

Voorwaardelijke Ventilatie- en Circulativenormen

Een demonstratiemodel

Jeroen Wildschut (WUR/PPO)

© 2013 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 Meerjarenafpraak energie Bloembollen (KAVB, PT, min.EZ, Agentschap NL en telers).



Projectnummer: 32 361 566 00

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

Internet : www.ppo.wur.nl

Inhoudsopgave

pagina

SAMENVATTING.....	5
1 INLEIDING	6
2 WERKWIJZE.....	6
3 RESULTATEN	9
3.1 Analyse klimaatgegevens KNMI.....	9
3.2 Energieverbruik Bewaarscenario's.....	10
3.2.1 Start-scenario.....	10
3.2.2 Scenario's met een laag percentage zuur en oplopende buitentemperaturen	11
3.2.3 Scenario's waarbij de ademhaling oploopt.....	14
3.2.4 Overige scenarioreeksen.....	16
4 CONCLUSIES	18

Samenvatting

Ventilatie en circulatie bij het bewaren van bloembollen hebben als functie om ethyleen (alleen van belang bij tulpenbollen), CO₂, water(damp) en soms ook warmte af te voeren en eventueel O₂ aan te voeren, zodat bewaarcondities optimaal zijn en hiermee de kwaliteit van de bollen hoog. Voldoende circulatie is daarnaast van belang om eventuele verschillen in bewaarcondities tussen de kisten voor de systeemwand te minimaliseren.

In dit project is een rekenmodel ontwikkeld waarmee op basis van omstandigheden en van instellingen het bewaarklimaat wordt berekend. De omstandigheden in de bewaarcel betreffen het percentage zure bollen, de ademhaling en de uitdrogingsnelheid. De omstandigheden buiten: de temperatuur en RV. De instellingen betreffen de ventilatie- en de circulatiehoeveelheid, de spreiding hierin en de bewaar temperatuur. Het bewaarklimaat wordt gekarakteriseerd door het ethyleengehalte, het CO₂-gehalte, de RV en de temperatuur. Deze parameters worden berekend op verschillende niveaus: gemiddeld in de cellucht, gemiddeld tussen de bollen en gemiddeld in de meest en in de minst beluchte kuubkist.

Door eerst de omstandigheden te definiëren en vervolgens de instellingen te kiezen, kan de gebruiker zien in welk bewaarklimaat dit resulteert. Door dit resultaat met de schadedrempels te vergelijken kan worden besloten iets aan de instellingen te veranderen om een beter resultaat te krijgen. Op deze wijze wordt een reeks scenario's doorgerekend waarbij gezocht kan worden naar het voor de productkwaliteit meest gunstige bewaarklimaat. Het model rekent ook de energiekosten uit zodat ook gezocht kan worden naar de goedkoopste instellingen om het voor de productkwaliteit meest gunstige bewaarklimaat te realiseren.

Met het model kan o.a. worden gedemonstreerd dat als het percentage zure bollen laag is (1%), en de ventilatie uitsluitend op ethyleen gestuurd wordt, er dan in veel gevallen onvoldoende warmte wordt afgevoerd. Er moet dan gekoeld worden. Iets meer ventileren is dan een goedkopere oplossing.

Als ook de circulatie uitsluitend op ethyleen gestuurd wordt dan blijft het ethyleengehalte tussen de bollen weliswaar onder de schadedrempel, maar dan loopt het temperatuurverschil tussen de minst en de meest beluchte kist teveel op. Het verbeteren van de luchtverdeling over de kisten is dan een veel goedkopere oplossing dan weer extra gaan circuleren.

Als de weersomstandigheden (oplopende buitentemperatuur, hoge RV) er toe leiden dat de RV in de cel te hoog wordt, dan is het tijdelijk laten oplopen van de celtemperatuur een veel goedkopere oplossing om de RV te verlagen dan het ontvochtigen.

Het model laat ook zien dat bij een laag percentage zure bollen, maar een hoge ademhaling en/of bij nadrogen in sommige gevallen maximaal geventileerd moet worden om al het water af te voeren. Ook dit is veel goedkoper dan actief ontvochtigen.

In geen enkel scenario kwam het CO₂-gehalte ook maar in de buurt van de hier gehanteerde schadedrempel van 8000 ppm (0.8%).

Op bedrijven zonder sensoren voor ethyleen, CO₂, temperatuur en RV kan het (tijdelijk) oplopen van ethyleen, of van het temperatuurverschil tussen de minst en de meest beluchte kist, buiten de waarneming vallen. Ook het tijdelijk oplopen van de ademhaling en daarmee de warmteproductie en de RV wordt dan niet opgemerkt. Ventileren en circuleren volgens normen die van een worst case scenario uitgaan is dan de enige optie om een ongunstig bewaarklimaat te voorkomen. Het energieverbruik is hierbij erg hoog.

Mèt sensoren kan het bewaarklimaat continue worden gevolgd en, zoals door het rekenmodel gedemonstreerd, geoptimaliseerd worden waarbij een ongunstig bewaarklimaat vermeden wordt en de energiekosten zo laag mogelijk gehouden worden. Dit optimalisatieproces wordt voor een groot deel geautomatiseerd door de klimaatcomputer.

Het rekenmodel kan toegepast worden op: <https://Sites.wur.nl/sites/BewaarModel>

1 Inleiding

Ventilatie en circulatie bij het bewaren van bloembollen hebben als functie om ethyleen (alleen van belang bij tulpenbollen), CO₂, water(damp) en soms ook warmte af te voeren en eventueel O₂ aan te voeren, zodat bewaarcondities optimaal zijn en hiermee de kwaliteit van de bollen hoog is. Voldoende circulatie is daarnaast van belang om eventuele verschillen in bewaarcondities tussen de kisten voor de systeemwand te minimaliseren.

De benodigde ventilatie- en circulatiedebieten (m³ lucht/uur per m³ bollen) hangen dus af van de productie (in bijvoorbeeld liter/uur per m³ bollen) van de af te voeren stoffen en van de schadedrempels (de maximale concentratie van die stoffen, waarbij er geen invloed op de kwaliteit is). Als zodanig hangen optimale ventilatie- en circulatie debieten daarom ook van elkaar af, zoals b.v. voor de afvoer van ethyleen:

$$e^{cel} = \frac{P^{cel}}{V} + e^{buiten} \quad \text{en} \quad e^{kist} = \frac{P^{kist}}{C} + e^{cel} \quad , \text{ zodat:} \quad e^{kist} = \frac{P^{kist}}{C} + \frac{P^{cel}}{V} + e^{buiten}$$

waarin e^{cel} = ethyleengehalte van de cellucht
 P^{cel} = ethyleenproductie in de cel
 V = Ventilatie-debiet
 e^{buiten} = ethyleengehalte van de buitenlucht
 e^{kist} = ethyleengehalte van de lucht tussen de bollen in de kist
 P^{kist} = ethyleenproductie door de bollen in de kist
 C = Circulatie-debiet

Ventilatie- en circulatienormen stammen uit de tijd dat de af te voeren stoffen niet door sensoren continue gemeten (gemonitord) konden worden, en dat het bewaarklimaat niet door een klimaatcomputer gestuurd kon worden.

Nu alles in principe meet- en regelbaar is kan zeer veel energie bespaard worden in vergelijking met handmatig volgens normen ingestelde ventilatie en circulatie. Bij de ventilatie kan veel op gas, en bij de circulatie nog forser op elektra bespaard worden.

Doelstelling van dit project is het inzichtelijk maken hoe ventilatie- en circulatienormen bepaald zijn, en hoe deze afhangen van de condities van de buitenlucht, van het vereiste bewaarklimaat en van de gehanteerde schadedrempels. Ook wordt duidelijk hoe de ventilatie- en circulatienormen invloed hebben op elkaar. Met deze inzichten worden klimaatcomputers doeltreffender en met meer vertrouwen ingesteld en wordt met een lager energieverbruik een beter bewaarklimaat gerealiseerd.

