere, duurdere constructies nodig zijn.

Met het eenvoudige droogmodel kan dus een gemiddelde droogtijd worden berekend. De huidige droogwanden zijn computergestuurd en de computer berekend dan ook tot welke temperatuur de lucht moet worden verwarmd om een redelijke delta c (vocht opnemend vermogen) te bereiken met een redelijke droogtijd.

Sub 2

In de fase van gebonden water verdamping is de verdamping laag. Het verdampingsproces wordt bepaald door de inwendige diffusie van vocht en de dampdoorgang door de bolhuid. Het is dus een langzaam proces dat niet beperkt wordt door het vocht opnemend vermogen van de drooglucht. Er kan daardoor dan ook een laag debiet worden aangehouden en verwarming van de drooglucht heeft alleen zin als deze zeer vochtig is.

Sub 3:

Het einde van de vrij water verdamping wordt in het geval van homogene droging aangegeven door het stijgen van de temperatuur van de uittredende drooglucht. De verdamping is niet hoog genoeg meer om afkoeling tot de natte boltemperatuur te veroorzaken. Voor het voorkomen van ziekteproblemen zal nog wel een gedeelte van het inwendige water moeten worden gedroogd. Daarom is een overgangperiode van nadroging aan de droogwand nodig waarin dit toch redelijk snel gebeurt. De vereisten voor het nadrogen zijn niet goed bekend en waren ook geen onderdeel van het hier gerapporteerde project. De duur van de nadroogperiode wordt nu in de praktijk intuïtief

vastgesteld door te voelen wanneer de bollen "handdroog" zijn. Nader onderzoek kan een nauwkeuriger vaststelling van de nadroogcondities en nadroogperiode mogelijk maken. Hierbij is een goed evenwicht nodig van de snelheid van drogen aan de buitenkant en de aanvoer van het inwendige water naar het productoppervlak. Bij te snel drogen aan de buitenkant ten opzichte van de aanvoer van inwendig water zal te snelle droging van de huid optreden met daardoor scheurvorming. Door een optimale combinatie te kiezen van luchtdebiet en vochtdeficit in de drooglucht kan de droogsnelheid worden aangepast. Hiernaar is in dit project geen nader onderzoek verricht maar verdient in de nabije toekomst in het kader van productkwaliteit wel aandacht.

4.2 Afwijking eenvoudig droogmodel

Het eenvoudige droogmodel gaat uit van een homogene beluchting door zowel één kist als door de verschillende kisten die voor de droogwand staan. Het is echter gebleken dat deze beluchting niet homogeen is zodat ook de droging niet homogeen zal zijn.

Bij een niet homogene droging door verschillen in beluchting tussen kisten of in één kist kunnen de volgende problemen worden verwacht:

- Bij een lagere lokale beluchting dan de gemiddelde zal een lokaal langere droogtijd nodig zijn zodat de bollen lokaal langer nat zullen blijven met daardoor een hoger ziekterisico
- Bij een hogere lokale beluchting dan de gemiddelde zal daar een kortere droogtijd nodig zijn, zodat de bollen daarna blootgesteld worden aan een hoge beluchting met een relatief lage RV. Daardoor wordt de nadroging versneld zodat extra uitdroging kan optreden met scheurvorming in de huid.

Door een inhomogene droging neemt de droogtijd dus toe wat meer ventilatorenergie kost. Bovendien wordt het vocht opnemend vermogen van de drooglucht niet optimaal benut omdat een deel door reeds droge bollen wordt gevoerd. Ook dit niet goed benutten van het vocht opnemend vermogen kost meer energie. De uitgangstemperatuur zal dan eerder dan bij homogene droging vanaf de natte boltemperatuur gaan stijgen.

Dus een betere verdeling van de beluchting zal allereerst **de kwaliteit verbeteren** en er zal bovendien **energie** mee worden **bespaard**.

Om de effecten van inhomogene beluchting na te gaan is de droging voor de droogwand gevolgd. Om de oorzaken van inhomogene beluchting na te gaan is de luchtstroming door een kistenstapeling experimenteel bepaald en modelmatig doorgerekend. Het probleem van inhomogene beluchting treedt zowel op bij droging (met hoge luchtdebieten van ca. 1000 m³ lucht per uur per m³ product) als bij bewaring (met lage luchtdebieten van ca. 100 m³ lucht per uur per m³ product). De oorzaken van inhomogene beluchting en het opheffen hiervan zijn zowel in het kader van het project drogen als het project bewaren onderzocht. Daarom is dit aspect in het eindrapport van het project bewaren besproken (Modelmatig onderzoek naar energiezuiniger bewaarcellen, onderdeel D van Energiezuiniger klimaatbeheersing bij bewaring van tulpenbollen, eindverslag Imag project 54201). Er worden daarin aanbevelingen gedaan om met minder ventilatorenergie een betere homogeniteit van de beluchting te verkrijgen. Hierdoor wordt de productkwaliteit verhoogd en het energiegebruik verlaagd. Omdat deze conclusies onverkort gelden voor de beluchting bij drogen zal hierop in de hoofdstukken 5, Luchtstroming, en 7, Algemene conclusies, worden teruggekomen..

4.3 Metingen van het droogverloop

Om het inzicht in het droogproces te vergroten zijn er in het oogstseizoen van 1999 en 2000 intensieve metingen op proefbedrijf De Noord gedaan. Proefbedrijf de Noord is gespecialiseerd in de teelt van bloembollen op zandgrond. Er werd steeds daags voor de droogexperimenten een partij tulpenbollen geoogst, onder goede oogstcondities. De bollen kwamen daarbij relatief schoon en droog van het land. De bollen gingen over een zeef en loofresten e.d. werden er uit gehaald. In 1999 werd het droogverloop in één kist gemeten en in 2000 het verloop over verschillende kisten

4.3.1 Metingen 1999 aan één kist

Bij de oogst werden 16 kuubskisten gevuld die voor de droogwand werden gezet: 2 breed, 4 hoog en 2 diep. De droogwand werd aangezet om 16.00 uur om gedurende de nacht te drogen. Van de ingaande buitenlucht werd enkele malen de droge **T_{bu,d}** en natte boltemperatuur **T_{bu,n}** gemeten. De gebeurde ook met de uitgaande lucht (zie tabel 1) Het was niet mogelijk de droogluchttemperatuur na verwarming te meten maar deze kan gedurende de eerste fase van vrij water verdamping worden berekend.

