



Aanvullend onderzoek SuperGaasbak

Afvoer van ethyleen en water door diffusie en langsstroom van cellucht

Jeroen Wildschut

Rapport WPR-859

Referaat

Wageningen University & Research heeft als alternatief voor het palletkistensysteem voor bloembollen een "Supergaasbak" voorgesteld. Dit is een grote gaasbak van bijvoorbeeld 3 * 1,5 * 0,3 m. De lucht wordt niet *door* de dunne laag bollen geblazen, maar *erlangs*. Uit testen in een windtunnel en berekeningen zijn de volgende conclusies getrokken: Voor de afvoer van ethyleen en van waterdamp tijdens het nadrogen en de bewaring erna, zijn supergaasbakken met een laagdikte van 25 – 30 cm geschikt. Bij 5% zure bollen is het energieverbruik dan ruim 60% lager dan bij bewaring in kuubskisten. Voor het sneldrogen (net na de oogst) zijn de supergaasbakken minder geschikt. Het wordt aanbevolen om op praktijkschaal in een bewaarcel te experimenteren met supergaasbakken van ongeveer 1,5 x 3 meter en een hoogte van 25 – 30 cm.

Abstract

As an alternative to the cubic box system for flower bulbs, Wageningen University & Research has designed a "Supergaasbak". This is a large box of about 3 * 1.5 * 0.3 m. Because of the thin layer of bulbs, the air is not blown through the bulbs, but along it. After testing in a wind tunnel and model calculations, the following conclusions were drawn: For the removal of ethylene and water vapor during storage after drying, "Supergaasbakken" with a layer thickness of 25 - 30 cm are suitable. With 5% fusarium infected tulip bulbs the energy consumption is reduced by 60% compared to storage in cubic boxes. The Supergaasbak is less suitable for quick drying just after harvesting. It is recommended to experiment on a practical scale in a storage cell with a Supergaasbak of approximately 1,5 x 3 m and 25 - 30 cm high.

Rapportgegevens

Rapport WPR-859

Projectnummer: 3736 1907 00

DOI nummer: 10.18174/474651

Dit project is uitgevoerd in opdracht van en gefinancierd door de partijen in de Stuurgroep Schone en Zuinige Bloembollen / Meerjarenaafpraak energie Bloembollen (KAVB, min.EZ, RVO.nl en telers), alsmede door de deelnemers aan het project Het Nieuwe Verwerken (Min. v. LNV (Topsector Tuinbouw & Uitgangsmaterialen), GMN, Bright Spark, Machinefabriek Akerboom, KAVB, Anthos, Greenport D&B en Innovatiefonds Rabobank Bollenstreek).

Disclaimer

© 2019 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Glastuinbouw - Bollen

Postbus 20, 2665 MV Bleiswijk T 0317 48 56 06, www.wur.nl/plant-research.

Kamer van Koophandel nr.: 09098104

BTW nr.: NL 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research.

Stichting Wageningen Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Adresgegevens

Wageningen University & Research, BU Glastuinbouw - Bloembollen

Postbus 20, 2665 ZG Bleiswijk

Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

T +31 (0)317 48 56 06

Inhoud

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
2	Werkwijze	9
3	Resultaten	11
	3.1 Ethyleen	11
	3.2 Water	16
4	Conclusies en aanbevelingen	21
	Bijlage 1 Tijdseries ethyleen	23
	Bijlage 2 Tijdseries waterdamp	25

Samenvatting

Als alternatief voor het palletkistensysteem is de "Supergaasbak" voorgesteld: een zeer grote gaasbak van bijvoorbeeld 3 x 1,5 x 0,3 m (l x b x h). De supergaasbakken worden via transportbanen door het bedrijf verplaatst en gestapeld in cellen bewaard. Bij de circulatie wordt de lucht niet *door* de bollen geblazen, maar *langs* de bollen, hiervoor is veel minder energie nodig. Ethyleen wordt dan door diffusie en langsstroom afgevoerd. Onderzoeksvraag is hierbij: wat is de optimale dikte van de laag bollen in de supergaasbak?

In een windtunnel is hiertoe een gaasbak geplaatst waarvan de randhoogte gevarieerd kon worden. In de ruimte onder de laag bollen zijn appels als ethyleenbron geplaatst en is het ethyleengehalte bij verschillende ventilatorstanden gemeten. Om ook van de afvoer van waterdamp een beeld te krijgen, zijn de appels vervangen door platte bakken met water en zijn op verschillende punten in de tunnel de temperatuur en de RV gemeten.

Uit de ethyleenmetingen blijkt dat ethyleenafvoer door diffusie zeer fors is. Met hogere luchtsnelheden bovenlangs de bollen wordt de evenwichtsconcentratie sterker verlaagd. Achtergrond hierbij is dat de luchtstroom trek en wervelingen vertoont die tot in de ruimte onder de bollen doorwerkt en sterker is naarmate luchtsnelheid hoger is. Hierdoor wordt er toch ook lucht *door* de bollen geblazen waardoor ook door verdunning de ethyleenconcentratie wordt verlaagd.

Bij een hogere ethyleenproductie stabiliseert de ethyleenconcentratie zich op een evenredig hoger niveau.

De laagdikte (in ieder geval tot 25 cm) heeft op zich geen effect op de evenwichtsconcentratie ethyleen onder de bollen. De laagdikte heeft echter *wel* effect op de ethyleenproductie van de bollen. Door een dubbel zo dikke laag bollen wordt 2 maal zoveel ethyleen geproduceerd, waardoor een hogere luchtsnelheid nodig is om het ethyleengehalte onder een bepaald niveau te houden.

Uit berekeningen op basis van de ethyleenmetingen volgt dat bij 5% zuur, een laagdikte van 25 cm en een tussenruimte van 20 cm bij de circulatie ruim 60% minder energie verbruikt wordt bij de bewaring in supergaasbakken dan bij bewaring in kuubskisten. Bij lagere zuurpercentages neemt dit voordeel af en bij ongeveer 1,5% zuur is het energievoordeel nihil.

De verdamping van water wordt bepaald door de temperatuur, het vochtdeficit, de luchtsnelheid en de mate waarin water aan en in de bol gebonden is. In de proefopstelling heeft de luchtsnelheid van de langsstroom, de temperatuur en het wateroppervlak onder de bollen een duidelijk effect op de afvoer van waterdamp, maar de dikte van de laag bollen (tot 30 cm) heeft geen effect.

Voor het sneldrogen zijn supergaasbakken minder geschikt omdat waterafvoer met diffusie plus langsstroom te langzaam gaat om zoveel water (tot 75 liter/m³ bollen in 12 tot 24 uur) in zo'n korte tijd af te voeren.

Afhankelijk van de temperatuur en de RV van de buitenlucht, en de ingestelde celtemperatuur bij het nadrogen, zijn de luchtsnelheden die bij supergaasbakken nodig zijn om bij 5% zure bollen de ethyleenconcentratie onder de 100 ppb te houden ruim voldoende om bij het nadrogen de RV tussen de bollen onder de 75% te houden. Bij hoge buitentemperaturen gecombineerd met een hoge RV lukt dat niet zonder de celtemperatuur extra te verhogen. Maar, hierin is geen verschil tussen supergaasbakken en kuubskisten.