2 Werkwijze

Voor het berekenen van de ethyleen- en CO₂-concentratie, de Relatieve Vochtigheid (RV)/H₂O en de warmteproductie van bloembollen in een bewaarcel is een model ontwikkeld waarmee op basis van omstandigheden en instellingen het resulterende bewaarklimaat uitgerekend wordt. Het energieverbruik om dit bewaarklimaat te realiseren wordt ook berekend.

Als *omstandigheden* kunnen in dit model ingevoerd worden:

- Het percentage zure bollen in een bewaarcel en in een kist (i.g.v. tulpen)
- De ademhaling (CO₂-productie per uur)
- De hoeveelheid af te voeren water a.g.v. het nadrogen/uitdrogen
- De temperatuur van de buitenlucht
- De RV van de buitenlucht

Als *instellingen* kunnen worden ingevoerd:

- De ventilatie (de hoeveelheid luchtverversing met buitenlucht per uur per m³ bollen)
- De circulatie (de hoeveelheid cellucht die per uur door een m³ bollen in kuubskisten wordt geblazen)
- De spreiding in het circulatiedebiet per kist over de kistenstapeling (a.g.v. een ongelijkmatige luchtverdeling)
- De celtemperatuur
- De gewenste RV

Het is ook mogelijk andere *schadedrempels* dan de “standaard” gehanteerde drempels in te voeren.

Als *resultaat* van omstandigheden en instellingen worden berekend:

- De ethyleengehaltes in de cellucht, in de lucht tussen de bollen (gemiddeld per kist, afhankelijk van het percentage zure bollen in die kist) en de overschrijding van de schadedrempel. En de ethyleengehaltes in de, als gevolg van een ongelijkmatige luchtverdeling over de stapeling, minst beluchte kist en in de meest beluchte kist.
- Het CO₂-gehalte van de cellucht en van de lucht tussen de bollen (alleen voor de gemiddelde kist), evenals de overschrijding van de schadedrempel.
- De RV van de cellucht en gemiddeld van de lucht tussen de bollen, en ook voor de minst en de meest beluchte kisten. Bij een RV boven de gewenste waarde wordt uitgerekend wat de (energie)kosten van ontvochtigen zijn.
- Het temperatuurverschil tussen de cellucht en de gemiddelde kist a.g.v. opwarming door ademhaling en afvoer van warmte door circulatie en verdamping. Dit wordt ook berekend voor de minst beluchte kist en de meest beluchte kist, waarna het verschil in temperatuur tussen deze kisten wordt berekend en vergeleken met de maximale waarde (standaard ingevoerd als 0,5 °C). Het aantal dagen dat het duurt voordat dit temperatuurverschil niet meer toeneemt wordt ook berekend. Hetzelfde wordt berekend voor in het geval er ontvochtigd wordt.
- De energiekosten van het realiseren van het bewaarklimaat voor een cel met 324 m³ bollen (kuubskisten van 1200 liter, 6 hoog x 9 diep x 5 rijen). Het energieverbruik waarin een bepaalde omstandigheid en instelling (scenario) resulteert, wordt uitgedrukt in MJoules per dag, en ook in €/dag/cel, €/dag per m³ bollen en in €/seizoen per m³ bollen. Zo kan voor een bewaarperiode met wisselende omstandigheden het totale minimale energieverbruik uitgerekend worden waarbij de schadedrempels niet overschreden worden. Het energieverbruik wordt opgesplitst in energie voor ventilatie (elektra + gas), circulatie (elektra), koelen (elektra) en ontvochtigen (elektra + gas).

De resultaten van de berekening van de energiekosten worden ook weergegeven met figuren.

Ter illustratie is op pagina 8 de “invoer- en resultaatpagina” van het model weergegeven voor het z.g. “start scenario”: de omstandigheid dat o.a. het percentage zure (tulpen)bollen 5% is en de temperatuur en de RV van de buitenlucht als gemiddeld over de bewaarperiode (respectievelijk ongeveer 15 °C en 85%). De instellingen zijn volgens de normen 100 m³/uur per m³ bollen ventilatie en 500 m³/uur per m³ bollen circulatie.

Het rekenmodel kan toegepast worden op: <https://Sites.wur.nl/sites/BewaarModel>

Daarnaast zijn klimaatgegevens van het KNMI geanalyseerd om hiermee realistische scenario's ten aanzien van de temperatuur en de RV van de buitenlucht te bepalen. Hierbij is gebruik gemaakt van de meteorologische urengegevens van het meetstation Berkhout van 2001 t/m 2010 voor de maanden juni t/m november.

resetten: cntrl o

Omstandigheden

% zure bollen in cel ademhaling	5,0%	%
	10	ml CO ₂ /uur/kg
buitentemperatuur buiten RV uitdroging	15,0	°C
	85%	%
	5	liter per x dgn/m ³
	30	dgn
% zure bollen in kist	5%	

Schadedrempels

ethyleen	100	ppb
CO ₂	8000	ppm
RV%	75%	
ΔT tussen kisten	0,50	

Instellingen

ventilatie terugtoeren		
ventilatie	100	m ³ /uur/m ³
circulatie	500	m ³ /uur/m ³
spreiding circulatie	40%	%
celtemperatuur	20,0	°C

Resultaat

Ethyleengehalte in de cel	5%	5%
Ethyleengehalte gemiddeld in de kist	84	ppb
gemiddelde overschreiding schadedrempel	100	ppb
Meest beluchte kist met 700 m ³ /uur	0%	0%
minst beluchte kist met 300 m ³ /uur	96	ppb
	111	ppb
CO₂ in de cel	445	ppm
CO ₂ tussen de bollen	457	ppm
overschreiding schadedrempel	-94%	

H₂O door ademhaling 4,8 ml/uur + uitdroging 6,9 ml/uur, per m³ bollen

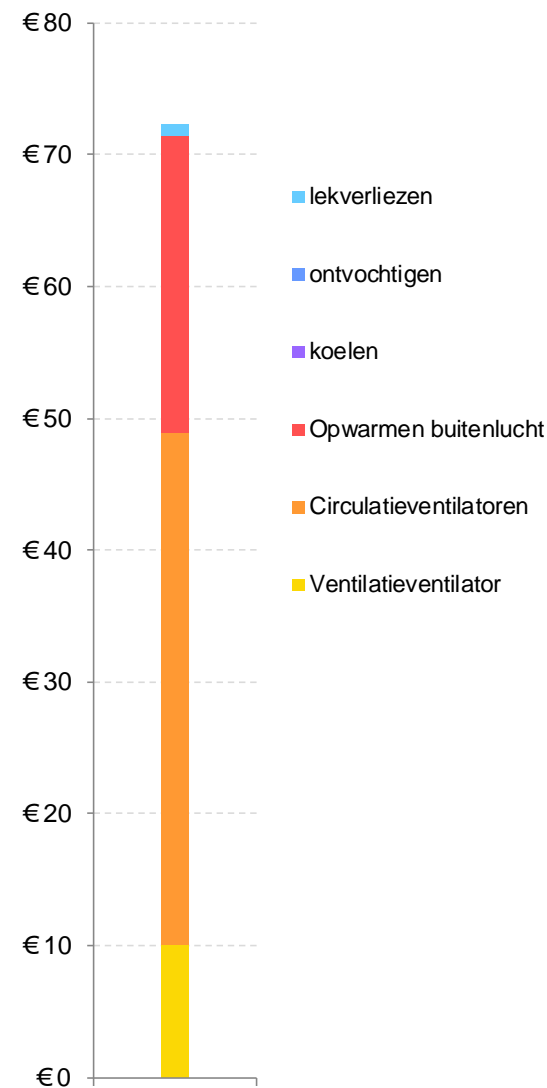
RV cellucht	63,8%
RV tussen de bollen	63,9%
overschreiding schadedrempel	-15%
Meest beluchte kist met 700 m ³ /uur	63,9%
minst beluchte kist met 300 m ³ /uur	64,0%

