

Deskstudy koeling met minimaal energieverbruik bij bewaring van bloembollenplantgoed

Gerard Bot & Jeroen Wildschut





Deskstudy koeling met minimaal energiegebruik bij bewaring van bloembollenplantgoed

Gerard Bot¹ & Jeroen Wildschut²

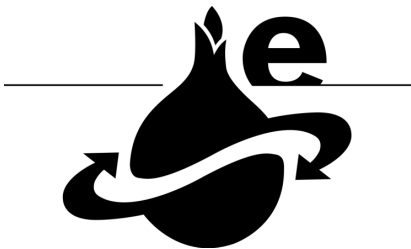
¹ Wageningen UR Glastuinbouw, Wageningen

² PPO Bloembollen en Bomen, Lisse

© 2008 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

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 Wageningen UR Glastuinbouw

Dit project is uitgevoerd in opdracht van en gefinancierd door de partijen in de Meerjarenaafpraak energie Bloembollen (KAVB, PT, LNV, SenterNovem en telers) onder projectnr. 6343-06-06-06-003



Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Bornsesteeg 65, 6708 PD Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 47 70 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	pagina
1 Inleiding	1
2 Referentie bewaarcel	3
3 Energiebalans bewaarcel	5
3.1 Algemene energiebalans	5
3.2 Warmteproductie bollen	9
3.3 Grootte-orde termen in de energiebalans	9
4 Resultaten modelberekeningen referentiebewaarcel tulpenplantgoed	11
4.1 Uitgangspunten tulpenbewaring	11
4.2 Berekeningen uitgangssituatie	12
4.3 Energiebesparende maatregelen	13
4.3.1 Vermindering van het ventilatiedebiet	13
4.3.2 Warmteterugwinning uit de ventilatielucht	16
4.3.3 Ventilator motoren buiten de cel	17
4.3.4 Buffering van koude of warmte	18
4.3.5 Toepassing van koud grondwater	19
4.3.6 Tulpenbewaring bij ander setpointregime	20
4.3.7 Bewaring lelie	21
5 Conclusies	23

1 Inleiding

In Nederland wordt een areaal van 10.500 ha. tulpen geteeld. Per jaar levert dit een productie op van ongeveer 525.000 m³ bollen, ruwweg 50%, dus 260.000 m³ kleine bolmaten (plantgoed) en 50% grote bolmaten (leverbaar). Het plantgoed wordt tussen de oogst en het opnieuw planten ongeveer 4 maanden bewaard, leverbaar gemiddeld 2 á 3 maanden voordat de bloeipreparatie bij lagere temperaturen gestart wordt. De temperatuur wordt tijdens de bewaring nauwkeurig geregeld. Plantgoed bij aflopende temperaturen van 25 °C naar 20 °C, gevolgd door enkele weken 17 °C voor het planten. Leverbare tulpenbollen in de regel bij een constante temperatuur van 20 °C. Tijdens de bewaring wordt met een hoog debiet geventileerd: 100 m³ lucht per m³ bollen per uur tot medio september, daarna met 60 m³ lucht per m³ bollen per uur. Daarnaast wordt met een nog hoger debiet lucht in de cel gerecirculeerd. Dit is nodig voor het afvoeren van ethyleengas dat door zure bollen (door de schimmel *Fusarium* aangetast) wordt geproduceerd. Ethyleen tast al bij zeer lage concentraties (vanaf 0.1 ppm) de gezonde bollen aan. De effecten van ethyleen worden pas in het volgende groeiseizoen zichtbaar: plantgoed produceert teveel kleine dochterbollen en te weinig leverbare bollen (overmatige 'verklistering') en in leverbare bollen, die verkocht worden voor de bloemproductie, wordt de bloem vernietigd. Voor het afvoeren van dit schadelijke ethyleengas is dus die hoge ventilatie nodig. Omdat alle lucht die de cel ingeblazen wordt, eerst opgewarmd of afgekoeld moet worden tot precies 20 °C, kost dit ventileren zeer veel energie. In het tijdvak van 1996 tot 2006 is het aandeel van de energie in de tulpensector dat voor rekening komt van opwarming van ventilatielucht tijdens drogen en bewaren gestegen van 21 naar 28%.