Kortom:

- Voor de afvoer van ethyleen en van waterdamp tijdens het nadrogen en de bewaring erna, zijn supergaasbakken met een laagdikte van 25 – 30 cm geschikt.
- Bij 5% zure bollen is het energieverbruik dan ruim 60% lager dan bij bewaring in kuubskisten.
- Voor het sneldrogen (net na de oogst) zijn de supergaasbakken minder geschikt

Het is daarom aanbevolen om op praktijkschaal in een bewaarcel te experimenteren met supergaasbakken van ongeveer 1,5 x 3 meter en een laagdikte van 25 – 30 cm.

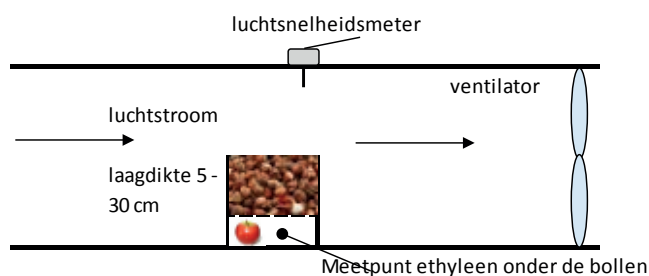
1 Inleiding

In het project "Ontwikkeling van een nieuw Droog- en Bewaarsysteem", PPO 2011, is als één van de alternatieven voor het huidige palletkistensysteem de "Supergaasbak" voorgesteld: een zeer grote gaasbak van bijvoorbeeld 3 x 1,5 x 0,3 m (l x b x h). De supergaasbakken worden via transportbanen door het bedrijf verplaatst en gestapeld in cellen bewaard. In tegenstelling tot palletkisten wordt bij de circulatie van de supergaasbak de lucht niet *door* de bollen geblazen, maar *langs* de bollen. De af te voeren ethyleen, of CO₂, waterdamp of warmte/koude verplaatst zich d.m.v. diffusie vanuit de lucht tussen de bollen naar de lucht tussen de supergaasbakken en vandaar met de langsstroom naar de vrije celruimte. Ventilatie van de bewaarcel met buitenlucht zorgt voor afvoer naar buiten (zie ook het schema in Figuur 8). Door de circulatielucht niet door de bollen te forceren, maar er langs te blazen is veel minder energie nodig.

In het project "Innovatieve verwerking en bewaring van bollen" (Het Nieuwe Verwerken) wordt op vier te integreren hoofdthema's een nieuw verwerkings- en bewaringssysteem ontwikkeld: 1) Drager (fust en bewaar ruimte), 2) energie, 3) Vision & 3D (monitoren van kwaliteit en stadium) en 4) ontsmetting.

Het optimaliseren van het ontwerp van de supergaasbak om zo het hoge energieverbruik van de zware ventilatoren bij de bewaring van bollen in kuubskisten te kunnen vervangen door het lage energieverbruik van enkele kleine ventilatoren bij de bewaring in supergaasbakken sluit hierop aan. Onderzoeksvraag hierbij is de optimale dikte van de laag bollen in de supergaasbak.

2 Werkwijze



Figuur 1 Windtunnel met meetopstelling.

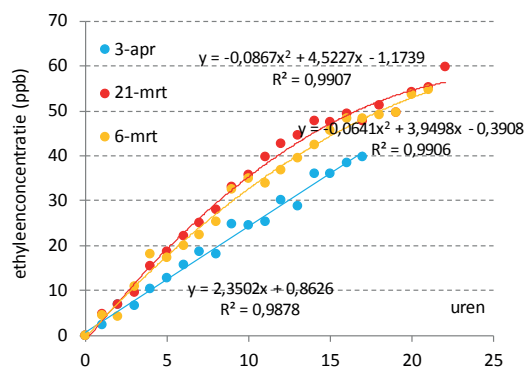
In een windtunnel is een gaasbak geplaatst waarvan de randhoogte gevarieerd kon worden van 5 tot 30 cm, zie foto. In de ruimte onder de laag bollen zijn appels als ethyleenbron geplaatst en is via een teflon slangetje het ethyleengehalte elke 10 minuten gemeten met de EMS-ethyleenanalyser. De ventilator is afwisselend één of meerdere dagen op verschillende standen of uit gezet. Met een 2^{de} ethyleenanalyser is gelijktijdig het ethyleengehalte van de cellucht gemeten. De cel werd permanent geventileerd met buitenlucht, behalve tijdens de perioden dat de klep gesloten werd om de ethyleenproductie van de appels te bepalen.

Om een beeld te krijgen van de afvoer van waterdamp zijn vervolgens onder de bollen i.p.v. appels platte bakken met water geplaatst en zijn op verschillende punten onder de bollen, in de tunnel en in de cel de temperatuur en de RV gelogd. De cel werd hierbij gecirculeerd, maar niet geventileerd. De celtemperatuur is hierbij afwisselend op 18 en op 24°C ingesteld.

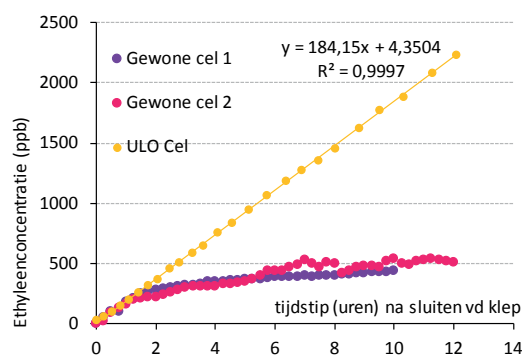
3 Resultaten

3.1 Ethyleen

In eerder onderzoek in de jaren 70 van de vorige eeuw aan o.m. de cultivar Apeldoorn is bepaald dat een tulpenbol besmet met *Fusarium* (een zure bol) bij 20°C ongeveer 0,15 ml ethyleen per dag produceert (dat is 0,00625 ml/uur). De minimale ventilatiecapaciteit van tulpenbewaarcellen ($\geq 100 \text{ m}^3/\text{uur}$ per m^3 bollen) is ingesteld op basis van deze hoeveelheid *en* het uitgangspunt dat de ethyleenconcentratie in de lucht van een bewaarcel bij 5% zure bollen onder de 100 ppb gehouden moet kunnen worden.



Figuur 2 Toename ethyleen na sluiten klep.



Figuur 3 Toename ethyleen na sluiten klep.

De ethyleenmetingen in de cel waarin de windtunnel geplaatst was gaven bij een gesloten klep (dus zonder ventilatie met buitenlucht) resultaten zoals samengevat in Figuur 2. Eerdere metingen in volle bewaarcellen op tulpenbedrijven in vergelijking met metingen in een ULO-cel lieten zien dat in gewone bewaarcellen de ethyleenconcentratie boven een bepaald punt, nauwelijks nog toeneemt, Figuur 3. In een ULO-cel daarentegen blijft de ethyleenconcentratie lineair toenemen. Dit laat zien dat gewone bewaarcellen lek zijn en dat het concentratieverschil tussen de lucht in de cel en die daarbuiten zo groot wordt dat ethyleen door diffusie net zo snel naar buiten lekt als er i.d.g. door de *Fusarium* schimmel in de zure bollen geproduceerd wordt.

De cel met de windtunnel is ook niet volledig lekvrij, waardoor ook daar de toename van de ethyleenconcentratie afvlakt, terwijl de ethyleenproductie van de appels gelijk blijft. De beste schatting van de ethyleenproductie van de appels is daarom op basis van de lineaire component van de regressievergelijkingen in Figuur 2. De vergelijkingen geven aan dat de ethyleenconcentratie met 2,35 tot 4,52 ppb/uur toeneemt. Op basis van het celvolume (41 m^3) kan dan berekend worden dat de ethyleenproductie van de appels tussen de 0,096 en 0,185 ml/uur ligt, wat overeenkomt met 15 tot 30 zure bollen (1,4 tot 2,6 % zure bollen), Tabel 1.