Opwarming door ademhaling

Temperatuur gemiddelde kist	20,17	°C
ΔT meest beluchte kist met 700 m ³ /uur	0,12	°C
ΔT minst beluchte kist met 300 m ³ /uur	0,29	°C
verschil	0,16	°C
overschreiding schadedrempel	-67%	

Energieverbruik

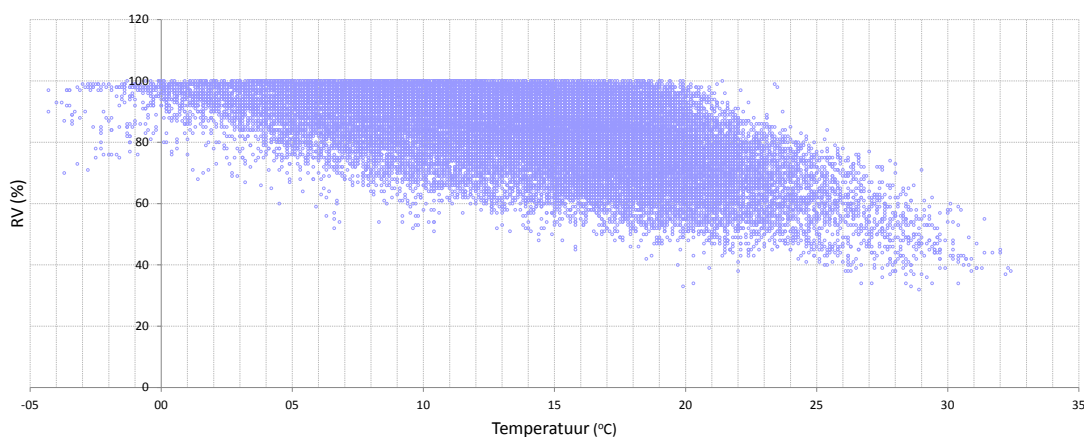
bespaard:	0%
totale kosten €/dag/cel	€72,27
Ventilatieventilator	€10,08
Circulatieventilatoren	€38,88
Opwarmen buitenlucht	€22,48
koelen	€0,00
ontvochtigen	€0,00
lekverliezen	€0,83



3 Resultaten

3.1 Analyse klimaatgegevens KNMI

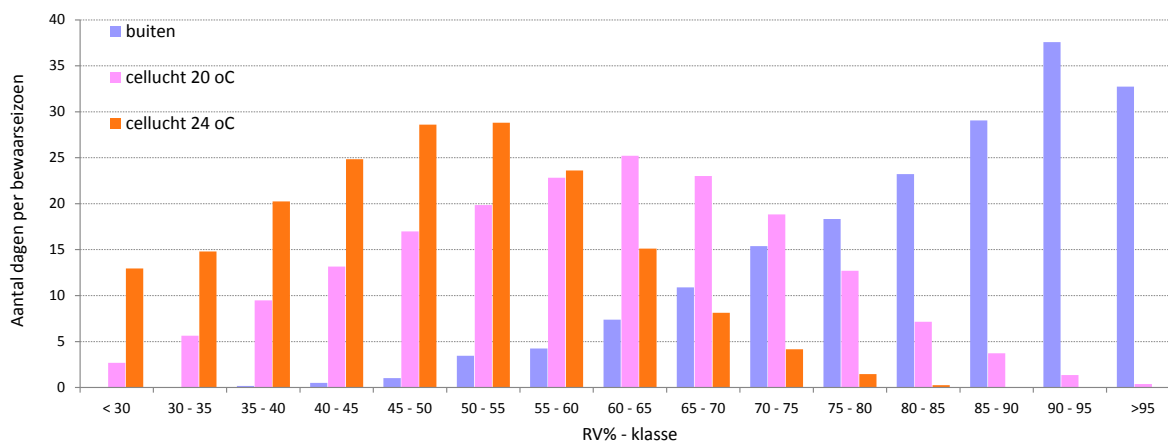
Via <http://www.knmi.nl/klimatologie/uurgegevens/#no> van het KNMI zijn de uurgegevens van temperatuur en RV in de bewaarperiode juni t/m november voor de jaren 2001 t/m 2010 binnengehaald en tegen elkaar uitgezet, figuur 1. De figuur laat zien dat onder de 20 °C een RV van 100% regelmatig voorkomt, boven de 20 °C vrijwel nooit. De maximale RV neemt van 20 °C naar 30 °C af van 100% naar 60%, de minimale RV is in dat traject rond de 40%. Van 20 °C naar 0 °C neemt de minimale RV toe van 40% tot ongeveer 80%. De gemiddelde RV is over de gehele periode 84,3%.



Figuur 1: Temperatuur x RV-combinaties KNMI Berkhout, 2001 t/m 2010, juni t/m november

Tulpenplantgoed wordt na de oogst (juni/juli) meestal de eerste 4 – 6 weken op 25 °C bewaard en vervolgens tot planten (oktober/november) op 20 °C. Leverbare bollen worden op 20 °C bewaard, daarna afhankelijk van het broeischema op 7°C en lager. Hyacinten worden eerst op 30 °C, daarna op 25 en vervolgens op 20 – 17 °C bewaard. Krokus op 23 – 20 -17°C en b.v. Muscari op 23 – 20 °C. Elk gewas en cultivar heeft zijn optimale bewaartemperatuur in relatie tot plantdatum en/of broeiperiode.

In figuur 2 is voor een bewaarperiode van 1 juni t/m 30 november (183 dagen) het aantal dagen uitgezet dat de RV een bepaalde waarde heeft. Hierin is te zien dat de RV in de buitenlucht bijv. 99 dagen > 85% is. Bij het bewaren op 20 °C van tulpenbollen in rust, dwz. met een normale ademhaling, en ventilatie van 100 m³/uur per m³ bollen komt de RV in de cel maar 5 dagen boven de 85%. Bij bewaren op 24 °C komt de RV in de cel vrijwel nooit boven de 85%. Gaat de ademhaling echter flink omhoog door b.v. stress na het pellen (na 1 september komt dit vrijwel nooit meer voor) en wordt er niet met 100 m³/uur per m³ bollen geventileerd maar met 20 m³/uur, dan komt de RV vaker boven de 85%. Ontvochtigen kan dan mogelijk teveel kosten meebrengen. De temperatuur dan tot b.v. 23 °C laten oplopen leidt tot een totaal van slechts 2 dagen met een RV boven de 85%.



Figuur 2: Frequenties RV%-klassen buitenlucht en cellucht, zonder ontvochtigen.

3.2 Energieverbruik Bewaarscenario's

3.2.1 Start-scenario

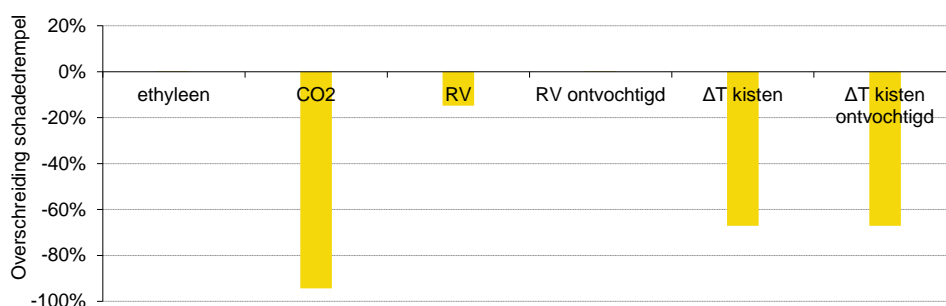
Als "start-scenario" staat het rekenmodel ingesteld op scenario 1, zie pagina 8. Hierbij is het percentage zure bollen 5% en één zure bol produceert 0.14 ml ethyleen/dag. De bollen zijn in rust en bij 20 °C komt bij de ademhaling dan 10 ml CO₂/uur per kg bollen vrij (6 liter/uur per m³ bollen). Hierbij komt ook 4,83 ml water en 126 kJoules warmte vrij. Ook wordt er water uit de bol verdampt bij het nadrogen of het uitdrogen. Dit kan tijdens de gehele bewaarperiode 5 – 10% van het begingewicht zijn. In scenario 1 is de buitentemperatuur 15 °C en de RV is 85% (ongeveer de gemiddelde waarden tijdens de bewaarperiode van 1 juli tot 1 november).