Een ander belangrijk bolgewas waar bij de bewaring van pootgoed wordt gekoeld is lelie. Dit wordt bewaard van oktober tot en met half januari bij een temperatuur van 2 °C en daarna tot en met maart bij -1 °C. Daarbij is de RV zo hoog mogelijk en omdat de bewaarde leliebollen in plastic zijn ingepakt, geven deze geen waterdamp af. Voorts is lelie niet gevoelig voor ethyleen. Daarom wordt bij deze bewaring nauwelijks geventileerd.

Steeds meer bedrijven beschikken over koeling op de bewaarcellen om op warme dagen de ventilatielucht te koelen. De omvang van het elektriciteitsverbruik is onbekend, maar zeker is dat daardoor het totale energiegebruik voor ventilatie in de tulpenteelt hoger is dan de genoemde 21%.

De behoefte aan koeling bij de bewaring van plantgoed van bloembollen neemt toe door de huidige trend van steeds betere klimaatbeheersing. De daarbij toegepaste compressiekoeling van de toegevoerde buitenlucht en gerecirculeerde binnenlucht vraagt veel energie. Door andere, energiezuiniger manieren van koeling toe te passen en/of de koelsystemen aan te passen, kan het energieverbruik bij de bewaring worden verminderd of kan worden voorkomen dat dit toeneemt bij toenemende koelvraag. In deze deskstudie wordt nagegaan of energiebesparende maatregelen bij de bewaring van tulp haalbaar zijn.

2 Referentie bewaarcel

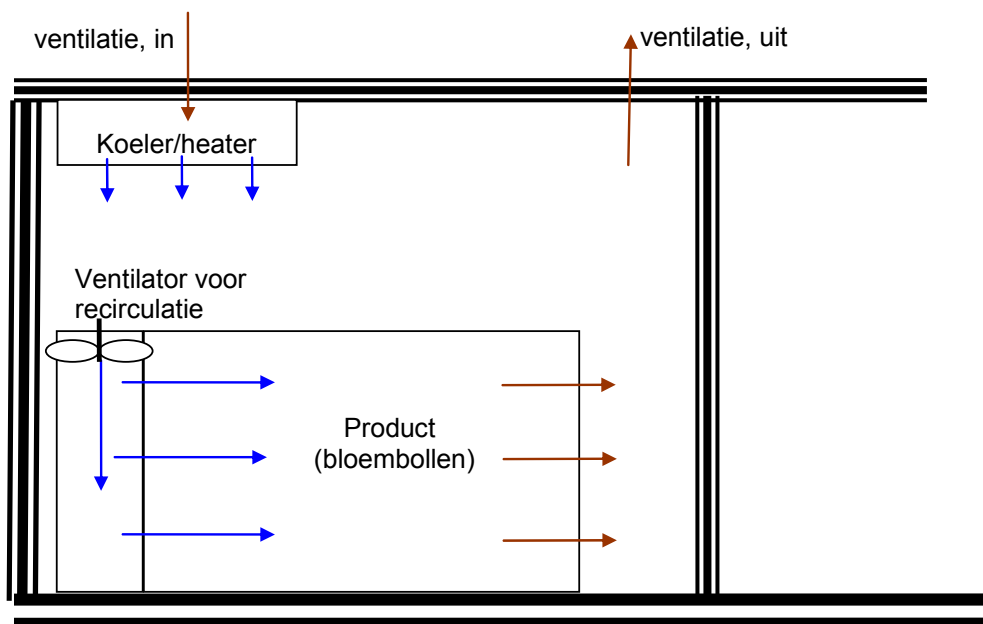
Plantgoed van tulpen wordt van roeien tot planten van juli tot en met oktober bewaard bij een temperatuur die afloopt van 25 naar 20 °C en een RV van 70-80%. Voor het verloop van het temperatuur setpoint worden enkele verschillende strategieën geadviseerd:

- Handhaaf ca. 4 tot 6 weken 25 °C, ga dan terug naar 20 °C en ga na 1 november (als dan door omstandigheden nog niet kon worden geplant) terug tot 17 °C.
- Houdt slecht verklisterende bollen op 30 °C of geef deze een ethyleenbehandeling.
- Houdt het plantgoed continue op een temperatuur van 20 °C.

In deze desk-study wordt gezocht naar energiebesparing tijdens het koelen. Daarom is voor het verloop van het setpoint gekozen voor de derde optie die de meeste koeling vraagt. Als hierbij energiebesparing tijdens koeling economisch haalbaar is dan is dit eenvoudig ook voor de andere opties te bepalen, als het niet haalbaar is dan is dit nog minder haalbaar bij de andere opties.