Tabel 1: droge en natte boltemperatuur van in- en uitgaande luchtstroom

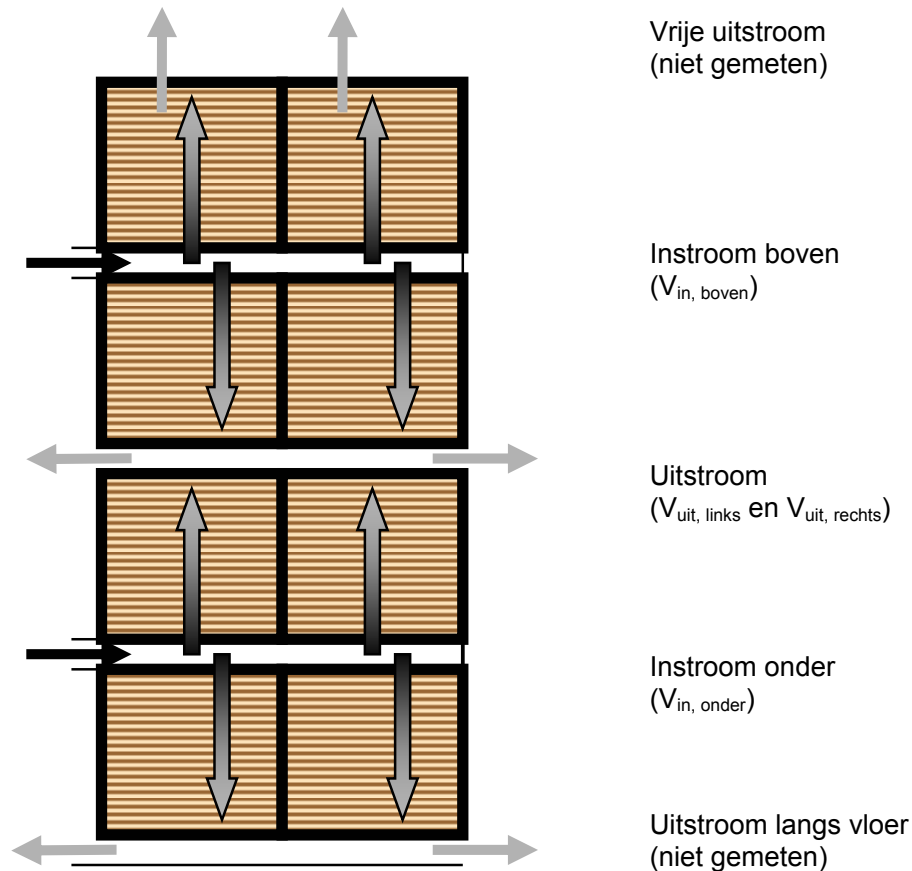
Tijd	<i>T_{bu,d}</i> [°C]	<i>T_{bu,n}</i> [°C]	<i>T_{uit,d}</i> [°C]	<i>T_{uit,n}</i> [°C]	<i>Abs dampverschil</i> [g/kg]
16.30	20,8	17,7	19,6	19,4	-11.3+14.1= 2.8
17.45	18,5	17,2	19,3	19,1	-11.7+13.8= 2.1
19.40	17,5	16,2	18,8	18,6	-11.0+13.2= 2.2
24 - 8.45	18,4	15,8	21	17,8	-10.1+11.4= 1.3

's Avonds was het verschil tussen de droge en natte boltemperatuur in de uitgaande lucht steeds 0,2 °C, zodat deze lucht dus steeds ongeveer verzadigd was met waterdamp (98%). Vanuit het eenvoudige droogmodel kan ingezien worden dat de droging in de eerste fase was van de vrij water verdamping waarbij de uittredende lucht de natte boltemperatuur heeft en vrijwel verzadigd is. De volgende ochtend was het verschil tussen droge en natte boltemperatuur van de uitgaande lucht 3,2 °C, hetgeen een RV van ongeveer 73 % betekent. Omdat de uitgaande luchttemperatuur steeds (behalve bij de eerste meting) hoger ligt dan de ingaande en vrijwel verzadigd is, is het duidelijk dat de lucht in de droogwand wordt verwarmd. Om 16.30 is er nog warme, relatief droge buitenlucht aanwezig die ook meer vocht opneemt dan is ingesteld. De droogkast regelt de temperatuur zodat een vaste hoeveelheid vocht opgenomen kan worden. Er is echter wel een groot verschil in ingesteld vochtverschil (was 7 g/kg) en waargenomen vochtverschil (ca. 2,2 g/kg) Dit grote verschil wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de plaats waar de regelcomputer de ingaande buitenlucht meet: aan de zuidgevel op 4,5 m hoogte. De ingaande buitenlucht treedt echter op ongeveer 2 m hoogte in op de tegenoverliggende gevel. Wellicht dat ook de temperatuur van de ingangslucht begrensd was. De ingangstemperatuur kan worden teruggerekend op 26.4 °C om 16u30 en op 25.0 °C om 17u45 en 19u40. Na 24u is de droging in de nadroogfase. Vanuit de vochtopname kan worden berekend dat de lucht is opgewarmd

Energiezuinig drogen van bloembollen

tot ca 24 0 °C. Het is duidelijk dat het drogen in dit stadium moeilijker is geworden en dat het echt "vrije water" gemiddeld al verdampt is.

Vervolgens zijn metingen verricht aan de stromingskarakteristieken van de lucht met name aan het debiet (luchtsnelheid maal doorstroomd oppervlak) en het drukverlies. De gemeten luchtsnelheden staan in Tabel 2; de meetlokatie is terug te vinden in Fig. 1.



Figuur 1. Zijaanzicht kuubskisten voor dubbellaags beluchting. De droogwand bevindt zich links van de kisten. De beide instroomopeningen zijn aan de rechterzijde afgesloten. De stroomrichting door de kisten is aangegeven. De witte stukken tussen de kisten zijn de palletbodems, die als luchtaan- of -afvoer dienen.

In principe worden overal ongeveer even grote snelheden verwacht. Dit klopt ongeveer als beide instroom of beide uitstroomopeningen met elkaar worden vergeleken. Het is echter opmerkelijk dat de uitstroomsnelheid een factor 2.5 keer zo laag is als de instroomsnelheid. Zoals te zien is in Figuur 1, is de middelste uitstroomopening de afvoer voor twee rijen kisten.