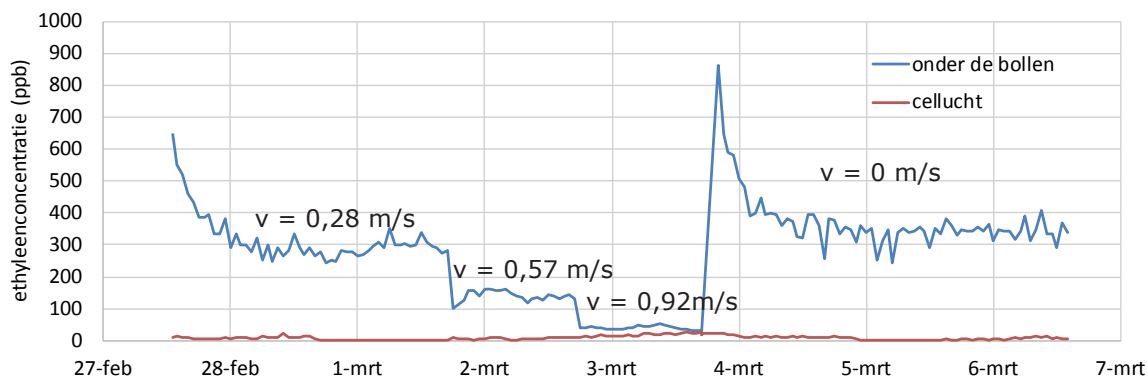
Tabel 1

Ethyleenproductie in de cel met de windtunnel.

	eenheid	06-mrt	21-mrt	04-apr
toename ethyleenconcentratie	ppb/uur	4,52	3,95	2,35
ethyleen productie	ml/uur	0,185	0,165	0,096
equivalent zure bollen	n	30	26	15
	%	2,6	2,3	1,4
aantal appels		10	9	9

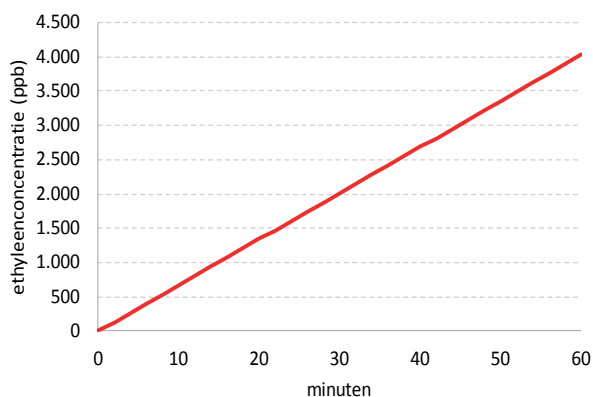
Bolmaat 10/11, 28 bollen/liter, ruimte onder de bollen 41 liter, celinhoud 41 m^3 .

Ethyleenmetingen in de ruimte (41 liter) onder de bollen waar de appels liggen laten zien dat wanneer er geen lucht over de bollen wordt geblazen, de ethyleenconcentratie onder de bollen zich na ongeveer een dag op 330 ppb stabiliseert, 5 maart, Figuur 4. Er wordt dan door diffusie evenveel ethyleen afgevoerd als er door de appels geproduceerd wordt: 0,185 ml/uur. Wanneer de ventilator de lucht met een snelheid van 0,28 m/s over de bollen blaast stabiliseert de ethyleenconcentratie zich op 280 ppb, bij een snelheid van 0,57 m/s werd dat 130 ppb en bij 0,92 m/s 30 ppb. In alle gevallen wordt dan echter evenveel ethyleen afgevoerd als er geproduceerd wordt: 0,185 ml/uur. Door permanente ventilatie van de cel met buitenlucht blijft in deze proefopstelling de ethyleenconcentratie van de cellucht stabiel op ongeveer 5 ppb.



Figuur 4 Ethyleen onder de bollen en in de cellucht bij verschillende lichtsnelheden.

De drijvende kracht achter diffusie is het verschil in ethyleenconcentratie tussen de cellucht en de lucht in de ruimte onder de bollen. Hoe groter dat verschil, hoe meer ethyleen zich per tijdseenheid verplaatst (in bv. ml/uur). Met een ethyleenproductie van de 10 appels van 0,185 ml/uur in de ruimte van 41 liter onder de bollen zou *zonder* diffusie de ethyleenconcentratie in één uur opgelopen zijn tot 4000 ppb, Figuur 5.



Figuur 5 Toename ethyleen indien geen diffusie.

Zonder bovenlangsstroom blijft de ethyleenconcentratie echter onder de 350 ppb, Figuur 4, hetgeen laat zien dat ethyleen afvoer door diffusie heel fors is. Bij lichtsnelheden van 0,27 tot 0,92 m/s stabiliseert de ethyleenconcentratie op lagere niveaus, maar omdat de ethyleenconcentratie in de cellucht in die periode constant en laag is (5 ppb), komt dit niet door extra diffusie, maar doordat de bovenlangsstroom wervelingen en trek veroorzaakt die tot in de ruimte onder de bollen doorwerkt: er wordt hierdoor toch ook lucht *door* de bollen geblazen. Dit is een fractie van de hoeveelheid die er langs geblazen wordt ($\leq 1\%$), maar voldoende om de ethyleenconcentratie door verdunning extra te verlagen.

In Bijlage 1 zijn 2 figuren opgenomen die het verloop van de ethyleenconcentratie in de cellucht en in de ruimte onder de bollen laten zien in de periode 6 februari t/m 7 april. In die periode is de laagdikte gevarieerd, van 10 – 15 – 20 tot 25 cm en is het aantal appels gevarieerd van 11 naar 6 naar 10 en 9. De ventilatorstand is gevarieerd van stand 0 tot stand 60, wat afhankelijk van de dikte van de laag bollen luchtsnelheden tot maximaal debiet van 0,92 m/s betekent.

De resultaten zijn samengevat in Tabel 2. Multiële regressie op de natuurlijke logaritme van de ethyleenconcentratie zien dat de laagdikte geen verschil maakt (p-waarde = 0,1039), maar de luchtsnelheid en het aantal appels (dus de ethyleenproductie) hebben wel effect (p-waarde respectievelijk 0,0000 en 0,0063).