De ventilatie is ingesteld op 100 m³/uur en de circulatie op 500 m³/uur. De spreiding in de circulatie als gevolg van ongelijkmatige luchtverdeling over de kuubskisten is 40%, zodat de minst beluchte kist 300 m³/uur krijgt en de meest beluchte kist 700 m³/uur.

De celtemperatuur is 20 °C en de gewenste RV ≤ 75%.

Als schadedrempels staan ingesteld: 100 ppb voor ethyleen, 8000 ppm voor CO₂, RV 75% en het maximale temperatuurverschil tussen kisten ΔT = 0.5 °C.

Voor dit scenario is de mate van overschrijding van de schadedrempels geïllustreerd door figuur 3. Ethyleen is precies op 100 ppb, dus wordt de schadedrempel niet overschreden. CO₂ is ver onder de schadedrempel en daarmee is de overschreiding dus negatief: -94%. Ook de andere parameter liggen onder de schadedrempel.



Figuur 3: Overschreiding drempelwaarden

De RV blijft ruim onder de 75% en ook het maximale temperatuurverschil tussen kisten blijft ver onder de 0.5 °C. Het ethyleengehalte in de door circulatie minst beluchte kist komt uit op 111 ppb, in de meest beluchte kist op 96 ppb.

Bij een gasprijs van € 0.32 en een kWh-prijs van € 0.12 kost het bewaren van 324 m³ bollen bij dit scenario € 72 per dag, of € 27 per m³ bollen per seizoen (123 dagen). De kosten voor ventilatie komen op € 10 per dag voor elektra en € 22 per dag voor gas, de kosten voor circulatie komen op € 39 per dag voor elektra. Koelen en ontvochtigen is in dit scenario niet nodig.

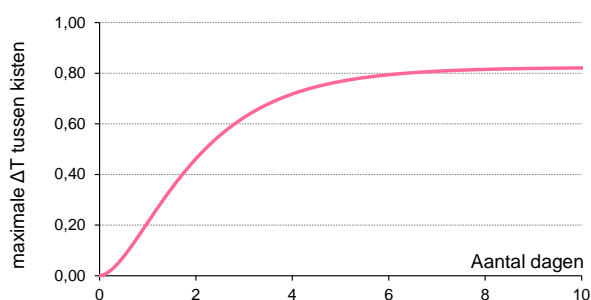
3.2.2 Scenario's met een laag percentage zuur en oplopende buitentemperaturen

Wanneer de circulatie van 500 m³/uur naar 400 m³/uur wordt teruggetoerd (scenario 2, tabel 1) neemt het ethyleengehalte tussen de bollen, zelfs bij een gemiddeld percentage zuur van 5%, maar weinig toe: van 100 ppb naar 104 ppb, tabel 1. Op de tulpenbollen heeft dit geen effect, maar de kosten worden verlaagd van € 72 naar € 59 (- 18%), tabel 1. In deze tabel zijn alleen de waarden van de parameters die in de reeks veranderen aangegeven. Waarden die constant blijven (in dit geval de buitentemperatuur en - RV, uitdroging, celtemperatuur, spreiding in de circulatie, energiekosten voor ontvochtigen en voor lekverliezen) zijn weggelaten. Omstandigheden en instellingen die van het ene scenario naar het volgende veranderen zijn vet gedrukt.

Tabel 1: Scenarioreeks waarbij er 1% zure bollen is.

	Eenheid	1	2	3	4	5	6	7
% zure bollen in de cel	%	5%	5%	1%	1%	1%	1%	1%
ventilatie	m ³ /uur	100	100	100	20	20	20	28
circulatie	m ³ /uur	500	400	400	400	100	165	165
ethyleengehalte gemiddeld in de kist	ppb	100	104	25	88	100	94	71
meest beluchte kist	ppb	96	99	24	87	96	91	69
minst beluchte kist	ppb	111	117	27	91	111	100	78
CO ₂ tussen de bollen	ppm	457	460	460	700	745	721	636
RV tussen bollen	%	64%	64%	64%	67%	67%	67%	66%
ΔT meest en minst beluchte kist	°C	0,16	0,21	0,21	0,21	0,82	0,50	0,50
Ventilatieventilator	€/dag	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1
Circulatieventilatoren	€/dag	38,9	19,9	19,9	19,9	0,3	1,4	1,4
Opwarmen buitenlucht	€/dag	22,5	28,6	28,6	0,0	0,0	0,0	0,1
warmte afvoer/koelen	€/dag	0,0	0,0	0,0	10,1	3,6	3,9	0,0
totaal	€/dag	72,3	59,4	59,4	40,9	14,8	16,2	12,4

Bij een lager percentage zure bollen hoort een andere ventilatienorm en ook een andere circulatienorm: bij ventileren met 100 m³/uur en circuleren met 500 m³/uur is met 1% zure bollen het ethyleengehalte tussen de bollen gemiddeld slechts 25 ppb, scenario 3. De ventilatie zou daarom terug kunnen naar 20 m³/uur per m³ bollen, scenario 4. Hiermee komt het ethyleengehalte tussen de bollen op 88 ppb zodat ook de circulatie terug kan: scenario 5 met een circulatiedebiet van 100 m³/uur. Dan komt het ethyleengehalte tussen de bollen weer op 100 ppb. De energiekosten dalen naar slechts € 15,- (-80% tov. scenario 1). Het temperatuurverschil tussen de minst en de meest beluchte kisten komt dan echter op 0.82 °C. Dit gebeurt niet binnen een paar uur, maar het duurt ongeveer 6 dagen voordat met deze instellingen het maximale temperatuurverschil bereikt wordt, figuur 4.

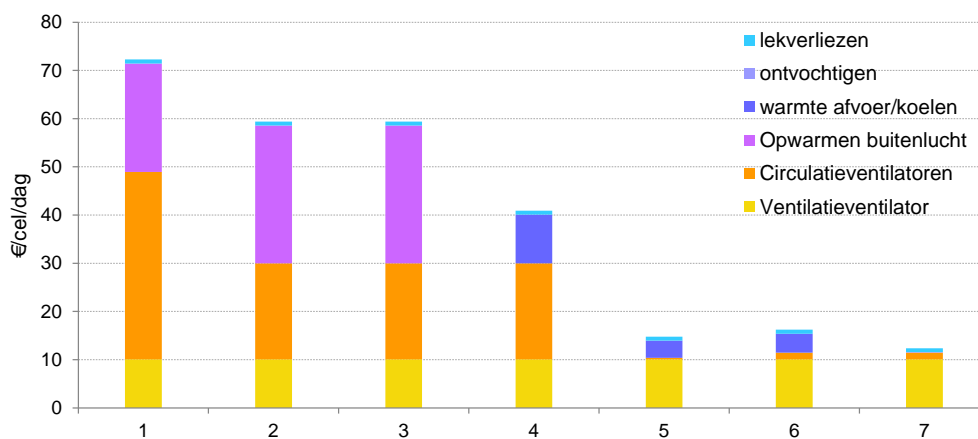


Figuur 4: Toename ΔT minst en meest beluchte kist

Om onder het maximale verschil van 0.5 °C te blijven moet de circulatie toch hoger ingesteld worden, scenario 6: 165 m³/uur. De energiekosten nemen dan iets toe tot € 16,-.

