

Ontwikkeling van een nieuw Droog- en Bewaarsysteem

De ontwerpfase

Jeroen Wildschut (WUR/PPO), Athanasios Sapounas (WUR Glastuinbouw), Guus Braam (DLV-Plant)

© 2011 Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.

DLO 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 Meerjarenaafpraak energie Bloembollen (KAVB, PT, min.EL&I, Agentschap NL en telers).



Projectnummer: 32 36084309

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, onderdeel van Wageningen UR

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
Internet : www.ppo.wur.nl

Inhoudsopgave

pagina

SAMENVATTING.....	5
1 INLEIDING	7
2 WERKWIJZE.....	7
3 RESULTATEN	8
3.1 Inventarisatie ideeën in de sector	8
3.2 Het kuubskistensysteem.....	12
3.3 Het containersysteem	14
3.4 Het grote gaasbakkensysteem.....	18
4 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	22

Samenvatting

Het voordeel van het huidige bewaarsysteem van bloembollen in kuubskisten voor droogwanden in bewaarcellen ligt vooral op het gebied van logistiek. Nadelen zijn het hoge energieverbruik en het ongelijkmatige bewaarklimaat. Op korte termijn kan de bloembollensector nog veel energie besparen door op onderdelen dit systeem te verbeteren. Op langere termijn kan het systeem echter niet verder geoptimaliseerd worden. Daarom is na gegaan of het mogelijk is om een concept van een nieuw systeem te ontwikkelen. Hiertoe zijn in de 4 bloembollenregio's brainstormsessies georganiseerd. De deelnemende telers, systeembouwers, voorlichters en onderzoekers hebben hierin nieuwe ideeën over bewaarsystemen naar voren gebracht. Deze ideeën zijn vervolgens geordend en samengevat. Hieruit zijn de twee meest perspectiefvolle concepten gekozen en met CFD-berekeningen zijn verschillende varianten onderling en met het huidige kuubskistensysteem vergeleken op basis van energieverbruik per m³ bollen en van gelijkmatigheid van de bewaarcondities. Als belangrijkste criterium bij dit laatste is de variatie in ethyleenconcentratie tussen de bollen. Op basis hiervan zijn varianten van het nieuwe concept nader doorgerekend met als uitgangspunt het zg. "worst case scenario": 5 % zure bollen.

Het eerste concept is een containersysteem van $\pm l \times b \times h = 6 \times 2 \times 1,5$ m, met 3 ventilatoren die lucht door de bollen zuigen. Hierdoor zijn bewaarcellen met droogwanden niet meer nodig. Wanneer de containers in een verwarmde geventileerde schuur staan zodat de lucht niet opgewarmd hoeft worden, maar waarvan het ethyleengehalte rond de 80 ppb is, wordt voor de circulatie minder energie verbruikt dan bij het kuubskistensysteem. Ook zijn de bewaarcondities gelijkmatiger: de spreiding in het ethyleengehalte is 8 – 11% en de maximale overschrijding van de ethyleengrens van 100 ppb is bij bolmaat 6 slechts 2% (bij het kuubskistensysteem is die 56%). Bij dit containersysteem is het energieverbruik voor verwarming hetzelfde als bij het kuubskistensysteem.

Bij de variant waarbij direct met buitenlucht geventileerd wordt kan door het lage ethyleengehalte van de buitenlucht met een fors lager debiet toe, dus met veel minder (elektrische) energie. De container moet dan echter een eigen heater hebben. De temperatuursverdeling tussen de bollen is dan echter verre van optimaal, vooral bij een groot verschil met de buitenluchttemperatuur. Het voordeel van het containersysteem is dat er geen bewaarcellen met droogwanden nodig zijn. Een nadeel is o.a. dat ze voor kleine partijen te groot zijn. Het containersysteem is niet in het bestaande systeem in te passen.

Het tweede concept is een systeem met zeer grote gaasbakken ($l \times b = 3 \times 1,5$ m met een laag bollen van 15 tot 30 cm dikte), die worden gestapeld in bewaarcellen. De lucht voor circulatie wordt niet door de bollen geforceerd, maar ethyleen, water, CO₂, etc. worden afgevoerd door diffusie en langstroom. Door 7 kleine ventilatoren per rij wordt een circulerende luchtstroom in stand gehouden. Een laag bollen van 30 cm dik vraagt bij circuleren met cellucht met een ethyleenconcentratie van 80 ppb volgens de modelberekeningen echter teveel energie. De laag is te dik t.o.v. de diffusiesnelheid van ethyleen. De bewaarcondities zijn wel gelijkmatiger dan bij het kuubskistensysteem. Pas wanneer de dikte van de laag bollen wordt teruggebracht tot 15 cm wordt ethyleen door diffusie snel genoeg afgevoerd en wordt er energiezuiniger gecirculeerd dan in het kuubskistensysteem. Het grote gaasbakkensysteem kan vermoedelijk nog verder verbeterd worden door het retourkanaal te vergroten.

De berekeningen van de varianten waarbij direct met buitenlucht met een ethyleengehalte van 10 ppb wordt gecirculeerd laten ook bij het gaasbakkensysteem een extreem laag energieverbruik voor circulatie zien. Maar pas wanneer het benodigde debiet (bij 5% zure bollen) dan onder de 100 m³/uur per m³ bollen komt wordt het totale energieverbruik voor verwarming *plus* circulatie fors lager dan bij het kuubskistensysteem. Gecombineerd met een zonedak en warmteterugwinning kan dit systeem toe met slechts 10% van het elektraverbruik wat voor circulatie bij het kuubskistensysteem nodig is, en minder dan 40% van de energie voor verwarming. De bewaarcondities zijn daarbij veel gelijkmatiger en de shadedrempel voor ethyleen wordt nergens in het systeem overschreden.

1 Inleiding

Voor het drogen en bewaren van bloembollen zijn gaasbakken inmiddels bijna volledig door kuubskisten vervangen. Deze variëren in grootte van 800 tot 1200 liter en zijn eenvoudig met de heftruck te verplaatsen. De bewaarcellen en droogwanden zijn hierop aangepast. De variatie in op kuubskisten gebaseerde bewaarsystemen is groot: in bewaarcellen worden kuubskisten 4 tot 6 hoog gestapeld, 5 tot 10 kisten diep en in 4 tot 6 rijen. Per ventilator worden 1 of 2 rijen aangeblazen en ook per uitblaasopening van de droogwand worden 1 of 2 lagen kisten aangeblazen (de zg. 1-laags en 2-laagssystemen). De droogwanden verschillen daarnaast ook door interne schuine wanden, door zg. scheppen, etc..

Wat al deze systemen gemeen hebben is dat er voor de luchtdoorstroming tijdens drogen en bewaren veel energie nodig is (hoge luchtweerstand), en dat de luchtstroom over de kistenstapel en binnenin de kist niet homogeen verdeeld is. Vooral de twee-laagssystemen zijn zeer onregelmatig.

In eerdere onderzoeksprojecten zijn de verschillende componenten van het huidige bewaarsysteem met kuubskisten voor een systeemwand m.b.t. energiebesparing geoptimaliseerd en in de praktijk succesvol getest. De aan het project State-of-the-Art deelnemende bedrijven realiseerden 3 jaar op rij besparingen van gemiddeld 40 – 50%. Een enkel bedrijf bespaarde zelfs tot 80% aan energie. Op kortere termijn zal de sector met deze en de eerder ontwikkelde verbeteringen dus nog aanzienlijk veel energie kunnen besparen. Op langere termijn bezien kan het huidige bewaarsysteem echter niet verder geoptimaliseerd worden. Daarom is na gegaan of het mogelijk is om een concept van een nieuw systeem te ontwikkelen dat niet de systeem-inherente problemen van voor een droogwand gestapelde kuubskisten heeft, nl. hoog energieverbruik en onregelmatige bewaarcondities, maar wel de logistieke voordelen van het kuubskistensysteem.

Daarnaast zou het toekomstbeeld van het beoogde nieuwe systeem idealiter moeten zijn dat in het gehele proces van oogst (veld) tot en met bewaren en het planten van plantgoed, en tot het opplanten voor de broei, de bollen niet, of zo min mogelijk omgestort worden. Hierdoor krijgen ziektes zo weinig mogelijk kansen en vindt er ook zo min mogelijk “handling” plaats. Het gebruik en emissie van ontsmettings- en gewasbeschermingsmiddelen worden dan verminderd, arbeidsomstandigheden verbeterd en arbeidskosten verlaagd.

Het doel van dit project is een systeem voor het drogen en bewaren van bloembollen te ontwikkelen waarmee de kwaliteit van de bollen wordt verbeterd, het energieverbruik sterk wordt verminderd in vergelijking met het huidige verbeterde droog en bewaarsysteem, en dat eenvoudig kan worden ingezet in het totale proces van oogsten, drogen, bewaren, planten en broeien. Daardoor worden ook de kosten verlaagd. Belangrijkste criteria hierbij zijn de gelijkmatigheid van de luchtstroom over de bollen en een zo laag mogelijk energieverbruik.

2 Werkwijze

In deze eerste fase van het project zijn i.s.m. DLV Plant in de 4 bloembollenregio's (De Zuid, 't Noordelijk Zandgebied, Flevoland en West-Friesland), zg. brainstormsessies georganiseerd. Na een inleidende inventarisatie van voor- en nadelen van de huidige kuubskistensystemen hebben de deelnemende telers, systeembouwers, voorlichters en onderzoekers nieuwe ideeën over bewaarsystemen naar voren gebracht. Deze ideeën zijn vervolgens geordend en samengevat. Hieruit zijn de twee meest perspectievolle concepten gekozen en met CFD-berekeningen zijn verschillende varianten onderling en met het huidige kuubskistensysteem vergeleken.