Wat ook te zien is in Figuur 1, is dat aan de wandzijde het afvoerkanaal een tweede uitstroomopening heeft, zodat de gemeten luchtsnelheid overeenkomt met de afvoer van één rij kisten. De bovenste rij heeft een vrije afvoer en de onderste rij heeft

Energiezuinig drogen van bloembollen

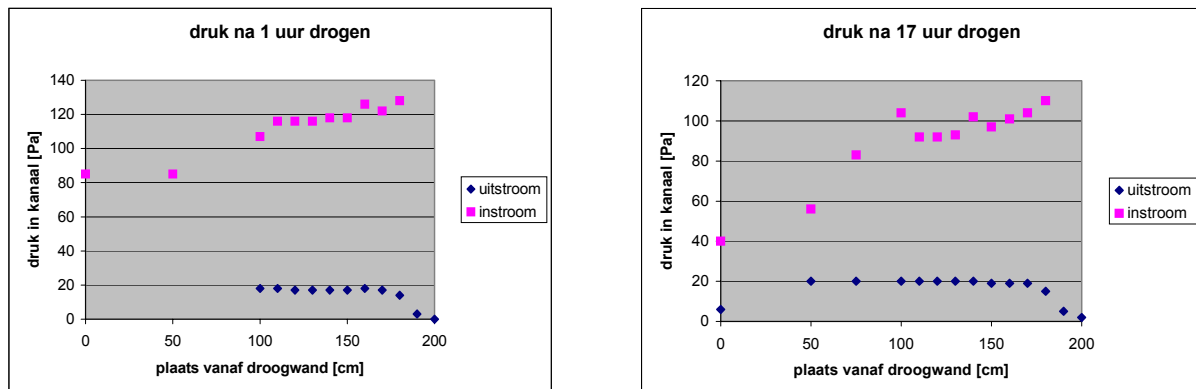
een afvoerkanaal voor zichzelf. Hierdoor is het te verwachten dat de gemeten luchtstroom iets kleiner is dan de helft van de invoerluchtstroom (die immers voor twee rijen kisten is).

Het relatief kleine verschil in luchtsnelheid tussen $V_{in, \text{ boven}}$ en $V_{in, \text{ onder}}$ kan verklaard worden uit de statische drukopbouw in de droogwand zelf. De lucht stroomt van onder naar boven langs de instroomopeningen. Hierdoor zal boven in de droogwand een iets grotere druk heersen dan onderin, zodat hier ook de luchtsnelheid groter is. Het verschil tussen $V_{uit, \text{ links}}$ en $V_{uit, \text{ rechts}}$ wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de verschillende stromingsweerstand in de kisten zelf die niet allen geheel gevuld waren.

Tabel 2: Luchtsnelheden van in- en uitgaande luchtstroom, voor plaats zie Fig. 1

Tijd	Vinboven [m/s]	Vinonder [m/s]	Vuitlinks [m/s]	Vuitrechts [m/s]
16.30	11,7	11,4	4,2	4,9
19.40	11,7	11,4		5,0
24+8.45	12,8	11,9	4,5	5,1

De gemeten drukopbouw is te zien in Figuur 2.



Figuur 2. Drukopbouw in instroomkanaal onder en zeer geringe drukverandering in middelste uitstroomkanaal na 1 uur drogen (17.00 uur) en 17 uur drogen (8.45 uur + 24).

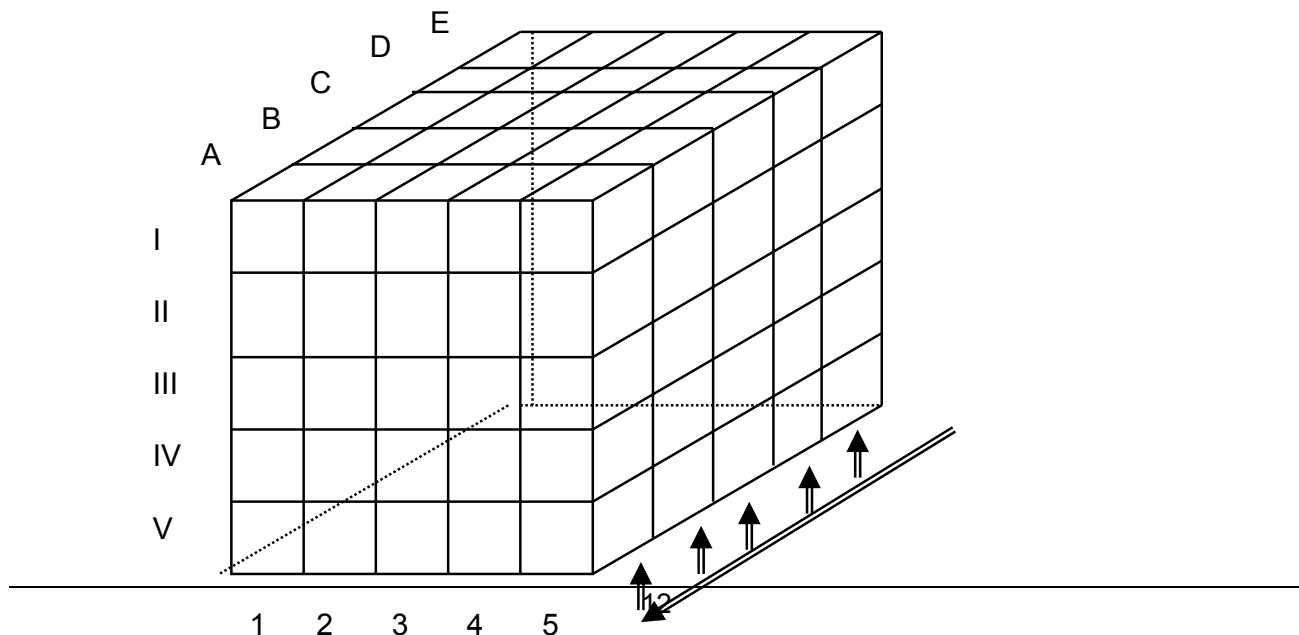
Voor beide gevallen is er een drukopbouw te zien in het instroomkanaal. Na één uur drogen neemt de druk toe van ongeveer 80 Pa bij de drukwand naar 120 Pa bij het eind van het kanaal. Na 17 uur drogen bedragen deze drukken respectievelijk ongeveer 40 Pa en 110 Pa. In de buurt van 100 cm treedt er een vreemd drukverloop op. Dit is de plaats waar de dwarsbalken van de palletbodem zich bevinden. Op deze plaats zullen wervels ontwikkelen, waardoor extra wrijving ontstaat. Het drukverloop in het uitstroomkanaal verloopt redelijk vlak. Dat betekent dat de wrijvingsverliezen in het kanaal gering zijn. De lage druk op 0 m na 17 uur van 5 Pa laat zien dat er ook aan de zijde van de droogwand een uitstroomopening aanwezig is. De hogere drukopbouw na

korte tijd drogen duidt erop dat de lucht van de natte bollen een grotere wrijvingsweerstand ondervindt dan van de droge bollen. Dit wordt bevestigd door de gemeten luchtsnelheden in tabel 2: de luchtsnelheid neemt voor alle vier de gevallen toe gedurende het droogproces.