In scenario's 4, 5 en 6 is in de energiekosten ook een bedrag ingesloten om een klein warmteoverschot weg te koelen, tabel 1. Dit is warmte geproduceerd bij de ademhaling van de bollen *en* warmte die door de ventilatoren geproduceerd wordt. Omdat het buiten koeler is dan binnen kan vanwege de lagere kosten ook de ventilatie beter iets toenemen van 20 naar 28 m³/uur, scenario 7. Er is dan geen warmteoverschot en de energiekosten dalen naar € 12,-.

De energiekosten voor de scenario's 1 t/7 zijn samengevat in figuur 5.



Figuur 5: Energiekosten scenarioreeks

Loopt de buitentemperatuur nu op naar 17 °C (scenario 8), dan ontstaat weer een warmteoverschot en om dat weg te koelen lopen de kosten weer op naar € 18, tabel 2a. De ventilatie dan naar 48 m³/uur opvoeren (scenario 9) verlaagt de kosten weer tot € 12, omdat voor opwarming van de buitenlucht nauwelijks gas nodig is. De warmte voor opwarming van de buitenlucht wordt vooral door de ademhaling van de bollen en door de ventilatoren geleverd.

Tabel 2a: scenarioreeks 7 t/m 14, waarbij bij 1% zure bollen de temperatuur van de buitenlucht oploopt.

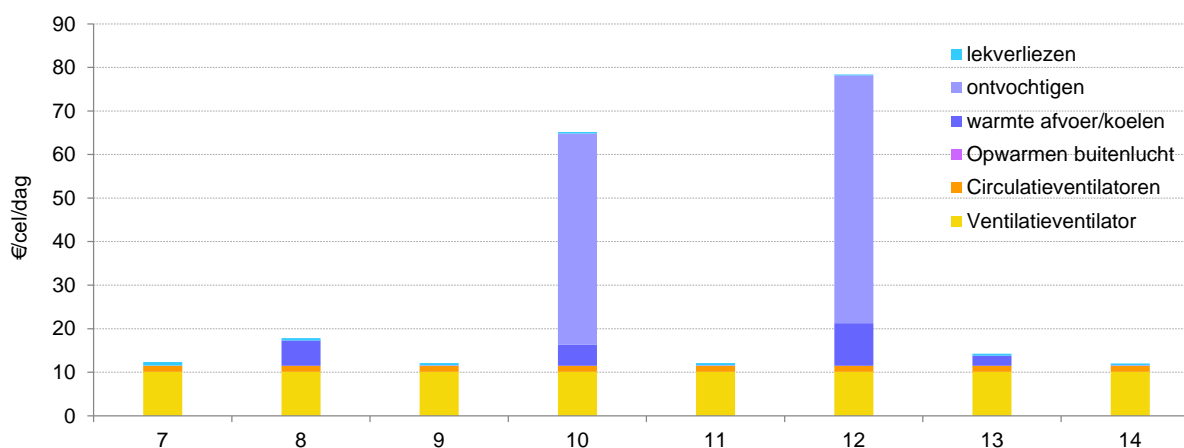
	Eenheid	7	8	9	10	11	12	13	14
buitentemperatuur	°C	15	17	17	18	18	20	20	20
ventilatie	m ³ /uur	28	28	48	48	48	48	48	58
circulatie	m ³ /uur	165	165	165	165	165	165	165	165
celtemperatuur	°C	20	20	20	20	21	21	22,5	22,5
ethyleengehalte gemiddeld in de kist	ppb	71	71	48	48	48	48	48	42
meest beluchte kist	ppb	69	69	45	45	45	45	45	39
minst beluchte kist	ppb	78	78	54	54	54	54	54	48
CO ₂ tussen de bollen	ppm	636	636	546	546	546	546	546	525
RV tussen bollen	%	66%	74%	73%	77%	73%	82%	75%	75%
ΔT meest en minst beluchte kist	°C	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Ventilatieventilator	€/dag	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1
Circulatieventilatoren	€/dag	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Opwarmen buitenlucht	€/dag	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1
warmte afvoer/koelen	€/dag	0,0	5,9	0,0	4,8	0,0	9,8	2,4	0,0
ontvochtigen	€/dag	0,0	0,0	0,0	48,5	0,0	57,0	0,0	0,0
lekverliezen	€/dag	0,8	0,5	0,5	0,3	0,5	0,2	0,4	0,4
totaal	€/dag	12,4	17,8	12,1	65,2	12,1	78,4	14,3	12,0

Loopt de temperatuur buiten op tot 18 °C (scenario 10), dan moet er weer warmte worden afgevoerd *en* de RV in de cel komt nu boven de 75%. Om de RV onder de 75% te houden zou dan actief ontvochtigd moeten worden: koelen om door condensatie water af te voeren en vervolgens weer opwarmen om weer op 20 °C

te komen. De energiekosten hiervoor zijn erg hoog: € 49 per dag, waardoor de totale bewaarkosten oplopen tot € 65 per dag per cel. Het is dan beter om de temperatuur in de cel tot 21 °C op te laten lopen, scenario 11: de energiekosten blijven dan op € 12 en de RV onder de 75%.

De energiekosten voor ontvochtigen zouden aanzienlijk lager kunnen zijn indien de COP (Coefficient of Performance) hoger zou zijn. De COP geeft aan hoeveel Joules met de koelmachine als warmte aan de bewaarcel onttrokken kunnen met 1 Joule elektra. Als de COP = 5 i.p.v. de in het model standaard ingestelde COP = 3 is er dus minder elektra voor koelen nodig. Wanneer de warmte die vrijkomt bij koelen om te ontvochtigen daarnaast benut kan worden voor het weer opwarmen van de ontvochtigde lucht tot celtemperatuur, dan zouden de kosten nog verder omlaag kunnen: De energiekosten voor scenario 10 zouden dan uitkomen op € 32 voor ontvochtigen, € 47 totale energiekosten per dag (in plaats van € 65).

Loopt de buitentemperatuur nog verder op naar 20 °C, scenario 12, dan zal men om ontvochtigen te vermijden de celtemperatuur nog iets verder op moeten laten lopen tot 22,5 °C, scenario 13, en om ook koelen te voorkomen zal de ventilatie naar 58 m³/uur opgevoerd moeten worden, scenario 14. De veranderingen in energiekosten zijn voor deze scenarioreeks samengevat in figuur 6a.

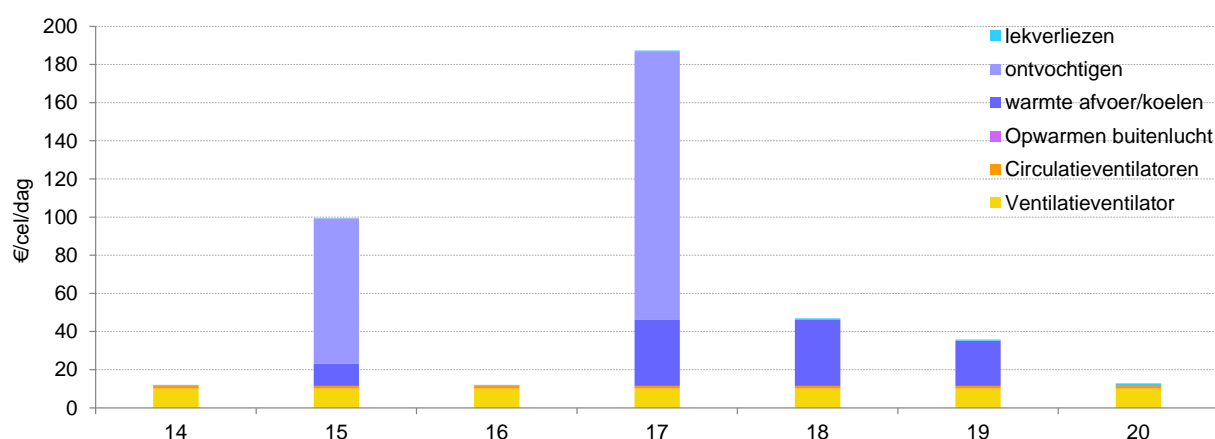


Figuur 6a: Energiekosten scenarioreeks oplopende buitentemperatuur.