CFD staat voor “Computational Fluid Dynamics” en met deze modellen worden luchtstromen berekend. De te analyseren systemen (zoals een droogwand met de ervoor gestapelde kuubskisten) worden verdeeld in 10-duizenden denkbeeldige kubusjes. Per kubusje worden op basis van natuurkundige wetten de gevolgen van veranderingen in het ene kubusje (druk, lichtsnelheid, weerstand, temperatuur, energie, gasconcentraties als ethyleen, etc.) voor de volgende kubusjes berekend in een iteratief proces. Deze modellen houden bij ventilatie en circulatie rekening met gasconcentratieveranderingen door vermenging *en* door diffusie.

De varianten zijn vergeleken op basis van energieverbruik per m³ bollen en van gelijkmatigheid van de bewaarcondities. Als belangrijkste criterium bij dit laatste is de variatie in ethyleenconcentratie nagegaan. Op basis hiervan zijn varianten van het nieuwe concept nader doorgerekend en is een uiteindelijk beste maar in detail nog verder optimaliseerbaar concept samengesteld. Uitgangspunt bij het doorrekenen van de varianten is het zg. “worst case scenario”: 5 % zure bollen.

3 Resultaten

3.1 Inventarisatie ideeën in de sector

De de brainstormsessies inleidende inventarisatie van de voor- en nadelen van het huidige systeem van kuubskisten en bewaarwanden en de opmerkingen van de deelnemers zijn samengevat in tabel 1. Een algemene opmerking hierbij is dat de relatieve zwaarte van de voor- en nadelen afhankelijk is van het product (welk bolgewas, plantgoed of leverbaar) en de grondsoort waarop het gewas geteeld wordt (klei of zand).

Tabel 1: Samenvatting van de voor- en nadelen van het kuubskistensysteem en enkele opmerkingen.

Aspect	voordelen	nadelen	opmerkingen
Logistiek op het veld transport	past in mechanisatie stapelbaar	klein volume	De trend is dat steeds meer in kiepwagens wordt gerooid (vooral binnen een straal van 25 km vanaf 't bedrijf). Mogelijk dat daardoor de bollen meer beschadigd worden?
interne logistiek	heftruuk		er wordt wel veel heen en weer gereden op de bedrijven
droogsnelheid		langzaam	droogsnelheid is voor veel gewassen snel genoeg
bewaarklimaat		ongelijkmatig	Nadeel is ook de kleine partijen: halfvolle kisten verstoren de luchtverdeling in de kistenstapel voor de wand. Het optimaliseren van het bewaarklimaat kost veel energie.
hygiëne / ontsmetting / ziektes		b.v. actellic lastig verdelen	nadeel is ook dat kisten tot wel 10 liter vocht opnemen bij dompelen.
beschadiging bollen		mogelijk bij overstorten	treedt vooral ook op bij het met gevulde kuubskisten over het veld denderen. Vooral de onderste bollen zouden dan kunnen beschadigen?
energiekosten		hoog	In het State-of-the-Art project wordt toch veel energie bespaard (tot 80%). Belangrijk is hoe men met het systeem omgaat: kisten netjes stapelen, bolmaten op de juiste plaats, terugtoeren bij de bewaring, ethyleengestuurd ventileren, enz.
arbo export en opslag	niet te tillen	ventileren	transport en opslag van lege kisten is nadelig

Een systeem-inherent probleem van voor een wand gestapelde kuubskisten is dat weerstandsverlaging (bv. een groter palletkanaal) weliswaar tot een groter totaaldebiet leidt, en dus tot minder energie per m³ lucht per m³ bollen, maar gepaard gaat met een slechtere luchtverdeling in de kistenstapel. Verbeterde luchtverdeling, zowel verticaal als horizontaal, kan zonder een verlies aan totaaldebiet maar beperkt gerealiseerd worden en is afhankelijk van o.a. bolmaat, kistenvulling en stapelhoogte en –diepte. In de praktijk is het elektraverbruik voor de circulatie erg hoog.

De ideeën voor een nieuw droog & bewaarsysteem die tijdens de vier bijeenkomsten gegenereerd werden zijn samengevat in tabel 2. Ter illustratie wordt in de tabel voor enkele ideeën verwezen naar figuren. De ideeën betroffen alternatieven voor de huidige kuubskist (“drager voor de bollen”: zakken, reuze gaasbakken, containers, etc.) en voor de systeemwand/bewaarcel (“een systeem voor het realiseren van een optimaal bewaarklimaat”: ventilatoren of natuurlijke tocht zoals bij de oude bollenschuur).

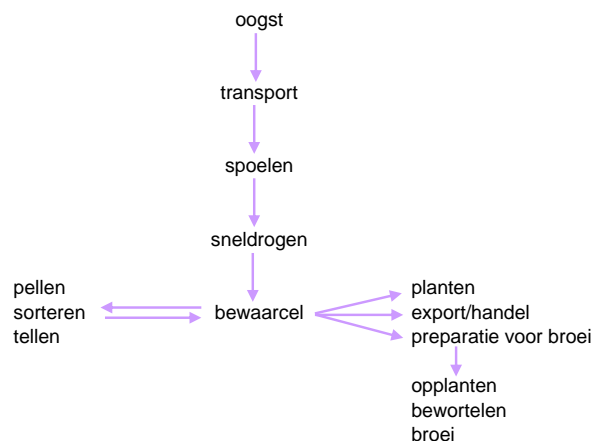
Bij alle nieuwe droog & bewaarsystemen wordt door de deelnemers verdergaande toepassing van computers, sensoren (voor ethyleen, RV, Temperatuur, CO₂, luchtsnelheid en druk) en tracing & tracking systemen voorzien.

Tabel 2: Samenvatting en combinaties van ideeën

Idee	figuur	mogelijk voordeel	opmerking
Big bags (inhoud 1,5 m3)		Veel ruimtebesparing indien leeg	
Super kuubskist (2.40 x 3 x 0.92 m), of minder diepe kist		Betere luchtverdeling, minder weerstand, veel rust op het bedrijf	circulatie sturen per kist, kunststof/metaal. Oplossing zoeken voor kleine restpartijen
Reuze gaasbak		idem	Afvoer ethyleen etc. door diffusie en langsstroom. Hoe dik mag hierbij de bollenlaag zijn (15 cm, 30 cm??)
Sealing/coaten/in vacuüm, gecombineerd met chemische of hormonale behandeling waardoor de bollen in rust geraken		Geen ventilatie/circulatie nodig	Hier is nog heel veel onderzoek voor nodig
Ventilatie/circulatie als bij de oude bollenschuur	→ fig 1	Energiezuinig	lastig om een stabiel bewaarklimaat te realiseren
Drogen op een transportband, dun laagje op lange band. Drogen op de wind, of band door kas laten draaien. Direct pellen, dan in kolommen storten die door de cel schuiven. Geen kisten, alleen transportbanen op het bedrijf		Energiezuinig, minder beschadiging?	Op het totale energieverbruik per m3 bewaarde bollen is door de korte droogperiode het energieverbruik voor het (snel)drogen maar 7-10% van het totaal.
Zuigen zoals bij aardappels in lattenkisten	→ fig 2	Energiezuiniger?	
Grote units als containers, met buizen/kokers er doorheen		Geen cellen meer nodig	
Kisten in kolom circuleren, lucht ondergronds aanvoeren	→ fig 3	Geen lekverliezen, gelijkmatige luchtverdeling	ondergronds sloffensysteem, beter stapelbaar, zoekende kisten, kisten die op elkaar aansluiten
Joppe-zakken (als aardappels)	→ fig 4	Energiezuinig	misschien te combineren met nettenteelt

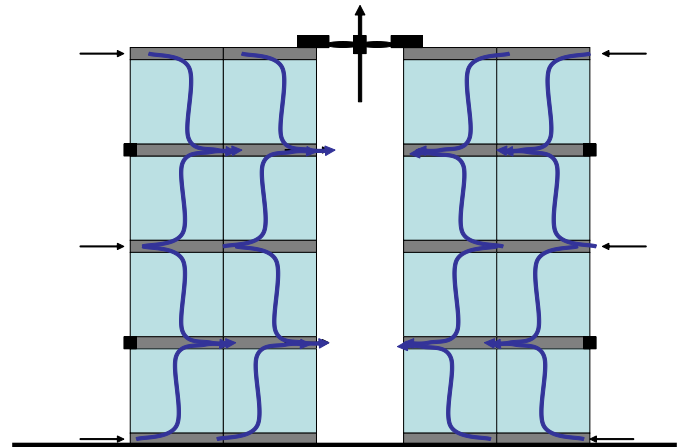
Productieproces

Uit de bespreking van de voor- en nadelen van het kuubskistensysteem kwam o.a. naar voren dat het niet realistisch om een “drager” te ontwikkelen die geschikt is voor alle fasen van het productieproces (samengevat in het schema hiernaast). Het oogsten gebeurt in toenemende mate in kiepwagens, en voor export zullen juist kleinere dragers als bv. leliekratten het meest blijven worden toegepast.

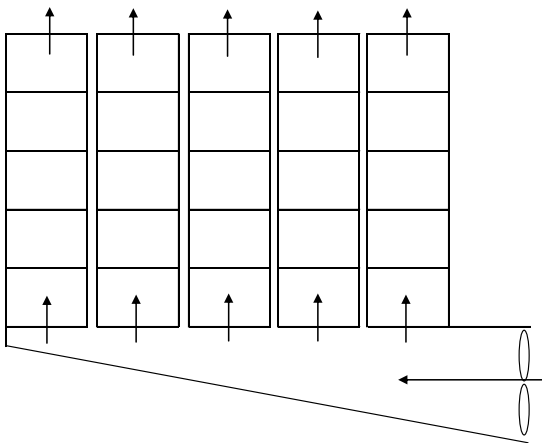




Figuur 1: Oude Bollenschuur.



