

# Verbetering kuubskist

Energie-efficiënt drogen in een half( $\frac{1}{2}$ )-laagssysteem

J. Wildschut (PPO), A. Sapounas (WUR Glas), P. de Wit (N.J.J. de Wit / Nord Lommerse), B. Bisschops (DLV Plant)

© 2010 Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V. is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Dit project is uitgevoerd in opdracht van en gefinancierd door de partijen in de Meerjarenafspraken energie Bloembollen (KAVB, PT, minEL&I, Agentschap NL en telers).



Projectnummer: 32 360 842 10

**Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.**

Bloembollen, Boomkwekerij & Fruit

Adres : Prof. Van Slogterenweg 2  
: Postbus 85, 2160 AB Lisse

Tel. : 0252 - 462121

Fax : 0252 - 462100

E-mail : [info.ppo@wur.nl](mailto:info.ppo@wur.nl)

Internet : [www.ppo.wur.nl](http://www.ppo.wur.nl)

# Inhoudsopgave

pagina

SAMENVATTING.....	5
1 INLEIDING .....	7
2 WERKWIJZE.....	7
3 RESULTATEN .....	9
3.1 CFD-modellering .....	9
3.2 Debietmetingen .....	14
3.3 Vochtafvoer uit de kist.....	15
3.4 Vochtafvoer tussen de bollen.....	17
3.5 Het droogproces .....	18
3.6 Economische analyse.....	20
4 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN .....	21
BIJLAGE 1: CFD-MODELLERING.....	23
BIJLAGE 2: POSTER ALTERNATIEVE KUUBSKIST .....	41



# Samenvatting

Op basis van eerdere testen is het ontwerp van een alternatieve kuubskist naar een idee van Peter de Wit (bloembollenbedrijf N.N.J. de Wit/Nord Lommerse) d.m.v. CFD-modellering verbeterd. De 2 dwars op het palletkanaal ongeveer halverwege de kisthoogte geplaatste buizen van hetzelfde geperforeerde materiaal als de kistbodem zijn hierbij 10 cm hoger en 2,5 cm meer naar binnengeplaatst. Om ook tussen de buizen de luchtstroom te verbeteren zijn de perforaties in het bovenste en onderste kwadrant van de buizen gesloten. De verbeterde ontwerpen van deze buizenkist zijn door Omnihout gebouwd en door PPO/DLV-Plant getest. Geplaatst in dit ½-laagsdroogstelsel zijn de debieten per kist gemeten en is gedurende het droogproces met sensoren de temperatuur en de RV van o.a. drooglucht, uitblaaslucht en tussen de bollen gelogd. Hiermee kon de vochtafvoer worden berekend.

De resultaten gaven aan dat de luchtverdeling over de kistenstapel bij de buizenkisten gelijkmatiger is dan bij gangbare kisten. De opstartfase van het droogproces is bij de buizenkisten korter omdat de door de drooglucht afgelegde weg door de bollen gehalveerd is tov. de gangbare kist. Daardoor is de gemiddelde vochtafvoer per m<sup>3</sup> lucht in deze fase groter. Ook de sneldroogfase verloopt sneller omdat de buizenkisten een lagere weerstand hebben en daardoor een hoger debiet. De kisten zijn daardoor 30 tot 50% eerder sneldroog dan de gangbare kisten. Tussen de buizen zijn de bollen eerder droog wanneer het bovenste en onderste kwadrant gesloten is.

Bij het drogen wordt door de buizenkisten 17 tot 23 % op gas, en 34 tot 49% op elektra bespaard. De totale energiebesparing bij drogen is 20 tot 29% per kist. De financiële besparing is echter klein: €0,22 tot €0,31 per kist. Door het kortere sneldroogproces is de kans op ziektes kleiner. Het economisch voordeel hiervan kan erg groot zijn, maar is moeilijk te berekenen.

Als de buizenkisten ook bij de bewaring ingezet worden kan door de lagere weerstand en de betere luchtverdeling ruim 50% op elektra worden bespaard. Dit kan tot €10,- per kist per seizoen opleveren. Dit vereist wel een kleine aanpassing aan de bovenkant van een 1-laagssysteemwand.

De meerkosten van de buizenkist zijn nog niet bekend en hangen o.a. af van materiaalkeuze en productievolume.

De luchtverdeling in de buizenkist kan nog verder worden verbeterd door meer af te sluiten dan de kwadranten, bv. 2 x 110% ipv. 2 x 90%. Nog verder afsluiten zou gecombineerd kunnen worden met een hoger perforatie percentage, bv. 60%. Achtergrond hierbij is dat in de huidige buizenkisten de weerstand in de diameter van de buis zit en niet de buisperforaties.

Thermostaat en frequentieregelaar zijn te sturen op basis van het verschil tussen het absolute vochtgehalte van de drooglucht en de uitblaaslucht. Hiermee zou een regeling ontworpen kunnen worden waarmee steeds de optimale combinatie van verwarming en debiet toegepast wordt om zo energie-efficiënt mogelijk binnen een bepaalde tijd te drogen.

De poster in Bijlage 2 vat de resultaten in 6 punten samen.



# 1 Inleiding

Naar een idee van Peter de Wit van het bloembollenbedrijf N.J.J. de Wit / Nord Lommerse is door Omnihout B.V voor dat bedrijf een aantal alternatieve kuubskisten gemaakt. Deze kisten hebben op ongeveer halverwege de hoogte dwars op het palletkanaal 2 of 3 buizen met een diameter van 15 cm van het zelfde materiaal als de kistbodem (een met kleine gaatjes geperforeerde metalen plaat met een netto doorlatendheid van 43%). Deze kisten met een open onderste palletbodem (kuubskisten voor een zg. tweelaagssysteem) worden geplaatst voor een één-laags droogwand zodat elke kist van onderen *en* van boven wordt aangeblazen en de lucht via de bollen door de buizen opzij wordt uitgeblazen. Per kist wordt daardoor de door de lucht afgelegde weg gehalveerd. Dit systeem kan een ½-laagssysteem genoemd worden: bij een tweelaagssysteem worden twee lagen door één uitblaasopening aangeblazen, bij een één-laagssysteem wordt één laag door één uitblaasopening aangeblazen en bij dit alternatieve systeem wordt één laag door twee uitblaasopeningen aangeblazen.

In het project 'State-of-the-Art bewaren van bloembollen' zijn deze kisten in 2008 getest op droogsnelheid en debiet per kist. De resultaten daarvan waren gunstig:

- Bij hetzelfde kWh-verbruik droogt de alternatieve kist 1,5 tot 2 keer sneller dan de normale kist.
- Met 3 buizen drogen de bollen sneller dan met 2, maar de kist met 3 buizen is bij het vullen en uitstorten minder praktisch.
- De luchtstroomverdeling tussen de bollen in de kist is nog niet optimaal: De bollen boven de buizen drogen iets langzamer dan de bollen onder de buizen, en ook de bollen tussen de buizen bleken trager te drogen.
- Bij het drogen van gespoelde tulpenbollen was het gemiddelde debiet per kist bij normale kisten in een éénlaagssysteem 708 m<sup>3</sup>/uur, bij kisten met 2 buizen 1223 m<sup>3</sup>/uur en bij kisten met 3 buizen 1651 m<sup>3</sup>/uur.

Deze resultaten gaven aanleiding tot nadere analyse en ontwerpverbetering met CFD-modellering van de 2-buizenkist. Deze verbeteringen zijn vervolgens door Omnihout uitgevoerd en de nieuwe kisten zijn daarna in een nieuw project, gefinancierd in het kader van het convenant "Schoon en Zuinig", getest.

Doelstellingen van dit project zijn energie-zuiniger en –efficiënter drogen & bewaren van bloembollen.

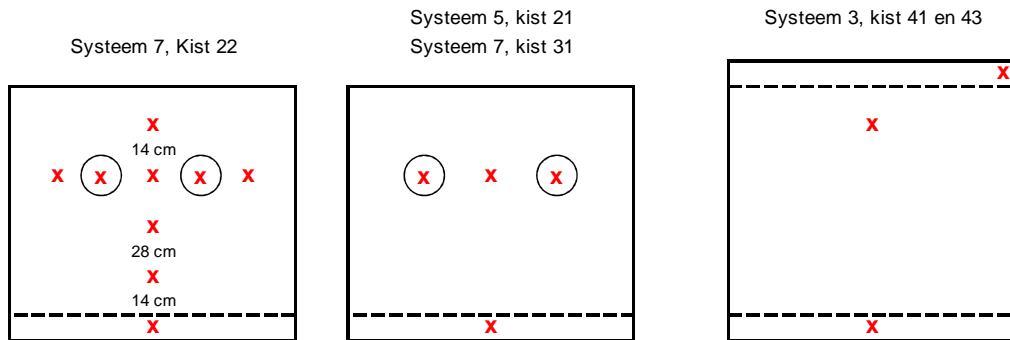
## 2 Werkwijze

Op basis van de eerdere metingen van droogsnelheid en debiet per kist, is in dit project gestart met het doorrekenen van mogelijke verbeteringen met CFD-modellen. Hiermee zijn o.a. verschillende posities van de buizen, de mate van perforatie van de buizen, het effect van een verkleinde onderste en bovenste palletopening en van afgeronde uitblaasopeningen doorberekend. De gevolgen voor de luchtverdeling in het ½-laagssysteem van 4 kisten diep x 3 hoog zijn hiermee in kaart gebracht en vergeleken met de resultaten van CFD-berekeningen van een 2 laagssysteem (4 hoog x 3 diep) en van 1-laagssystemen (3 hoog x 4 diep en 4 hoog x 3 diep).

De twee meest belovende prototypes zijn vervolgens door Omnihout B.V. gemaakt en daarna bij het drogen, direct na het spoelen, getest. Hierbij zijn in twee sessies ( 9 juli en 2 augustus 2010) met sensoren op verschillende plaatsen in het systeem de temperatuur en de Relatieve Luchtvochtigheid (RV) tijdens het droogproces elke 15 minuten gelogd: in de droogwand en in het palletkanaal, op verschillende plaatsen tussen de bollen in de kist, in de uitblaaslucht van de kisten en ook in de buitenlucht, figuur 1. Daarnaast is voor het ½-laagssysteem het debiet per kist gemeten en ter vergelijking voor het 2-laagssysteem het debiet

van de beschouwde kisten in de bovenste laag. Dit laatste debiet is gemeten in de uitblaasopening van een op de bovenste kisten geplaatste pallet (figuur 1, meest rechtse kist).

Bij de meetsessie op 9 juli stonden de buizenkisten in dezelfde schuurruimte voor een andere droogwand dan de gemeten 2-laagskist, bij de meetsessie op 2 augustus stonden de buizenkisten in de linker rij en de 2-laagskisten in de rechter rij voor dezelfde droogwand (type "1 wand, 2 rijen").



Figuur 1: meetpunten (X) in de kisten, het palletkanaal en in de uitblaaslucht.

Kistnummering: 1<sup>ste</sup> cijfer geeft de laag aan (van onder naar boven), 2<sup>de</sup> cijfer de positie vanaf de wand.

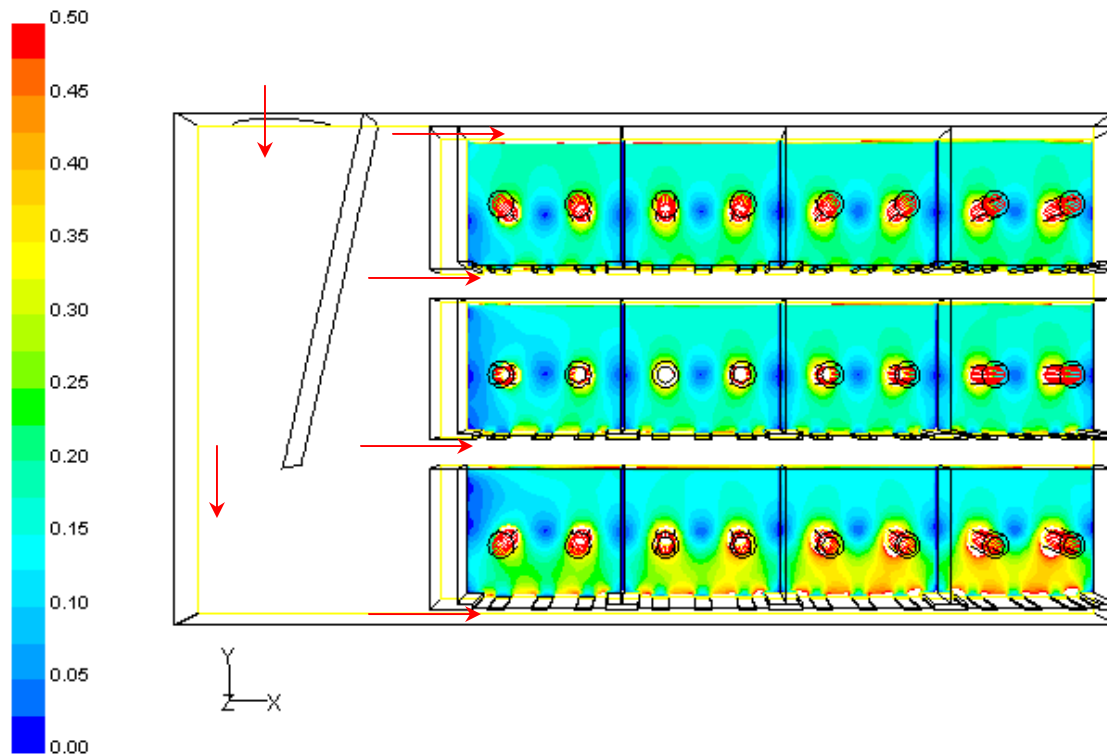
Uit de temperatuur kan het maximale vochtgehalte van de lucht (in ml H<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup> lucht) worden berekend, waarna met de RV het absolute vochtgehalte wordt berekend. Met deze gegevens is op de verschillende posities in de droogwand en de kistenstapeling o.a. het absolute vochtgehalte, het vochtdeficit, het verschil tussen het absolute vochtgehalte van de drooglucht en van de lucht tussen de bollen en van de uitblaaslucht berekend.



## 3 Resultaten

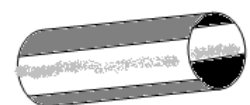
### 3.1 CFD-modellering

Om verbeteringen te kunnen doorrekenen is eerst een CFD-model gemaakt van de 2-buizenkist zoals deze in het State-of-the-Art project getest is. De debietmetingen aan de kistenstapeling van 3 hoog x 4 diep zijn hierbij gebruikt ter validering van het model. In de kist met een buitenmaat van 1,20 (b) x 1,00 (h) x 1,00 (l) meter en een netto pallethoogte van 17 cm was de as van de buizen geplaatst op 34 cm boven de geperforeerde plaatbodem. De afstand tussen assen van de buizen was 45 cm. De resultaten zijn in beeld gebracht in figuur 1. Vooral in de onderste laag is duidelijk te zien dat de luchtsnelheid onder de buizen veel hoger is dan boven de buizen. Tussen de buizen zijn er duidelijk gebieden waar de luchtstroom kleiner is.



Figuur 2: Luchtsnelheden in een ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, met de as van de buizen in de oorspronkelijke positie van 34 cm boven bodem en 45 cm tussen de assen. Met rode pijlen is de luchtstroomrichting aangegeven, op de kleurschaal links de luchtsnelheid in m/s.

De meest voor de hand liggende verbeteringen om de luchtverdeling boven en onder de buizen gelijkjer te krijgen en ook tussen de buizen de luchtstroom te vergroten is o.a. om de buizen hoger te plaatsen en meer naar elkaar toe. Uit verkennende berekeningen bleek een aspositie van 44 cm boven de bodem (10 cm hoger) en tussen de assen 40 cm i.p.v. 45 cm (de buizen 2,5 cm meer naar binnen) het meest optimaal. Om de luchtstroom tussen de buizen nog meer te verbeteren is het afdichten van het onderste en het bovenste kwadrant van de buizen ook een optie. De resultaten van de CFD-berekeningen van deze



verbeteringen mbt. debieten per kist en energieverbruik zijn samengevat in tabel 1 en 2. Hierin zijn ook de resultaten van CFD-berekeningen van het 1-laagssysteem en het 2-laagssysteem samengevat, alsmede enkele varianten zoals een afgeronde uitblaasopening en een buizenperforatie van 60% i.p.v. 43%. Voor een uitgebreid overzicht van de luchtstromen door de bollen in de verschillende kistontwerpen en kistenstapelings, zie bijlage 1.

Tabel 1: Resultaten van CFD-berekeningen aan standaard 1- en 2-laagssystemen, en alternatieve 1/2 (half)laagssystemen, bij gelijk debiet per systeem.