Omdat tulpenbollen ademen, dus waterdamp en warmte produceren, en omdat ze bij 20 °C ook ethyleen kunnen produceren moet de lucht in de koelcel worden verversd door ventilatie. Daarnaast wordt de lucht gerecirculeerd om lokale ophoping van ethyleen te voorkomen. De ventilatie wordt geadviseerd op een niveau van 100 m³ lucht per m³ bollen per uur tot half september en daarna op 60 m³ lucht per m³ bollen per uur. Dit is gebaseerd op 5% zuur zodat daarbij de schadedrempel van 100 ppb ethyleen niet wordt overschreden. Bij lagere percentages zuur hoeft minder te worden geventileerd. Door toepassing van een ethyleensensor kan de ventilatie zo worden geregeld dat onder de schadedrempel wordt gebleven met als resultaat dat de ventilatie kan worden beperkt.

Er zijn door de meer frequent voorkomende warme zomers, dus perioden waarin een bewaar temperatuur vereist is die lager is dan de heersende omgevingstemperatuur. Dit kan alleen in een koelcel worden gerealiseerd waarin een koeler warmte onttrekt aan de cel.



Figuur 2.1. Schematische weergave koel-bewaarcel met ventilatie en recirculatie.

Om de warmteonttrekking laag te houden zijn de wanden van de bewaar-/koelcel zwaar geïsoleerd, veelal buitenwanden met 12 cm Polyurethaan schuim (PU) en tussenwanden met 10 cm PU. Om bovendien de uitwisseling tussen de bloembollen en de cellult te verbeteren, ofwel lokale ophoping van vocht, warmte en ethyleen te voorkomen, wordt de lucht door de bollen geblazen. De recirculatie is op een niveau van 500 m³ lucht per m³ bollen per uur. Dit wordt in Figuur 2.1 schematisch weergegeven. Ventilatie is dus de luchtuitwisseling van de bewaarcel met de omgeving en recirculatie de luchtuitwisseling door de bollen.

De afmetingen van de voor bloembolbewaring gebruikte cellen is niet gestandaardiseerd. Cellen voor kuubkistbewaring zijn voorzien van voorzetwanden waarin de ventilatoren voor de recirculatie zijn aangebracht. Voor bewaring in

gaasbakken wordt de cel voorzien van plafondventilatoren om de recirculatie, ofwel de luchtbeweging tussen de bakken op peil te houden. In alle gevallen moet een koeler in staat zijn overtollige warmte af te voeren. Het ventilatie-debiet wordt geregeld met een instelbare klep, in modernere cellen met een frequentieregelaar op de ventilatoren. Om alternatieven voor de gebruikelijke koelmethode te analyseren is de uitgangssituatie voor wat betreft de te realiseren temperatuur- en vochttrajecten gekozen zoals deze bij het begin van deze paragraaf zijn beschreven.

In Tabel 2.1 zijn de celgegevens voor 22 tulpenbedrijven geïnventariseerd.

Tabel 2.1. Celgegevens voor 22 tulpenbedrijven.

Bedrijf	Aantal cellen	m ³ bollen/cel	m ³ /cel	Vulling	Aantal ventilatoren	Ventilatoren/cel
1	5	153	196	78%	21	4.2
2	4	66	246	27%	3	0.8
3	7	70	318	22%	13	1.9
4	8	212	768	28%	35	4.4
5	6	125	413	30%	12	2.0
6	6	80	296	27%	15	2.5
7	9	122	416	29%	6	0.7
8	8	141	499	28%	24	3.0
9	4	173	540	32%	16	4.0
10	8	121			31	3.9
11	6	56	300	19%	3	0.5
12	3	156	572	27%	6	2.0
13	4	102	402	25%	12	3.0
14	2	37	120	31%	4	2.0
15	2	219	925	24%	6	3.0
16	5	108	402	27%	12	2.4
17	4	97	306	32%	8	2.0
18	7	89	299	30%	16	2.3
19	10	123	415	30%	44	4.4
20	3	91	293	31%	7	2.3
21	6	110	495	22%	25	4.2
22	6	91	441	21%	24	4.0
Gemiddeld	6	115	412	28%	21	4.2