Figuur 2: Kuubskisten in een zuigsysteem.



Figuur 3: Kolombeluchting.



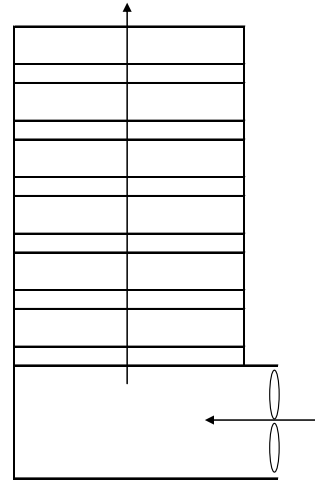
Figuur 4: Joppezakken.

Nieuwe concepten

Bij de ontwikkeling van een nieuw concept droog & bewaarsysteem voor bloembollen wordt er daarom van uitgegaan dat bollen in kiepwagens geoogst worden, op het bedrijf vanuit de kiepwagen gespoeld, dan snelgedroogd in een dunne laag op een brede transportband die met weinig en duurzaam opgewarmde (zonnedak en/of kaslucht) lucht aangeblazen wordt, en bij voorkeur direct daarna gepeld en gesorteerd. Vervolgens komen de bollen in het nieuwe bewaarsysteem. Hierbij lijken de volgende 3 typen het meest perspectief te hebben:

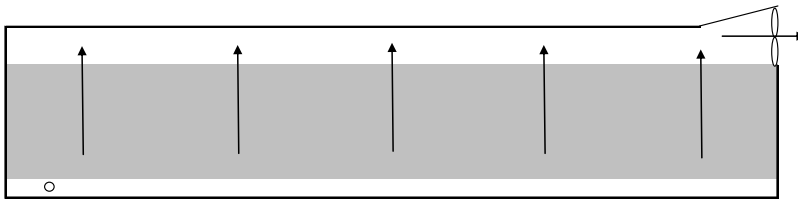
1) Zeer grote kuubskist:

Het systeem zou kunnen bestaan uit kuubskisten van bv. 2 x 3 x 1 m. Deze worden 1 (of 2) diep x 4 hoog gestapeld in een bewaarcel en van onderaf angeblazen.



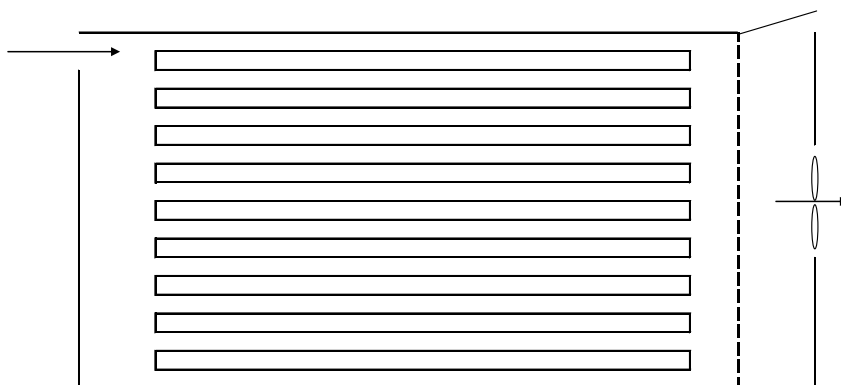
2) Containersysteem:

Containers met een afmeting van ongeveer $l \times b \times h = 6 \times 2 \times 1,5$ m hebben elk eigen ventilatoren die lucht door de bollen (eventueel via een intern buizenstelsel) perst of zuigt. Hierdoor zijn bewaarcellen met droogwanden niet meer nodig (de container is een kleine mobiele bewaarcel). De containers staan onder een natuurlijk geventileerd (open) afdak, zodat bv. ethyleen direct wordt afgevoerd. Hierbij is geen onderscheid meer tussen ventilatie en circulatie: de bollen worden direct gecirculeerd met opgewarmde buitenlucht. Het ethyleengehalte van de buitenlucht is 95% van het jaar rond de 10 ppb, zodat vergeleken met het huidige systeem waarin gecirculeerd wordt met cellucht met een ethyleengehalte van 80 – 100 ppb een veel kleinere circulatiehoeveelheid nodig is om het ethyleengehalte van de lucht tussen de bollen onder de 100 ppb te houden.



3) Zeer grote gaasbakken:

Gaasbakken met afmetingen van bv. 3 x 1,5 x 0,30 m worden gestapeld in bewaarcellen. De lucht voor circulatie wordt niet door de bollen geforceerd, maar ethyleen, water, CO₂, etc. worden afgevoerd door diffusie en langsstroom. Er wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van natuurlijke ventilatie (tocht), waarbij de lucht op duurzame wijze wordt verwarmd (zonnedak, warme kaslucht, opgeslagen warmwater), of gekoeld (grondwater). Deze warmte wordt voor een groot deel weer teruggewonnen.



Van deze 3 concepten zijn de laatste twee met CFD-modellen doorgerekend. Het eerste concept wordt in de praktijk op een enkel bedrijf gedeeltelijk al toegepast.

3.2 Het kuubskistensysteem

De alternatieve systemen worden vergeleken met een modern kuubskistensysteem: een zg. éénlaags-systeem met afgeronde uitblaasopeningen waar door terugtoeren met frequentieregelaars niet gemiddeld met 500 maar met 300 m³/uur per m³ bollen wordt gecirculeerd. Het door CFD-modellen voor de circulatie berekende energieverbruik per m³ bollen, en het gemiddelde ethyleengehalte en de spreiding daarom heen is in tabel 3 samengevat voor bewaring van bollen met 5% zuur en met maat 6 (plantgoed), en bollen met maat 12 (leverbaar/broeibollen). Het energieverbruik bij bolmaat 12 is fors lager dan bij bolmaat 6.

Tabel 3: Energieverbruik en ethyleen in het kuubskistensysteem bij circulatie met cellucht van 80 ppb, 300 m³/uur per m³ bollen en 5% zure bollen in de kist.

Bolmaat	cm	6	12
Energieverbruik per m ³ bollen	W/m ³	45.3	26.2
Gemiddelde ethyleenconcentratie die de kist verlaat	ppb	105.9	106.2
Gemiddelde ethyleenconcentratie tussen de bollen	ppb	97.51	97.26
Maximale ethyleenconcentratie tussen de bollen	ppb	156.1	167.4
spreiding ethyleengehalte	%	60%	72%
maximale drempeloverschrijding	%	56%	67%
Energie voor verwarming bij ΔT = 3,9 °C	W/m ³	104.0	104.0
Totaal	W/m ³	149.3	130.2

In deze tabel is ook het energieverbruik voor verwarming aangegeven bij ventilatie van de cel volgens de norm (100 m³ lucht/uur per m³ bollen tot september, daarna 60 m³/uur).

Ter vergelijking is in tabel 4 het elektraverbruik volgens de norm en het gerealiseerde elektraverbruik van de aan het project State-of-the-Art deelnemende bedrijven weergegeven. Dit laat zien dat het elektraverbruik voor circulatie met 300 m³/uur dat door het CFD-model berekend wordt in de dezelfde orde is als voor de StArt-bedrijven.

Tabel 4: Elektraverbruik circulatie (Watt/m³) bij StArt-bedrijven.

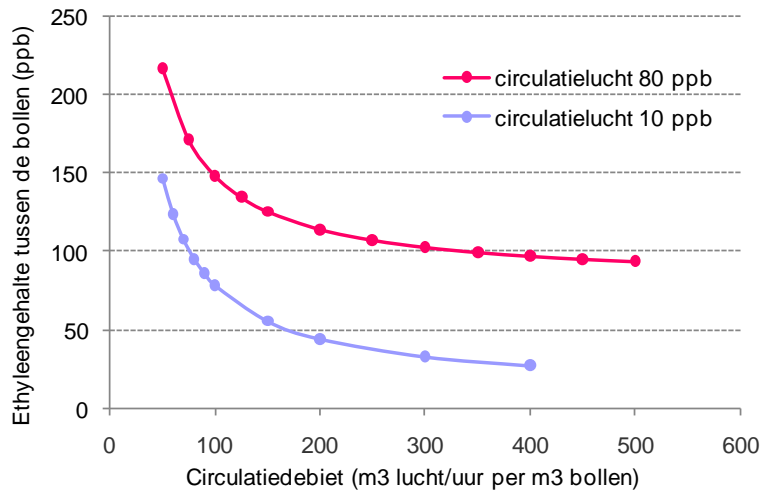
	norm	StArt
Bedrijf 1	68,0	65,9
Bedrijf 2	39,0	22,7
Bedrijf 3	78,7	51,3
Bedrijf 4	45,6	34,3
Bedrijf 7	44,6	16,8
Bedrijf 5	44,9	21,2
Bedrijf 8	42,8	10,8
Bedrijf 9	41,4	13,8
gemiddeld	50,6	29,6

Een belangrijk aspect van het circuleren met cellucht is dat de afvoer van door de bollen (of door bv. de Fusarium schimmel in zure bollen) geproduceerde gassen (ethyleen, CO₂) afhankelijk is van de concentratie van die gassen in de cellucht. Wordt bij 5% zure bollen de ethyleenconcentratie door ethyleengestuurde ventilatie op bv. 80 ppb gehouden, dan is het benodigde circulatiedebiet om de ethyleenconcentratie tussen de bollen onder de schadedrempel van 100 ppb te houden vele malen hoger dan indien de ethyleenconcentratie van de cellucht zoals in buitenlucht slechts 10 ppb is, figuur 5.