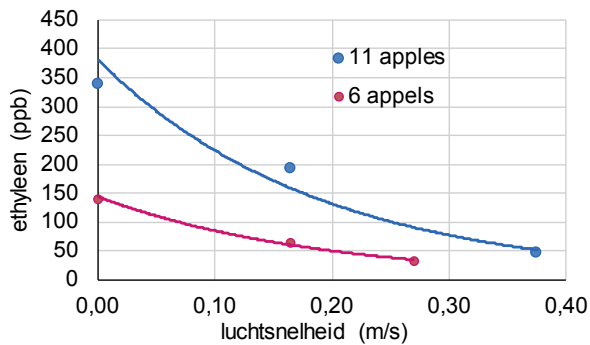
Tabel 2

Luchtsnelheid, laagdikte, aantal appels en ethyleenconcentratie.

luchtsnelheid (m/s)	laag dikte (cm)	aantal appels	ethyleen (ppb)	ethyleen LN(ppb)*
0,83	10	11	17	2,84
0,44	10	11	83	4,42
0,22	10	11	636	6,46
0,00	10	11	883	6,78
0,49	15	11	90	4,50
0,24	15	11	1116	7,02
0,86	15	11	40	3,69
0,49	15	11	117	4,76
0,24	15	11	791	6,67
0,89	20	11	101	4,62
0,40	20	11	312	5,74
0,00	25	11	1160	7,06
0,28	25	11	667	6,50
0,59	25	11	71	4,27
0,00	25	11	330	5,80
0,92	25	11	31	3,42
0,59	25	11	131	4,88
0,28	25	11	281	5,64
0,92	25	11	64	4,15
0,00	25	11	265	5,58
0,00	25	11	341	5,83
0,00	10	11	263	5,57
0,22	10	11	194	5,27
0,44	10	11	48	3,86
0,00	10	11	341	5,83
0,00	10	6	140	4,94
0,22	10	6	65	4,18
0,00	10	6	33	3,50
0,00	10	6	278	5,63
0,00	10	6	113	4,73
0,00	10	6	48	3,87
0,12	10	6	105	4,66

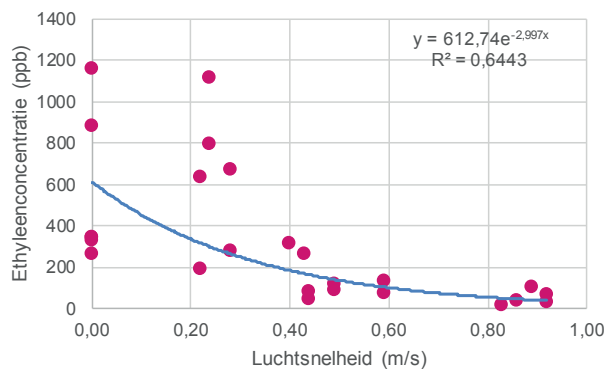
* LN(ppb) = natuurlijke logaritme van de ethyleenconcentratie

Het effect van het aantal appels wordt geïllustreerd door Figuur 6: bij ongeveer 2 keer zoveel appels is de ethyleenproductie ongeveer 2 keer zo hoog, en stabiliseert de ethyleenconcentratie bij dezelfde luchtsnelheid op een ongeveer 2 keer zo hoog niveau.



Figuur 6 Verschil tussen 6 en 11 appels.

Het verband tussen de luchtsnelheid boven de bollen en de evenwichtsconcentratie ethyleen onder de bollen bij 11 appels, wordt weergegeven door Figuur 7. Uit Figuur 6 en 7 valt af te leiden dat de evenwichtsconcentratie ethyleen (E^e) beschreven kan worden door de formule $E^e = be^{-av} \times cE^p$, waarbij E^p = Ethyleenproductie (ml/uur), v = de luchtsnelheid, $b = 613$, $a = 2,997$ en in dit geval $c = 1/0,178$ (= de ethyleenproductie van de appels), dus $c = 5,62$.



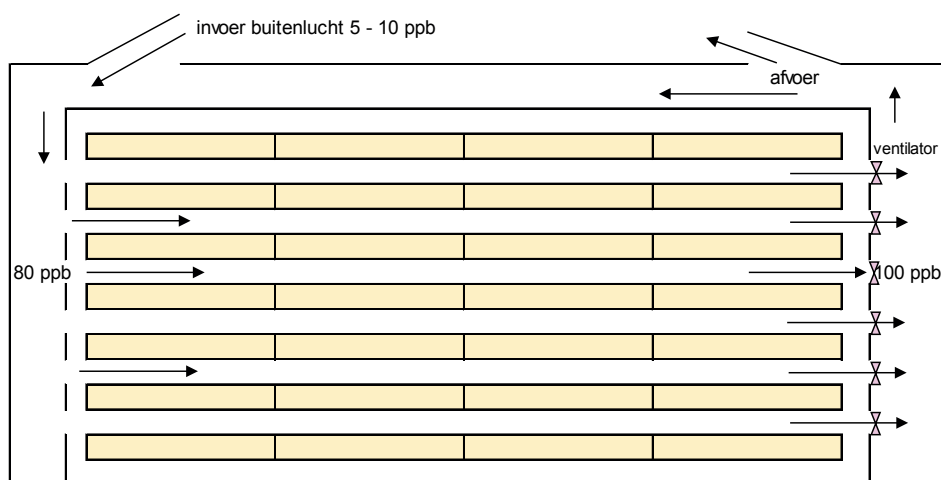
Figuur 7 Ethyleen bij langsstroom.

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat de laagdikte op zich geen effect heeft op de evenwichtsconcentratie ethyleen onder de bollen (de afvoer van ethyleen d.m.v. diffusie via de ruimte tussen de bollen wordt niet beperkt door de dikte van de laag). De laagdikte heeft echter *wel* effect op de ethyleenproductie van de bollen. Bij een bepaald percentage bollen wordt door een dubbel zo dikke laag 2 maal zoveel ethyleen geproduceerd, waardoor een hogere luchtsnelheid nodig is om het ethyleengehalte onder een bepaald niveau (in principe 100 ppb, de algemene schadedrempel) te houden.

Op basis van deze formule is een rekenmodel ontwikkeld waarmee berekend kan worden wat de luchtsnelheid moet zijn om $E^e \leq 100$ ppb te houden, afhankelijk van het percentage zure bollen, de laagdikte (dus het aantal zure bollen per laag) en de ruimte tussen de lagen. Op basis van die luchtsnelheid en van de ethyleenproductie van het aantal supergaasbakken met een oppervlakte van b.v. $3 \times 1,5$ m elk, die per laag in een rij staan opgesteld kan berekend worden in hoeveel seconden de lucht aan het eind van de rij is, en hoeveel ethyleen dan is opgenomen. De totale hoeveelheid lucht die bovenlangs de bollen stroomt wordt berekend uit het aantal seconden tot het eind van de laag \times de luchtsnelheid \times het oppervlak van de doorsnede van de ruimte tussen de lagen. Van dat aantal seconden is bekend hoeveel ethyleen erin geproduceerd wordt, zodat de toename van de ethyleenconcentratie bekend is. Uitgangspunt is dat de ethyleenconcentratie aan het begin van de rij bijvoorbeeld 80 ppb is, en voorwaarde is dat aan het eind van de rij de ethyleenconcentratie onder de 100 ppb blijft.

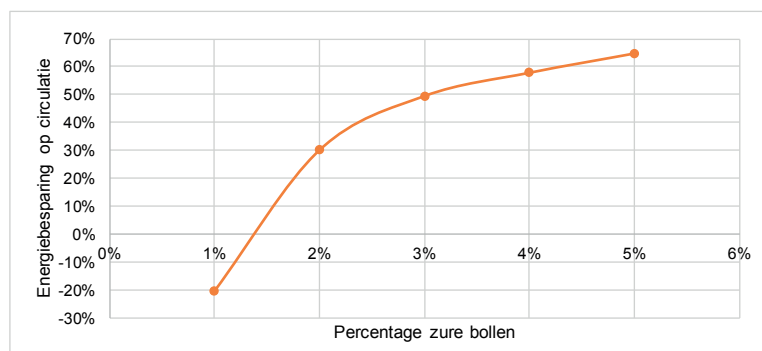
Door in het rekenmodel te variëren met zuurpercentage, laagdikte en tussenruimte wordt een optimum gevonden waarbij de ethyleenconcentratie ≤ 100 blijft.