Metingen aan droogfront

Een volgende stap is het bestuderen van het droogproces in een kist. Er was uit ervaring bekend dat hier 12 tot 24 uur voor nodig is. Na ongeveer vier uur moet dus voor een kist met beter dan gemiddelde beluchting al een redelijk deel van het aanhangende water gedroogd zijn. Besloten werd de kist met de hoogste beluchting door te meten. Uit tabel 2 is af te leiden, dat er meer lucht het bovenste instroomkanaal in gaat, dan in de onderste. De uitstroomweerstand is het geringst in de bovenste laag kisten, dus moet een van de vier bovenste kisten genomen worden. Door de drukopbouw in het instroomkanaal (zie Figuur 2) is het duidelijk, dat door de kisten het verst van de wand de grootste luchthoeveelheid stroomt. En tenslotte staat in tabel 2 dat de rechterluchtstroom groter is dan de linkerluchtstroom. Dus de kist, die in figuur 1 rechtsboven is weergegeven, is nader bestudeerd. Om 20.00 uur, na vier uur drogen, werd deze kist van de droogwand gehaald. De inhoud werd in gedachten verdeeld over 125 deelvolumes: 5 lagen met 5 keer 5 rijen. Elk deelvolume werd zo goed mogelijk bij elkaar geraapt en in een net gedaan. Het resultaat was 125 netten met bollen met een massa van $4,4 \pm 0,8$ kg. De netten werden allemaal gewogen en daarna weer in een kuubskist gedaan. (Dit had het effect dat bollen die eerst bovenin de kist zaten onderin terecht kwamen en vice versa). Een kleine twee uur later stond de kist weer in de stapel om verder te drogen.

De volgende ochtend werd de kist weer van de droogwand gehaald en werd het gewicht van de 125 netten met bollen weer bepaald. De bollen hadden dus eigenlijk geen 17 uur maar 15 uur gedroogd. Ze waren echter toch ongeveer goed droog. De lokatie van het net heeft drie coördinaten zie Figuur 3: laag I (boven) t/m laag V (onder); rij A (ver van droogwand) t/m rij E (nabij droogwand) en rij 1 (links) t/m rij 5 (rechts)



Energiezuinig drogen van bloembollen

Figuur 3. Nummering van de deelvolumes.

De relatieve vochtverliezen zijn uit de meetgegevens bepaald. Omdat het te verwachten is dat in de gemeten periode de onderste laag meer droogt dan de bovenste, zijn ook meteen de gemiddelde vochtverliezen per laag uitgerekend (met bijbehorende spreiding). Ook is gekeken of er nog verdere ordening plaatsvond. Per rij van 5 is steeds het gemiddelde vochtverlies met bijbehorende spreiding uitgerekend. Deze zijn weergegeven in tabel 3 en 4. In tabel 3 zijn de groepen samengesteld uit 5 deelvolumes die verschillende afstand tot de droogwand hebben. In tabel 4 zijn de deelvolumes waarover gemiddeld is even ver van de droogwand gesitueerd. De gemiddelden van gemiddelde waarden zijn de gemiddelden per laag (25 deelvolumes); Deze getallen zijn in beide tabellen natuurlijk gelijk. De gemiddelden van de spreiding is natuurlijk niet gelijk. Deze waarden zijn voor tabel 4 veel lager dan voor tabel 3. Dat betekent dat het veel zinvoller is te middelen als de deelvolumes dezelfde afstand tot de wand hebben.

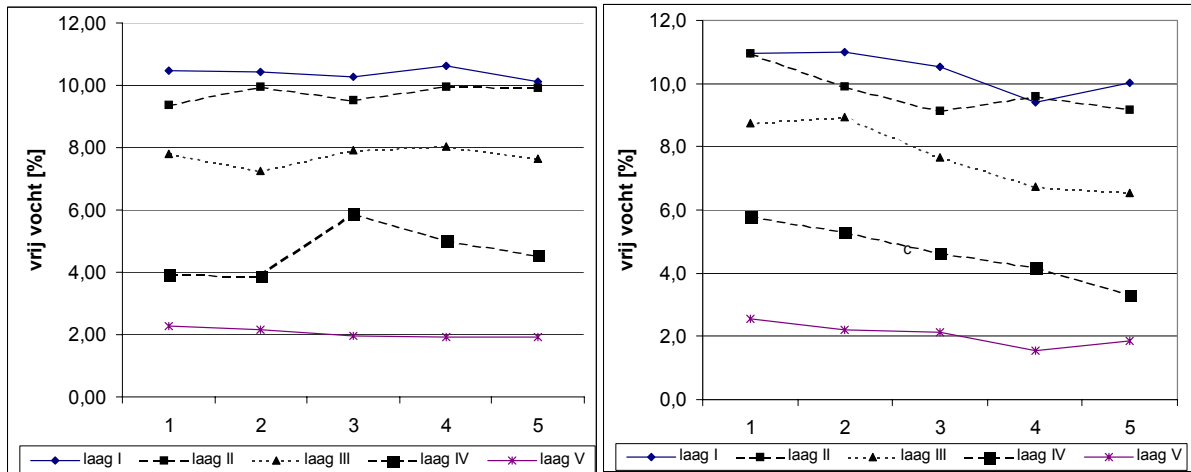
Tabel 3. Gemiddelde en Spreiding per rij van 5 deelvolumes met verschillende afstand tot droogwand.

Gemiddeld van rij	1	2	3	4	5	Gemiddeld
laag I	10,5	10,4	10,3	10,6	10,1	10,4
laag II	9,4	10,0	9,5	10,0	9,9	9,8
laag III	7,8	7,2	7,9	8,0	7,7	7,7
laag IV	3,9	3,9	5,9	5,0	4,6	4,6
laag V	2,3	2,2	2,0	1,9	1,9	2,1
Spreiding van rij						
laag I	0,4	0,9	0,9	0,7	0,6	0,7
laag II	0,9	1,0	0,9	0,7	0,9	0,9
laag III	0,8	1,1	2,0	1,5	1,1	1,3
laag IV	0,7	0,8	1,5	1,0	1,6	1,1
laag V	0,4	0,7	0,7	0,9	1,0	0,8

Tabel 4. Gemiddelde en Spreiding per rij van 5 deelvolumes met dezelfde afstand tot droogwand.