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Systeem	1-laags	2-laags	2-laags	1/2-laags	1/2-laags	1/2-laags	1/2-laags	1/2-laags	1/2-laags	1/2-laags
hoogte	3	4	4	3	3	3	3	3	3	4
diepte	4	3	3	4	4	4	4	4	4	3
afgeronde uitblaasopening	nee	nee	ja	nee	ja	nee	ja	nee	nee	nee
Perforatie bodemplaat	40%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%
Perforatie buizen kwadranten				open	open	dicht	dicht	open	dicht	open
Kistnummer	debieten in m3/uur/m3 bollen									
11	1480	1280	1531	1390	1662	1475	1701	1333	1432	1847
12	1511	1875	1846	2135	2133	2082	2036	2114	2089	2206
13	1531	2150	2184	2462	2445	2320	2268	2450	2332	<b>2390</b>
14	1538			<b>2581</b>	<b>2628</b>	<b>2376</b>	<b>2408</b>	<b>2617</b>	<b>2396</b>	
21	<b>1095</b>	897	1049	<b>765</b>	1312	<b>974</b>	1395	<b>715</b>	<b>921</b>	<b>1243</b>
22	1133	1412	1409	1614	1569	1620	1593	1575	1614	1470
23	1143	1900	1948	1650	1633	1647	1652	1677	1649	1505
24	1148			1650	1681	1639	1691	1752	1678	
31	2090	<b>814</b>	<b>908</b>	1259	1244	1287	1347	1179	1263	1421
32	2365	1426	1258	1512	1240	1530	1332	1496	1563	1553
33	2491	1882	1774	1476	<b>1232</b>	1520	<b>1301</b>	1509	1535	1588
34	<b>2547</b>			1576	1290	1601	1337	1641	1627	
41		1914	1892							1570
42		2227	2073							1609
43		<b>2296</b>	<b>2203</b>							1665
Gemiddeld debiet	1673	1673	1673	1673	1673	1673	1672	1671	1675	1672
<b>min</b>	1095	814	908	765	1232	974	1301	715	921	1243
<b>max</b>	2547	2296	2203	2581	2628	2376	2408	2617	2396	2390
spreiding	43%	44%	39%	54%	42%	42%	33%	57%	44%	34%
Druk systeemwand (Pa)	618	603	520	315	260	319	265	317	320	255
Energie (kW)	1.78	1.81	1.56	0.95	0.78	0.96	0.80	0.95	0.96	0.77
m3 lucht/watt	11.3	11.1	12.9	21.2	25.7	20.9	25.2	21.1	20.9	26.2
E-besparing tov. Nr 1	0%	2%	-12%	-47%	-56%	-46%	-55%	-46%	-46%	-57%
E-besparing tov. Nr 3				-39%	-50%	-39%	-49%	-39%	-38%	-51%
toe/afname min. debiet		-26%	-17%	-30%	12%	-11%	19%	-35%	-16%	14%

In tabel 1 zijn de droogsystemen doorberekend met een gelijk gemiddeld debiet per kist van  $\pm 1673$  m3/uur. De tabel laat zien dat in vergelijking met standaard 1-laags- en 2-laagsystemen (systemen 1, 2 en 3), de minst beluchte kist in de systemen 5, 7 en 10 de meeste lucht krijgt. Bij systeem 7 is de spreiding het laagst. Vergroten van de perforatie van de buizen van 43% naar 60%, vergelijk systeem 4 met 8 en systeem 6 met 9, heeft geen effect op het energieverbruik en leidt tot een iets hogere spreiding. Het energieverbruik bij de systemen 5, 7 en 10 is vergeleken met systeem 1 ongeveer 55% lager en vergeleken met systeem 3 ongeveer 50% lager.

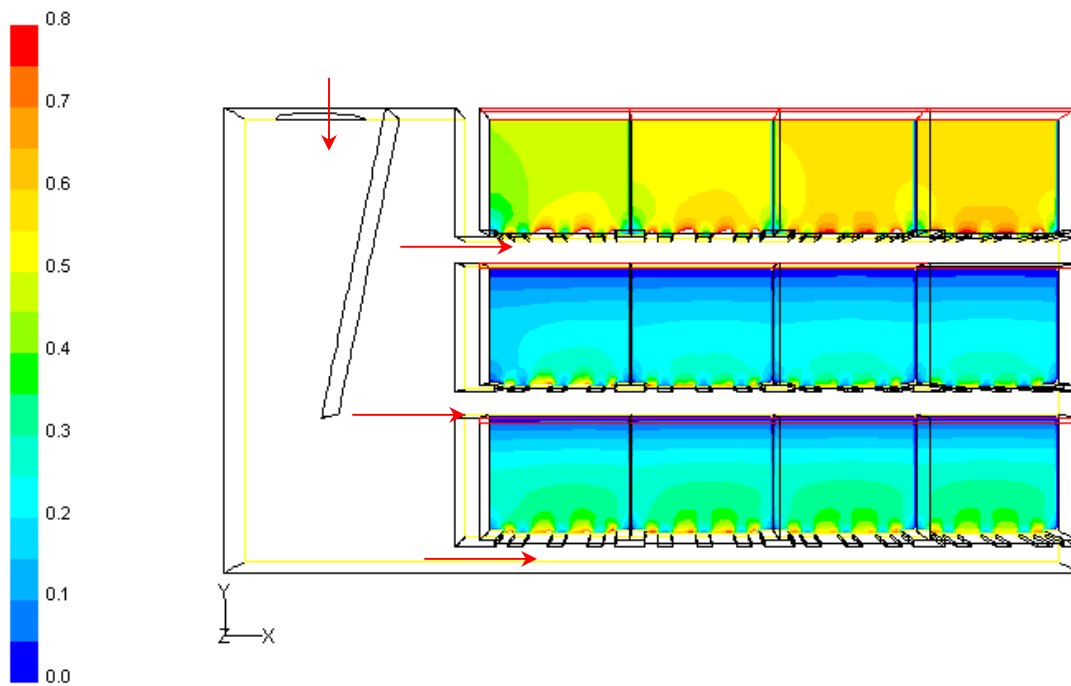
In tabel 2 zijn de zelfde systemen vergeleken bij gelijk energieverbruik (zelfde ventilator op volle toeren). Door de lagere weerstand resulteert dit in fors hogere debieten voor de systemen 5, 7 en 10. Door vervolgens terug te toeren tot het debiet van de minst beluchte kist in systeem 1 wordt rond de 71% energie bespaard.

Tabel 2: Resultaten van CFD-berekeningen aan standaard 1- en 2-laagssystemen, en alternatieve 1/2 (half)laagssystemen, bij gelijk energieverbruik per systeem.

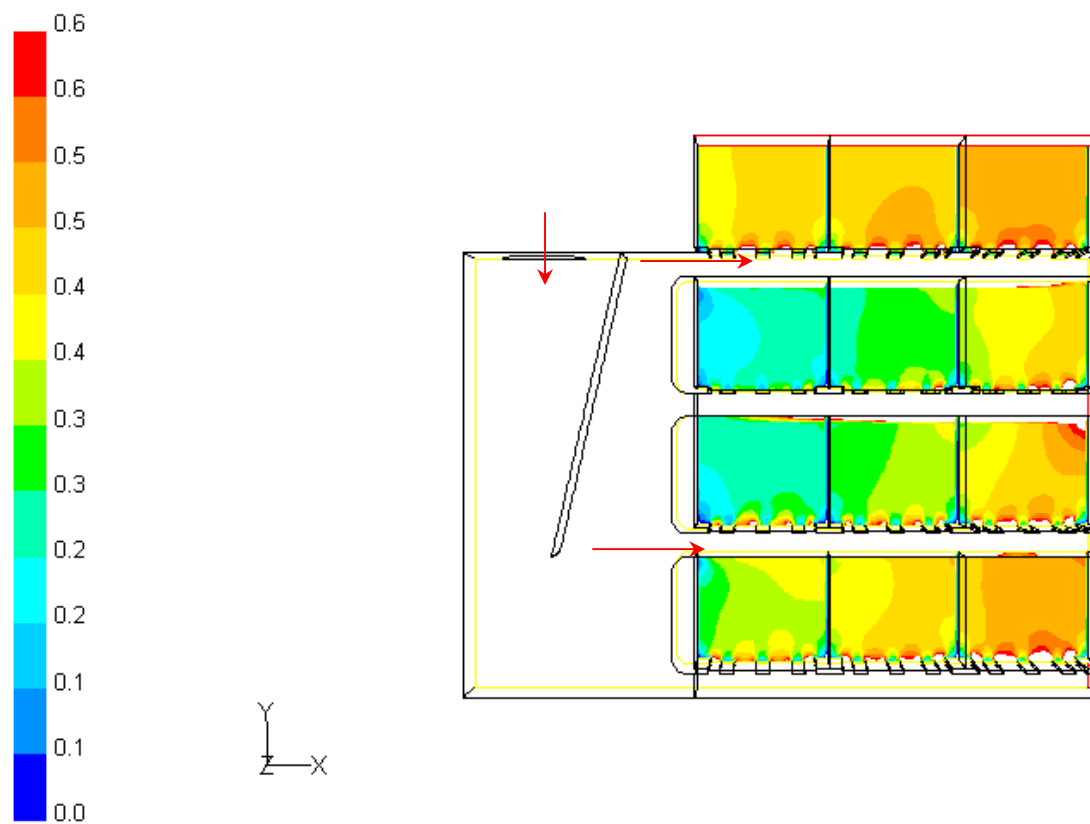
Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Systeem	1-laags	2-laags	2-laags	1/2-laags	1/2-laags	1/2-laags	1/2-laags	1/2-laags	1/2-laags	1/2-laags
hoogte	3	4	4	3	3	3	3	3	3	4
diepte	4	3	3	4	4	4	4	4	4	3
afgeronde uitblaasopening	nee	nee	ja	nee	ja	nee	ja	nee	nee	nee
Perforatie bodemplaat	40%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%
Perforatie buizen kwadranten				open	open	dicht	dicht	open	dicht	open
Kistnummer	debieten in m3/uur/m3 bollen									
11	1480	1272	1599	1715	2185	1812	2222	1641	1757	2445
12	1511	1863	1928	2635	2805	2557	2660	2603	2563	2921
13	1531	2136	2281	3039	3215	2849	2963	3017	2861	<b>3165</b>
14	1538			<b>3185</b>	<b>3455</b>	<b>2919</b>	<b>3145</b>	<b>3222</b>	<b>2940</b>	
21	<b>1095</b>	891	1095	<b>944</b>	1726	<b>1196</b>	1823	<b>880</b>	<b>1130</b>	<b>1646</b>
22	1133	1403	1472	1992	2063	1990	2081	1939	1980	1947
23	1143	1888	2035	2036	2148	2023	2158	2065	2023	1993
24	1148			2036	2211	2014	2209	2157	2059	
31	2090	<b>809</b>	<b>948</b>	1554	1636	1581	1760	1452	1550	1882
32	2365	1417	1313	1866	1630	1880	1740	1842	1917	2057
33	2491	1870	1853	1822	<b>1619</b>	1867	<b>1700</b>	1858	1884	2103
34	<b>2547</b>			1944	1696	1967	1746	2021	1996	
41		1901	1976							2078
42		2213	2165							2131
43		<b>2281</b>	<b>2300</b>							2204
Gemiddeld debiet	1673	1662	1747	2064	2199	2055	2184	2058	2055	2214
<b>min</b>	1095	809	948	944	1619	1196	1700	880	1130	1646
<b>max</b>	2547	2281	2300	3185	3455	2919	3145	3222	2940	3165
spreiding	43%	44%	39%	54%	42%	42%	33%	57%	44%	34%
Druk systeemwand (Pa)	618	596	567	480	450	482	453	481	482	447
Energie (kW)	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.77	1.79	1.78
m3 lucht/watt	11.3	11.2	11.8	13.9	14.8	13.9	14.8	13.9	13.8	15.0
toe/afname gem. debiet		-1%	4%	23%	31%	23%	31%	23%	23%	32%
toe/afname min. debiet		-26%	-13%	-14%	48%	9%	55%	-20%	3%	50%
E-besparing bij terug/optoeren naar minimum van Nr 1		148%	54%	56%	-69%	-23%	-73%	92%	-9%	-71%

De luchtstroom over de kisten en tussen de bollen in de kisten is voor een gangbaar 1-laagssysteem van 3 hoog x 4 diep, zonder afgeronde uitblaasopeningen (systeem nr. 1) samengevat in figuur 3: Hierin is goed te zien dat de laagste luchtsnelheden in de 2<sup>de</sup> laag voorkomen (blauwe kleur) en de hoogste snelheden in de bovenste laag (geel). Kist 34 (3<sup>de</sup> laag, 4<sup>de</sup> kist vanaf de wand) heeft het hoogste debiet.

De luchtstroom in het op bloembollenbedrijf N.J.J. de Wit gangbare 2-laagssysteem van 4 hoog x 3 diep, met afgeronde uitblaasopeningen, is samengevat in figuur 4. De luchtsnelheid (en dus het debiet) is het hoogst in kist 13 (1<sup>ste</sup> laag, 3<sup>de</sup> kist vanaf de wand) en het laagst in kist 31.



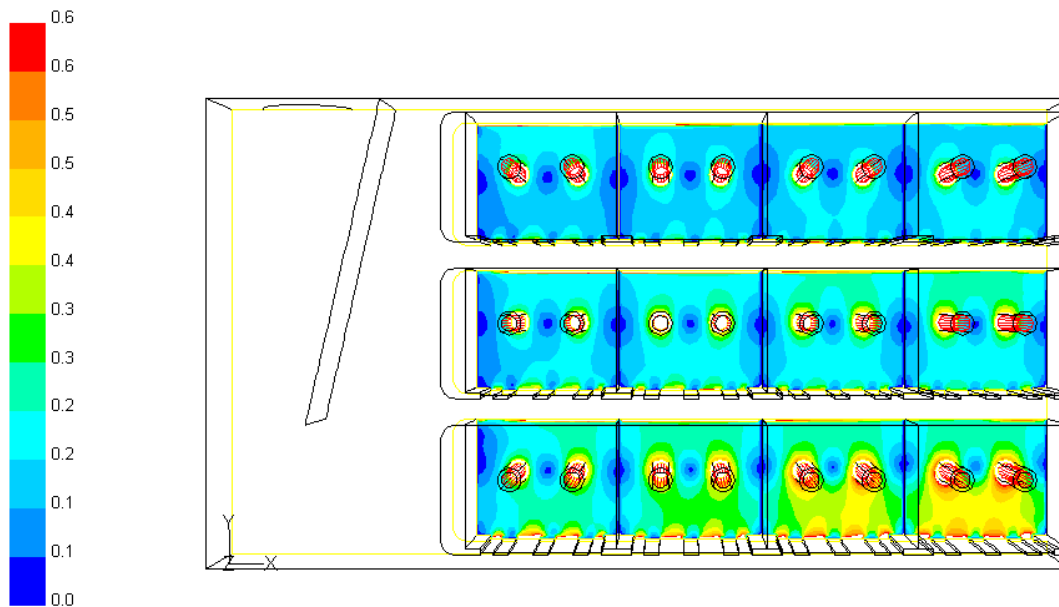
Figuur 3: Luchtsnelheden in systeem 1, 1-laags, 3 hoog x 4 diep, zonder afgeronde uitblaasopeningen.



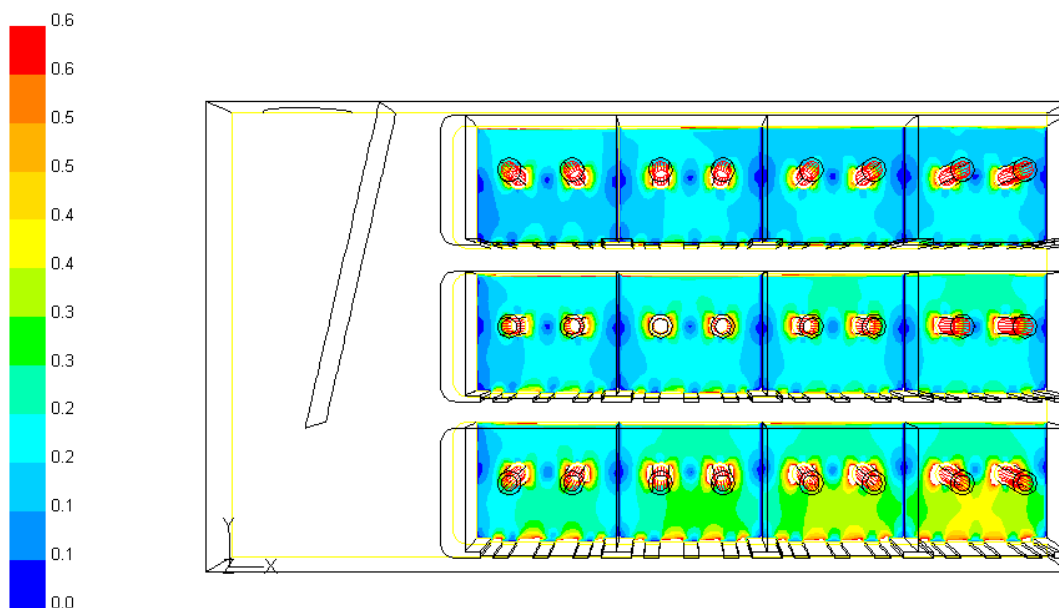
Figuur 4: Luchtsnelheden in Systeem 3, 2-laags, 4 hoog x 3 diep, met afgeronde uitblaasopeningen.

De resultaten van de twee meest belovende ontwerpen zijn samengevat in figuur 5 (Systeem 5) en figuur 6 (Systeem 7). Systeem 10 (zie bijlage) is verder buiten beschouwing gelaten omdat het niet op het bedrijf van toepassing is.

Duidelijk is te zien dat het gebied tussen de buizen dat een lagere luchtsnelheid heeft, bij Systeem 7 waar het bovenste en onderste kwadrant van de buizen is gesloten is, kleiner is dan bij systeem 5.



Figuur 5: Luchtsnelheden in Systeem 5, 3 hoog x 4 diep, met afgeronde uitblaasopeningen en open bovenste en onderste kwadranten van de buizen.



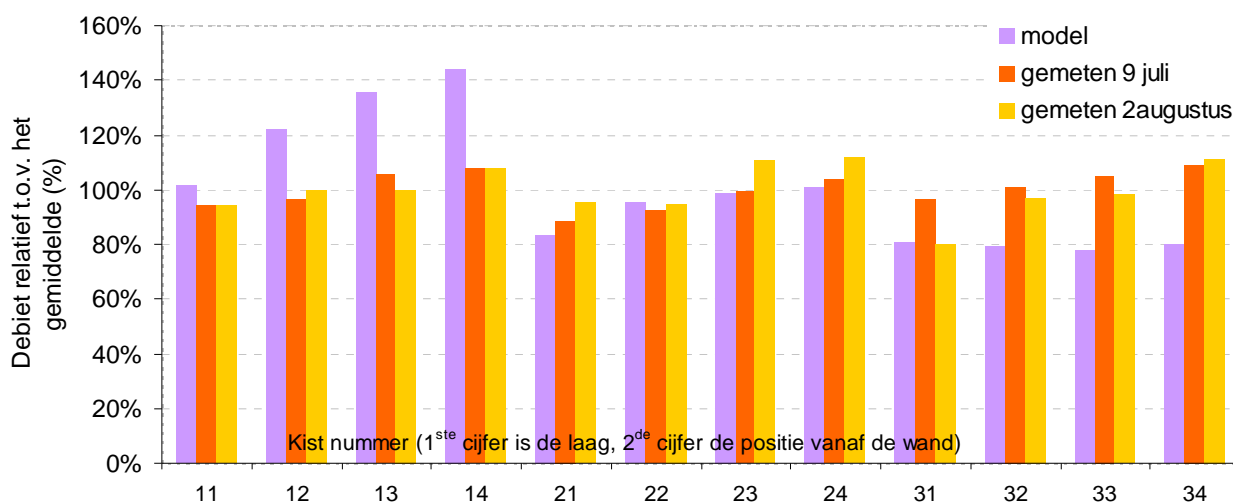
Figuur 6: Luchtsnelheden in Systeem 7, 3 hoog x 4 diep, met afgeronde uitblaasopeningen en gesloten bovenste en onderste kwadranten van de buizen.