In Figuur 8 is een cel met een rijdiepte van 4 supergaasbakken schematisch weergegeven. Bij zuurpercentages variërend van 5% tot 1% is het hiervoor het energieverbruik voor circulatie berekend en vergeleken met bewaring in kuubskisten.



Figuur 8 Schematische weergave cel met supergaasbakken.

Uit de berekeningen blijkt dat bij een zuurpercentage van 5%, wanneer dus maximaal gecirculeerd moet worden, het energieverbruik voor kuubskisten fors hoger is dan voor supergaasbakken. In een cel met supergaasbakken wordt voor de circulatie ruim 60% minder energie verbruikt, Figuur 9, terwijl de ethyleenconcentratie onder de 100 ppb blijft. Bij een lager percentage zuur neemt de besparing van supergaasbakken t.o.v. kuubskisten echter af.

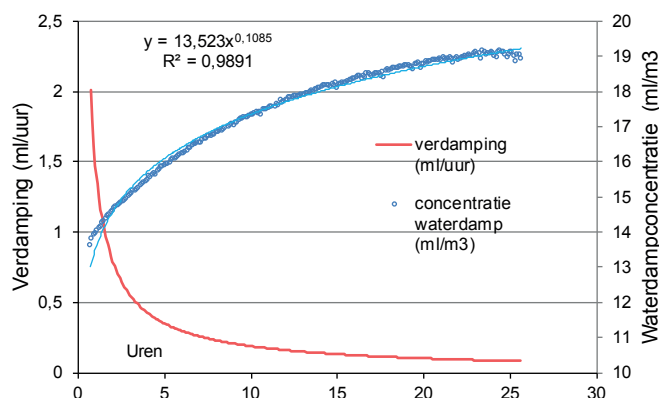


Figuur 9 Energiebesparing op circulatie t.o.v. K-kisten.

In deze berekeningen is uitgegaan van een laagdikte van 25 cm en een tussenruimte van 20 cm, de cel is dan voor 39% gevuld met bollen. Bij een lager percentage zuur zou de tussenruimte kunnen verminderen: er wordt minder ethyleen geproduceerd, waardoor het ethyleengehalte naar het eind van de cel toe minder snel oploopt, zodat er minder lucht langs hoeft te stromen. Er kunnen dan per m³ cel meer bollen worden bewaard bij eenzelfde circulatiecapaciteit.

3.2 Water

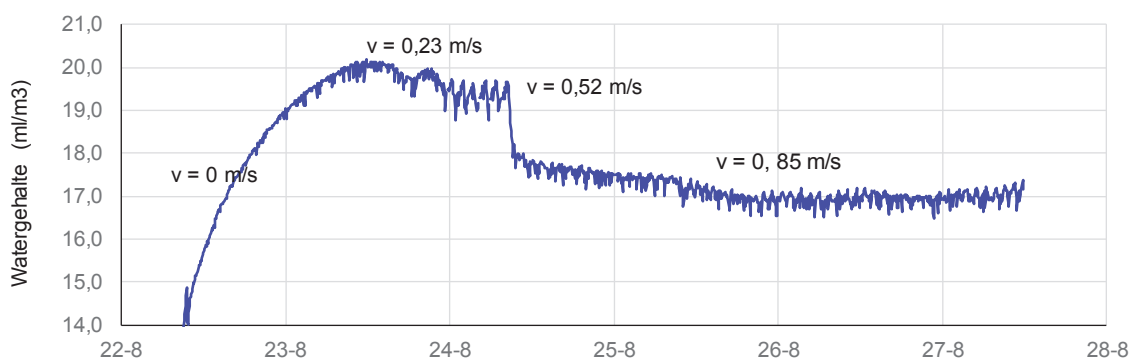
Hoewel ethyleen en waterdamp beide gasvormig zijn en een klein molecuulgewicht hebben is er één belangrijk verschil: het kookpunt van ethyleen is bij -110°C en dat van water bij +100°C. Bij de bewaartemperaturen van bollen is de opnamecapaciteit van lucht voor ethyleen daarom onbeperkt: er wordt opgenomen wat er geproduceerd wordt. Bij water wordt de "productie" van waterdamp bepaald door de temperatuur, het vochtdeficit, de luchtsnelheid en de mate waarin water aan en in de bollen gebonden is. Figuur 10 laat dit zien voor de proefopstelling waarbij temperatuur (i.d.g. 24°C) en RV% onderin de laag bollen gemeten is terwijl de ventilator uit stond (luchtsnelheid = 0 m/s).



Figuur 10 Verdamping en concentratie.

Wanneer de temperatuur van de cel van 18°C naar 24°C wordt verhoogd, neemt het vochtdeficit snel toe en hiermee de verdamping. En als tegelijkertijd de ventilator van de windtunnel wordt uitgezet, wordt er minder waterdamp afgevoerd en neemt het vochtgehalte toe. Naarmate het vochtgehalte hoger wordt en het maximale vochtgehalte nadert, wordt er steeds minder verdampt en neemt het vochtgehalte van de lucht onderin tussen de bollen uiteindelijk niet verder toe.

Als een dag later vervolgens de ventilator wordt aangezet en de luchtsnelheid 23 cm/s is, stelt zich een evenwichtsconcentratie van gemiddeld 19,6 ml H₂O/m³ lucht in, Figuur 11. Bij hogere luchtsnelheden daalt de evenwichtsconcentratie.



Figuur 11 Toe- en afname van de waterdampconcentratie bij verschillende luchtsnelheden.

In de proefopstelling zijn de evenwichtsconcentraties waterdamp bepaald bij verschillende combinaties van laagdikte, temperatuur, aantal waterbakken onder de bollen en luchtsnelheden boven de bollen. De resultaten zijn samengevat in Tabel 3, zie Bijlage 2 voor de volledige tijdserie. Regressie op de natuurlijke logaritme van het watergehalte van de lucht onderin de bollen laat zien dat ook hier de laagdikte op zich geen effect heeft (p waarde = 0,3114), maar wel het aantal bakken met water (p = 0,0001), d.w.z. het verdampend oppervlak, het maximale watergehalte zoals bepaald door de temperatuur (p =0,0000) en de luchtsnelheid boven de bollen (p = 0,0000). Wanneer de bollen echt vochtig zijn en er waterdamp afgevoerd *moet* worden, dan speelt de laagdikte wel een rol: hoe dikker de laag hoe meer vocht er per laag afgevoerd moet worden.

Tabel 3

Tabel 3: Laagdikte, temperatuur, maximaal H_2O -gehalte, aantal bakken, luchtsnelheid, absoluut en relatief H_2O -gehalte.