Bij buitentemperaturen die oplopen tot ver boven de gewenste celtemperatuur ontstaat de volgende scenarioreeks, tabel 2b:

	Eenheid	14	15	16	17	18	19	20
buitentemperatuur	°C	20	22	22	28	28	28	28
buiten RV	%	85%	85%	85%	85%	60%	60%	60%
ventilatie	m ³ /uur	58	58	58	58	58	26	26
circulatie	m ³ /uur	165	165	165	165	165	165	165
celtemperatuur	°C	22,5	22,5	24,5	24,5	24,5	24,5	33,5
ethyleengehalte gemiddeld in de kist	ppb	42	42	42	42	42	76	76
meest beluchte kist	ppb	39	39	39	39	39	73	73
minst beluchte kist	ppb	48	48	48	48	48	82	82
CO ₂ tussen de bollen	ppm	525	525	525	525	525	652	652
RV tussen bollen	%	75%	84%	75%	100%	74%	75%	46%
ΔT meest en minst beluchte kist	°C	0,50	0,50	0,50	0,63	0,50	0,50	0,50
Ventilatieventilator	€/dag	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1
Circulatieventilatoren	€/dag	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Opwarmen buitenlucht	€/dag	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
warmte afvoer/koelen	€/dag	0,0	11,7	0,0	34,9	34,9	23,8	0,0
ontvochtigen	€/dag	0,0	76,1	0,0	140,3	0,0	0,0	0,0
lekverliezen	€/dag	0,4	0,1	0,4	0,6	0,6	0,6	0,9
totaal	€/dag	12,0	99,4	12,0	187,3	47,0	35,8	12,4

Neemt de temperatuur van de buitenlucht toe tot 22 °C, scenario 15, dan moet er weer gekoeld *en* ontvochtigd worden. De hoge kosten hiervoor zijn te vermijden door de celtemperatuur op te laten lopen tot 24,5 °C, scenario 16. Loopt de buitentemperatuur op tot 28 °C dan moet er fors gekoeld en ontvochtigd worden, scenario 17. Dit scenario is echter niet realistisch: als het buiten 28 °C is, is de RV nooit $\geq 85\%$, maar meestal $\leq 60\%$ (zie figuur 1), scenario 18. Er hoeft dan niet ontvochtigd te worden, maar wel gekoeld. Door minder te ventileren (26 ipv. 58 m³/uur) kan hierop bespaard worden, terwijl het ethyleengehalte toch fors onder de schadedrempel blijft, scenario 19. De kosten komen dan op € 36. Voor wat betreft het ethyleengehalte zou de ventilatie nog verder verminderd kunnen worden tot 19 m³/uur, maar dan wordt waterdamp onvoldoende afgevoerd en loopt de RV in de cel op tot boven de 75%. Om de kosten tot € 12 terug te brengen zou men de temperatuur in de cel moeten laten oplopen tot 33,5 °C!



Figuur 6b: Energiekosten scenarioreeks waarbij de buitentemperatuur nog verder oploopt.

3.2.3 Scenario's waarbij de ademhaling oploopt

Een andere scenarioreeks is die waarbij de ademhaling sterk oploopt door stress, bijvoorbeeld net na het pellen. Ook in deze reeks is het percentage zuur 1%, buiten is de temperatuur 15 °C en de RV 85%, in de cel is de gewenste RV < 75%. Het percentage uitdroging is 1% en de spreiding in de circulatie is 40%. De reeks begint met scenario 7 uit de vorige reeks, waarbij de ventilatie 28 m³/uur is en de circulatie 165 m³/uur.

Wanneer nu de ademhaling verdubbelt, en daarmee ook de warmteproductie van de bollen, neemt het verschil in temperatuur tussen de minst beluchte kist en de meest beluchte kist toe van 0,5 °C naar 1,08 °C, zie tabel 3, scenario 21.

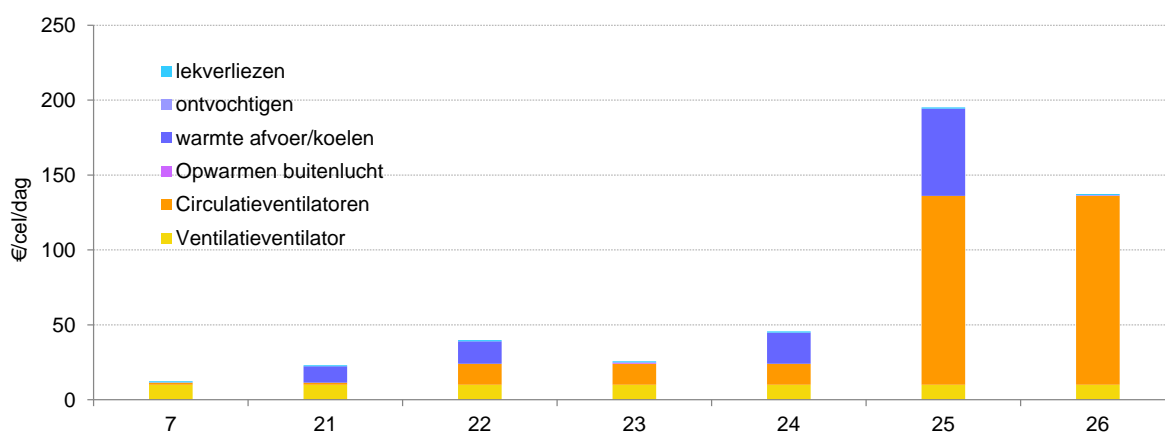
Tabel 3: Scenarioreeks waarbij de ademhaling oploopt.

	Eenheid	7	21	22	23	24	25	26
ademhaling	ml CO ₂ /uur/kg	10	20	20	20	40	40	40
ventilatie	m ³ /uur	28	28	28	60	60	60	178
circulatie	m ³ /uur	165	165	355	355	355	740	740
ethyleengehalte gemiddeld in de kist	ppb	71	71	66	36	36	34	16
meest beluchte kist	ppb	69	69	65	35	35	33	15
minst beluchte kist	ppb	78	78	69	39	39	35	17
CO ₂ tussen de bollen	ppm	636	886	847	619	853	817	552
RV tussen bollen	%	66%	67%	67%	65%	66%	66%	64%
ΔT meest en minst beluchte kist	°C	0,50	1,08	0,50	0,50	1,04	0,50	0,50
Ventilatieventilator	€/dag	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1
Circulatieventilatoren	€/dag	1,4	1,4	13,9	13,9	13,9	126,0	126,0
Opwarmen buitenlucht	€/dag	0,1	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,4
warmte afvoer/koelen	€/dag	0,0	10,8	15,0	0,0	20,9	58,3	0,0
ontvochtigen	€/dag	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
lekverliezen	€/dag	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
totaal	€/dag	12,4	23,1	39,8	25,7	45,7	195,2	137,3

De energiekosten nemen hierbij toe van € 12 tot € 23, omdat bij deze instellingen warmte actief afgevoerd moet worden. Om het temperatuurverschil tussen kisten terug te brengen naar $\leq 0,5$ °C dient de circulatie opgevoerd te worden naar 355 m³/uur, scenario 22. Het warmteoverschot neemt daardoor echter nog verder toe (door warmteproductie van de ventilatoren), zodat nog meer gekoeld moet worden waardoor de energiekosten tot € 40 oplopen. Omdat het buiten koeler is dan binnen kan door het opvoeren van de ventilatie van 28 naar 60 m³/uur koelen vermeden worden en nemen de kosten af tot € 26, scenario 23.