## 3.2 Debietmetingen

De debieten per kist in Systeem 7, en van twee kisten in het 2-laagssysteem, zijn op 9 juli en 2 augustus gemeten en de resultaten zijn samengevat in tabel 3. In deze tabel zijn ook de door het CFD-model berekende debieten voor Systeem 7 vermeld. Het gemiddelde gemeten debiet lag op 9 juli fors lager dan volgens het model, op 2 augustus in dezelfde orde. Opvallend vooral is de lagere spreiding bij de metingen. Het model overschat vooral de debieten in de onderste laag, zie ook figuur 7.

Tabel 3: debiet (m<sup>3</sup>/uur) per kist in systeem 7 (½-laags) en systeem 3 (2-laags).

Kist	Systeem 7			Systeem 3	
	CFD-model	gemeten 9 juli	gemeten 2 augustus	Kist	2/8 resp 9/7
11	1701	1205	1442	11	
12	2036	1235	1530	12	
13	2268	1349	1533	13	
14	2408	1377	1657	21	
21	1395	1130	<b>1467</b>	22	
22	1593	<b>1184</b>	1450	23	
23	1652	1271	1697	31	
24	1691	1325	1714	32	
31	1347	1234	<b>1224</b>	33	
32	1332	1287	1484	41	<b>984</b>
33	1301	1338	1508	42	
34	1337	1395	1703	43	<b>1215</b>
gemiddeld	1672	1277	1534		
min	1301	1130	1224		
max	2408	1395	1714		
spreiding	33,1%	10,4%	15,9%		



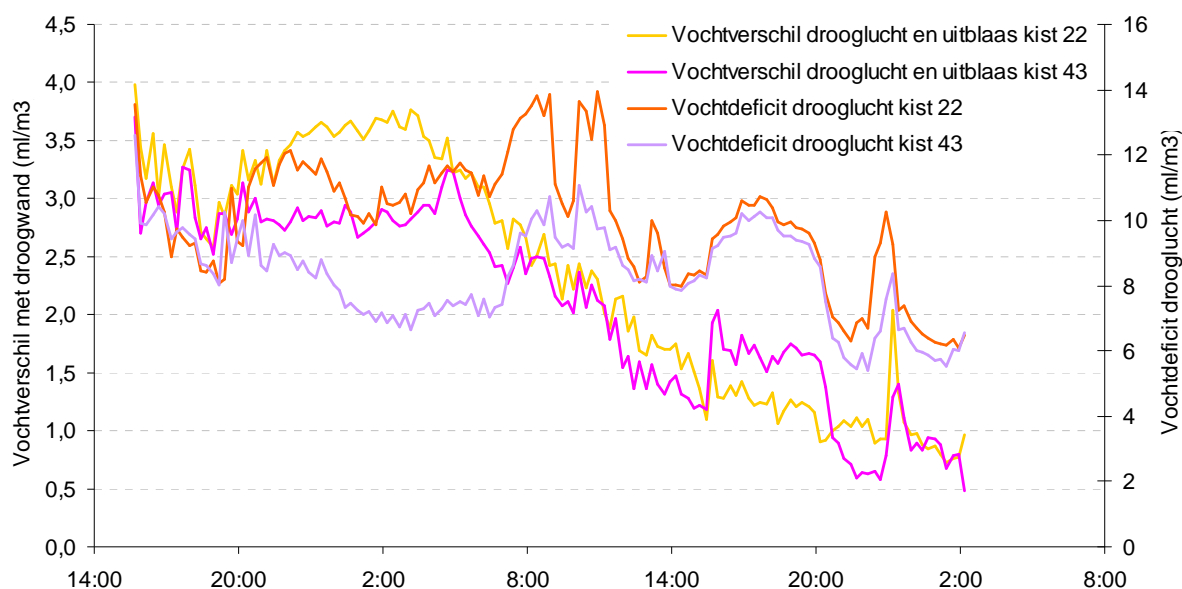
Figuur 7: Gemeten en berekende luchtverdelingen bij systeem 7.

### 3.3 Vochtafvoer uit de kist

Het verschil in absoluut vochtgehalte tussen de drooglucht die de kist instroomt en de lucht die er uitstroomt via de buizen (kist 22 met buizen met een gesloten bovenste en onderste kwadrant, in systeem 7) of de pallet (op kist 43 in systeem 3) geeft aan hoeveel ml vocht per m<sup>3</sup> lucht is afgevoerd.

Vermenigvuldigd met het debiet (m<sup>3</sup>/uur) geeft dit de hoeveelheid vocht die per uur wordt afgevoerd. Het debiet in kist 22 in systeem 7 was in de meetsessie op 9 juli 1184 m<sup>3</sup>/uur. Volgens de CFD-berekeningen zou deze kist een debiet iets onder het gemiddelde moeten hebben, volgens de metingen heeft deze kist het op één na laagste debiet, tabel 3. Het debiet in kist 43 was 1215 m<sup>3</sup>/uur en is volgens de CFD-berekeningen de kist met het hoogste debiet in systeem 3.

In figuur 8 is het verloop in vochtafvoer voor beide kisten samengevat. In deze figuur is op de 2<sup>de</sup> y-as ook het vochtdeficit van de drooglucht in de beide droogwanden weergegeven.



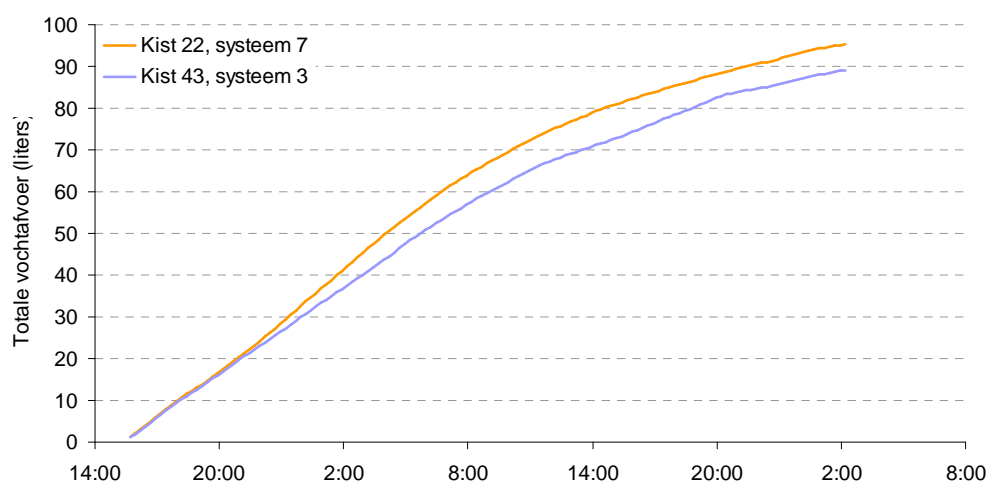
Figuur 8: Vochtverschil uitblaaslucht met drooglucht in systeem 7 (kist 22) en 3 (kist 43).

Figuur 8 laat zien dat tot 20:30 uur het vochtdeficit van de drooglucht in beide droogwanden gelijk is en daarom ook het vochtverschil tussen drooglucht en uitblaaslucht. Doordat ook het debiet vrijwel gelijk is wordt er dan ongeveer evenveel vocht afgevoerd.

Van 20:30 tot de volgende ochtend 11:00 uur is het vochtdeficit van de drooglucht van kist 43 echter lager dan van kist 22 (mogelijk door een andere instelling op de klimaatcomputer). Hierdoor wordt uit kist 43 minder vocht afgevoerd.

Vanaf 2:00 uur neemt het vochtverschil tussen de droogwand en kist 22 af en is niet meer evenredig met het vochtdeficit van de drooglucht. Bij kist 43 is dit vanaf 05:00 uur het geval. Het "vrije water" is nu vrijwel verdwenen en vochtdeficit en debiet zijn niet meer de enige factoren die vochtafvoer bepalen. Vochtdiffusie vanuit de bol wordt nu steeds meer de limiterende factor. Na ongeveer 36 uur is er uit de kisten 90 tot 95 liter water afgevoerd, figuur 9.

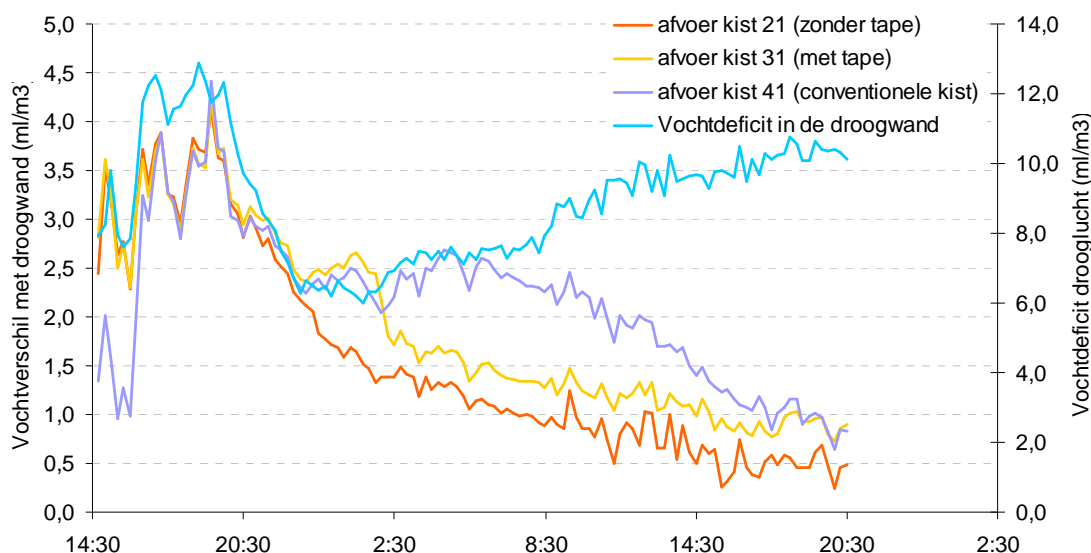
Doordat het vochtdeficit van de drooglucht voor de verschillende kisten ongelijk was is een vergelijking van de droogsnelheid niet goed mogelijk.



Figuur 9: Cumulatieve vochtafvoer uit kist 22 in systeem 7 en kist 43 in systeem 3.

Bij de meetsessie op 2 augustus stonden de te meten kisten voor dezelfde droogwand zodat het vochtdeficit van de drooglucht voor alle kisten gelijk was. In deze sessie is in de rechter rij kist 41 in systeem 3 gemeten en kist 21 (met open bovenste en onderste kwadrant, systeem 5) en kist 31 (met gesloten bovenste en onderste kwadrant, systeem 7) in het ½-laagssysteem in de linker rij. Voor kist 21 was het gemeten debiet 1467 m<sup>3</sup>/uur, voor kist 31 was dat 1224 m<sup>3</sup>/uur en voor kist 41 was dat 984 m<sup>3</sup>/uur.

In figuur 10 is het verloop in vochtafvoer voor de drie kisten samengevat. Ook in deze figuur is op de 2<sup>de</sup> y-as het vochtdeficit van de drooglucht in droogwand weergegeven.



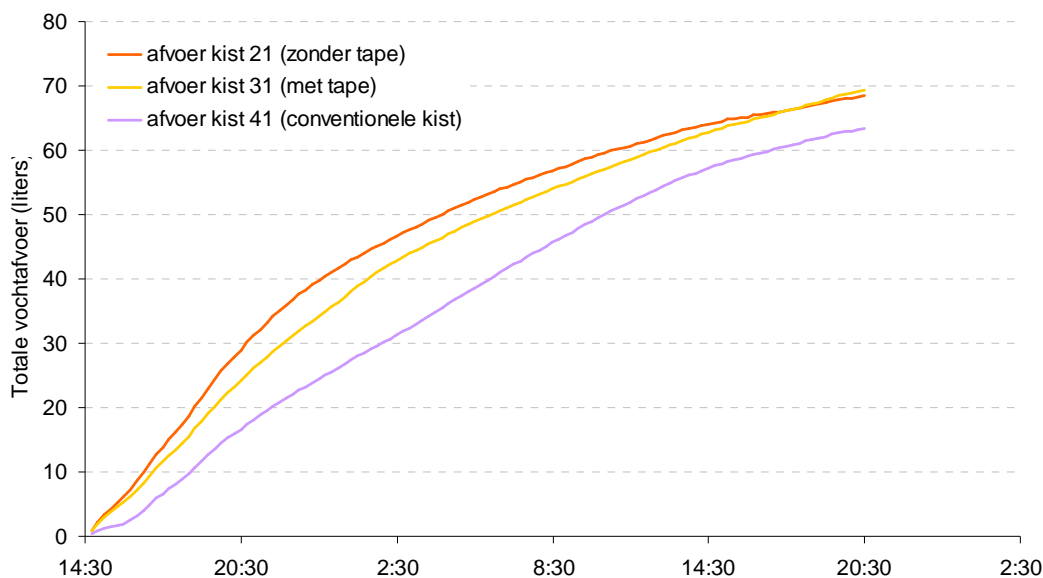
Figuur 10: Vochtverschil tussen droogwand en kist 21 (systeem 5), kist 31 (systeem 7) en kist 41 (systeem 3).

Het droog proces start om 14:45 uur en verloopt voor kist 21 en kist 31 tot ongeveer 20:30 gelijk, en parallel aan het vochtdeficit. Voor kist 41 duurt het echter tot ongeveer 17:00 uur voordat de vochtafvoer per m<sup>3</sup> lucht gelijk aan is aan de andere twee kisten. Rond 23:00 uur (na 8 uur) is in kist 21 het meeste vrije water afgevoerd, in kist 31 is dat rond 02:00 uur (na ongeveer 11 uur) en in kist 41 is dat rond 07:00 uur (na 16 uur). Na deze tijdstippen loopt de per m<sup>3</sup> lucht opgenomen hoeveelheid vocht niet meer parallel aan het vochtdeficit en is diffusiesnelheid de limiterende factor. Het sneldroogproces verloopt in de buizenkisten respectievelijk 30 tot 50% sneller dan in



kist 41. Achtergronden hierbij zijn het fors hogere debiet in kisten 21 en 31, en een latere opstart van het droogproces in kist 41.

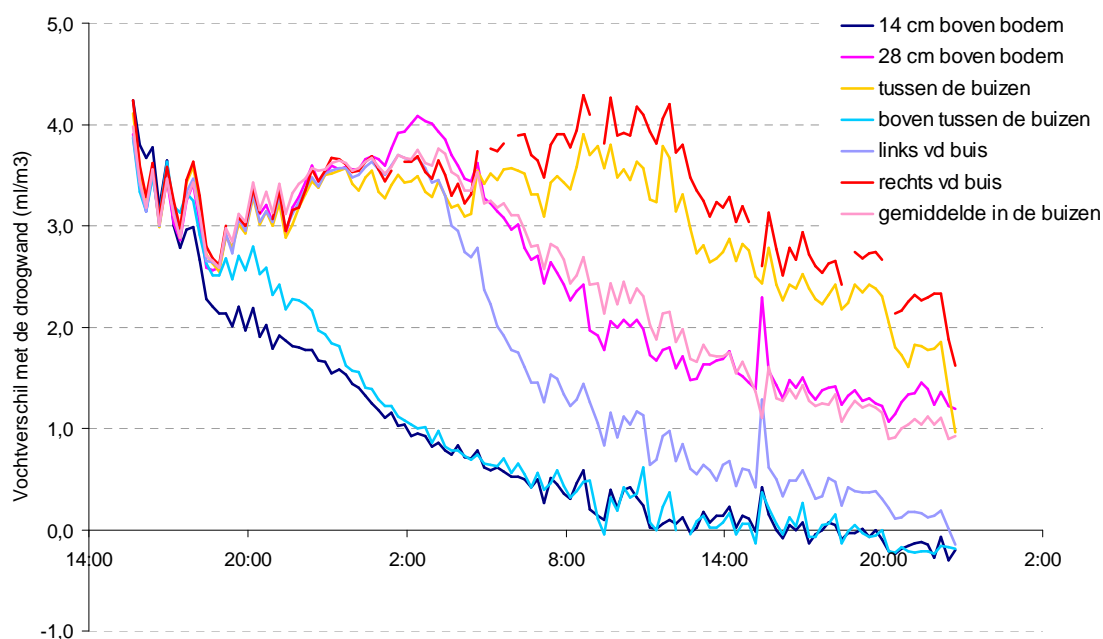
Na ongeveer 30 uur is er uit de kisten 65 tot 70 liter water afgevoerd, figuur 11.



Figuur 11: Cumulatieve vochttafvoer

### 3.4 Vochttafvoer tussen de bollen

Bij de meetsessie op 9 juli zijn de sensoren in kist 22 (bovenste en onderste kwadrant van de buis gesloten) op verschillende punten in de kist tussen de bollen ingegraven (zie figuur 1). De verschillen in absoluut vochtgehalte (ml/m<sup>3</sup> lucht) tussen drooglucht en bollen zijn samengevat in figuur 12.



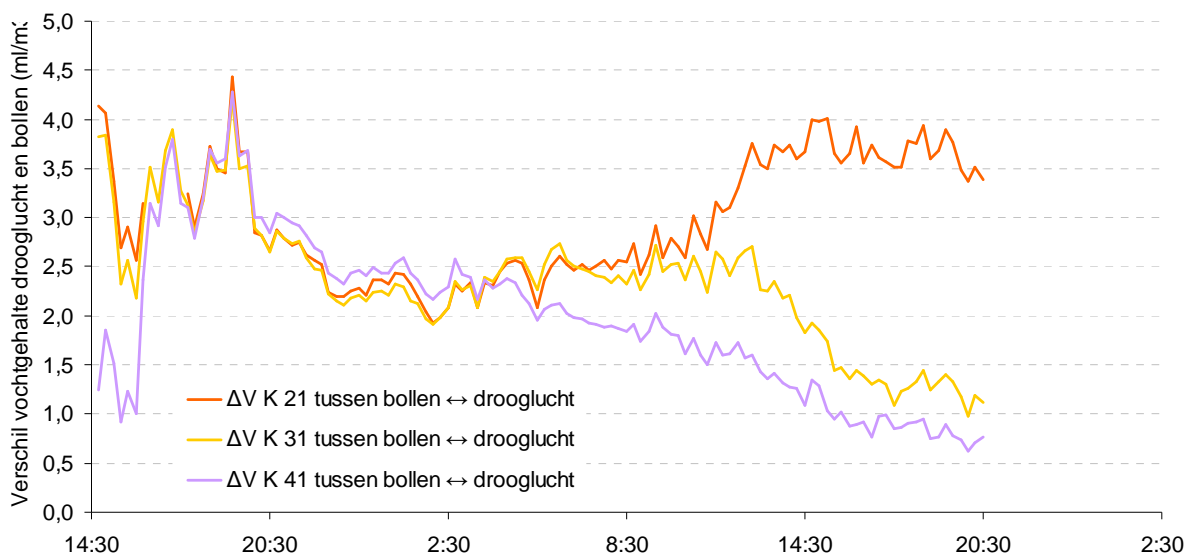
Figuur 12: Vochttafvoer tussen de bollen.