Laag (cm)	Temperatuur (°C)	H_2O_{max} (ml/m ³)	aantal bakken	v (m/s)	H_2O abs (ml/m ³)	RV%
15	18	15,5	1	0	13,0	84%
15	18	15,5	1	0,23	12,4	80%
15	18	15,5	1	0,52	12,0	78%
15	18	15,5	1	0,85	11,8	76%
30	18	15,5	1	0	13,2	85%
30	18	15,5	1	0,29	13,0	84%
30	18	15,5	1	0,64	11,9	77%
30	18	15,5	1	0,95	11,5	74%
15	18	15,5	2	0	15,1	98%
15	18	15,5	2	0,23	13,5	87%
15	18	15,5	2	0,52	12,6	81%
15	18	15,5	2	0,85	12,3	79%
30	18	15,5	2	0	15,2	98%
30	18	15,5	2	0,47	12,8	83%
30	18	15,5	2	0,64	12,6	81%
30	18	15,5	2	0,95	12,2	79%
30	18	15,5	2	0	15,2	98%
15	24	22,4	1	0	18,8	84%
15	24	22,4	1	0,23	17,8	80%
15	24	22,4	1	0,52	16,2	72%
15	24	22,4	1	0,85	15,3	68%
15	24	22,4	2	0	20,1	90%
15	24	22,4	2	0,23	19,6	88%
15	24	22,4	2	0,52	17,3	77%
15	24	22,4	2	0,85	15,8	71%

Bij de bewaring van de bollen wordt als schadedrempel voor vochtigheid een RV van 75% aangenomen.

Het maximale watergehalte van de lucht wordt bepaald door de temperatuur:

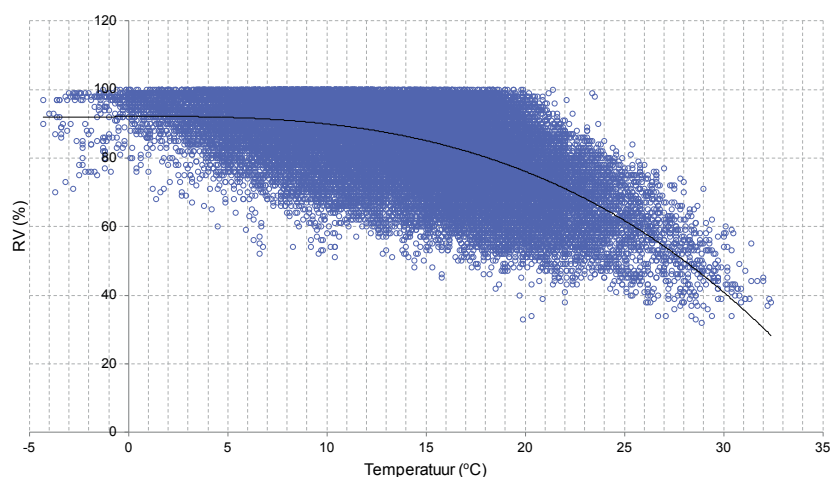
$H_2O^{\max} = 4,582 \times e^{((17,3 \times T)/(T+237))}$. Uit de regressie volgt dat in de omstandigheden van de proefopstelling de natuurlijke logaritme van het vochtgehalte LN (H_2O^{abs}) evenredig is aan:

$0,044 H_2O^{\max} - 0,217 \times v + c$. (v = de lichtsnelheid in m/s, c = een constante). Hiermee kan berekend worden hoe hoog de lichtsnelheid moet zijn om bij een bepaalde temperatuur de RV (= $H_2O^{\text{abs}} / H_2O^{\max}$) onder de 75 % te houden. Op basis van die lichtsnelheid en van de verdamping van het aantal supergaasbakken met een oppervlakte van $3 \times 1,5$ m, die per laag in een rij staan opgesteld kan berekend worden in hoeveel seconden de lucht aan het eind van de rij is, en hoeveel waterdamp dan maximaal is opgenomen, afhankelijk van de RV van de lucht aan het begin van de rij supergaasbakken.

Direct na het rooien worden tulpenbollen rond de 24 uur (minimaal 12 en maximaal 36 uur) voor de droogwand gedroogd met gemiddeld ongeveer 2000 m³ opgewarmde buitenlucht/uur per m³ bollen. Tijdens dit zg. *sneldrogen* wordt, afhankelijk van of bollen gespoeld zijn of niet, tot wel 75 liter aanhangend water per m³ bollen afgevoerd (verdampt). Aanvankelijk is hierbij de RV van de lucht tussen de bollen 100%. De buitenlucht wordt 4-5 graden opgewarmd om in korte tijd snel veel water af te kunnen voeren. De grafiek in Bijlage 2 en berekeningen met bovenstaande formules laten zien dat verlaging van de RV tussen de bollen in Supergaasbakken uiteindelijk wel lukt, maar veel te lang duurt (2 á 3 dagen). In een nieuw verwerkingssysteem wordt bij het sneldrogen daarom gedacht aan een luchtmes over een brede transportband waarmee de bollen na de oogst en het spoelen gedroogd worden en vervolgens in de supergaasbak worden geplaatst.

Na het sneldrogen gaan de bollen de bewaarcel in waar het *nadrogen* begint. Deze fase duurt 1 à 2 weken en is een overgangsfase naar de fase waarin de bollen in "rust" zijn. Tijdens het nadrogen wordt per m³ bollen gemiddeld nog ruim 2 liter per dag afgevoerd, daarna drogen de bollen uit met 0,3 tot 1,5 liter per dag, afhankelijk van met hoeveel lucht er geventileerd wordt en van het vochtdeficit van die lucht. Bollen die in rust zijn verademen 10 ml CO₂/kg/uur, waarbij ruim 115 ml water per dag per m³ bollen vrijkomt. De uitdroging tijdens de fase waarin de bollen tot rust zijn zou dus niet meer dan 115 ml moeten zijn, maar is dus fors meer (dan wenselijk) omdat geventileerd wordt op basis van ethyleen.

Voor een aantal scenario's is met het BewaarModel (PPO, 2013) uitgerekend wat de RV tussen de bollen in kuubskisten en van de cellucht wordt bij het nadrogen, wanneer per dag ruim 2 liter water/m³ bollen moet worden afgevoerd. Deze scenario's gaan uit van enkele in juni t/m november voorkomende combinaties van temperatuur en RV van de buitenlucht, zie Figuur 12, en instellingen van de bewaarcel: een celtemperatuur van 25°C, de hoeveelheden ventilatielucht en circulatielucht om het ethyleengehalte onder de 100 ppb te houden bij 5% zuur (respectievelijk 100 en 500 m³/uur) en bij 1% zuur (respectievelijk 20 en 100 m³/uur).



Figuur 12 Temperatuur x RV, uurdata KNMI 2001 t/m 2010, juni t/m november.

Op basis van de bevindingen van de proefopstelling is uitgerekend tot welke waarden in die gevallen de RV toeneemt aan het eind van de bewaarcel bij langsstroom. Hierbij wordt net als bij de berekeningen voor ethyleen gerekend met een laagdikte van 25 cm en een tussenruimte van 20 cm. In Tabel 4 worden deze waarden vergeleken met bewaring in kuubskisten zoals berekend met het BewaarModel.