Gemiddeld van rij	A	B	C	D	E	Gemiddeld
laag I	10,0	9,4	10,5	11,0	11,0	10,4
laag II	9,2	9,6	9,1	9,9	11,0	9,8
laag III	6,6	6,7	7,7	8,9	8,8	7,7
laag IV	3,3	4,2	4,7	5,3	5,8	4,6
laag V	1,8	1,5	2,1	2,2	2,5	2,1
Spreiding van rij	A	B	C	D	E	Gemiddeld
laag I	0,4	0,3	0,1	0,3	0,3	0,3
laag II	0,3	0,4	0,5	0,9	0,4	0,5
laag III	0,7	1,1	0,6	1,1	0,6	0,8
laag IV	1,0	0,9	0,8	1,4	1,2	1,1
laag V	0,8	0,6	0,9	0,6	0,6	0,7

Een zelfde beeld komt naar voren uit figuur 4. De linkerhelft is de grafische weergave van tabel 3. Hier zijn duidelijk verschillen te zien tussen de lagen. Maar binnen de laag loopt de vochtverdeling van links naar rechts vrijwel vlak. Wanneer naar de rechterhelft wordt gekeken (de grafische representatie van tabel 4), dan is er wel een duidelijke plaatsafhankelijkheid te zien. Naarmate de bollen verder van de wand zijn, drogen ze sneller. Daarbij is natuurlijk ook weer het effect zichtbaar dat onder in de bollen eerder droog zijn dan bovenin.



Figuur 4. Vochtgehalte als functie van plaats en laag na 4 uur drogen. Linkerzijde is de lokatie van links naar rechts en rechterzijde is de afstand tot de droogwand.

De afstand tot de droogwand bepaalt dus ook de droogsnelheid. Dit moet geanalyseerd worden in relatie met Figuur 2. Hier was duidelijk een drukopbouw waar te nemen in het aanvoerkanaal (instroomkanaal). Een hogere druk resulteert in een grotere snelheid, dus hoe verder van de wand des te groter de luchtstroom. Omdat het drogen in de eerste periode vooral de afvoer van aanhangend of vrij vocht aan de buitenzijde van de bol betekent, is de opnamecapaciteit van de lucht de beperkende factor. Dat betekent dat hoe meer lucht er langs de bol stroomt des te hoger de droogsnelheid. De hoogste druk en daarbij de hoogste luchtsnelheid vindt plaats op de grootste afstand van de droogwand. En hier vindt ook volgens Figuur 3 de meeste droging plaats.

Conclusies drogen één kist

De eerste serie metingen op proefboerderij De Noord geven een consistent beeld van de stroming door de droogwand en de bolstapeling en van het verloop van het droogproces. De hoogste druk (Figuur 2) en daarbij de grootste luchtsnelheid vindt plaats op de grootste afstand van de droogwand. En hier vindt ook volgens Figuur 4 de meeste droging plaats.

Hoewel het droogfront aanwezig is, is het niet echt scherp. Het is wel duidelijk dat na 4 uur drogen een laag van ongeveer 20 cm bollen gedroogd kan worden. De (vocht-) opnamecapaciteit van de lucht is duidelijk de beperkende factor in het droogproces.

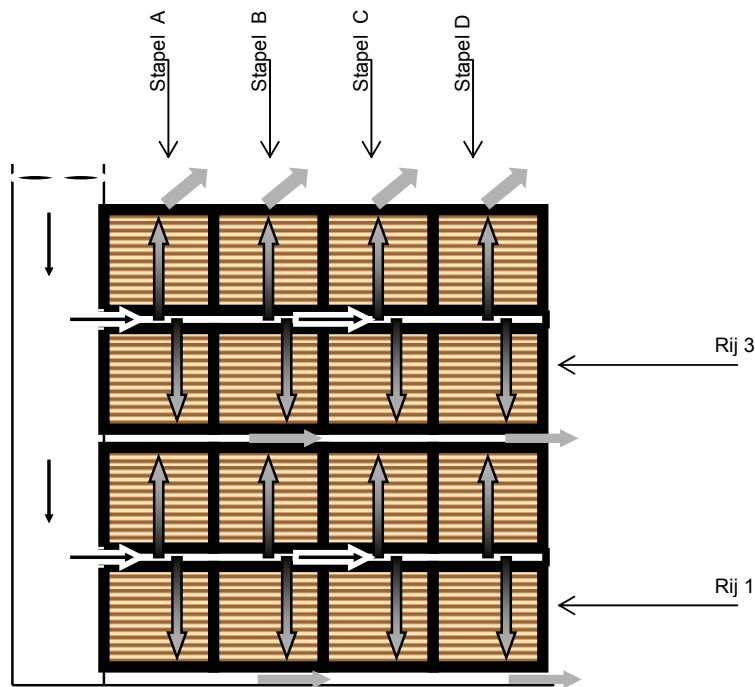
4.3.2. Metingen in verschillende kuubkisten (seizoen 2000)

Doel van de metingen:

Het voornaamste doel van deze metingen was het verkrijgen van inzicht in de invloed van de positie van de kist in de stapeling voor de droogwand op de hoeveelheid lucht die door het bloembollenvolume in de kist stroomt.

Werkwijze:

De metingen zijn uitgevoerd op proefbedrijf 'De Noord'. Er is gemeten aan een stapeling van vier kisten diep en vier kisten hoog voor de daar aanwezige droogwand die gedroogd werden met dubbellaagsbeluchting. Er is alleen gemeten aan kisten waar de lucht van boven naar beneden doorstroomt, deze kisten zijn in Figuur 5.1 aangegeven met daarbij de code die gebruikt is bij de verwerking van de resultaten.

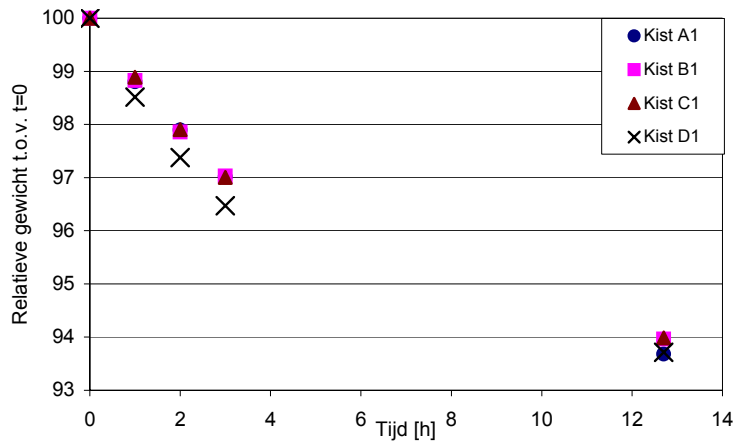


Figuur 5.1 Kisten in een vier bij vier configuratie voor de droogwand, zoals gebruikt in het experiment, alleen de eerste en de derde rij van onder zijn gebruikt.