De figuur laat zien dat 14 cm vanaf de geperforeerde bodem de bollen het eerste (na 2 – 3 uur) “sneldroog” zijn. Vrijwel direct gevolgd door de bollen 14 cm onder de bovenkant. De buizen zijn dus qua droogsnelheid voldoende symmetrisch geplaatst. Op 28 cm van de bodem zijn de bollen na 10 – 11 uur droog. Het vochtgehalte loopt hier gelijk met de uitblaaslucht.

De bollen tussen de buizen, en ook rechts van de buis, drogen het laatst, pas na 24 uur. Links van de buizen wijkt hier sterk vanaf. Vermoedelijk is de sensor iets teveel naar links geplaatst waardoor deze net in de nattere zone kwam te liggen, vgl. met figuur 6. Uit die figuur volgt ook dat het volume bollen dat tussen en naast de buizen laat droogt waarschijnlijk klein is.

Bij de meetsessie op 2 augustus is tussen de bollen alleen tussen de buizen en op 20 cm diepte tussen de bollen in kist 41 gemeten. De resultaten zijn samengevat in figuur 13. Opvallend is weer (vergelijk ook met figuur 10) dat er de eerste 1½ - 2 uur in kist 41 op 20 cm onder de bovenkant weinig vocht wordt opgenomen. De achtergrond hierbij is dat wat in die periode onderin de kist door de warmere drooglucht wordt opgenomen voor een groot deel hoger in de kist op de dan nog koelere bollen weer neer slaat. Door de kortere weg in de buizenkisten speelt dit daar geen rol.

Ook is te zien dat het drogen tussen de buizen bij kist 21 achterblijft op kist 31. De luchtverdeling in kist 31 is dus beter dan in kist 21. Kist 31 blijft tussen de buizen iets achter op kist 41, maar omdat dit slechts een klein volume betreft in vergelijking met kist 41, is het de vraag hoe erg dit is.



Figuur 13: Vochtverschil drooglucht en tussen de buizen (kist 21 en 31) en op 20 cm diepte (kist 41).

Kist 31, systeem 7, zou nog verder verbeterd kunnen worden door meer dan het bovenste en onderste kwadrant af te sluiten. Dit leidt niet tot meer weerstand omdat het geperforeerde oppervlak van de buis ruim een factor 3 groter is dan het oppervlak van de 4 uitblaasopeningen van de 2 buizen. De weerstand zit dus in de diameter van de buis en niet in het oppervlak van de perforaties, hetgeen ook verklaart waarom er in de CFD-berekeningen geen verschil in “tegendruk” is tussen de systemen 4 en 8 en tussen 6 en 9.

### 3.5 Het droogproces

Op basis van resultaten kan het droogproces in 3 fasen verdeeld worden, die bij de verschillende systemen door verschil in debiet en door het verschil in afgelegde weg (afstand en route tussen inblaaspunt en uitblaaspunt van de kist) in duur verschillen.

Fase 1: het opstarten.

Bij systeem 3 (conventionele kist in het 2-laagssysteem) wordt het vocht in de eerste uren door de warmere

drooglucht opgenomen, maar bovenin de kist slaat dit vocht op de dan nog koudere bollen weer neer. Het vochtgehalte van de uitblaaslucht is daardoor lager dan bij de buizenkisten. In die kisten is de afgelegde weg gehalveerd en verdwijnt dit vocht vrijwel direct via de buizen.

Fase 2: het sneldrogen.

In deze fase is het vochtgehalte van de uitblaaslucht boven de 90% en de vochtafvoer wordt volledig bepaald door het vochtdeficit van de drooglucht. De duur van deze fase wordt bepaald door het debiet en stopt wanneer het meeste vrije water is afgevoerd. Door het hogere debiet in buizenkisten duurt deze fase bij de buizenkisten korter.

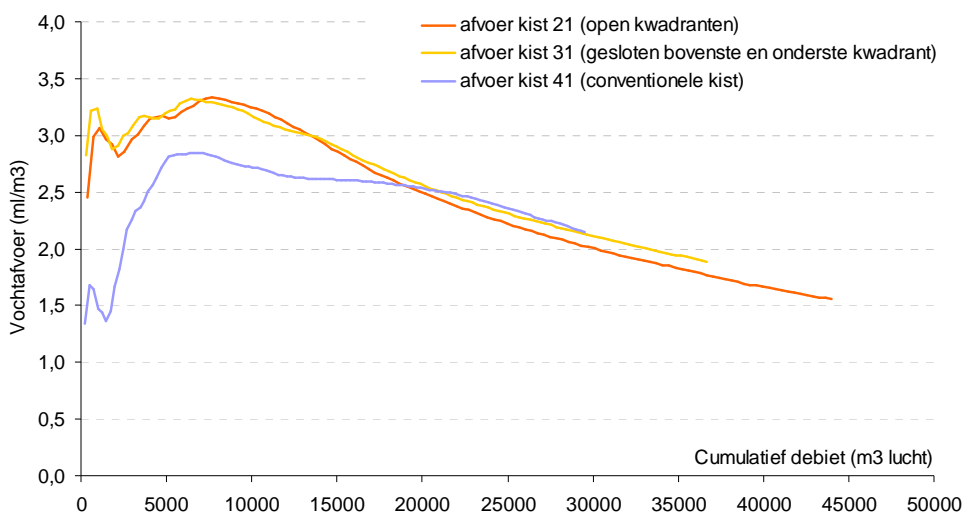
Fase 3: het nadrogen.

Als het meeste vrije water is afgevoerd, en (bijna) alle bollen aan de buitenkant droog zijn, begint het nadrogen. Het verhogen van het vochtdeficit van de drooglucht is in deze fase zinloos. Het vocht moet door diffusie naar de buitenkant van de bol verplaatst worden en een hoog vochtdeficit heeft hier geen effect op. Ook een hoog debiet heeft maar een beperkt effect. Het debiet moet voldoen aan de eis om voldoende vocht af te voeren om een concentratiegradiënt tussen de buitenkant van de bol en binnenin de bol in stand te houden, zodat het diffusieproces niet stopt. De overgang van fase 2 naar fase 3 is geleidelijk en duurt langer naarmate de luchtstroom in de kist minder goed verdeeld is.

In de praktijk betekent dit dat het voordeel van de buizenkisten zit in de zeer korte opstartfase en de kortere sneldroogfase. Deze twee fasen samen nemen voor systeem 5 ongeveer 8 uur in beslag, voor systeem 7 ongeveer 11 uur en voor systeem 3 ongeveer 16 uur, tabel 4. Achtergrond hierbij is dus niet alleen een hoger debiet bij de buizenkisten, maar vooral in de opstartfase ook per m<sup>3</sup> lucht grotere vochtafvoer, figuur 14.

Tabel 4: Duur droogfasen per systeem.

		Kist 21 systeem 5	Kist 31 systeem 7	Kist 41 systeem 3
opstartfase	van	14:45	14:45	14:45
	tot	15:15	15:15	16:45
	duur	0:30	0:30	2:00
sneldroogfase	van	15:15	15:15	16:45
	tot	23:00	2:00	7:00
	duur	7:45	10:15	14:15
	som	8:15	10:45	16:15
nadrogen	vanaf	23:00	2:00	7:00



Figuur 14: Vochtafvoer t.o.v. cumulatief debiet.

## 3.6 Economische analyse

Door het sneller opstarten van het droogproces en de kortere sneldroogtijd is het energieverbruik in de buizenkisten lager. Als direct na de sneldrooifase de kisten in de bewaarcel nagedroogd zouden worden, wordt er bij drogen 17 tot 23 % op gas bespaard en 34 tot 49% op elektra, tabel 5. De besparing op gas is kleiner omdat het kortere droogproces voor het grootste deel door een hoger debiet per ventilator wordt gerealiseerd waardoor in een kortere periode dus meer lucht moet worden verwarmd en dit per uur dus ook meer gas kost. Toch wordt er bespaard op gas omdat de opstartperiode bij de buizenkisten zoveel korter is. Financieel is de energiebesparing echter erg laag: € 0,22 tot € 0,31 per kist.

Door de kortere sneldroogtijd wordt de kans op ziektes kleiner. Het economisch voordeel hiervan zal van jaar tot jaar verschillen, en incidenteel erg groot kunnen zijn, maar is moeilijk te berekenen.

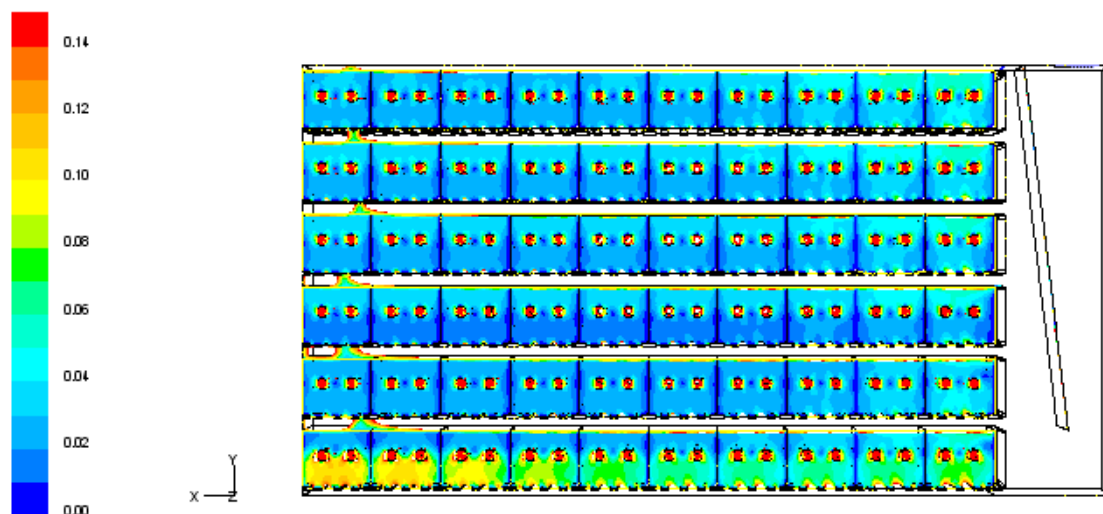
Tabel 5: Energieverbruik en -kosten per kist bij sneldrogen bij  $\Delta T = 5^\circ\text{C}$  en 12 kisten per 2,2 kW ventilator

Systeem		5 (kist 21)	7 (kist 31)	3 (41)
debiet	m <sup>3</sup> /uur	1465	1224	984
duur opstart + sneldrogen	uur	8:15	10:45	16:15
gasverbruik	m <sup>3</sup>	2,26	2,44	2,94
bespaard tov. kist 41	%	23%	17%	
elektra	kWh	1,51	1,97	2,98
bespaard tov. kist 41	%	49%	34%	
totaal energie	MJ	93	104	130
bespaard tov. kist 41	%	29%	20%	
energiekosten	€	€ 0,86	€ 0,97	€ 1,24
bespaard tov. kist 41	€	€ 0,31	€ 0,22	

gasprijs € 0,30  
kWh-prijs € 0,12

Als de buizenkisten echter ook bij de bewaring worden gebruikt is de besparing op elektra fors: door de betere luchtverdeling over de kisten (figuur 15) en de lagere weerstand kan ruim 50% energie bespaard worden. Dit kan bij een bewaarduur van 120 dagen €6 - €10 opleveren. Terugverdientijden kunnen echter nog niet worden berekend daar de meerkosten van de buizenkist nog niet bekend zijn en afhangen van o.a. materiaalkeuze en productievolume.

Om bestaande 1-laags droogwanden geschikt te maken voor de buizenkisten moet de bovenkant van de droogwand aangepast worden om de bovenste kisten ook van boven aan te kunnen blazen. Een alternatief is om voor de bovenste kistenlaag de gangbare kuubskisten te gebruiken.



Figuur 15: Resultaten CFD-berekeningen voor luchtsnelheden bij de bewaring in 6 hoog x 10 diep kistenstapeling.

## 4 Conclusies en Aanbevelingen

Uit de resultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De luchtverdeling over de kistenstapeling is bij de buizenkisten gelijkmatiger dan bij gangbare kisten.
- De opstartfase van het droogproces is bij de buizenkisten korter omdat de door de drooglucht afgelegde weg door de bollen gehalveerd is tov. de gangbare kist. Daardoor is de gemiddelde vochtafvoer per m<sup>3</sup> lucht in deze fase groter.
- De buizenkisten hebben een lagere weerstand en daardoor een hoger debiet. Hierdoor wordt de sneldroogperiode verkort.
- De buizenkisten zijn daardoor 30 tot 50% eerder sneldroog dan de gangbare kisten.
- Tussen de buizen zijn de bollen eerder droog wanneer het bovenste en onderste kwadrant gesloten is.
- Bij het drogen wordt door de buizenkisten 17 tot 23 % op gas, en 34 tot 49% op elektra bespaard. De totale energiebesparing is 20 tot 29% per kist.
- De financiële besparing is echter klein: €0,22 tot €0,31 per kist.
- Door het kortere sneldroogproces is de kans op ziektes kleiner. Het economisch voordeel hiervan kan erg groot zijn, maar is moeilijk te berekenen.
- Als de buizenkisten ook bij de bewaring worden ingezet kan door de lagere weerstand en de betere luchtverdeling ruim 50% op elektra worden bespaard. Dit kan tot €10,- per kist per seizoen opleveren.
- Dit vereist een aanpassing aan de bovenkant van een 1-laagssysteemwand.
- De terugverdientijd op basis van lagere energiekosten kan nog niet worden berekend omdat de meerkosten van de buizenkist nog niet bekend zijn.

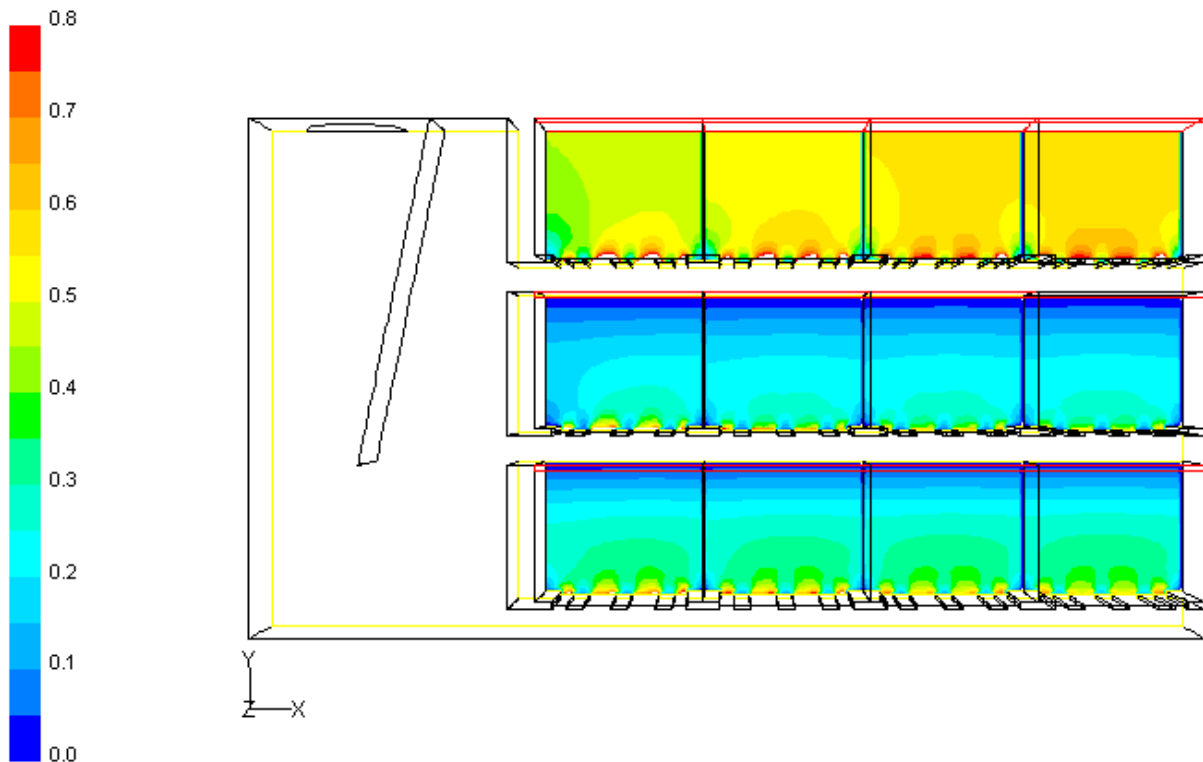
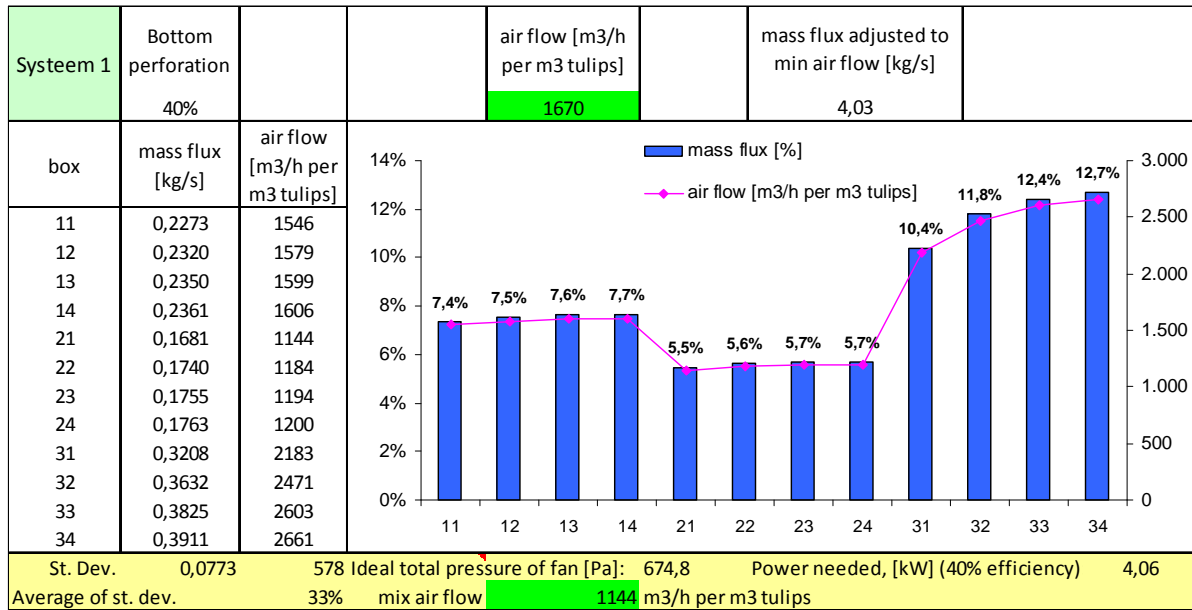
### Aanbevelingen:

- Luchtverdeling in de buizenkist kan nog verder worden verbeterd door meer af te sluiten dan de kwadranten, bv. 2 x 110% ipv. 2 x 90%. Nog verder afsluiten zou gecombineerd kunnen worden met een hoger perforatie percentage, bv. 60%. Ook een iets kleinere diameter van de buis is mogelijk een optie. Achtergrond hierbij is dat in de huidige buizenkisten de weerstand in de diameter van de buis zit en niet de buisperforaties.
- Thermostaat en frequentieregelaar zijn te sturen op basis van het verschil tussen het absolute vochtgehalte van de drooglucht en de uitblaaslucht. Hiermee zou een regeling ontworpen kunnen worden waarmee steeds de optimale combinatie van verwarming en debiet toegepast wordt om zo energie-efficiënt mogelijk binnen een bepaalde tijd te drogen.