Circulatie met slechts 80 m³cellucht/uur met een ethyleenconcentratie van 10 ppb is ruim voldoende om de

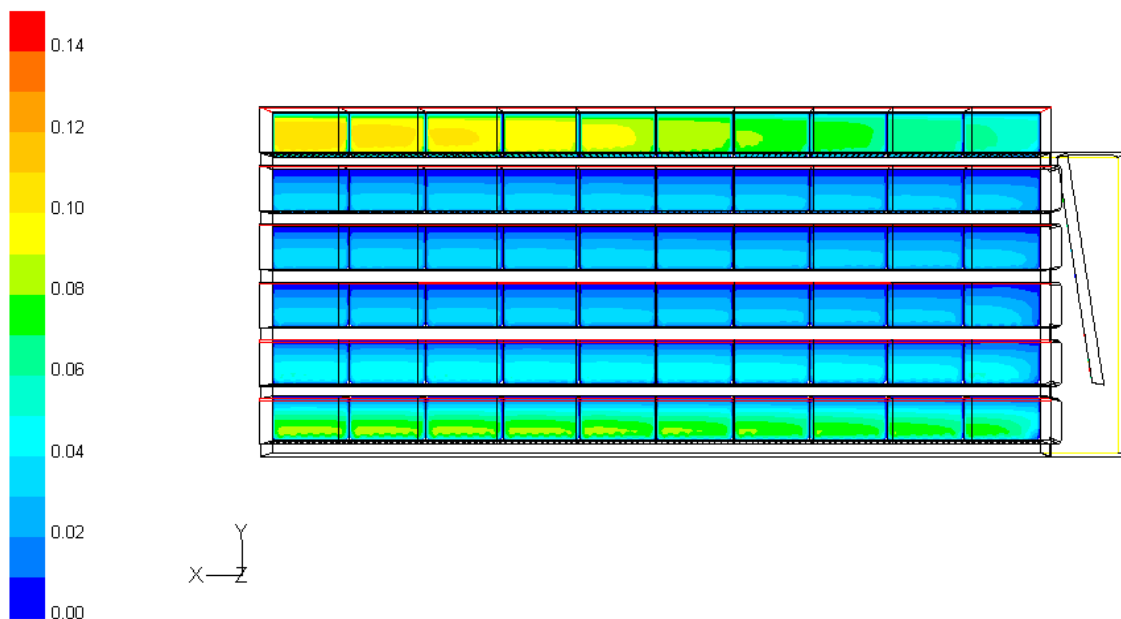
ethyleenconcentratie tussen de bollen onder de 100 ppb te houden, terwijl voor circulatie met cellucht met een ethyleenconcentratie van 80 ppb 300 tot 500 m³/uur nodig is om de gemiddelde concentratie tussen de bollen onder de 100 ppb te houden.

Om het ethyleengehalte van de cellucht bij 5% zure bollen rond de 10 ppb te houden is echter extreem veel ventilatie nodig (> 6000 m³/uur per m³ bollen) wat tot een zeer hoog gasverbruik zou leiden.

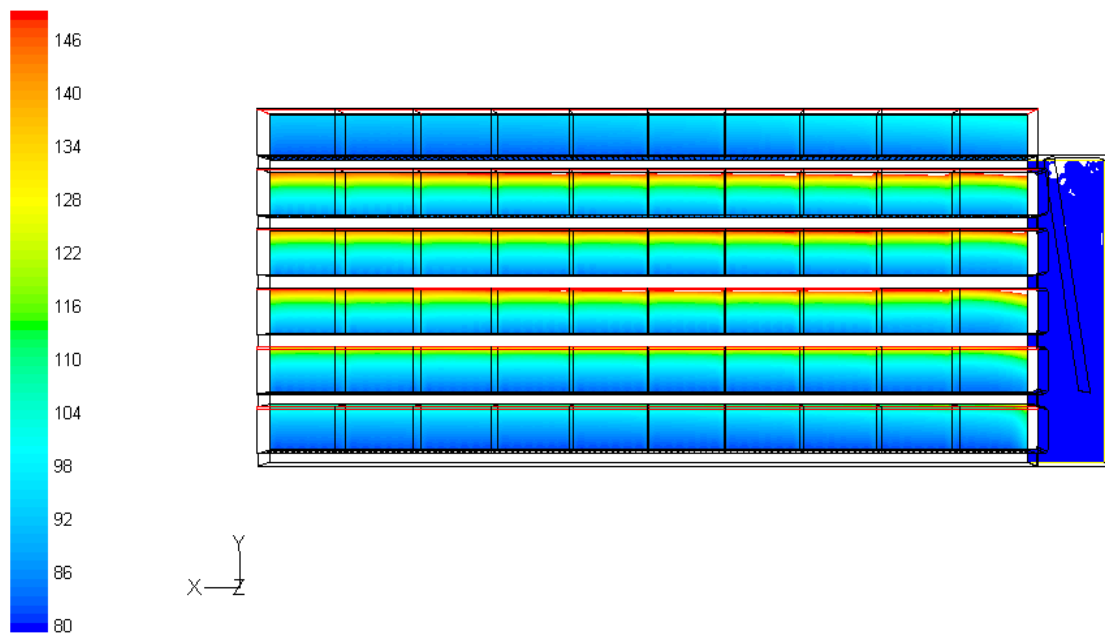


Figuur 5: Ethyleengehalte tussen de bollen

De luchtstroom in de kistenstapeling is echter ongelijk, zie figuur 6 voor circulatie met cellucht met een ethyleenconcentratie van 80 ppb van bollen met bolmaat 12, zodat ook de ethyleenconcentratie per kist en in de verschillende kisten varieert, figuur 7.



Figuur 6: Luchtsnelheden bij de circulatie van bollen (maat 12) in een 6 hoog x 10 diep gestapeld 1-laags kuubskistensysteem.

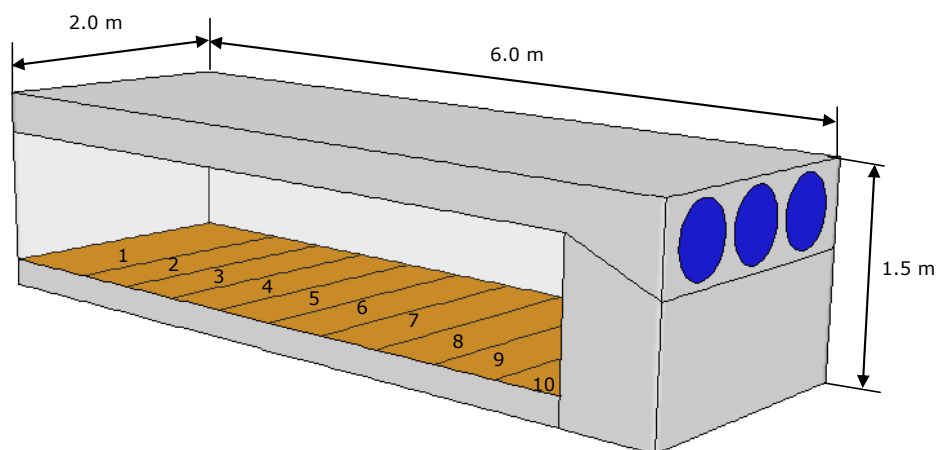


Figuur 7: Bij figuur 6 horende ethyleenconcentraties als gevolg van circulatie met cellucht van 80 ppb ethyleen.

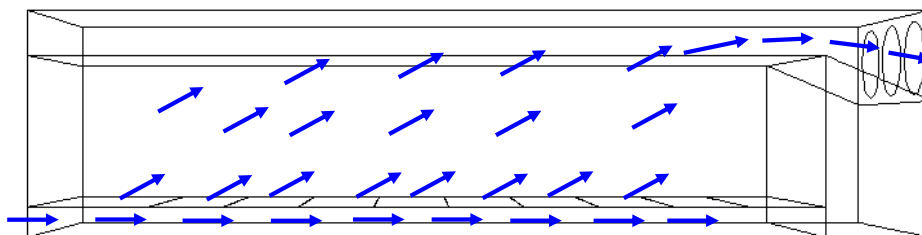
De ethyleenconcentratie is het laagst waar de luchtsnelheid het hoogst is (laag 1 en 6, vooral de kisten het verst van de wand). In laag 5 is de gemiddelde ethyleenconcentratie het hoogst en vooral tussen de bollen bovenin de kisten wordt de schadedrempel overschreden. Dit laat ook zien dat kolombeluchting (zoals bijvoorbeeld in figuur 3) geen optie is: naar boven toe loopt het ethyleengehalte steeds verder op.

3.3 Het containersysteem

Bij het eerste ontwerp van het containersysteem is uitgegaan van een container van 1,5 meter hoog, 2 meter breed en 6 meter lang, figuur 8, waarin $10,5 \text{ m}^3$ bollen opgeslagen kunnen worden. Hierin zijn 3 ventilatoren met elk een diameter van 50 cm geplaatst die de lucht door de bollen zuigen. De richting van de luchtstroom is weer gegeven in figuur 9.



Figuur 8: Eerste ontwerp containersysteem.



Figuur 9: Luchtstromen in het eerste ontwerp containersysteem.

De geperforeerde bodem is in 10 gelijke delen verdeeld om hiermee eventueel de luchtstroom te sturen met verschillende perforatiegraden (40 tot 80%). Bij de berekeningen is er van uitgegaan dat de containers in een verwarmde schuur staan waar door ventilatie het ethyleengehalte van de lucht die de container instroomt op 80 ppb gehouden wordt. Het percentage zure bollen in de container is 5 % (worst case scenario).