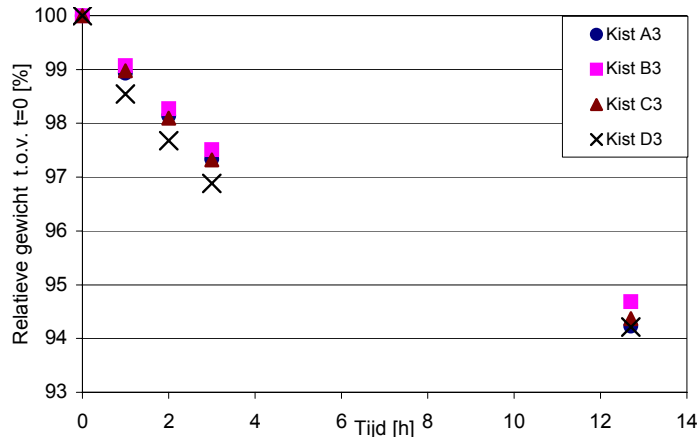
In deze kisten is een frame geplaatst. De tulpenbollen die zich binnen dit frame bevonden zijn in twee rijden van 5 verdeeld en in netzakjes gedaan. Van deze bollen is het gewicht bepaald, vervolgens is de droogwand een uur aangezet en zijn de bollen weer gewogen. Dit is herhaald na een totale droogtijd van twee, drie en 12,7 uur. De hoeveelheid gewichtsafname is hier een maat voor de hoeveelheid lucht die langs de bollen is gestroomd, immers naarmate er meer lucht langs de bollen stroomt kan er meer aanhangend vocht verdampt worden. Voor de resultaten zijn gemiddelde waarden berekend van de gewichtsafname per kist.

Resultaten:

In de figuren 5.2 en 5.3 is het gewicht van de bollen in de netzakjes tegen de droogtijd uitgezet waarbij het gewicht geïndexeerd is ten opzichte van het gewicht voor het drogen. De codes waarmee de kisten zijn aangegeven geven de plaats van de kist in de stapeling aan, waarbij de index A tot en met D de plaats in de rij aangeeft met A de kist tegen de droogwand aan en de index 1 en 3 geven de betreffende rij aan met 1 de kist op de schuurfloer.



Figuur 5.2 Relatief gewicht van de bollen in de bovenste laag van de kuubkisten in de eerste rij

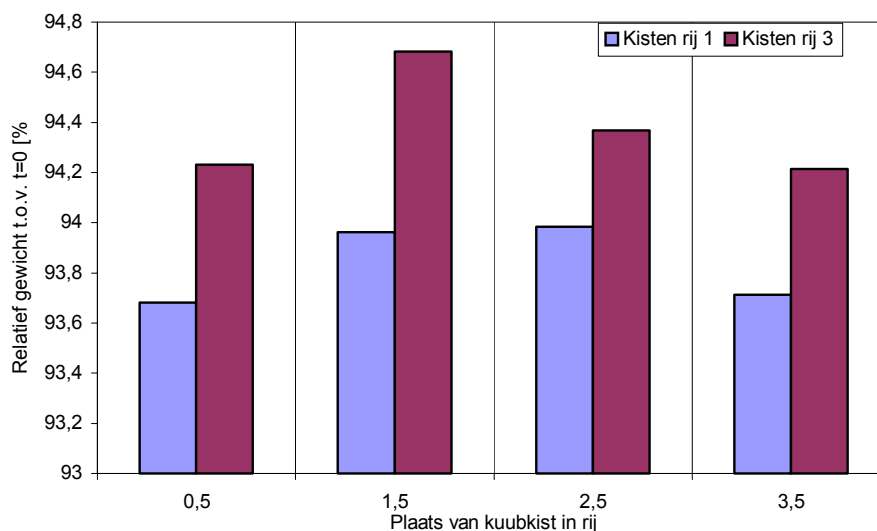


Figuur 5.3 Relatief gewicht van de bollen in de bovenste laag van de kuubkisten in de derde rij

In deze figuren is duidelijk zichtbaar dat de laatste kist (D1 en D3 in figuur 5.1) als beste droogt; de meeste lucht stroomt dus door de bollen in de laatste kist. Dit is te verklaren door de drukopbouw die in het kanaal optreedt. Zoals in de theorie besproken is, is de totale druk constant, deze druk bestaat uit een snelheidscomponent, de dynamische druk en een weerstandscomponent, de statische druk. Omdat de luchtsnelheid verder naar het eind van de palletkanaal afneemt doordat ze daar botst tegen de stop die in de pallet geplaatst is, vindt er in het kanaal een verschuiving plaats wat betreft de opbouw van de totale druk. In het begin van het kanaal zal deze, door de hoge luchtsnelheid voornamelijk bestaan uit dynamische druk en aan het eind wordt deze snelheid kleiner

Energiezuinig drogen van bloembollen

doordat de lucht de weerstand van het bollenmedium moet overwinnen, hier zal de totale druk voornamelijk bestaan uit statische druk. Deze statische druk stuwt de lucht door de bollen. Aan dit verschijnsel is het ook toe te schrijven dat de derde kist in de rij nog redelijk wat lucht krijgt. Uit de figuur blijkt ook dat de eerste kist duidelijk meer lucht krijgt dan de tweede kist in de rij. Dit lijkt het gevolg te zijn van de lagere kanaalweerstand van het uitgangskanaal, in dit geval de palletbodem van de kisten in de eerste en derde rij, die de lucht moet overwinnen. De lucht die door de eerste kist stroomt hoeft om buiten de stapeling te komen in vergelijking met de lucht die door de tweede kist stroomt maar een klein stukje uitgangskanaal te doorstromen. Dit verschijnsel telt naast de drukopbouw ook mee in het verschil tussen de derde en vierde kist.



Figuur 5.4 Relatief gewicht van de bollen in de bovenste laag van de kuubkisten ten opzicht van het gewicht voor het drogen aan het eind van het droogproces ($t=12,7$ uur)

In Figuur 5.4 is het relatieve gewicht van de bollen in de bovenste laag van de kuubkisten aan het eind van het drogen weergegeven. In deze figuur is het verschil tussen de eerste en de derde laag van de stapeling zichtbaar.