## Bijlage 1: CFD-modellering

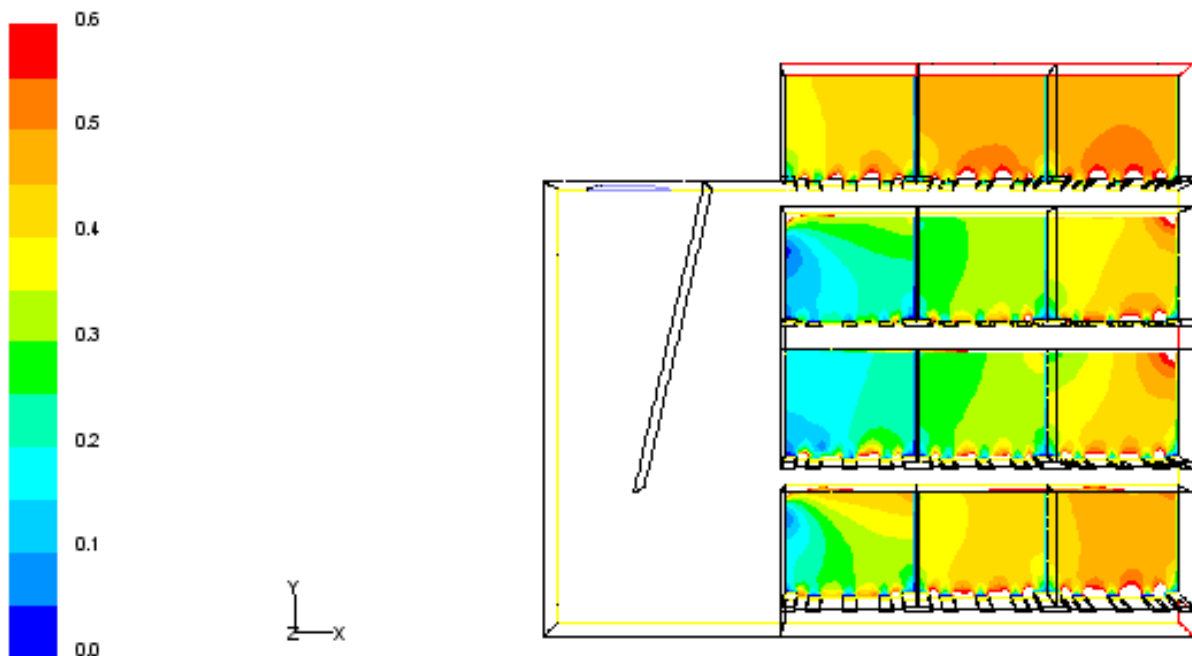
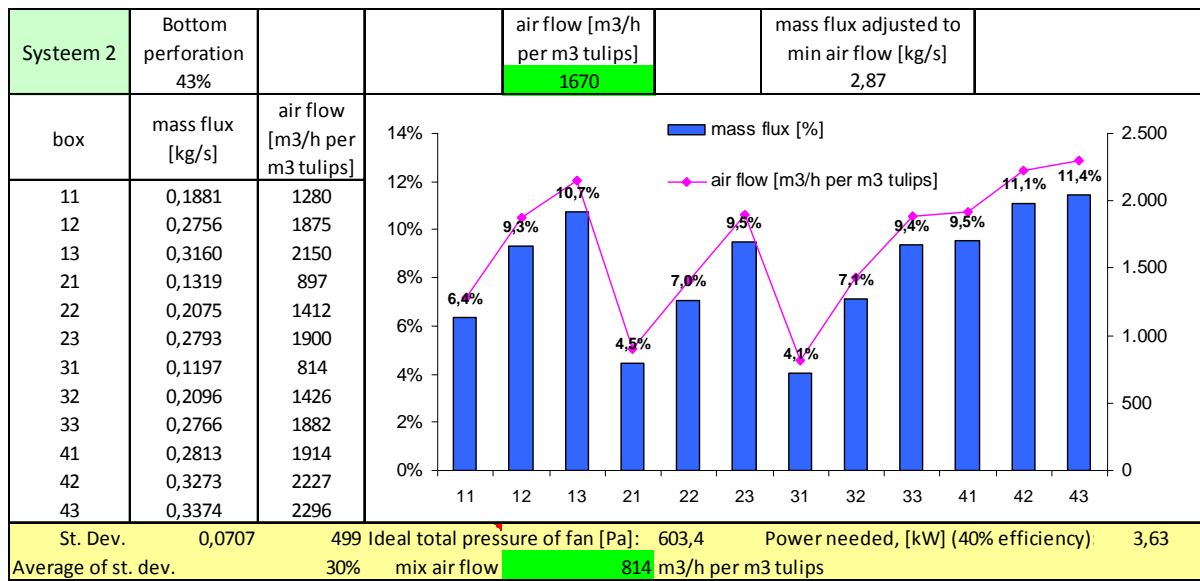
System 1, 1-laags, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, gemiddeld debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).



Luchtsnelheden (m/s) System 1, 1-laags, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, gemiddeld debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

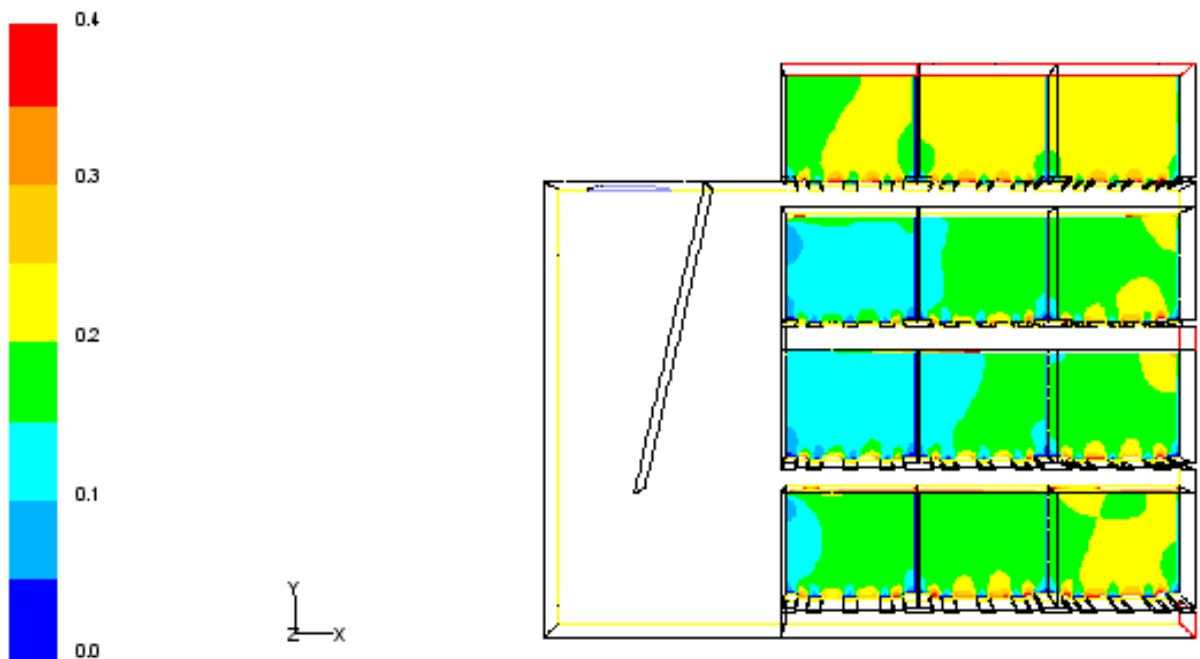
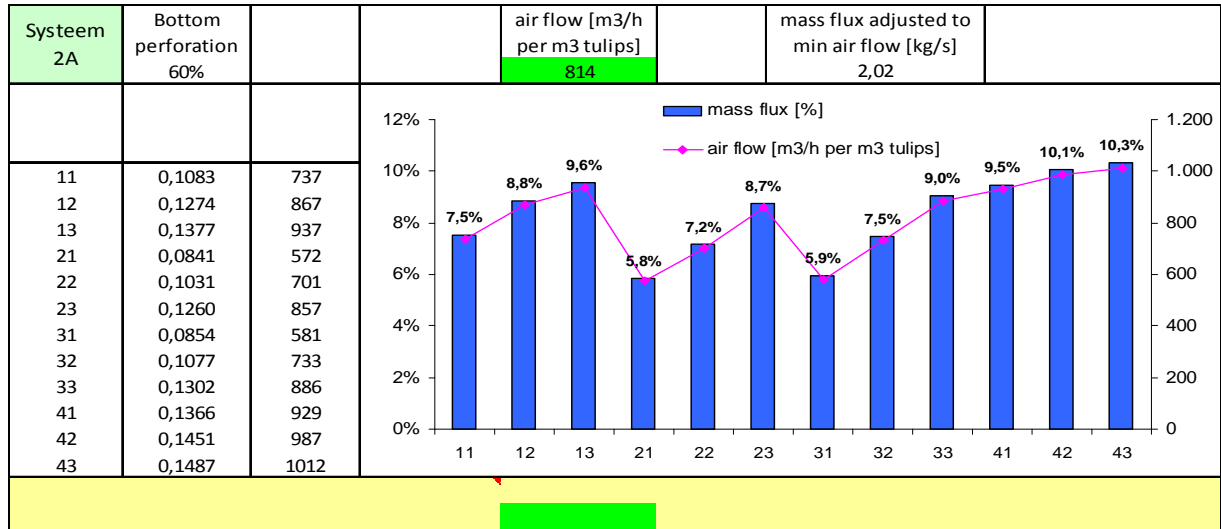


System 2: 2-laagssysteem, 4 hoog x 3 diep, bodemperforatie 43%, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).



System 2: 2-laagssysteem, 4 hoog x 3 diep, bodemperforatie 43%, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

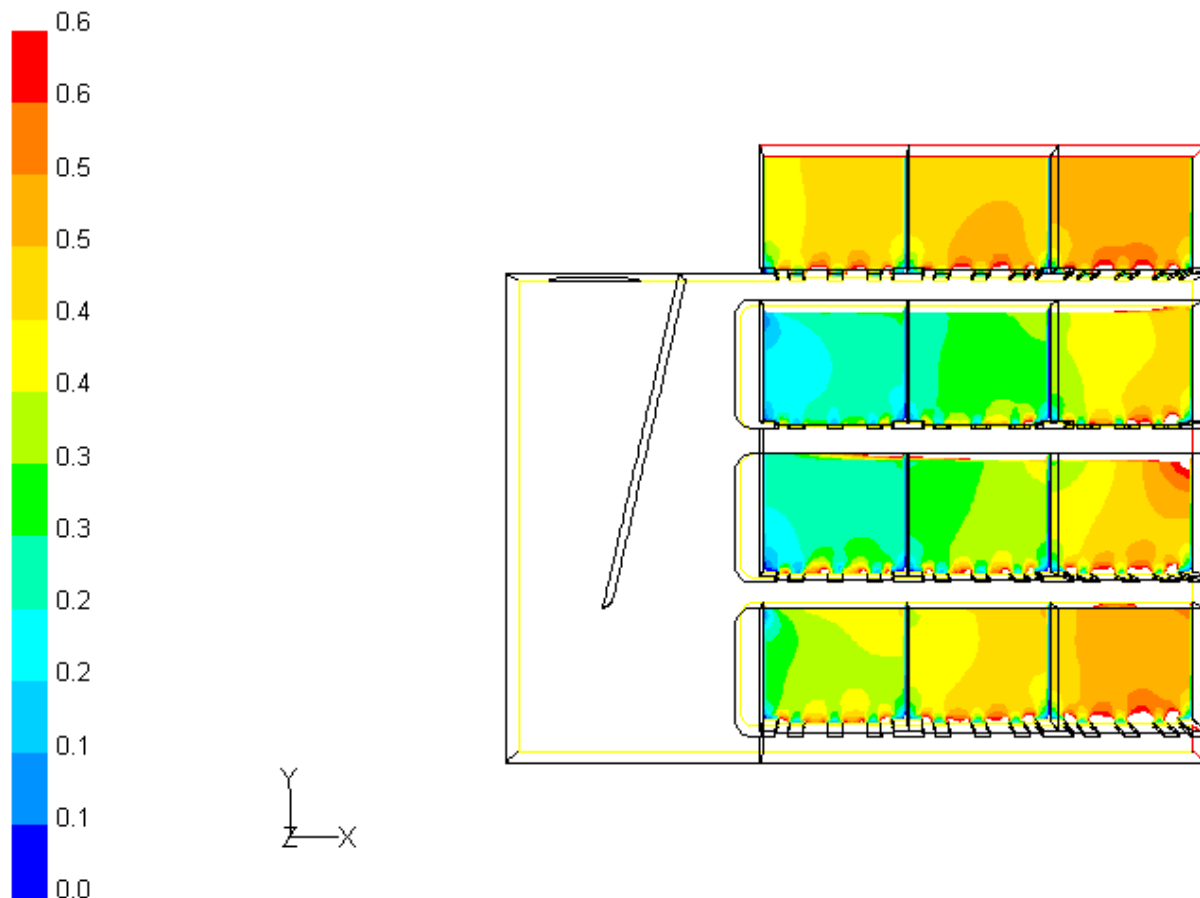
System 2A: 2-laagssysteem, 4 hoog x 3 diep, bodemperforatie 60%, debiet 814 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).



Luchtsnelheden (m/s) System 2A, 2-laagssysteem, 4 hoog x 3 diep, bodemperforatie 60%, debiet 814 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

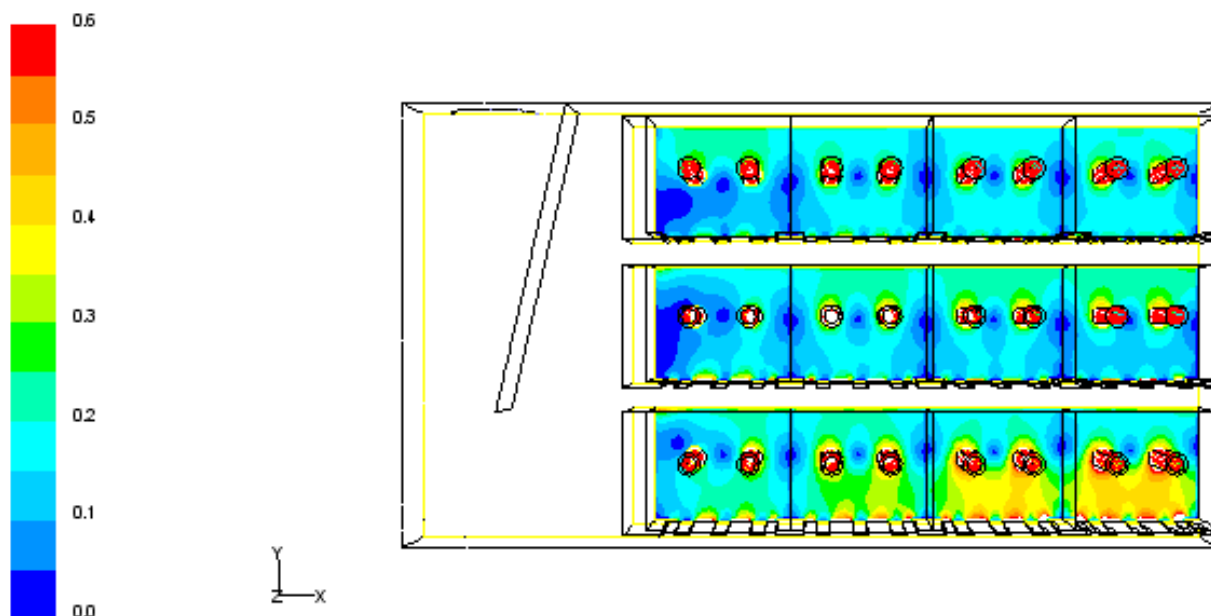
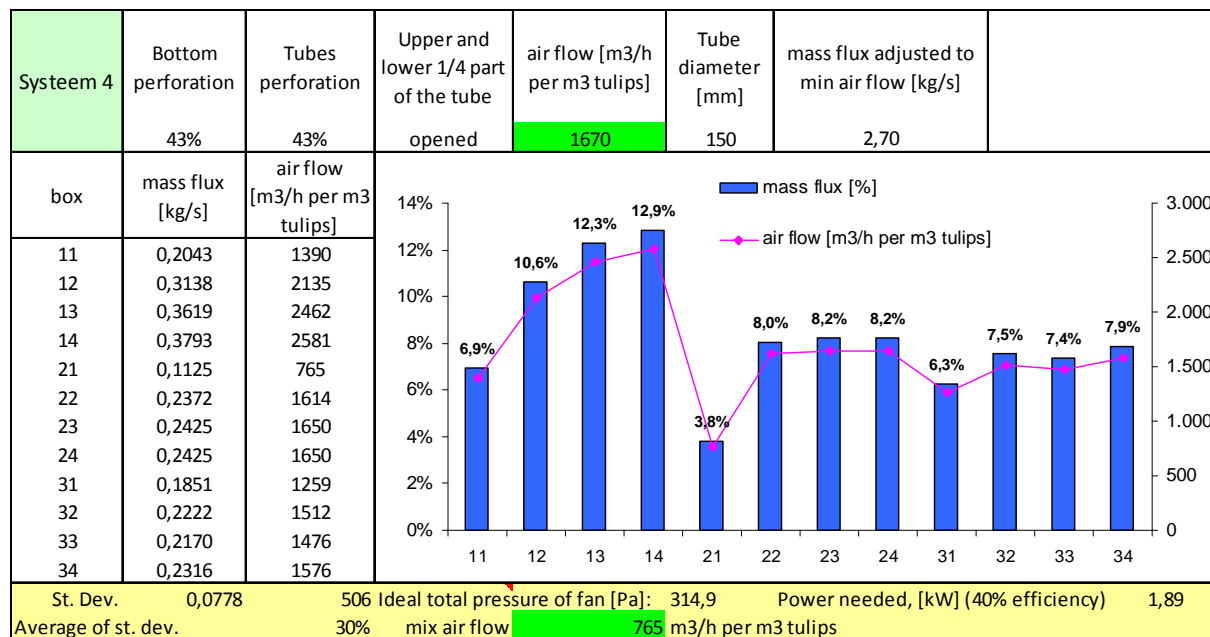
System 3: 2-laagssysteem, 4 hoog x 3 diep, bodemperforatie 43%, afgeronde uitblaasopeningen, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