Tabel 4

RV bij nadrogen met kuubskisten en met supergaasbakken, waarbij ruim 2 liter/dag verdampt moet worden. De celtemperatuur is op 25°C ingesteld. Bij 5% zuur wordt per m³ bollen geventileerd met 100 m³ lucht/uur en worden kuubskisten gecirculeerd met 500 m³/uur. Supergaasbakken worden gecirculeerd met 385 m³/uur per m³ bollen. Bij 1% zuur wordt de cel met 20 m³/uur geventileerd en kuubskisten met 100 m³ gecirculeerd. Supergaasbakken met 245 m³/uur.

buitenlucht		bewaarcel met kuubskisten			supergaasbakken
temperatuur (°C)	RV%	Zuur %	RV bollen %	RV cellucht %	toename RV einde cel %
10	100	5%	46,5	45,5	46,5
15	100		61,4	60,4	61,4
15	85		53,0	52,1	53,1
20	100		79,8	80,7	79,8
20	75		62,0	61,0	62,0
25	80		85,6	84,7	85,6
25	60		65,6	64,7	65,7
10	100	1%	69,0	64,3	71,0
15	100		83,9	79,2	81,1
15	85		75,5	70,9	77,5
20	100		100	98,6	100
20	75		84,5	79,8	81,8
25	80		100	100	100
25	60		88,2	83,5	85,5

Tabel 4 laat zien dat wanneer de buitenlucht een temperatuur heeft van 10°C en een RV van 100%, bij ventilatie met 100 m³/uur en circulatie met 500 m³/uur en een celtemperatuur van 25°C, de RV van de cellucht 45,5% wordt. De RV van de lucht tussen de bollen is dan een fractie hoger: 46,5%. Worden met deze cellucht supergaasbakken gecirculeerd met 385 m³/uur (dan blijft bij gaasbakken met een laagdikte van 25 cm en een tussenruimte van 20 cm het ethyleengehalte onder de 100 ppb), dan loopt aan het eind van de cel de RV ook op tot 46,5%.

Is de buitenlucht 15°C met een RV van 100% dan wordt de RV in de cel in beide gevallen rond de 60%. Bij hogere buitentemperaturen komt de RV dan in de cel boven de 75% uit en zal de celtemperatuur iets omhoog moeten.

Bij buitentemperaturen van 20 of 25°C en RV's van respectievelijk 100% of 80% loopt de RV op tot ruim boven de 75%, maar kan met een iets hogere celtemperatuur omlaag gebracht worden.

Als er vanwege een aandeel zure bollen van slechts 1% veel minder geventileerd en gecirculeerd hoeft te worden, dan loopt de RV hoger op.

Er is wanneer afvoer van ethyleen leidend is bij de ventilatie/circulatie dus vrijwel geen verschil tussen de RV bij kuubskisten en bij supergaasbakken. En bij een heel laag zuur% kan in beide gevallen de ventilatie vaak niet evenredig hiermee verminderd worden omdat dan de RV te hoog wordt.

De fase *na* het nadrogen vraagt wat vocht afvoer (drogen) betreft juist om zo weinig mogelijk ventilatielucht om de bollen niet te veel te laten uitdrogen. Een hoog zuur% staat dit vaak niet toe.

4 Conclusies en aanbevelingen

Afvoer van ethyleen door diffusie is evenredig met het concentratieverschil tussen de cellucht en de lucht tussen de bollen. Zonder diffusie, en zonder luchtstroom langs de bollen, zou de ethyleenconcentratie in deze proefopstelling in een uur tijd tot 4000 ppb zijn opgelopen, maar blijft na enige tijd (24 uur) stabiel op 350 ppb. Afvoer van ethyleen door diffusie is dan gelijk aan de ethyleenproductie (van i.d.g. 0,185 ml/uur). Afvoer door diffusie is dus zeer fors.

Met luchtstroom bovenlangs is de afvoer van ethyleen even groot, maar de ethyleenconcentratie stabiliseert zich op een lager niveau, afhankelijk van de luchtsnelheid. Achtergrond hierbij is dat de luchtstroom trek en wervelingen vertoont die tot in de ruimte onder de bollen doorwerkt en sterker is naarmate luchtsnelheid hoger is. Hierdoor wordt er toch ook lucht *door* de bollen geblazen waardoor ook door verdunning de ethyleenconcentratie wordt verlaagd.

Bij een hogere ethyleenproductie stabiliseert de ethyleenconcentratie zich op een evenredig hoger niveau.

De laagdikte (in ieder geval tot 25 cm) heeft op zich geen effect op de evenwichtsconcentratie ethyleen onder de bollen (de afvoer van ethyleen d.m.v. diffusie via de ruimte tussen de bollen wordt niet beperkt door de dikte van de laag). De laagdikte heeft echter *we* effect op de ethyleenproductie van de bollen. Bij een bepaald percentage bollen wordt door een dubbel zo dikke laag 2 maal zoveel ethyleen geproduceerd, waardoor een hogere luchtsnelheid nodig is om het ethyleengehalte onder een bepaald niveau te houden.

De evenwichtsconcentratie ethyleen (E^e) kan beschreven worden door $E^e = be^{-av} \times cE^p$, waarbij E^p = Ethyleenproductie (ml/uur), v = de luchtsnelheid (m/s), en in deze proefopstelling $b = 613$, $a = 2,997$ en $c = 5,62$.

Op basis van laagdikte en tussenruimte, zuurpercentage, oppervlak van de supergaasbak en het aantal gaasbakken op rij kan hiermee berekend worden bij welke luchtsnelheid het ethyleengehalte bij langsstroom onder de 100 ppb blijft, afhankelijk van de startconcentratie. Vervolgens kan geschat worden wat het energieverbruik van de ventilatoren is om het bijbehorend debiet te leveren.

Bij 5% zuur, een laagdikte van 25 cm en een tussenruimte van 20 cm (de cel is dan voor 39% gevuld met bollen) wordt bij de circulatie ruim 60% minder energie verbruikt bij de bewaring in supergaasbakken dan bij bewaring in kuubskisten.

Bij lagere zuurpercentages neemt dit voordeel af en bij ongeveer 1,5% zuur is het energievoordeel nihil.

Voor ethyleen, met een kookpunt van -110°C , is de opnamecapaciteit van lucht onbeperkt en daarom gelijk aan de ethyleenproductie. Maar voor waterdamp hangt de opnamecapaciteit af van het vochtdeficit. De "productie" van waterdamp, de verdamping, wordt daarom bepaald door de temperatuur (die het maximale watergehalte van de lucht bepaald), de hoeveelheid water die al opgenomen is, de luchtsnelheid en de mate waarin water aan en in de bol gebonden is.

In de proefopstelling heeft de luchtsnelheid van de langsstroom, de temperatuur en het wateroppervlak onder de bollen een duidelijk effect op de afvoer van waterdamp, maar de dikte van de laag bollen (tot 30 cm) heeft geen effect.

Na de oogst van de bollen wordt onderscheid gemaakt tussen sneldrogen voor de droogwand (bij gespoelde bollen moet in 12 tot 24 uur tot 75 liter water per m^3 bollen worden afgevoerd), nadrogen in de bewaarcel (waarin in 1 à 2 weken ruim 2 liter per m^3 bollen per dag wordt afgevoerd) en de daaropvolgende bewaring wanneer de bollen in rust zijn en er eigenlijk zo min mogelijk uitdroging moet plaats vinden (bij de ademhaling in die fase komt slechts 115 ml per m^3 bollen per dag vrij).

Voor het sneldrogen zijn supergaasbakken minder geschikt omdat waterafvoer met diffusie plus langsstroom te langzaam gaat om zoveel water in zo'n korte tijd af te voeren.

In een nieuw verwerkingssysteem wordt bij het sneldrogen daarom gedacht aan een "luchtmes" over een brede transportband waarmee de bollen na de oogst en het spoelen gedroogd worden en vervolgens in de supergaasbak worden geplaatst.

Afhankelijk van de temperatuur en de RV van de buitenlucht, en de ingestelde celtemperatuur bij het nadrogen, zijn de luchtsnelheden die bij supergaasbakken nodig zijn om bij 5% zure bollen de ethyleenconcentratie onder de 100 ppb te houden ruim voldoende om bij het nadrogen de RV tussen de bollen onder de 75% te houden.