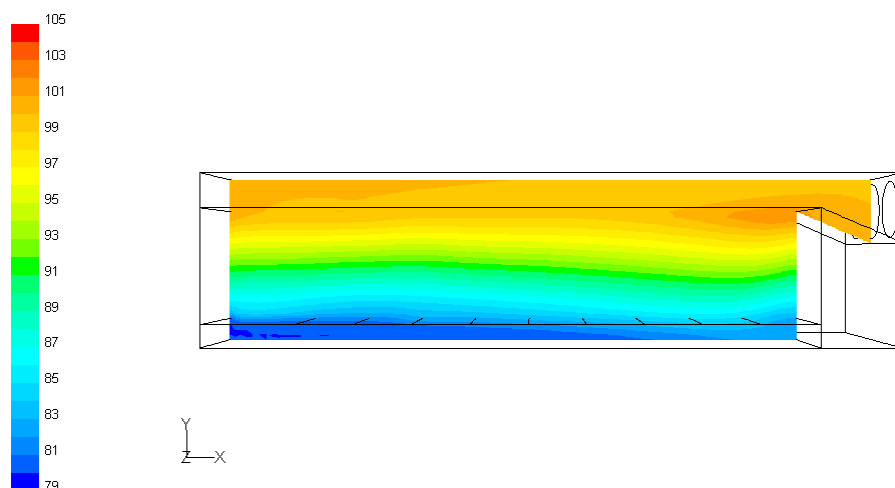
Containers in een verwarmde schuur

De resultaten van de berekeningen van enkele varianten zijn samengevat in tabel 5. Deze laat zien dat het vergroten van de perforatiegraad geen effect heeft op energieverbruik, met als achtergrond dat de meeste weerstand niet in de bodem van de container zit, maar in de bollen. Een grotere bolmaat (12 ipv. 6) verlaagt dus wel de weerstand waardoor om een zelfde debiet te realiseren veel minder energie nodig is.

Tabel 5: Varianten op het containersysteem met 10,6 m3 bollen, circulatie met 80 ppb ethyleen en 340 m3/uur per m3 bollen.

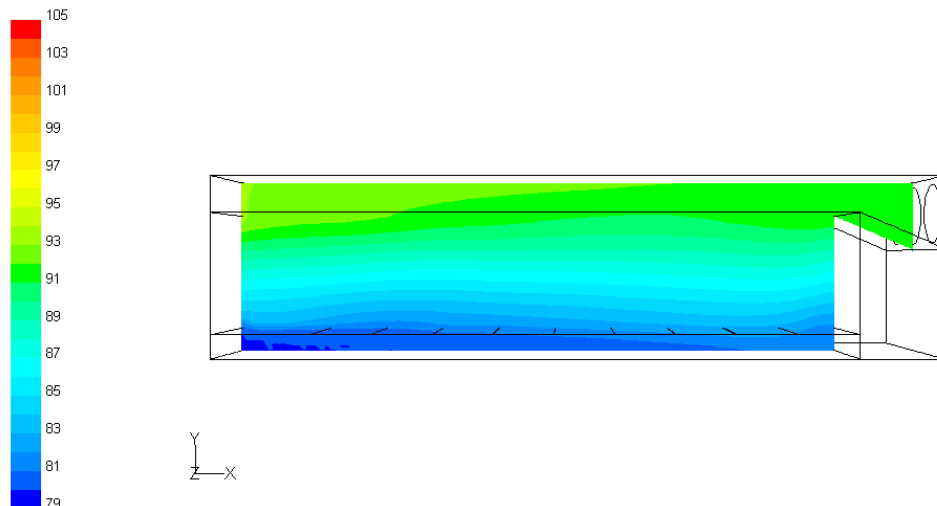
Perforatiegraad containerbodem (delen 1 t/m 10)	%	60	1 t/m 4 op 60	80	80
			5 t/m 10 op 80		
Bolmaat	cm	6	6	6	12
Energieverbruik per m3 bollen	W/m3	23.0	23.0	23.0	15.3
Gemiddelde ethyleenconcentratie tussen de bollen	ppb	92	92	92	87
Gemiddelde ethyleenconcentratie dat container verlaat	ppb	100	100	100	92
Maximale ethyleenconcentratie tussen de bollen	ppb	102	102	102	94
spreiding ethyleengehalte	%	11%	11%	11%	8%
maximale drempeloverschrijding	%	2%	2%	2%	-6%

De spreiding in het ethyleengehalte (berekend als: maximale *minus* gemiddelde ethyleenconcentratie en dit *gedeeld* door het gemiddelde) is laag (11 tot 8 %) en de overschrijding van de 100ppb veiligheidsdrempel is minimaal. De verticale ethyleenverdeling bij bolmaat 6 wordt geïllustreerd door figuur 10.



Figuur 10: Ethyleenverdeling bij circulatie in het containersysteem met een bodemperforatie van 80% en bolmaat 6.

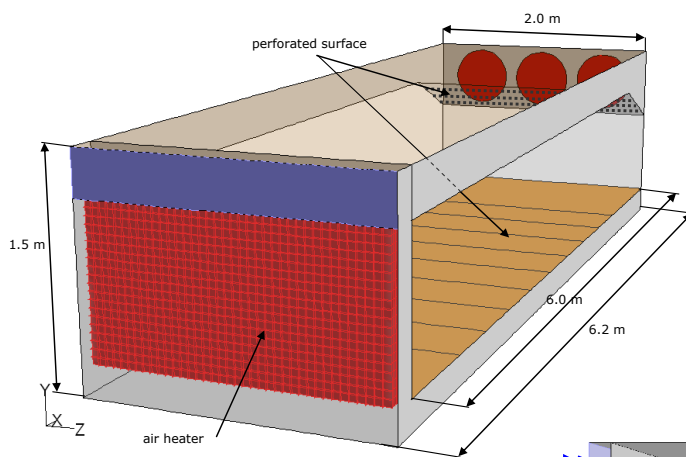
De hoogste concentratie zit bovenin, en het dichtst bij de ventilatoren. De verticale ethyleenverdeling bij bolmaat 12 wordt geïllustreerd door figuur 11. Bij eenzelfde debiet ($340 \text{ m}^3/\text{uur}$ per m^3 bollen) is de ethyleenconcentratie veel lager en komt nergens boven de 100 ppb.



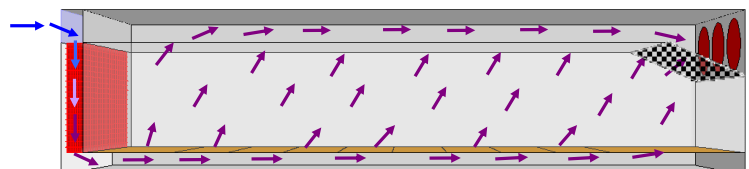
Figuur 11: Ethyleenverdeling bij circulatie in het containersysteem met een bodemperforatie van 80% en bolmaat 12.

Containers in de buitenlucht

Bij een volgende variant van het containersysteem is uitgegaan van een onverwarmde open schuur waardoor de container direct met buitenlucht wordt gecirculeerd. Daarom is bij dit ontwerp een heater ingebouwd. De container is ook iets aangepast om meer bollen op te kunnen slaan, figuur 12. In figuur 13 is de richting van de luchtstroom aangegeven.



Figuur 12: Tweede ontwerp containersysteem.



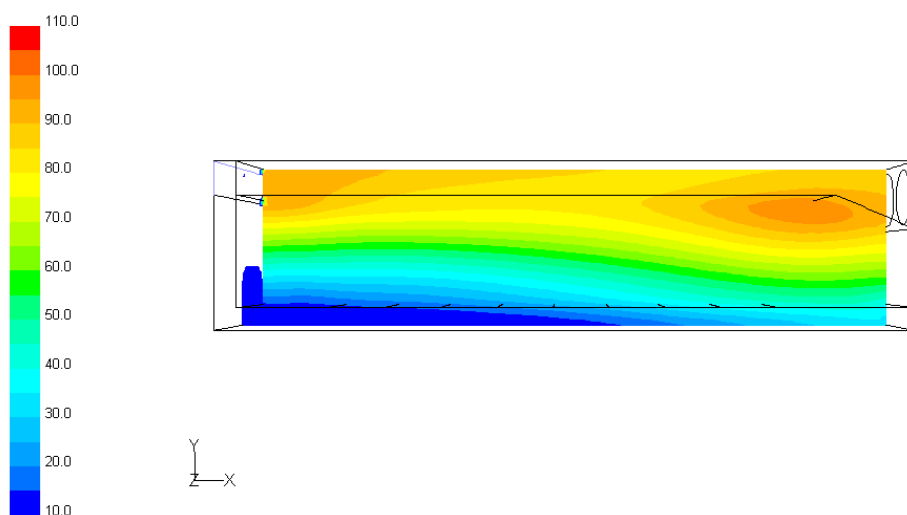
Figuur 13: Luchtstroom in het 2^{de} ontwerp containersysteem.

Door het direct met buitenlucht circuleren wordt gerekend met een ethyleenconcentratie van 10 ppb. Bij deze concentratie is een veel lager debiet nodig om ethyleen af te voeren (zie ook figuur 5), waardoor het energieverbruik voor circulatie extra laag is, tabel 6.

Tabel 6: Varianten op het containersysteem met 11,8 m³ bollen, een heatersysteem, en directe circulatie met buitenlucht met 10 ppb ethyleen.