Systeem 3		Bottom perforation			air flow [m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips]	mass flux adjusted to min air flow [kg/s]
		43%			1670	3,20
box	mass flux [kg/s]	air flow [m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips]				
11	0,2250	1531	7,6%			
12	0,2712	1846	9,2%			
13	0,3210	2184	10,9%			
21	0,1541	1049	5,2%			
22	0,2071	1409	7,0%			
23	0,2863	1948	9,7%			
31	0,1334	908	4,5%			
32	0,1848	1258	6,3%			
33	0,2607	1774	8,8%			
41	0,2780	1892	9,4%			
42	0,3046	2073	10,3%			
43	0,3237	2203	11,0%			
St. Dev.		0,0623	437	Ideal total pressure of fan [Pa]: 519,5		Power needed, [kW] (80% efficienc
Average of st. dev.			26%	mix air flow 908 m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips		1,56



Luchtsnelheden (m/s) System 3: 2-laagssysteem, 4 hoog x 3 diep, bodemperforatie 43%, afgeronde uitblaasopeningen, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

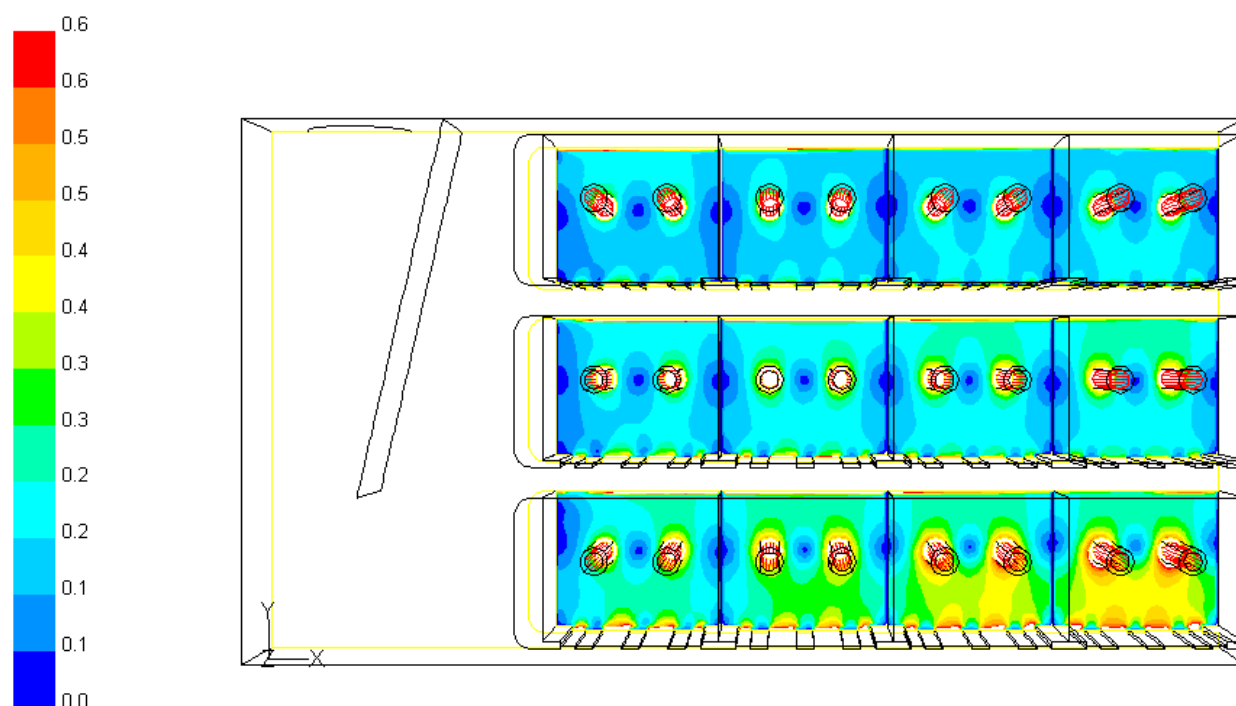
System 4: ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten open, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).



Luchtsnelheden (m/s) System 4: ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten open, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

System 5: ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten open, afgeronde uitblaasopening, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

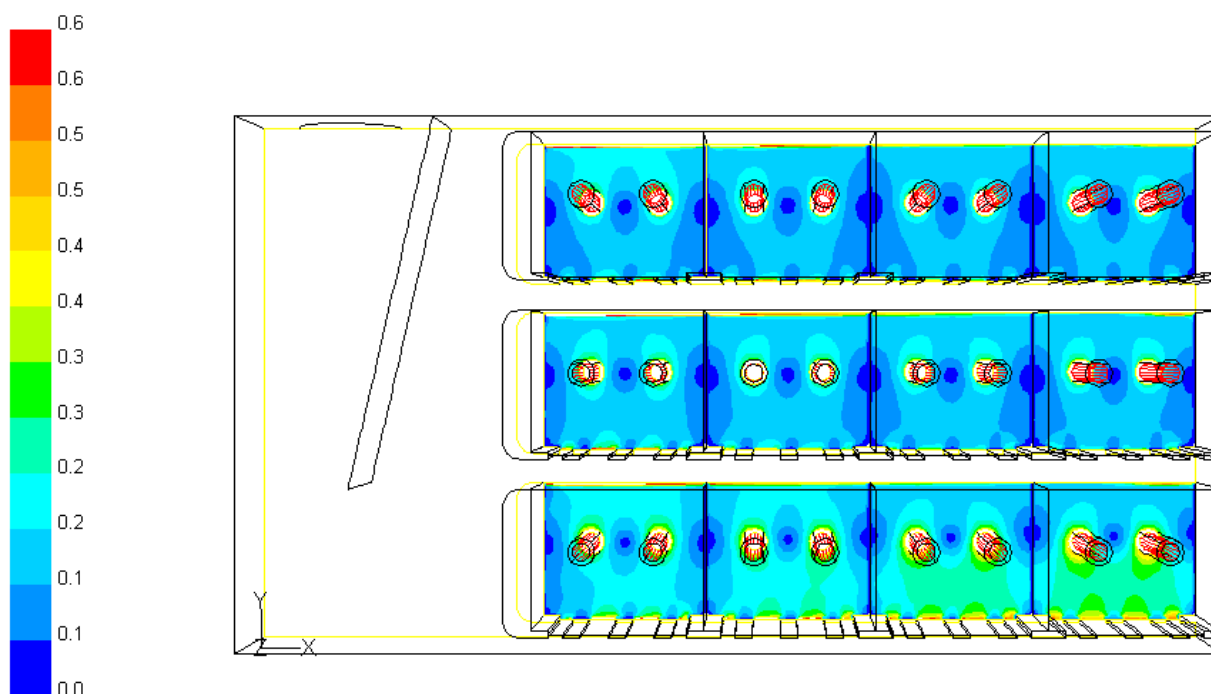
System 5	Bottom perforation	Tubes perforation	Upper and lower 1/4 part of the tube opened	air flow [m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips]	Tube diameter [mm]	mass flux adjusted to min air flow [kg/s]				
	43%	43%		1670	150	4,34				
box	mass flux [kg/s]	air flow [m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips]								
11	0,2442	1662								
12	0,3135	2133								
13	0,3594	2445								
14	0,3862	2628								
21	0,1929	1312								
22	0,2306	1569								
23	0,2400	1633								
24	0,2471	1681								
31	0,1829	1244								
32	0,1822	1240								
33	0,1810	1232								
34	0,1896	1290								
St. Dev.	0,0722	484					Ideal total pressure of fan [Pa]:	260,3	Power needed, [kW] (80% efficienc	0,78
Average of st. dev.		29%					mix air flow	1232 m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips		



Luchtsnelheden (m/s) System 5: ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten open, afgeronde uitblaasopening, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

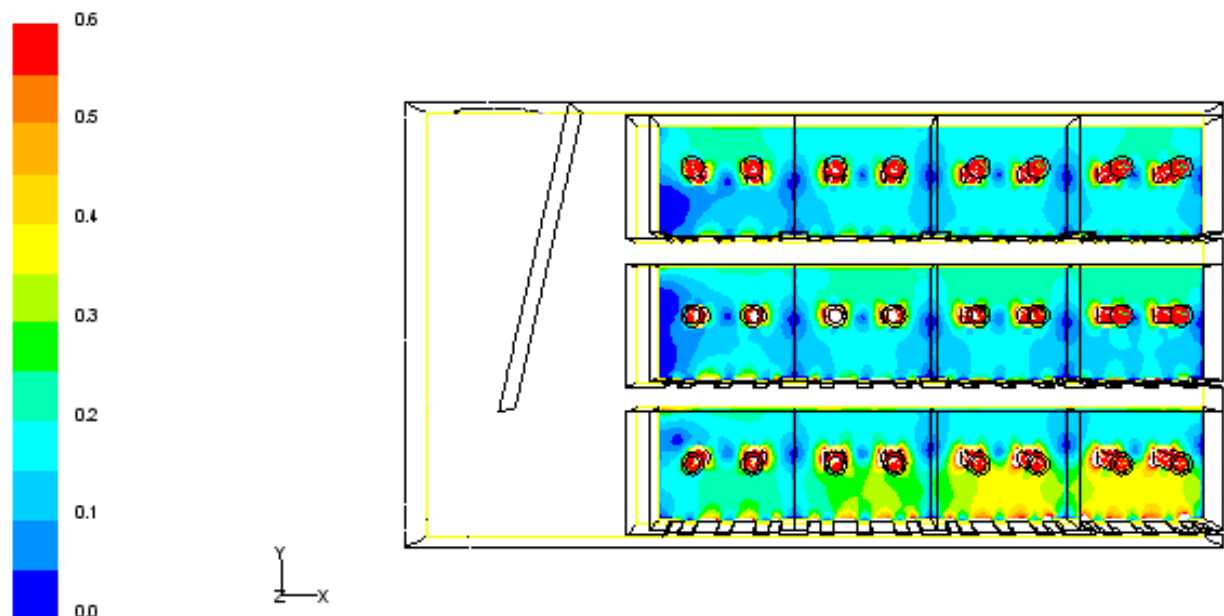
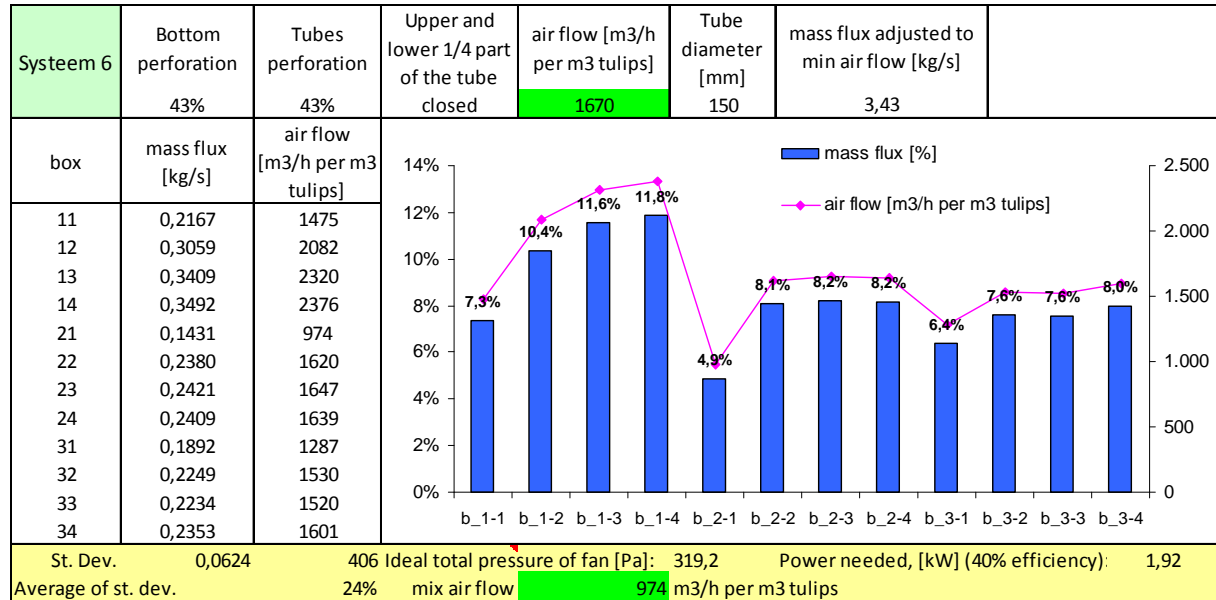
System 5A: ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten open, afgeronde uitblaasopening, debiet 1232 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

System 5A	Bottom perforation	Tubes perforation	Upper and lower 1/4 part of the tube	air flow [m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips]	Tube diameter [mm]	mass flux adjusted to min air flow [kg/s]				
	43%	43%	opened	1232	150	3,47				
box	mass flux [kg/s]	air flow [m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips]								
11	0,2072	1410								
12	0,2184	1486								
13	0,2329	1585								
14	0,2429	1653								
21	0,1738	1182								
22	0,1664	1132								
23	0,1615	1099								
24	0,1593	1084								
31	0,1647	1121								
32	0,1542	1049								
33	0,1444	982								
34	0,1486	1011								
St. Dev.	0,0346	235					Ideal total pressure of fan [Pa]:	146,3	Power needed, [kW] (80% efficiency):	0,32
Average of st. dev.		19%					mix air flow	982 m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips		



Luchtsnelheden (m/s) System 5A: ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten open, afgeronde uitblaasopening, debiet 1232 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

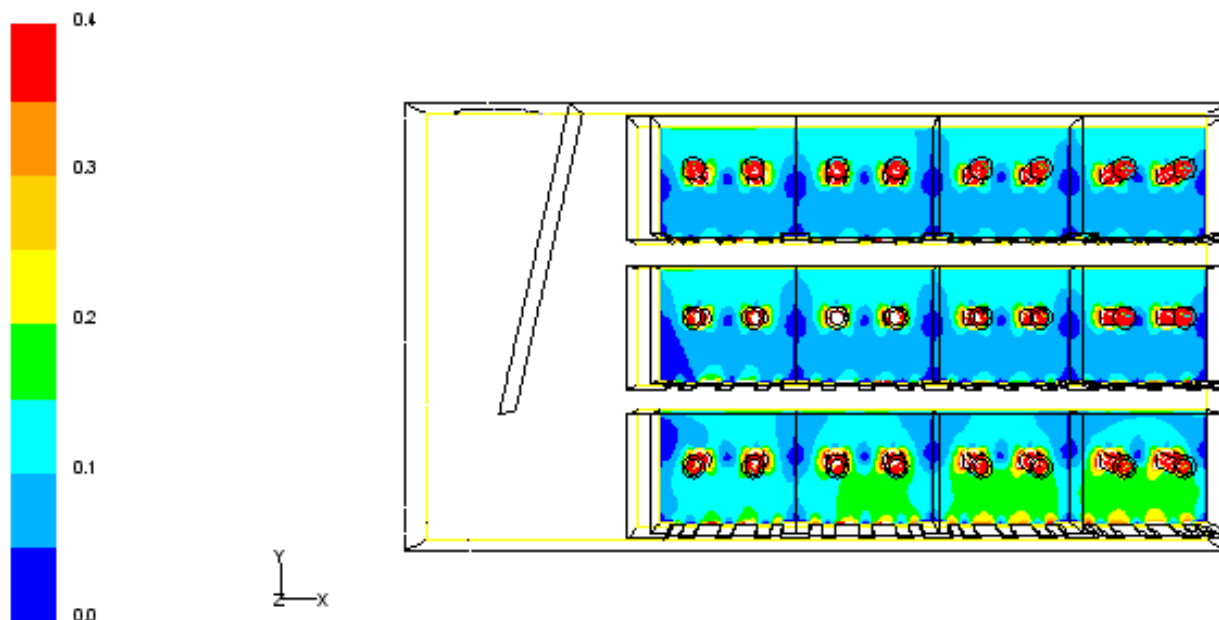
System 6: ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten gesloten, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).