Uit deze figuur blijkt dat er, ook al is het relatief niet heel erg groot, een verschil is tussen de hoeveelheid lucht die door de bollen in de derde rij en de eerste rij stroomt. Voor dit verschijnsel zijn meerdere verklaringen aan te dragen. De eerste en zwaarst meetellende verklaring is gebaseerd op het feit dat de lucht die door de bovenste kistenrij stroomt een vrije uitstroom heeft, de lucht hoeft daar namelijk niet door een uitgangskanaal heen om buiten de stapeling te komen. Hierdoor zal relatief een groot deel van de lucht vanuit het ingangskanaal, die de weg van de minste weerstand kiest, door de vierde kistenrij stromen, met als gevolg dat door de derde rij minder lucht stroomt. Hiernaast telt ook mee dat de lucht die door de eerste kistenrij stroomt via een uitgangskanaal stroomt waaraan alleen de eerste kistenrij ligt. De derde rij moet het uitgangskanaal delen met de tweede kistenrij en moet daardoor een grotere weerstand overwinnen. Als laatste kan de verdeling ook nog negatief beïnvloed zijn door de drukwand, het is niet duidelijk of de

hoeveelheid lucht die het onderste ingangskanaal even groot is als de hoeveelheid die door het bovenste kanaal de stapeling binnenstroom.

Conclusie:

Uit deze metingen blijkt dat er duidelijk verschillen optreden tussen de verschillende kisten in de stapeling. Als eerste veroorzaakt de drukopbouw in de kanalen dat er door de kisten achter in de stapeling meer lucht stroomt dan de door de kisten dicht bij de droogwand. Hiernaast zijn er ook verschillen gemeten tussen de verschillende rijen in de stapeling, deze worden veroorzaakt door de verschillende weerstanden die door de lucht per rij overwonnen moet worden om uit de stapeling te kunnen treden. Inzicht in de oorzaken van de inhomogene beluchting kan leiden tot verbeteringen aan de droogwand en eventueel de kuubskisten waardoor de droogkwaliteit kan worden verhoogd en tevens energie kan worden bespaard.

5 Luchtstroming

De luchtstroming is uitgebreid onderzocht in het kader van zowel het project drogen als het project bewaren. Hoewel in beide toepassingen het luchtdebiet een factor 10 verschilt, is het onderzoek geheel analoog. De resultaten van dit luchtstromingsonderzoek zijn weergegeven in het eindverslag Modelmatig onderzoek naar energiezuiniger bewaarcellen dat deel uitmaakt van de eindrapportage Energiezuiniger klimaatbeheersing bij bewaring van tulpenbollen.

Een belangrijke vaststelling was dat de stroming door de stapeling kisten voor de droogwand niet homogeen is. Hierdoor zijn er flinke verschillen in droogtijd tussen verschillende kisten. Bij een meer homogene beluchting worden de achterblijvende kisten sneller gedroogd en de sneldrogende kisten korter blootgesteld aan de drooglucht. Hierdoor zal vooral de kwaliteit van het product verbeteren en wordt bovendien energie bespaard. Daarbij zijn aanbevelingen gedaan voor het meer homogeen maken van de beluchting door de verschillende kisten van de stapeling. Dit betreft het aanbrengen van een afvoerkanaal boven op de kisten om de uitstroming van de bovenste kistenrij analoog te maken aan die van de onderste kistenrij en het eenzijdig afsluiten van deze bovenste en onderste uitstroomkanalen aan de van de wand afgekeerde zijde. Verder is een betere aanpassing nodig van de weerstand van de kistbodems aan die van het instroomkanaal om te veel drukopbouw in het instroomkanaal te voorkomen. Voor deze aanpassingen worden ontwerpregels gegeven.

Verder zijn aanbevelingen gedaan voor verbetering van het ontwerp van de droogwand om daarin de drukverliezen terug te brengen en daardoor energie te besparen. Dit betreft afronding van de stromingsopeningen in de wand naar de instroomkanalen onder de kisten en aanpassing van de schuine wand die achter de ventilator is geplaatst als luchtverdelers.

Er wordt geschat dat het energiegebruik bij drogen voor wat de ventilatorenergie betreft kan dalen met ca 50% en voor wat de verwarmingsenergie betreft met ca. 30%. Hierbij moet de restrictie worden gemaakt dat de voorstellen voor verbetering zijn gebaseerd op berekeningen met een stromingsmodel dat met behulp van uitgebreide metingen is gekalibreerd. Het is evenwel onmogelijk alle effecten die een rol spelen te modelleren zodat een experimentele verificatie van de verbeteringen nodig is voordat deze in de praktijk kunnen worden geïntroduceerd. Bovendien zal bij een experimenteel aantonen van de verbeteringen de acceptatie in de praktijk veel groter zijn.

6 Warmteterugwinning

Er is onderzocht of warmteterugwinning uit de drooglucht een aantrekkelijke optie is om energie te besparen. In de drooglucht is immers de toegevoerde voelbare warmte voor een redelijk deel omgezet in latente warmte. Het terugwinnen van deze latente warmte en het aan de invoerlucht terugvoeren als voelbare warmte zou in potentie energie kunnen besparen. Dit vereist dat de bevochtigde lucht in een gesloten circuit kan worden behandeld wat voor de uit een drogende stapeling kuubskisten bollen komende lucht moeilijk zal zijn en extra voorzieningen vereist. Het is wel mogelijk in een gesloten droogstelsel zoals een tunneldroger. Verder is vanuit kasklimatologisch onderzoek gebleken dat de energiewinst zeer betrekkelijk is. Voor warmteterugwinning komt een door een warmtepomp gekoeld oppervlak in aanmerking waarop het vocht kan condenseren en daarbij zijn latente warmte afstaat. Aan het koude oppervlak wordt dan niet alleen de latente warmte bij de condensatie van het vocht afgegeven maar wordt ook de lucht afgekoeld zodat voelbare warmte wordt onttrokken. Zowel de voelbare als de latente warmte wordt dus opgenomen en moet door de warmtepomp aan de warme kant worden afgegeven. Omdat de aandrijfenergie voor de warmtepomp evenredig is met de opgenomen warmte moet deze worden afgestemd op de totaal opgenomen latente en voelbare warmte. Om de opgenomen voelbare warmte te verlagen kan de te ontvochtigen warme lucht in een warmtewisselaar worden voorgekoeld door de reeds ontvochtigde koude lucht, waarbij de ontvochtigde koude lucht op haar beurt wordt teruggewarmd door de te ontvochtigen warme lucht. Dit vraagt een extra warmtewisselaar en extra ventilatorvermogen om het drukverlies over de warmtewisselaar te leveren. De warmtepomp heeft weliswaar een asvermogen nodig dat lager is dan het opgenomen vermogen aan het koude oppervlak (verhouding is de COP koelmachine) of het afgegeven vermogen aan de warme kant (verhouding is COP warmtepomp) maar dit is mechanische energie. Deze moet als elektrische energie worden toegevoerd waarbij de efficiëntie van de energieopwekking in rekening moet worden gebracht. In een total-energy concept zou de restwarmte van de elektriciteitsopwekking ook benut kunnen worden zodat de totale efficiëntie toeneemt. Bij het drogen kan door luchtbehandeling dus wel redelijk veel energie worden teruggewonnen maar dit vraagt hoge investeringen. Voor de korte droogperiode van bollen kan dit nooit terugverdiend worden. Voor installaties die gedurende lange tijd, liefst jaarrond, is luchtbehandeling met warmteterugwinning wel zinvol.