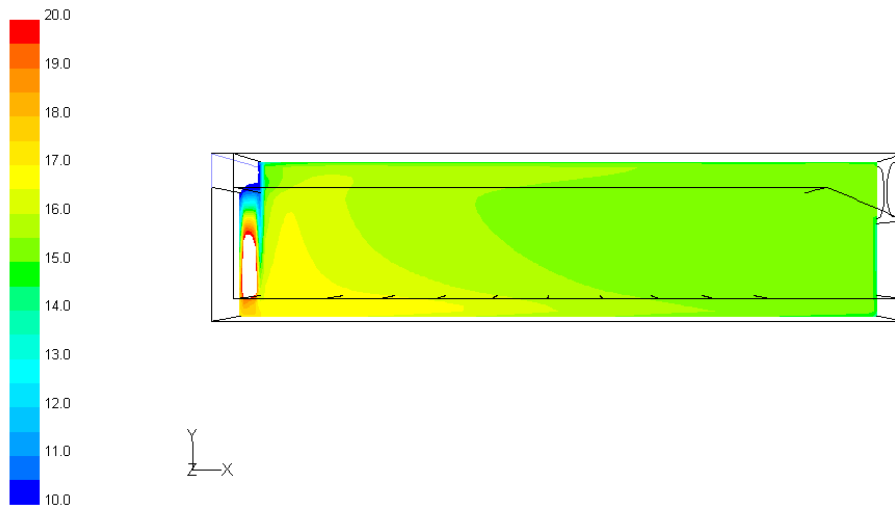
Bolmaat	cm	6	6	6	6	12	12	12
Circulatie-debiet	m ³ /h	82	83	84	51	120	121	122
Buitentemperatuur	°C	15.0	10.0	5.0	5.0	15.0	10.0	5.0
Gemiddelde temperatuur tussen de bollen	°C	18.9	15.2	13.0	14.1	17.6	13.6	10.5
ΔT	°C	3.9	5.2	8.0	9.1	2.6	3.6	5.5
Energieverbruik Circulatie per m ³ bollen	W/m ³	1.74	1.76	1.78	0.55	2.55	2.57	2.59
Energieverbruik Verwarmen per m ³ bollen	W/m ³	107.0	145.6	223.3	154.3	105.5	145.0	224.6
Totaal energieverbruik per m ³ bollen	W/m ³	108.7	147.4	225.1	154.8	108.0	147.6	227.1
Gemiddelde ethyleenconcentratie tussen de bollen	ppb	68.6	63.8	62.9	119.6	46.4	46.3	46.3
Gemiddelde ethyleenconcentratie die container verlaat	ppb	93.7	92.7	91.9	145.1	67.1	66.6	66.2
Maximale ethyleenconcentratie tussen de bollen	ppb	109.3	115.9	114.6	182.6	81.5	81.4	81.2
spreiding ethyleengehalte	%	59%	82%	82%	53%	76%	76%	75%
maximale drempeloverschrijding	%	9%	16%	15%	83%	-19%	-19%	-19%

Bij een debiet van 83 m³/uur per m³ bollen is met bolmaat 6 de overschrijding van de schadedrempel 9 tot 15%. Bij een debiet van 51 m³/uur loopt dit op tot 83%. Bij bolmaat 12 en een debiet van 120 m³/uur wordt nergens de schadedrempel overschreden. De variatie in ethyleenconcentratie bij bolmaat 6 is weergegeven in figuur 14.



Figuur 14: Ethyleenverdeling in het tweede ontwerp containersysteem bij bolmaat 6 bij circulatie met 10 ppb en 83 m³/uur per m³ bollen.

In figuur 15 is de temperatuursverdeling in de container weergegeven bij een buitentemperatuur van 10 °C. Deze figuur laat zien dat dan de temperatuursverschillen oplopen tot meer dan 3 °C, hetgeen voor zowel broeibollen als plantgoed onacceptabel is. Het systeem heeft vermoedelijk een veel grotere ruimte onder de bollen nodig om de temperatuur te bufferen.



Figuur 15: Temperatuurverdeling bij circulatie met 83 m³/uur per m³ bollen en een buitentemperatuur van 10 °C.

3.4 Het grote gaasbakkenstelsel

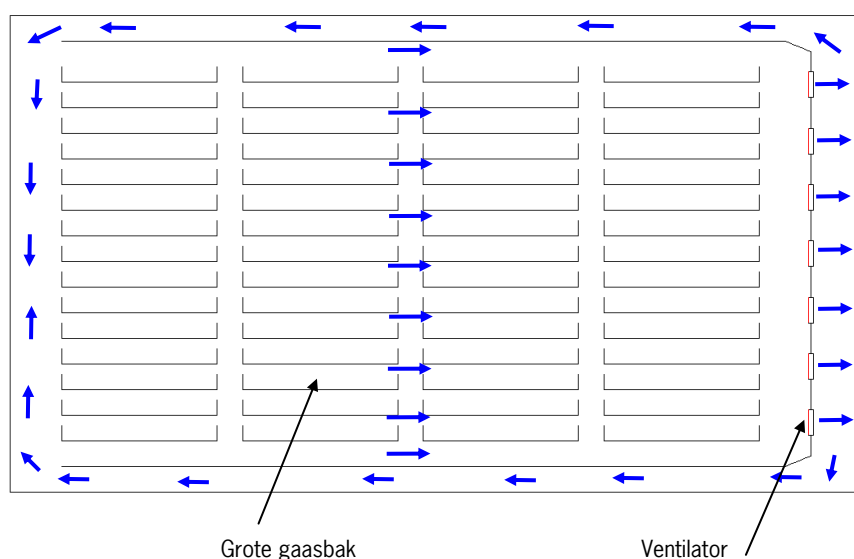
Van het grote gaasbakkenstelsel zijn 4 ontwerpen doorgerekend, tabel 7. In de eerste drie ontwerpen is uitgegaan van een afmeting van lxbxh = 3 x 1,5 x 0.30 m. Bij ontwerp 1 is er tussen de in kolommen 15 hoog gestapelde bakken 20 cm ruimte, tussen de kolommen 50 cm. Met 4 kolommen per rij staat er per rij dan 81 m³ bollen. Bij ontwerp 2 is minder ruimte tussen de kolommen en de bakken maar iets meer ruimte tussen de kolommen en de ventilatoren. Bij ontwerp 3 is die ruimte weer als bij ontwerp 1, maar staan er ipv. 4 nu 5 kolommen met in totaal 115 m³ bollen per rij. In het vierde ontwerp is de dikte van de laag bollen teruggebracht van 30 naar 15 cm en zijn de bakken 23 hoog gestapeld.

Tabel 7: Overzicht Systeemvarianten grote gaasbakken.

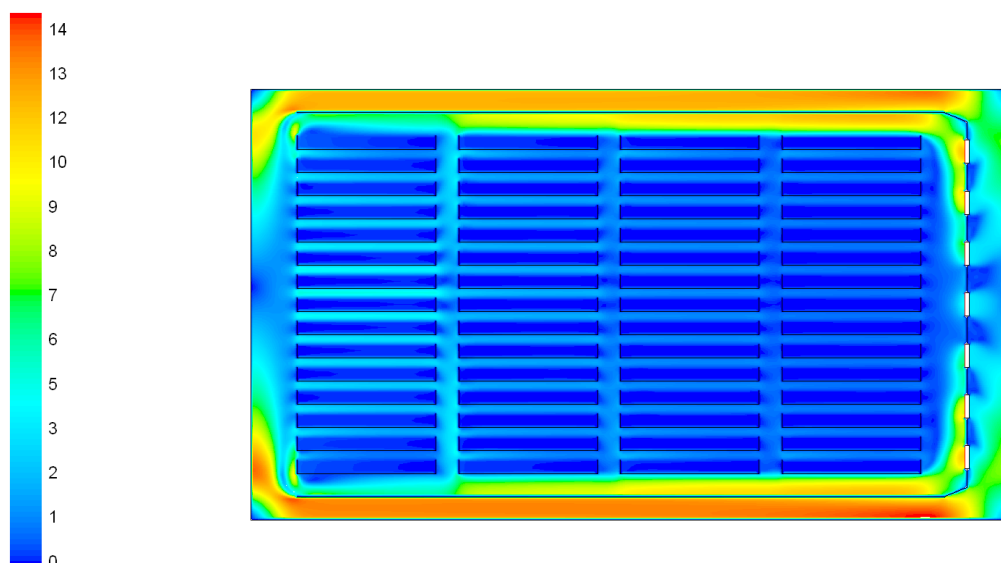
		Ontwerp 1	Ontwerp 2	Ontwerp 3	Ontwerp 4
hoogte retourkanalen (2x)	m	0,50	0,50	0,50	0,50
bakhoogte	cm	30	30	30	15
tussen de bakken	cm	20	18	18	20
tussen kolommen	cm	50	5	5	5
tussen kolom en ventilatoren	m	1,00	1,65	1,00	1,00
hoogte kolom	n	15	17	17	23
onderste bak tot vloer	cm	50	16	16	16
bovenste bak tot plafond	cm	50	16	16	16
aantal kolommen	n	4	4	5	5
bakken per rij	n	60	68	85	115
m ³ bollen per rij	m ³	81	92	115	78
vrije verticale ruimte	m	3,8	3,2	3,2	4,72
id.	%	46%	39%	39%	58%

De luchtstroomrichting in ontwerp 1 is weergegeven in figuur 16. In de ontwerpen wordt de circulatielucht door 7 kleine ventilatoren langs, onder en boven de gaasbakken gezogen en via ruime retourkanalen onder en boven de gaasbakken teruggeleid. In de retourlucht wordt door ventilatie met opgewarmde buitenlucht het ethyleengehalte op 80 ppb gehouden.

De luchtsnelheden worden weergegeven in figuur 17. De hoogste luchtsnelheden worden in de retourkanalen berekend.