Luchtsnelheden (m/s) System 6: ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten gesloten, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

System 6A: ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten gesloten, debiet 974 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

Systeem 6A	Bottom perforation	Tubes perforation	Upper and lower 1/4 part of the tube closed	air flow [m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips]	Tube diameter [mm]	mass flux adjusted to min air flow [kg/s]	
	43%	43%		974	150	2,95	
box	mass flux [kg/s]	air flow [m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips]					
11	0,1446	984					
12	0,1685	1147					
13	0,1801	1226					
14	0,1846	1256					
21	0,1231	838					
22	0,1296	882					
23	0,1313	894					
24	0,1316	895					
31	0,1360	926					
32	0,1310	891					
33	0,1280	871					
34	0,1321	899					
St. Dev.	0,0224	147	Ideal total pressure of fan [Pa]:	114,9	Power needed, [kW] (40% efficiency)	0,40	
Average of st. dev.		15%	mix air flow	838	m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips		

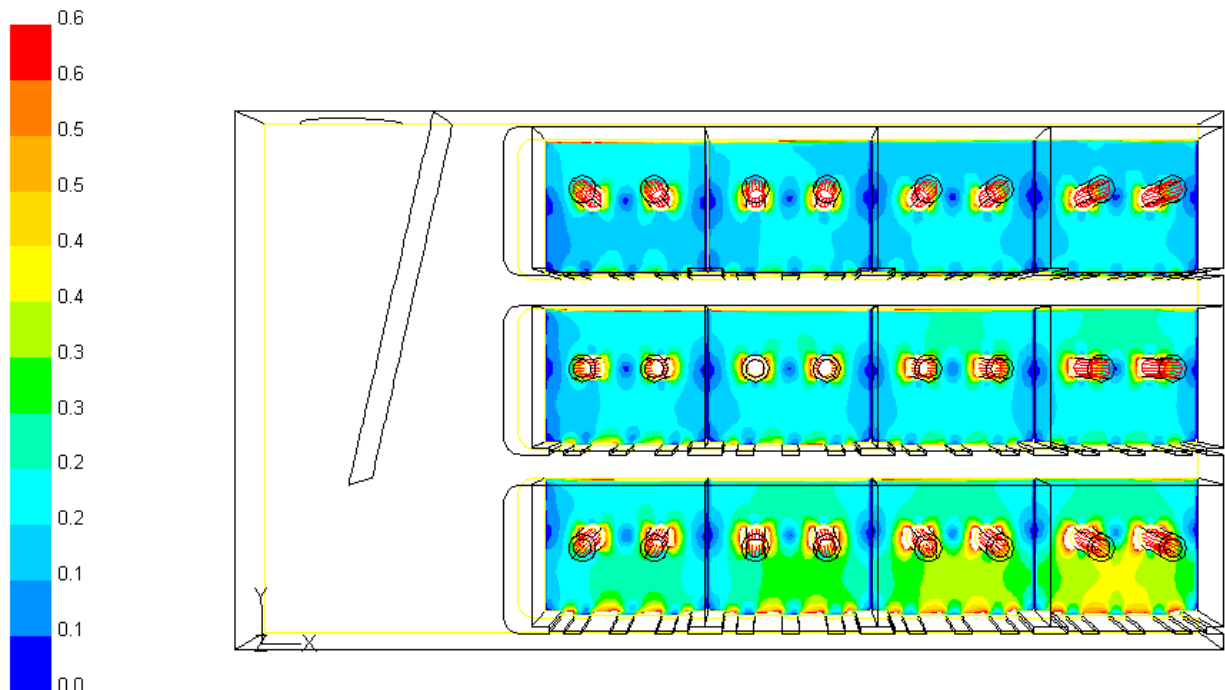


Luchtsnelheden (m/s) System 6A: ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten gesloten, debiet 974 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).



System 7: ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten gesloten, afgeronde uitblaasopening, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

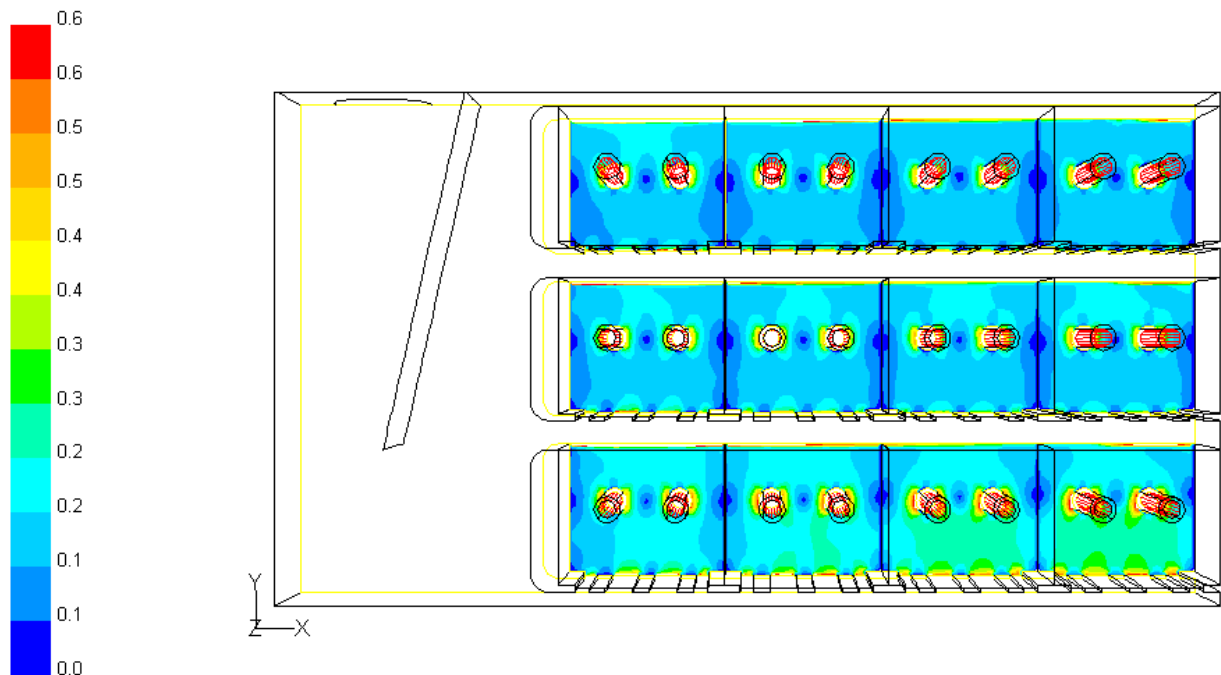
System 7	Bottom perforation	Tubes perforation	Upper and lower 1/4 part of the tube closed	air flow [m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips]	Tube diameter [mm]	mass flux adjusted to min air flow [kg/s]				
	43%	43%		1670	150	4,59				
box	mass flux [kg/s]	air flow [m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips]								
11	0,2500	1701								
12	0,2992	2036								
13	0,3333	2268								
14	0,3538	2408								
21	0,2051	1395								
22	0,2341	1593								
23	0,2428	1652								
24	0,2485	1691								
31	0,1979	1347								
32	0,1957	1332								
33	0,1913	1301								
34	0,1965	1337								
St. Dev.	0,0562	380					Ideal total pressure of fan [Pa]:	265,4	Power needed, [kW] (80% efficienc	0,80
Average of st. dev.		23%					mix air flow	1301	m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips	



Luchtsnelheden (m/s) System 7: ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten gesloten, afgeronde uitblaasopening, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

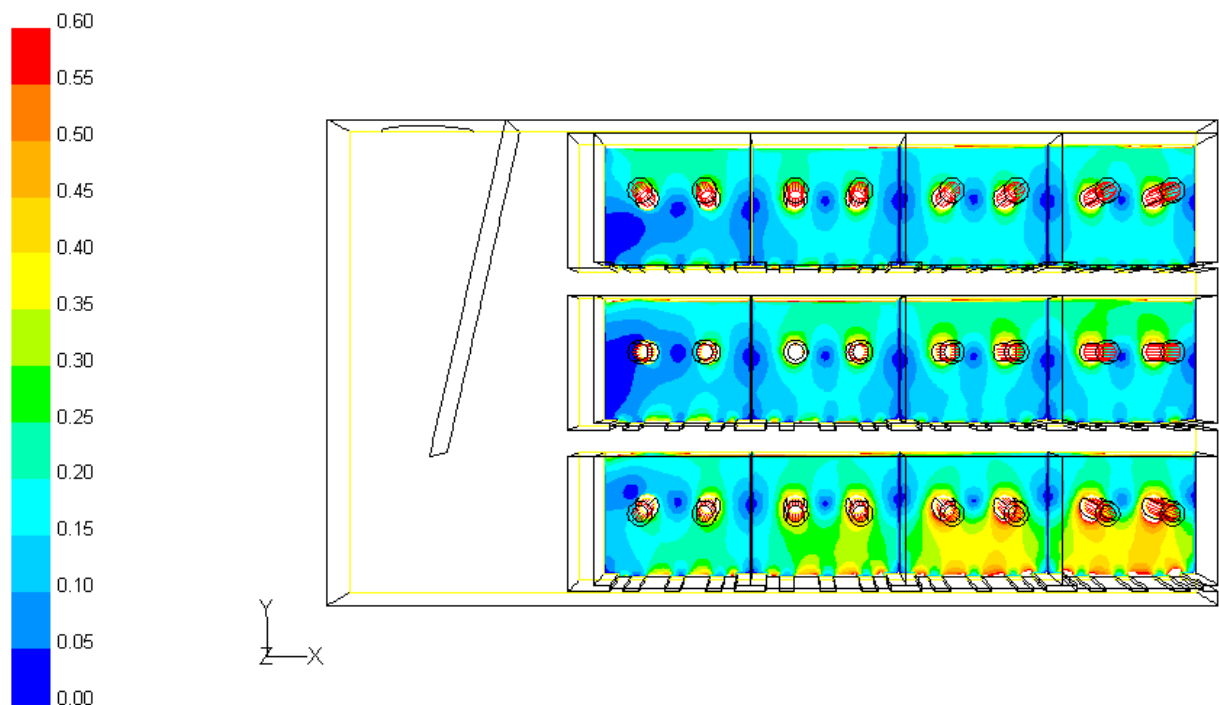
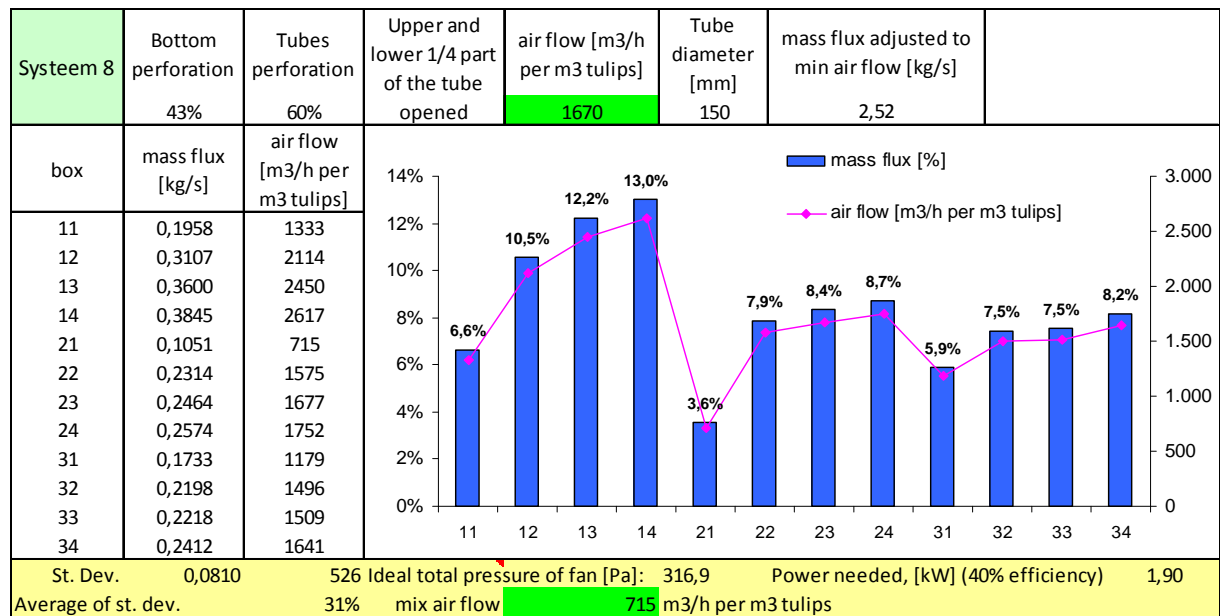
System 7A: 1/2-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten gesloten, afgeronde uitblaasopening, debiet 1301 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

System 7A	Bottom perforation	Tubes perforation	Upper and lower 1/4 part of the tube closed	air flow [m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips]	Tube diameter [mm]	mass flux adjusted to min air flow [kg/s]
	43%	60%		1301	150	3,80
box	mass flux [kg/s]	air flow [m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips]				
11	0,2065	1405				
12	0,2276	1549				
13	0,2430	1654				
14	0,2519	1714				
21	0,1768	1203				
22	0,1812	1233				
23	0,1816	1235				
24	0,1823	1241				
31	0,1664	1133				
32	0,1635	1113				
33	0,1582	1076				
34	0,1625	1106				
St. Dev.	0,0328	222	Ideal total pressure of fan [Pa]:	165,4	Power needed, [kW] (80% efficienc	0,39
Average of st. dev.		17%	mix air flow	1076	m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips	



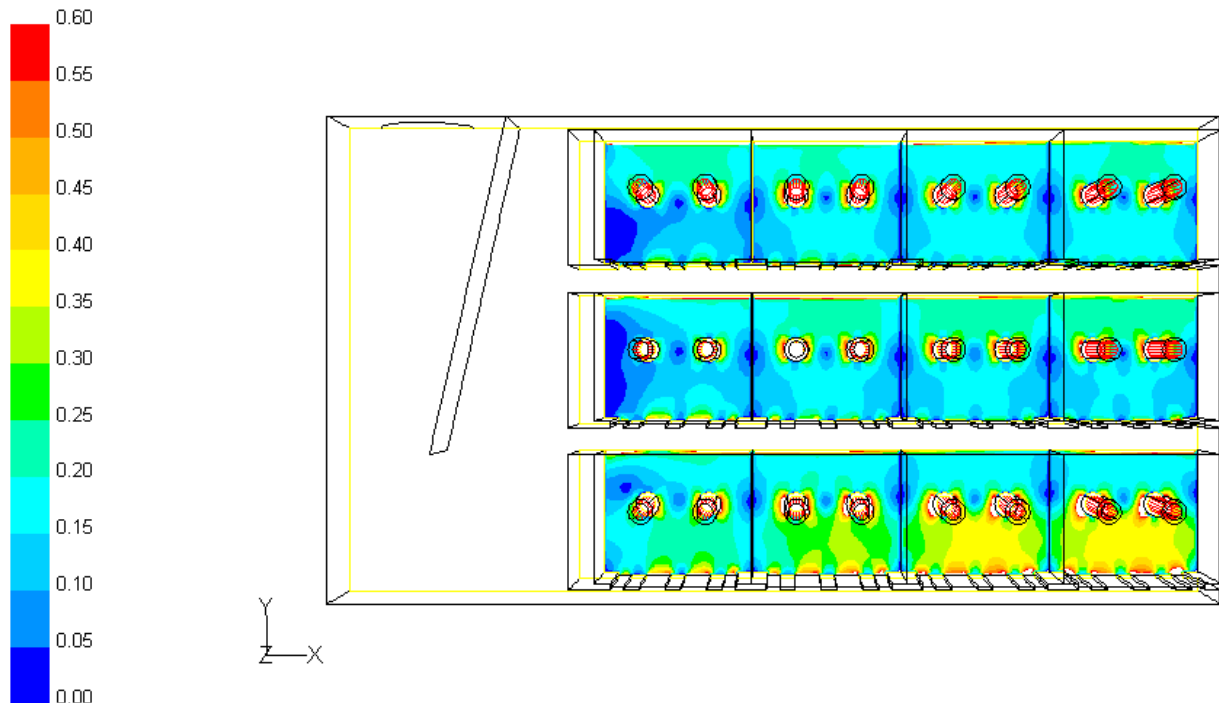
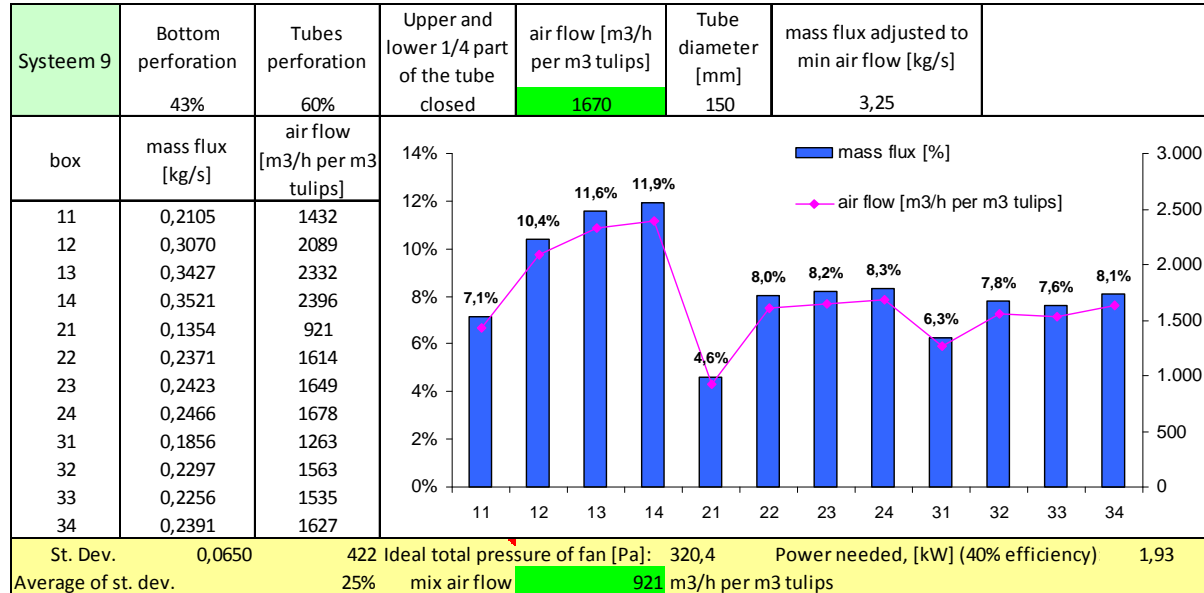
System 7A: 1/2-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten gesloten, afgeronde uitblaasopening, debiet 1301 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

System 8: ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 60% , kwadranten open, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).