Neemt de ademhaling verder toe naar 40 ml/uur/kg, scenario 24, dan zou de circulatie tot 740 m³/uur moeten toenemen om te voorkomen dat het temperatuurverschil tussen kisten boven de 0.5 °C komt, scenario 25. De energiekosten hiervoor zijn zeer hoog, € 195 per dag per cel, maar kunnen naar beneden door nog meer te ventileren: 178 m³/uur. De kosten dalen dan naar € 137. Deze ventilatiehoeveelheid, en in mindere mate ook de circulatiehoeveelheid, is zo hoog dat de meeste bedrijven dit niet kunnen realiseren. Het komt natuurlijk ook (bijna) nooit voor dat alle 324 m³ bollen net gepeld zijn en zoveel warmte produceren.

Het verloop aan energiekosten in deze scenarioreeks is samengevat in figuur 5.



Figuur 7: Energiekosten scenarioreeks waarbij de ademhaling oploopt.

Een (betere) variant op de vorige scenarioreeks is die waarbij door aanpassingen in de systeemwand de spreiding in de circulatie verminderd wordt, tabel 4.

Tabel 4: Scenarioreeks waarbij de ademhaling oploopt en de luchtverdeling over de kisten verbeterd wordt (de spreiding verminderd).

	Eenheid	21	27	28	29	30	31	32	33	34	35
ademhaling	ml CO ₂ /uur/kg	20	20	20	40	40	40	50	50	50	50
ventilatie	m ³ /uur	28	28	50	50	50	94	94	94	117	100
circulatie	m ³ /uur	165	165	165	165	165	165	165	215	215	215
spreiding circulatie	%	40%	21%	21%	21%	11%	11%	11%	11%	11%	11%
celtemperatuur	°C	20	20	20	20	20	20	20	20	20	21
ethyleengehalte gemiddeld in de kist	ppb	71	71	46	46	46	31	31	29	26	28
meest beluchte kist	ppb	69	70	45	45	45	31	31	29	25	28
minst beluchte kist	ppb	78	74	49	49	47	33	33	30	27	29
CO ₂ tussen de bollen	ppm	886	886	698	1010	1010	786	886	844	781	825
RV tussen bollen	%	67%	67%	66%	67%	67%	66%	66%	66%	65%	63%
ΔT meest en minst beluchte kist	°C	1,08	0,50	0,50	1,03	0,50	0,50	0,66	0,50	0,50	0,50
Ventilatieventilator	€/dag	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1
Circulatieventilatoren	€/dag	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	3,1	3,1	3,1
Opwarmen buitenlucht	€/dag	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0
warmte afvoer/koelen	€/dag	10,8	10,8	0,0	21,7	21,7	0,0	10,7	11,3	0,0	0,0
ontvochtigen	€/dag	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
lekverliezen	€/dag	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,0
totaal	€/dag	23,1	23,1	12,4	34,0	34,0	12,5	23,0	25,3	14,2	14,1

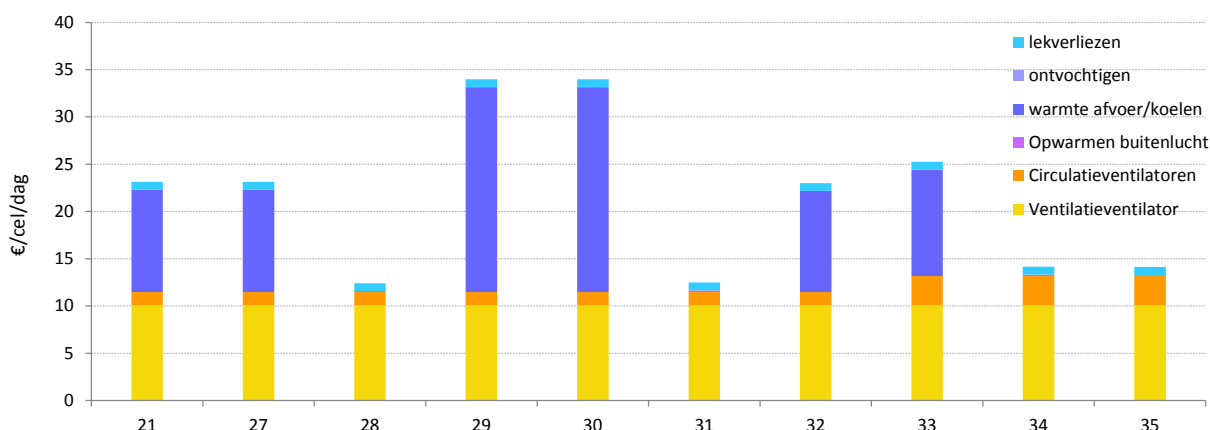
Door de spreiding te verminderen van 40% naar 21%, scenario 27, wordt het temperatuurverschil tussen de minst en de meest beluchte kist teruggebracht van 1,08 °C tot ≤ 0,5 °C. Door vervolgens de ventilatie op te voeren tot 50 m³/uur, scenario 28, hoeft niet meer gekoeld te worden en dalen de energiekosten naar € 12. Vergeleken met scenario 23 (€ 26) is dat een kostenbesparing van € 14.

Loopt de ademhaling op naar 40 ml CO₂/uur/kg, scenario 29, dan loopt het temperatuurverschil tussen de minst en de meest beluchte kist op tot 1,03 °C en treedt er weer een warmteoverschot op. Door de spreiding nog verder te verlagen tot 11%, scenario 30, blijft het temperatuurverschil tussen de minst en de meest beluchte kist weer ≤ 0,5 °C en door de ventilatie nog verder op te voeren naar 94 m³/uur hoeft niet meer gekoeld te worden om de cel op 20°C te houden. De kosten dalen dan tot € 13, veel lager dan scenario 26 dat onder dezelfde omstandigheden € 137 kost.

Loopt de ademhaling op tot 50 ml CO₂/uur/kg, scenario 31, dan komt het temperatuurverschil tussen de minst en de meest beluchte kist boven 0,5 °C. Een verdere verbetering van de luchtverdeling over de kisten (een daling van de spreiding onder de 10%) is niet realistisch en dus moet door opvoeren van de circulatie naar 215 m³/uur het temperatuurverschil tussen de minst en de meest beluchte kist teruggebracht worden, scenario 32. Door de ventilatie naar 117 m³/uur op te voeren wordt koelen voorkomen en dalen de energiekosten naar € 14, scenario 34.

Is méér ventileren dan 100 m³/uur niet mogelijk, dan kunnen de energiekosten ook verlaagd worden door de celtemperatuur met één graad tot 21 °C op te laten lopen.

De energiekosten voor deze scenarioreeks zijn samengevat in figuur 8.



Figuur 8 : Energiekosten scenarioreeks met hoge ademhaling waarbij de luchtverdeling wordt verbeterd