Figuur 16: Luchtstromen in het eerste grote gaasbakkenontwerp.



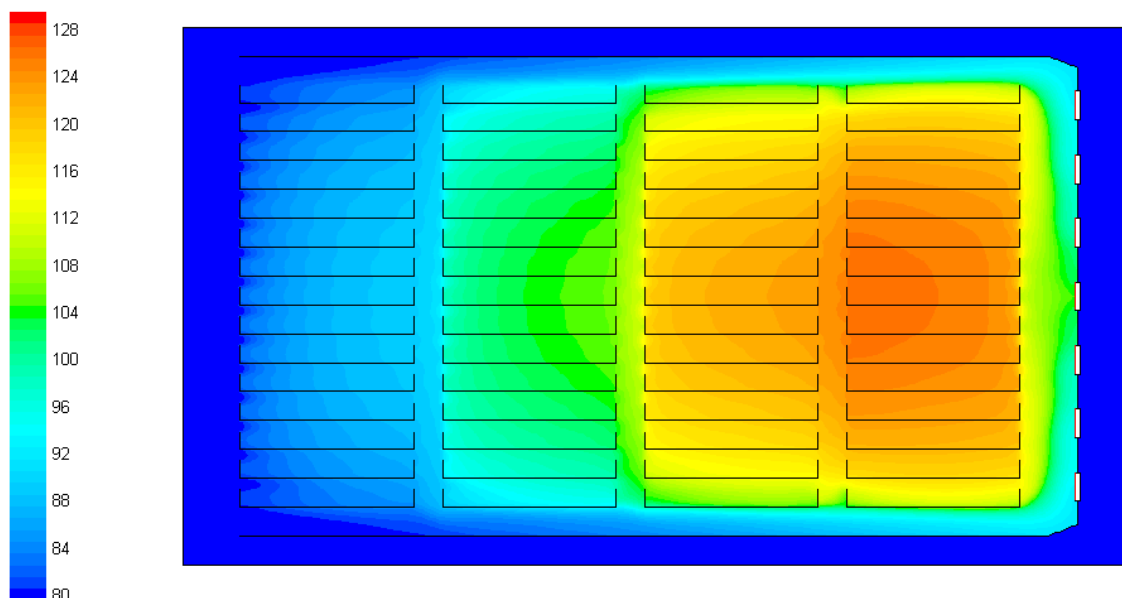
Figuur 17: Luchtsnelheden in het eerste grote gaasbakken ontwerp.

Circulatie met verwarmde cellucht

Van ontwerp 1 zijn een aantal varianten doorberekend: Bij de eerste variant, waarbij gecirculeerd wordt met 381 m³/uur per m³ bollen is het energieverbruik per m³ bollen laag (22 W), maar komt het gemiddelde ethyleengehalte uit op 107 ppb en de maximale overschrijding van de ethyleendrempel komt op 27%, zie figuur 18 voor de verdeling van ethyleen in dit systeem. De maximale overschrijding van de ethyleendrempel is lager dan bij het kuubskistensysteem (27% tegen 56%), maar nog niet ideaal. Opvoeren van het circulatiedebiet reduceert het gemiddelde ethyleengehalte en ook de maximale drempeloverschrijding, maar dit vereist een zeer hoog energieverbruik, tabel 8.

Tabel 8: Varianten van het grote gaasbakkensysteem (ontwerp 1 met 15 gaasbakken per kolom), cellucht van 80 ppb.

Bodemperforatie	%	60	60	60	60	60	80	80
Zijkantperforatie	%	0	0	0	0	0	80	80
Luchtstroom		zuigen	zuigen	zuigen	zuigen	<i>persen</i>	zuigen	zuigen
Bolmaat	cm	6	6	6	6	6	6	12
Circulatie-debiet	m ³ /h	381	571	762	914	762	571	571
Energieverbruik per m ³ bollen	W/m ³	22	66	146	251	106	96	87
Gemiddelde ethyleenconcentratie tussen de bollen	ppb	107	96	90	89	94	94	93
Gemiddelde ethyleenconcentratie afvoertucht	ppb	98	92	89	87	89	92	92
Maximale ethyleenconcentratie tussen de bollen	ppb	127	114	104	101	112	97	97
spreiding ethyleengehalte	%	19%	19%	16%	13%	19%	4%	4%
maximale drempeloverschrijding	%	27%	14%	4%	1%	12%	-3%	-3%
Verlaagd circulatiedebiet	m ³ /h	286	429	571	686	571		
Energieverbruik Circulatie per m ³ bollen	W/m ³	9	28	62	106	45		
spreiding ethyleengehalte	%	21%	20%	18%	16%	18%		
maximale drempeloverschrijding	%	43%	23%	13%	7%	13%		



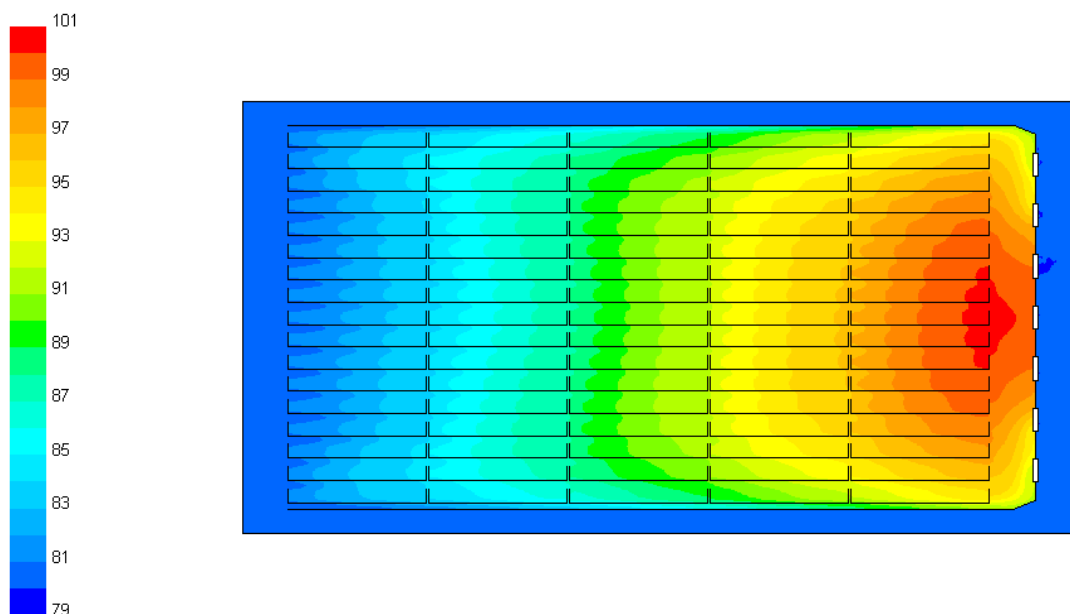
Figuur 18: Verdeling van ethyleen in ontwerp 1 bij circulatie met 381 m³/uur per m³ bollen en cellucht van 80 ppb.

Een variant waarbij de ventilatoren niet zuigen maar persen geeft een lager energieverbruik, maar een iets hogere overschrijding van de ethyleendrempel.

Bij een grotere bodemperforatie wordt de ethyleendrempel niet overschreden, maar het energieverbruik is hoger. Een grotere bolmaat verlaagt het energieverbruik nauwelijks.

De resultaten van de berekeningen aan de andere 3 ontwerpen zijn samengevat in tabel 9. Bij de ontwerpen 2 en 3 wordt de ethyleendrempel niet of nauwelijks overschreden, maar het energieverbruik is hoger dan bij het kuubskistensysteem.

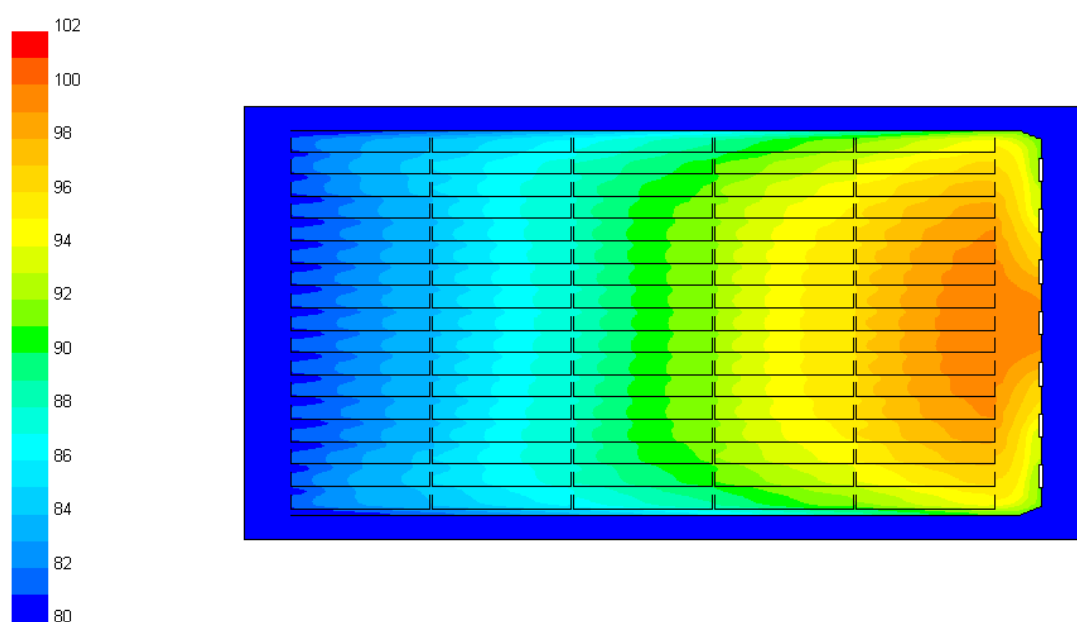
De eerste 3 varianten in tabel 9 zijn berekend met een gelijk debiet voor de 7 ventilatoren. Voor ontwerp 3 is de ethyleenverdeling bij gelijk debiet voor de ventilatoren weergegeven in figuur 19. Dicht bij de ventilatoren en op halverwege de kolomhoogte is het ethyleengehalte het hoogst. Door de 3 middelste ventilatoren een hoger debiet, en de 2 onderste en de 2 bovenste een lager debiet te geven wordt de ethyleenverdeling nauwelijks verbeterd, figuur 20. Ook het omgekeerde heeft nauwelijks effect, maar het energieverbruik is wel hoger.