7 Algemene conclusies

Het is aangetoond dat het droogproces niet gelijkmatig verloopt door een inhomogene beluchting. Gedurende de vrij water verdamping wordt de droogpotentie van de drooglucht niet meer ten volle benut als uit de snelst drogende kisten het vrije water is verdampt. Het nablijven van droging in de slechtste kisten verlengt de droogduur en verhoogt het energiegebruik. De productkwaliteit van de snelst drogende bollen wordt nadelig beïnvloed door een lange nadroogtijd, die van de langzaamst drogende bollen door een lange natperiode. Een gelijkmatige droging is dus goed voor de productkwaliteit en bespaart ook energie. Bovendien zijn er hoge drukverliezen in de droogwand. De sleutel is het verminderen van de drukverliezen in de wand en het verbeteren van de gelijkmatigheid van beluchting. Hiervoor is voor de beide projecten Drogen en Bewaren



Energiezuinig drogen van bloembollen

uitgebreid gemeten en gerekend aan de beluchting van voor droog- of ventilatiewanden geplaatste stapelingen kuubskisten bloembollen. Daardoor zijn mogelijkheden ontstaan om de productkwaliteit bij het drogen en bewaren van bloembollen te verbeteren en veel energie besparen. Bij een redelijk niveau van praktijkimplementatie kan daarmee de doelstelling van de energieafspraken bloembollen worden gehaald.

Vanuit de berekeningen met het door uitgebreide metingen gevalideerde model blijkt dat de homogeniteit van de beluchting het eerst moet worden verbeterd door aanpassing van de stromingsweerstand van de kistenbodems aan de weerstand van de toevoerkanalen. Daarbij moet de doorlaat van de kistenbodems worden verkleind. Hierdoor zal door de eerste en laatste kisten de luchtstroming veel beter gelijk zijn. Bij de huidige systemen treedt stuwing van lucht in het toevoerkanaal op waardoor meer lucht door de laatste kisten gaat. Daarnaast is er een groot verschil in uitstroming tussen de middelste kistenrijen en de onderste en bovenste. Het verschil tussen onderste en bovenste kan worden geminimaliseerd door de bovenste kistenrij af te dekken met een van boven gesloten palletbodem. Door bovendien het bovenste en onderste uitstroomkanaal af te dichten aan de van de wand afgekeerde zijde en nog één uitstroomopening bij de wand toe te laten wordt het verschil met de middelste kistenrij geminimaliseerd. Verder zijn verbeteringen mogelijk aan de drukwand door openingen af te ronden en het principe en in de luchtverdeling minder weerstand in te bouwen. Omdat deze verbeteringen zijn gebaseerd op modelberekeningen verdient het aanbeveling deze eerst experimenteel te toetsen. Dit zal ook de acceptatie door de praktijk verhogen.

Energiebesparing door warmteterugwinning is goed mogelijk maar vraagt vrij hoge investeringen. Door de korte periode van gebruik van de drooginstallaties zal dit nooit worden terugverdiend.

Bijlage 1

Voorbeeld ter illustratie van het eenvoudige droogmodel.

Gegeven is een kuubskist met ca. 550 kg bollen waarin het vochtgehalte terug moet worden gebracht van ca. 60 naar 55%,
 Dan moet dus ca. 22.5 kg water (=22 500 g) verdampen per kuubskist.
 De hiervoor benodigde verdampingswarmte is dan $22.5 \times 2.45 = 55$ MJ
 Het ventilatiedebiet bij drogen is gewoonlijk 1000 m³ per kuubskist per uur.
 Stel dat de buitenluchttemperatuur 20 °C is met 80% RV (normale zomerse conditie)
 Omdat ventilatorenergie elektrische energie is wordt, om dit te combineren met energie voor verwarmen, energie omgerekend naar primaire energie via een elektrisch rendement van de elektriciteitsopwekking van 40%.
 De vraag is of direct kan worden gedroogd met buitenlucht met $T_{in} = 20$ °C of dat de ingangslucht moet worden verwarmd tot b.v. 22.5, 25 of 30 °C.

Berekend zijn:

De droogperiode,

De energie input (= ventilatorenergie primair plus verwarmingsenergie)

Het energierendement (= verdampingsenergie / input primaire energie)

De berekeningsresultaten worden in de volgende tabel gegeven:

T_{in} °C	RV in %	T_{uit} °C	Delta c g/m ³	m ³ lucht	Droog uur	Energie prim, MJ	Rend %
20	80	17.5	1.1	20 450	20.5	11.5	480
22.5	69	18.3	1.85	12 162	12.2	43.3	127
25	60	19.4	2.9	7 870	7.9	58.9	94
30	45	21	4.5	5 000	5	62.8	88

Het is dus uit het voorbeeld gemakkelijk in te zien dat drogen met buitenlucht alleen ventilatorenergie kost en een hoog energierendement heeft. Het vocht opnemend vermogen van de buitenlucht is in het algemeen echter laag zodat dan een lange droogtijd wordt verkregen. Verwarmen van de buitenlucht verhoogt de natte boltemperatuur en dus het vocht opnemend vermogen van de ventilatielucht, waardoor bij meer verwarmen een steeds kortere droogtijd wordt gerealiseerd. Dit kost minder ventilatorenergie maar meer verwarmingsenergie waardoor het energiegebruik stijgt. Per eenheid latente warmte wordt dus steeds meer energie gebruikt. Verhogen van het ventilatordebiet is tot zekere grenzen mogelijk maar de druk zal ongeveer lineair tot kwadratisch en het ventilatorvermogen zal wat sterker dan kwadratisch met het debiet toenemen. Als het debiet zou worden verdubbeld tot 2000 m³ lucht per kuubskist per uur dan zou in het voorbeeld de droogtijd halveren tot ca 10 uur maar zou het ventilatorvermogen vijf tot zes maal zo hoog worden zodat over de halve periode de primaire energie met een factor 2 tot 3 zal toenemen tot ca 30 MJ. Hierbij wordt niet in beschouwing genomen dat een veel krachtiger en dus duurdere ventilator moet worden geïnstalleerd en dat de drukken in het systeem hoog worden.