Bij hoge buitentemperaturen gecombineerd met een hoge RV lukt dat niet zonder de celtemperatuur extra te verhogen. Hierin is geen verschil tussen supergaasbakken en kuubskisten.

Samenvattend:

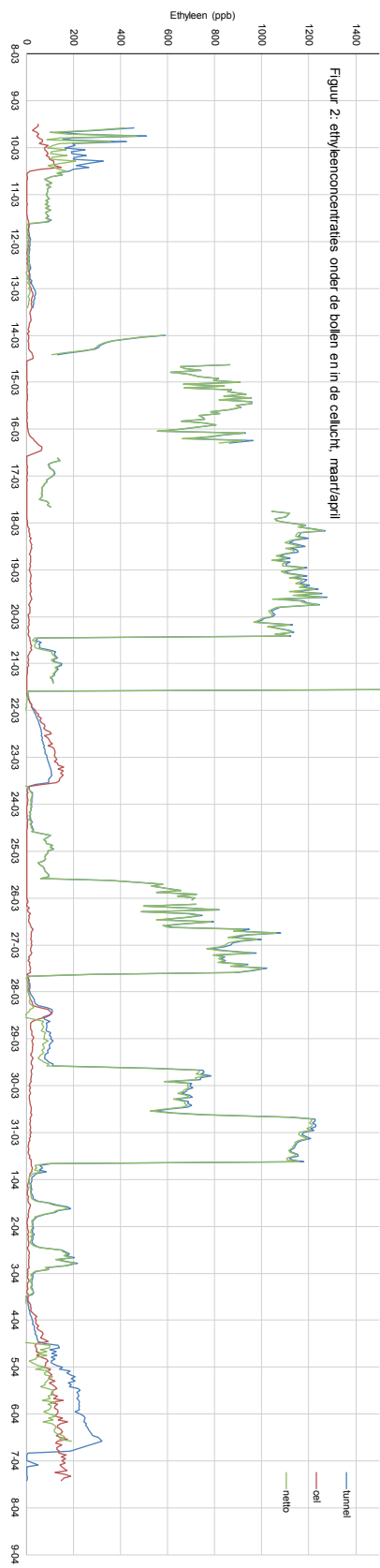
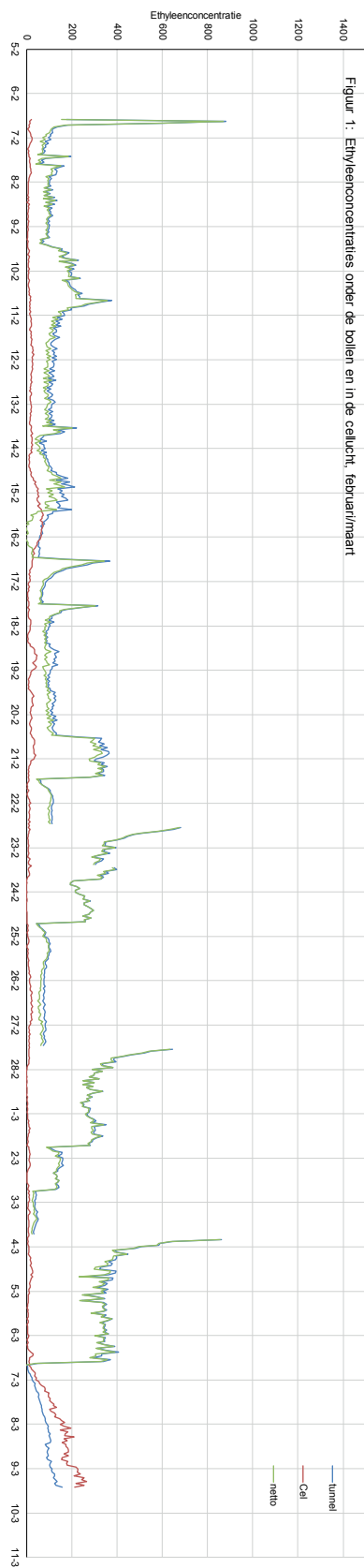
Voor de afvoer van ethyleen en van waterdamp tijdens het nadrogen en de bewaring erna, zijn supergaasbakken met een laagdikte van 25 – 30 cm geschikt.

Bij 5% zure bollen is het energieverbruik voor de circulatie bij bewaring in supergaasbakken ruim 60% lager dan bij bewaring in kuubskisten.

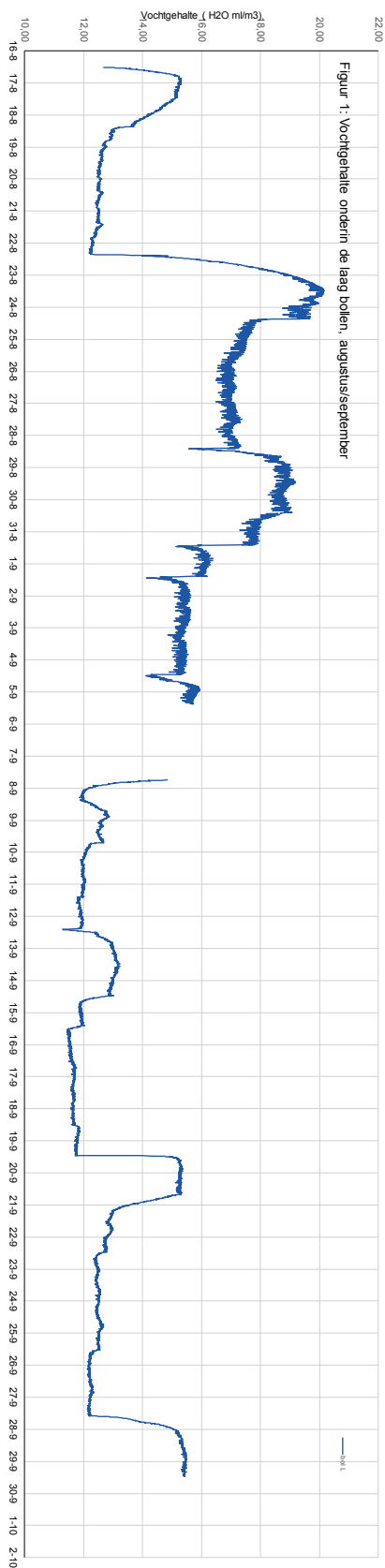
Voor het sneldrogen (net na de oogst) zijn de supergaasbakken minder geschikt, omdat afvoer van de grote hoeveelheid water (tot 75 liter per m³ bollen per dag) doormiddel van diffusie plus langsstroom te langzaam gaat.

Het is daarom aanbevolen om op praktijkschaal in een bewaarcel te experimenteren met supergaasbakken van ongeveer 1,5 x 3 meter en een laagdikte van 25 – 30 cm. Daarbij zouden ethyleenmetingen op minstens 2 punten moeten plaats vinden en luchtstroom volgens het schema in Figuur 8 laten verlopen.

Bijlage 1 Tijdsseries ethyleen



Bijlage 2 Tijdseries waterdamp



To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen University & Research,
BU Glastuinbouw - Bloembollen
Postbus 20
2665 ZG Bleiswijk
Violierenweg 1
2665 MV Bleiswijk
T +31 (0)317 48 56 06
F +31 (0) 10 522 51 93
www.wur.nl/glastuinbouw

Rapport WPR-859

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 5.000 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.