Figuur 19: Ethyleenverdeling in ontwerp 3 bij gelijk debiet per ventilator.

Tabel 9: Varianten van het grote gaasbakkensysteem (ontwerp 2, 3 en 4), cellucht van 80 ppb.

Ontwerp		2	2	3	3	3	3	3	4
bakhoogte	cm	30	30	30	30	30	30	30	15
gaasbakken per rij	n	68	68	85	85	85	85	85	115
debietverdeling over ventilatoren	%	gelijk	gelijk	gelijk	binnen meest	binnen <i>minst</i>	binnen meest	binnen meest	binnen meest
Bolmaat	cm	6	12	6	6	6	6	12	6
Bodemperforatie	%	60	60	60	60	60	80	80	80
Circulatie-debiet	m ³ /h	417	417	417	423	417	423	423	312
Energieverbruik per m ³ bollen	W/m ³	88	84	121	122	146	117	117	30.5
Gemiddelde ethyleenconcentratie tussen de bollen	ppb	91	91	90	90	90	90	90	95
Gemiddelde ethyleenconcentratie die container verlaat	ppb	96	96	96	95	97	95	95	101
Maximale ethyleenconcentratie tussen de bollen	ppb	102	101	100	100	101	100	100	110
spreiding ethyleengehalte	%	12%	12%	12%	11%	12%	11%	11%	16%
maximale drempeloverschrijding	%	2%	1%	0%	0%	1%	0%	0%	10%



Figuur 20: Ethyleenverdeling bij ontwerp 3 bij een hoger debiet van de 3 middelste ventilatoren.

Tabel 9 laat ook zien dat het energieverbruik bij bolmaat 12 even hoog is als bij bolmaat 6. De lucht stroomt namelijk niet door de bollen, maar er langs. De diffusie vanuit de laag bollen naar de langsstromende lucht is duidelijk te weinig waardoor er heel veel lucht langs moet stromen om een zo groot mogelijke concentratiegradiënt te realiseren. Hierdoor is het energieverbruik te hoog. In ontwerp 4 is de dikte van de laag bollen teruggebracht tot 15 cm, maar de ruimte tussen de bakken op 20 cm gesteld. Daardoor is ook de totale vrije ruimte (zie ook tabel 7) fors hoger en de weerstand dus ook lager. Het benodigde debiet om ethyleen voldoende af te voeren is nu flink verminderd waardoor ook het energieverbruik in ontwerp 4 fors lager ligt. Het energieverbruik is nu lager dan bij het kuubskistensysteem en ook de maximale overschrijding van de ethyleendrempel is lager. Een verdere verbetering van ontwerp 4 ligt vermoedelijk in het vergroten van de afstand tussen de kolommen zoals in ontwerp 1, en in het vergroten van de retourkanalen.

Circulatie met buitenlucht

In de voorgaande berekeningen is steeds uitgegaan van het circuleren van de reuze gaasbakken met 5% zure bollen met cellucht waarvan het ethyleengehalte door verversing met opgewarmde buitenlucht op 80 ppb wordt gehouden. Voor ontwerp 1 zijn ook een aantal scenario's doorgerekend van circuleren met lucht van 10 ppb (buitenlucht) ipv. 80 ppb ethyleen, bij 5% en bij 2 % zure bollen. Het energieverbruik wordt dan drastisch verlaagd en het ethyleengehalte blijft ver onder de 100 ppb, tabel 10.

Bij 5% zuur is een circulatiedebiet met 190 m³/uur voldoende om de ethyleenconcentratie tussen de bollen op 64 ppb te houden. Wanneer het systeem verder geoptimaliseerd is, zodat om bij 5% zuur de ethyleenconcentratie tussen de bollen op 100 ppb te houden een debiet van minder dan 100 m³/uur voldoende is, wordt er t.o.v. het kuubskistensysteem zeer fors op elektra bespaard: er hoeft dan helemaal niet meer gecirculeerd te worden. De 100 m³ lucht die er per m³ bollen langs stroomt (en bij minder dan 5% zuur evenredig minder) is dan direct opgewarmde buitenlucht met 10 ppb ethyleen. Deze lucht gaat na de ventilatoren niet door een retourkanaal, maar eventueel via een warmtewisselaar, naar buiten.

Tabel 10: Scenario's bij ontwerp 1.

Percentage zure bollen	%	5%	5%	5%	2%	2%
ethyleenconcentratie aanvoerlucht	ppb	80	10	10	80	10
Bolmaat	cm	6	6	6	6	6
Circulatiedebiet	m ³ /h	381	381	190	381	95
Energieverbruik per m ³ bollen	W/m ³	21.7	21.1	2.9	21.1	0.8
Gemiddelde ethyleenconcentratie tussen de bollen	ppb	107	37	64	91	34
Gemiddelde ethyleenconcentratie afvoerlucht	ppb	98	28	46	87	39
Maximale ethyleenconcentratie tussen de bollen	ppb	127	60	92	100	43
spreiding ethyleengehalte		19%	62%	43%	10%	26%
maximale drempeloverschrijding		27%	-40%	-8%	0%	-57%

4 Conclusies en Aanbevelingen

Het containersysteem waarbij de containers in een verwarmde geventileerde schuur staan zodat de lucht niet opgewarmd hoeft worden, maar waarvan het ethyleengehalte rond de 80 ppb is, verbruikt minder energie voor de circulatie dan het kuubskistensysteem. Ook zijn de bewaarcondities gelijkmatiger: de spreiding in het ethyleengehalte is 8 – 11% en de drempeloverschrijding is bij bolmaat 6 slechts 2% (bij het kuubskistensysteem 56%) en bij bolmaat 12 blijft het maximale ethyleengehalte onder de 100 ppb. Bij dit

containersysteem is het energieverbruik voor verwarming hetzelfde als bij het kuubskistensysteem.

De variant waarbij direct met buitenlucht geventileerd wordt kan door het lage ethyleengehalte van de buitenlucht met een fors lager debiet toe, dus met veel minder (elektrische) energie. De container moet dan echter een eigen heater hebben. De temperatuursverdeling tussen de bollen is dan echter verre van optimaal, vooral bij een groot verschil met de buitenluchttemperatuur. Verdere optimalisering van deze variant ligt daarom vermoedelijk in een grotere (buffer)ruimte onder de bollen.

Het voordeel van het containersysteem is dat er geen bewaarcellen met droogwanden nodig zijn. Een nadeel is o.a. dat ze voor kleine partijen te groot zijn. Het containersysteem is niet in het bestaande systeem in te passen.

Bij het grote gaasbakkensysteem staan de gaasbakken gestapeld in een bewaarcel waar door 7 kleine ventilatoren per rij een circulerende luchtstroom in stand wordt gehouden. Een laag bollen van 30 cm dik vraagt bij circuleren met cellucht met een ethyleenconcentratie van 80 ppb volgens de modelberekeningen teveel energie. De laag is te dik t.o.v. de diffusiesnelheid van ethyleen. De bewaarcondities zijn wel gelijkmatiger dan bij het kuubskistensysteem. Pas wanneer de dikte van de laag bollen wordt teruggebracht tot 15 cm wordt ethyleen door diffusie snel genoeg afgevoerd en wordt er energiezuiniger gecirculeerd dan in het kuubskistensysteem. Het grote gaasbakkensysteem kan vermoedelijk nog verder verbeterd worden door de ruimte tussen de kolommen op 50 cm te houden. Door ook de ruimte in het retourkanaal te vergroten wordt waarschijnlijk nog meer weerstand weggenomen waardoor het energieverbruik nog verder afneemt.

De berekeningen van de varianten waarbij direct met buitenlucht met een ethyleengehalte van 10 ppb wordt gecirculeerd laten ook bij het gaasbakkensysteem een extreem laag energieverbruik voor circulatie zien. Maar pas wanneer het benodigde debiet dan onder de 100 m³/uur per m³ bollen komt wordt het totale energieverbruik voor verwarming *plus* circulatie fors lager dan bij het kuubskistensysteem. Gecombineerd met een zonedak (35% besparing op verwarming) en warmteterugwinning (50% besparing op verwarming, maar wel weer extra energie voor ventilatoren waardoor ongeveer 40% op totaal energie bespaard wordt) kan bij 5% zure bollen dit systeem toe met slechts 10% van het elektraverbruik wat voor circulatie bij het kuubskistensysteem nodig is, en minder dan 40% van de energie voor verwarming. De bewaarcondities zijn daarbij veel gelijkmatiger en de schadedrempel voor ethyleen wordt nergens in het systeem overschreden.

Het is daarom aanbevolen deze laatste optimalisering samen met systeembouwers, installateurs en telers verder uit te werken om tot een definitief geoptimaliseerd ontwerp te komen dat op een nieuw te bouwen bedrijf gerealiseerd kan worden. Het snelle droogstelsel op een brede transportband is hier een integraal onderdeel van.