3.2.4 Overige scenarioreeksen

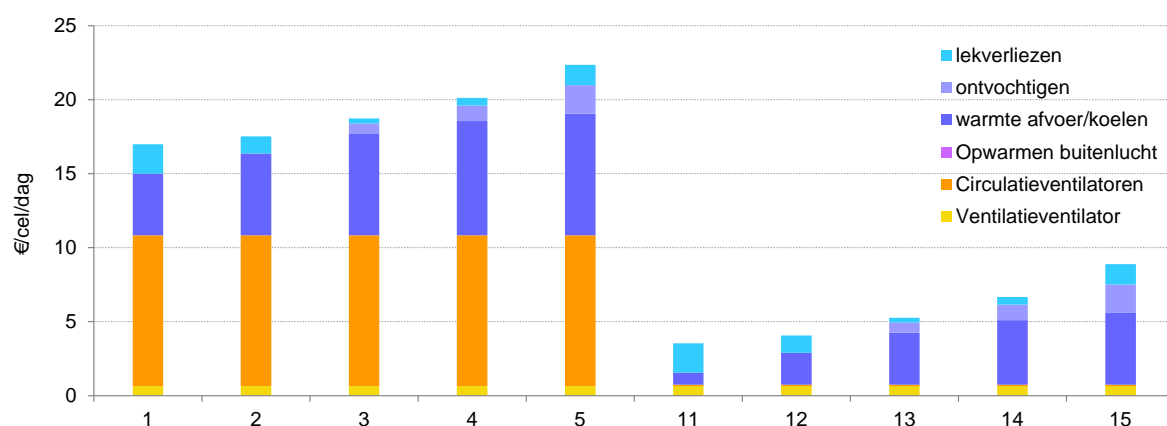
Met het rekenmodel kunnen ook scenario's voor andere gewassen dan tulp, in andere omstandigheden en bij andere instellingen berekend worden. Voor het percentage zure bollen dient dan 0 (nul) ingevuld te worden en als de bewaartemperatuur op bv. 5 °C ligt dan dient voor de ademhaling een waarde van 1 – 3 ml CO₂/uur/kg ingevuld te worden. Mogelijk worden andere schadedrempels gehanteerd bij de koele bewaring, zoals 600 ppb ethyleen (bij tulp), of een maximaal temperatuurverschil tussen de minst en de meest beluchte kist van 0,1 °C ipv. 0,5 °C.

Een mogelijke scenarioreeks voor de bewaring van lelie is samengevat in tabel 5 en figuur 9. Hierbij wordt de celtemperatuur op 2 °C gehouden, is de ademhaling 3,5 ml/uur/kg, vindt géén uitdroging plaats en is de ventilatie 1 m³/uur per kuub bollen. De luchtvochtigheid in de cel wordt onder de 85% gehouden. Het maximale temperatuurverschil tussen de minst beluchte kist en de meest beluchte kist is op 0,1 °C gesteld. De reeks begint met een buitentemperatuur van -10 °C en loopt in stappen van 5° tot +10 °C. De spreiding in circulatievoud is 40%. Vervolgens wordt de reeks herhaald, maar nu met een verbeterde luchtverdeling (een spreiding van 10%).

Tabel 5: scenarioreeks 2 °C-bewaring leliebollen bij oplopende buitentemperatuur, zonder en met verbeterde luchtverdeling.

	Eenheid	zonder verbeterde luchtverdeling					met verbeterde luchtverdeling				
		1	2	3	4	5	11	12	13	14	15
buitentemperatuur	°C	-10	-5	0	5	10	-10	-5	0	5	10
buiten RV	%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%
circulatie	m ³ /uur	320	320	320	320	320	68	68	68	68	68
spreiding circulatie	%	40%	40%	40%	40%	40%	10%	10%	10%	10%	10%
CO ₂ tussen de bollen	ppm	2492	2492	2492	2492	2492	2516	2516	2516	2516	2516
RV tussen bollen	%	66%	82%	100%	100%	100%	67%	83%	100%	100%	100%
ΔT meest en minst beluchte kist	°C	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11
Ventilatieventilator	€/dag	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Circulatieventilatoren	€/dag	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Opwarmen buitenlucht	€/dag	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
warmte afvoer/koelen	€/dag	4,2	5,5	6,9	7,7	8,2	0,8	2,2	3,5	4,4	4,9
ontvochtigen	€/dag	0,0	0,0	0,7	1,0	1,9	0,0	0,0	0,7	1,0	1,9
lekverliezen	€/dag	2,0	1,2	0,3	0,5	1,4	2,0	1,2	0,3	0,5	1,4
totaal	€/dag	17,0	17,5	18,7	20,1	22,3	3,5	4,1	5,3	6,7	8,9

De reeksen laten zien dat onder deze omstandigheden bij hogere buitentemperatuur de energiekosten steeds hoger worden. Naarmate de buitentemperatuur meer afwijkt van de celtemperatuur worden de lekverliezen hoger. Door het verbeteren van de luchtverdeling hoeft veel minder gecirculeerd te worden om het maximale temperatuurverschil tussen kisten onder de 0,1 °C te houden. Daardoor zijn de energiekosten voor circulatie veel lager, en omdat de warmte van de circulatieventilatoren niet weggekoeld hoeft te worden, zijn de energiekosten voor koeling ook lager.



Figuur 9: Energiekosten scenarioreeks leliebewing zonder en met verbeterde luchtverdeling

4 Conclusies

Met het rekenmodel wordt op basis van omstandigheden en van instellingen het bewaarklimaat berekend. De omstandigheden in de bewaarcel betreffen het percentage zure bollen, de ademhaling en de uitdrogingsnelheid. De omstandigheden buiten: de temperatuur en RV. De instellingen betreffen de ventilatie- en de circulatiehoeveelheid, de spreiding hierin en de bewaartemperatuur. Het bewaarklimaat wordt gekarakteriseerd door het ethyleengehalte, het CO₂-gehalte, de RV en de temperatuur. Deze parameters worden berekend op verschillende niveaus: gemiddeld in de cellucht, gemiddeld tussen de bollen en gemiddeld in de meest en in de minst beluchte kuubskist.

Door eerst de omstandigheden te definiëren en vervolgens de instellingen, kan de gebruiker zien in welk bewaarklimaat dit resulteert. Door dit resultaat met de schadedrempels te vergelijken kan worden besloten iets aan de instellingen te veranderen om een beter resultaat te krijgen. Op deze wijze wordt een reeks scenario's doorgerekend waarbij gezocht kan worden naar het voor de productkwaliteit meest gunstige bewaarklimaat. Het model rekent ook de energiekosten uit zodat ook gezocht kan worden naar de goedkoopste instellingen om het voor de productkwaliteit meest gunstige bewaarklimaat te realiseren.

Het model laat o.a. zien dat als het percentage zure bollen laag is (1%), en de ventilatie uitsluitend op ethyleen gestuurd wordt, er dan in veel gevallen onvoldoende warmte wordt afgevoerd. Er moet dan gekoeld worden. Iets meer ventileren is dan een goedkopere oplossing.

Als ook de circulatie uitsluitend op ethyleen gestuurd wordt dan blijft het ethyleengehalte tussen de bollen weliswaar onder de schadedrempel, maar dan loopt het temperatuurverschil tussen de minst en de meest beluchte kist teveel op. Het verbeteren van de luchtverdeling over de kisten is dan een veel goedkopere oplossing dan weer extra gaan circuleren.

Als de weersomstandigheden (oplopende buitentemperatuur, hoge RV) er toe leiden dat de RV in de cel te hoog wordt, dan is het tijdelijk laten oplopen van de celtemperatuur een veel goedkopere oplossing om de RV te verlagen dan het ontvochtigen.

Het model laat ook zien dat bij een laag percentage zure bollen, maar een hoge ademhaling en/of bij nadrogen in sommige gevallen maximaal geventileerd moet worden om al het water af te voeren. Ook dit is veel goedkoper dan actief ontvochtigen.

In geen enkel scenario kwam het CO₂-gehalte ook maar in de buurt van de hier gehanteerde schadedrempel van 8000 ppm.

Op bedrijven zonder sensoren voor ethyleen, CO₂, temperatuur en RV kan het (tijdelijk) oplopen van ethyleen, of van het temperatuurverschil tussen de minst en de meest beluchte kist, buiten de waarneming vallen. Ook het tijdelijk oplopen van de ademhaling en daarmee de warmteproductie en de RV valt buiten de waarneming. Ventileren en circuleren volgens normen die van een worst case scenario uitgaan is dan de enige optie om ongunstig bewaarklimaat te voorkomen. Het energieverbruik is hierbij erg hoog.

Mèt sensoren kan het bewaarklimaat continue worden gevolgd en, zoals gedemonstreerd door het rekenmodel, geoptimaliseerd worden waarbij een ongunstig bewaarklimaat vermeden wordt en de energiekosten zo laag mogelijk gehouden worden. Dit optimalisatieproces wordt voor een groot deel geautomatiseerd door de klimaatcomputer.