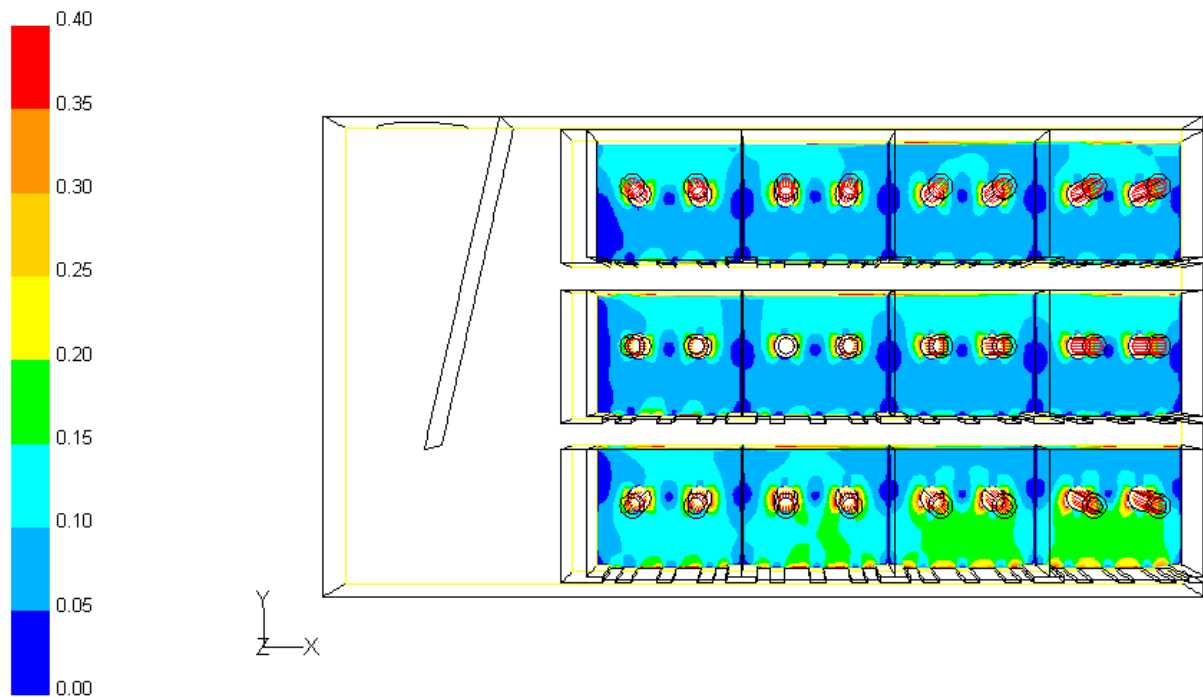
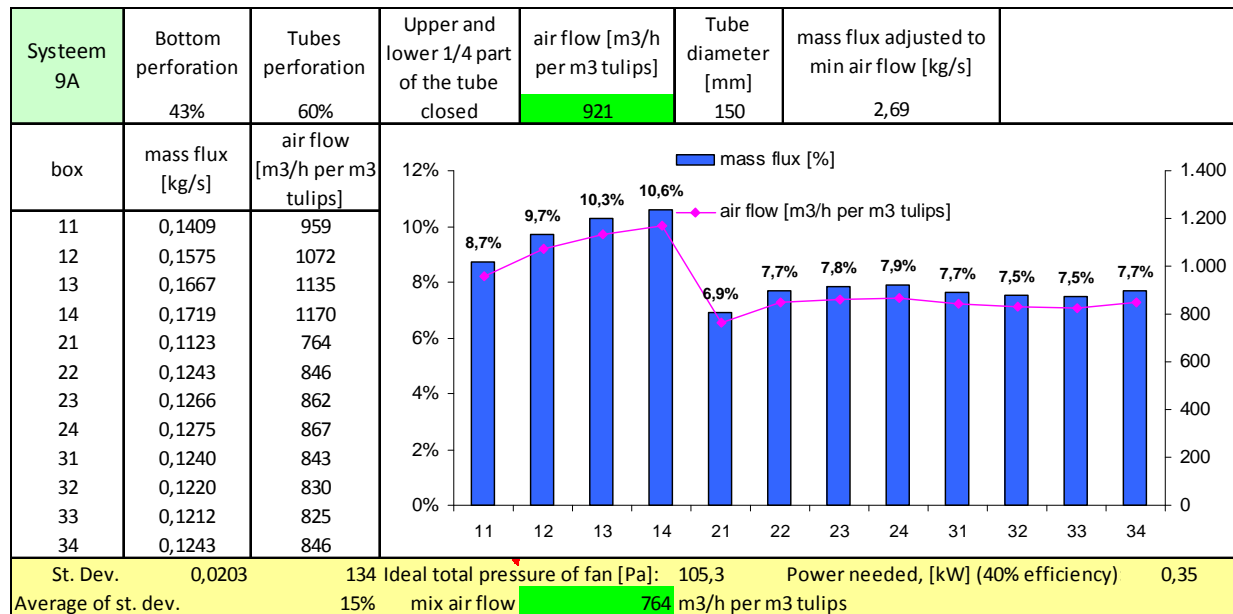
Luchtsnelheden (m/s) System 8: ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 60% , kwadranten open, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

System 9, ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 60%, kwadranten gesloten, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).



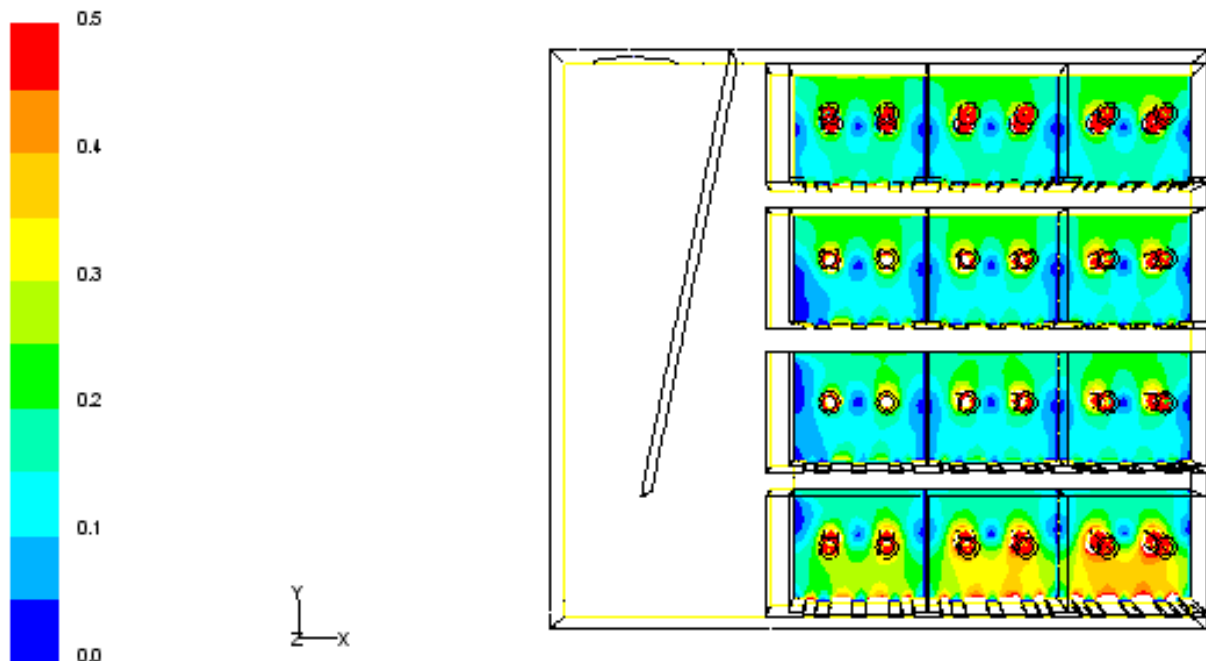
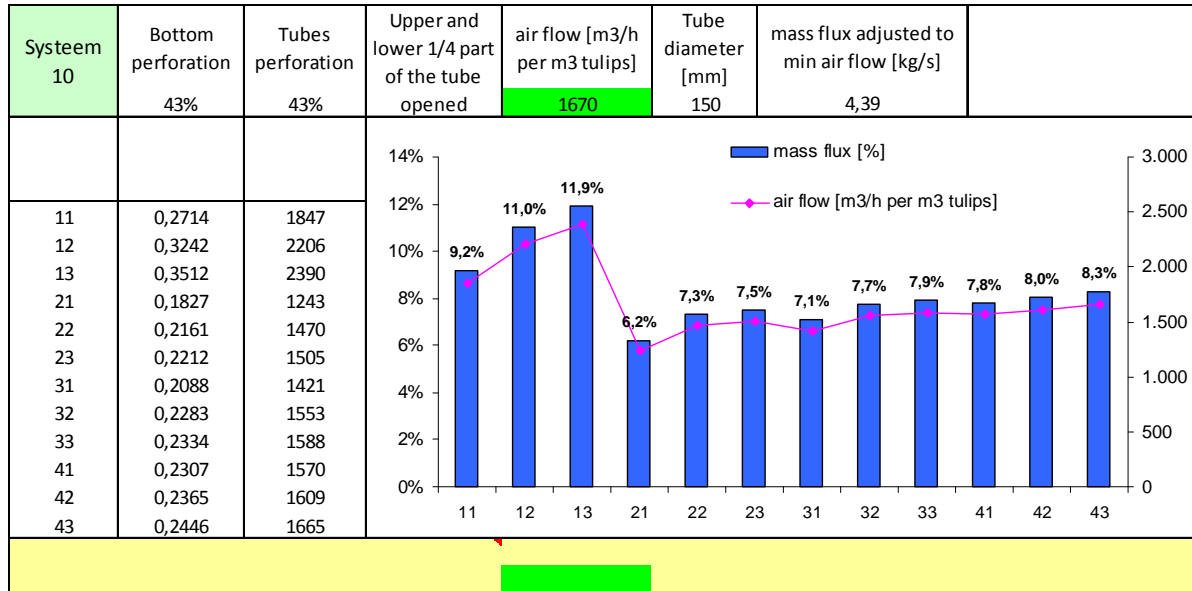
System 9, ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 60%, kwadranten gesloten, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

System 9A, ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 60%, kwadranten gesloten, debiet 921 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).



Luchtsnelheden (m/s) System 9A, ½-laagssysteem, 3 hoog x 4 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 60%, kwadranten gesloten, debiet 921 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h)

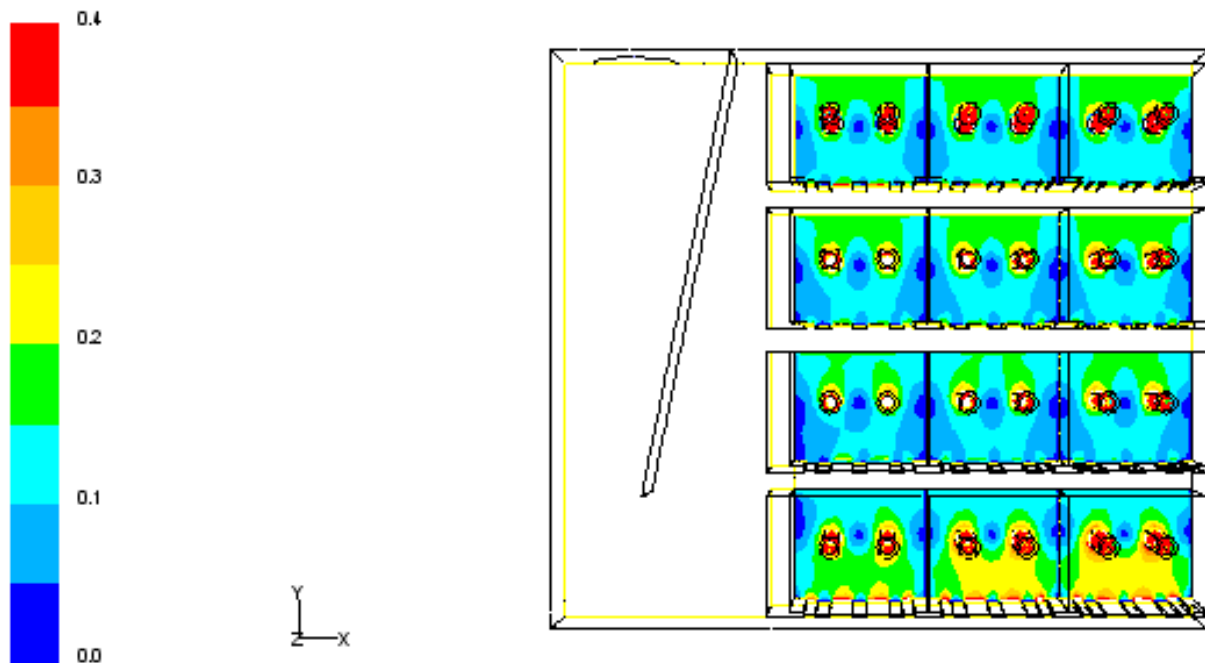
Systeem 10, ½-laagssysteem, 4 hoog x 3 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten open, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).



Luchtsnelheden (m/s) Systeem 10, ½-laagssysteem, 4 hoog x 3 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten open, debiet 1670 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

System 10A: ½-laagssysteem, 4 hoog x 3 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten open, debiet 1243 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

System 10A	Bottom perforation	Tubes perforation	Upper and lower 1/4 part of the tube opened	air flow [m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips]	Tube diameter [mm]	mass flux adjusted to min air flow [kg/s]	
	43%	43%		1243	150	3,68	
box	mass flux [kg/s]	air flow [m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips]					
11	0,1963	1335	9,0%	1243			
12	0,2238	1523	10,2%	1243			
13	0,2348	1597	10,7%	1243			
21	0,1532	1043	7,0%	1243			
22	0,1620	1102	7,4%	1243			
23	0,1651	1123	7,5%	1243			
31	0,1679	1143	7,7%	1243			
32	0,1726	1175	7,9%	1243			
33	0,1762	1199	8,0%	1243			
41	0,1750	1191	8,0%	1243			
42	0,1790	1218	8,2%	1243			
43	0,1842	1254	8,4%	1243			
St. Dev.	0,0257	167	Ideal total pressure of fan [Pa]: 142,4		Power needed, [kW] (40% efficiency)		0,64
Average of st. dev.		13%	mix air flow		1043 m <sup>3</sup> /h per m <sup>3</sup> tulips		



Luchtsnelheden (m/s) System 10A: ½-laagssysteem, 4 hoog x 3 diep, bodemperforatie 43%, buizenperforatie 43%, kwadranten open, debiet 1243 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>.h).

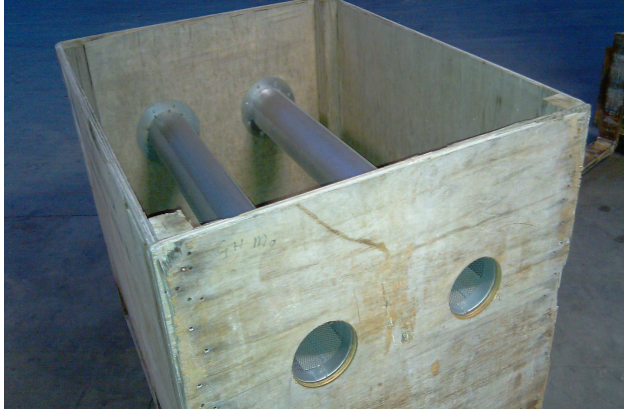




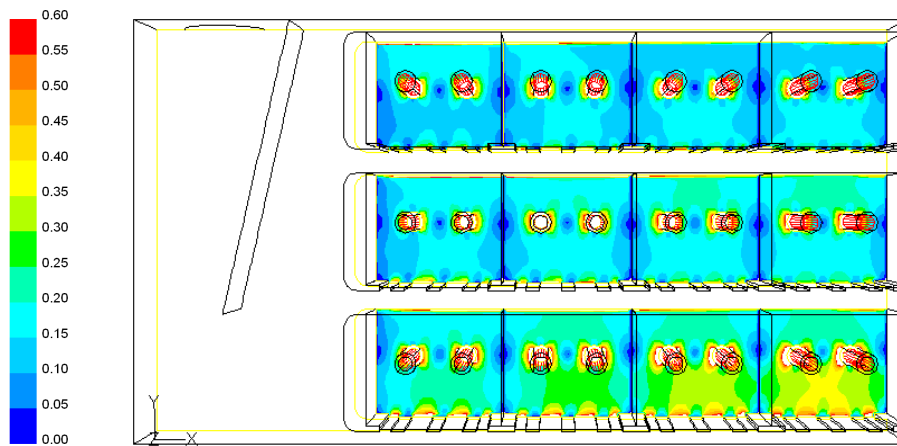
## Bijlage 2: Poster Alternatieve kuubskist



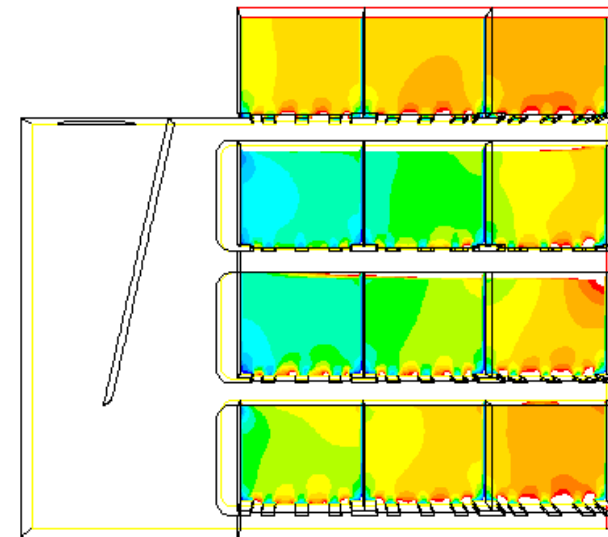
## Met alternatieve kuubskist energie-efficiënt drogen in een half (1/2)-laagssysteem



- Gelijmatiger luchtverdeling over de kisten
- Kortere opstartfase van het droogproces.
- Lagere weerstand en daardoor hoger debiet.
- 30% eerder sneldroog.
- kans op ziektes kleiner.
- 17 % op gas en 34% op elektra bespaard.



3 hoog x 4 diep half (1/2) laagssysteem



4 hoog x 3 diep twee (2) laagssysteem