Het vermogen per ventilator varieert van 1.5-2.2 kW, dus gemiddeld 1.85 kW,

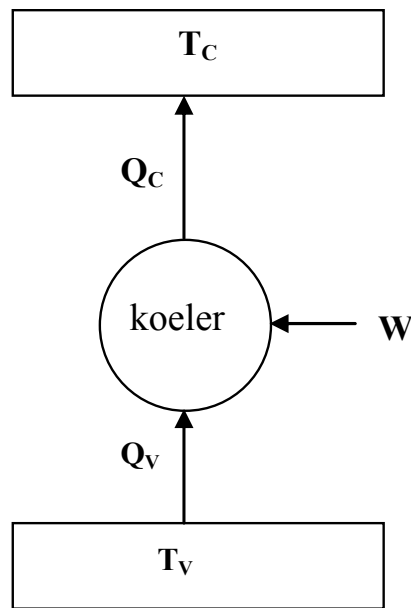
Veelal is wel de hoogte gelijk: in verband met de stapelhoogte is deze meestal 6 meter zodat een stapeling mogelijk is van 4 kuubskisten hoog. De diepte varieert veelal van 6 tot 8 kisten en de breedte veelal van 4 tot 6 rijen kisten. Omdat gezocht wordt naar de invloed van alternatieve koelmethode kan een referentiegel worden gekozen met gemiddelde afmetingen. Besparingen voor deze referentiegel zullen dan als richtinggevend voor andere cellen gelden.

Zoende worden als afmetingen voor de referentiegel gekozen: 7 m bij 10 m met een hoogte van 6 m en een vullingsgraad van 30% ofwel 126 m³ bollen. Het totale gewicht hiervan is 75.6 ton. Er zijn in de referentiegel voor ventilatie en recirculatie 4 ventilatoren gemonteerd van 1.85 kW, dus met een totaal vermogen van 7.4 kW. Dit is 57 W per m³ bol bij een ventilatie en recirculatie van respectievelijk 100 en 500 m³ lucht per m³ bol per uur. Bij een lager ventilatiedebiet zal het ventilatorvermogen uiteraard verminderen. Het is plausibel dan ook het recirculatievermogen te verminderen.

3 Energiebalans bewaarcel

3.1 Algemene energiebalans

Om de koelcel op een lagere temperatuur dan zijn omgeving te kunnen houden wordt er warmte aan onttrokken door een koelmachine. De meest toegepaste compressie koelmachine moet worden aangedreven, met andere woorden er moet arbeid op worden verricht. De aan de koelcel onttrokken warmte Q_V wordt bij de verdampers op de lage verdampertemperatuur T_V opgenomen, deze onttrokken warmte, plus de op de koelmachine verrichte arbeid W wordt bij de condensor op de hogere temperatuur T_C afgevoerd. Dit is in het geïdealiseerde schema van Figuur 3.1 weergegeven.



Figuur 3.1. Schema koelmachine met T_V en T_C respectievelijk de verdampers- en condensortemperatuur, Q_V en Q_C de onttrokken en afgestane warmte en W de verrichte arbeid.

Vanuit de energiebalans over het systeem kan gemakkelijk worden ingezien dat: de afgestane warmte gelijk is aan de opgenomen warmte plus de op de koelmachine verrichte arbeid:

$$Q_C = Q_V + W \quad 3.1$$

Het rendement van de koelmachine, in het algemeen COP (coefficient of performance) genoemd, wordt gedefinieerd als opgenomen warmte per eenheid verrichte arbeid:

$$\text{COP}_{\text{koel}} = Q_V / W \quad 3.2$$

Zodat in combinatie met vergelijking 3.1 de COP kan worden uitgedrukt in de opgenomen en afgestane warmte als:

$$\text{COP}_{\text{koel}} = Q_V / (Q_C - Q_V) \quad 3.3$$

De onttrokken en afgegeven warmtestromen hangen af van de thermodynamische kringloop die in de koelmachine wordt doorlopen. In de thermodynamica is de zgn. Carnotkringloop de theoretisch beste kringloop en hoewel deze in de praktijk niet is te realiseren geeft zij aan hoe het rendement afhangt van systeemvariabelen.

Voor een Carnot koelmachine is af te leiden dat vergelijking 3.3 kan worden omgezet in een uitdrukking met de verdampers- en condensortemperaturen als:

$$\text{COP}_{\text{koel, Carnot}} = T_V / (T_C - T_V) \quad 3.4$$

met de temperaturen T in Kelvin.

Hoewel praktische kringlopen rendementen van minder dan de helft hiervan realiseren gedragen zij zich analoog. Om dus de arbeid op de kringloop, dus op de koelmachine, laag te houden bij een gevraagde koeltemperatuur moet bij de door het proces vereiste koeltemperatuur het temperatuurverschil tussen condensor en verdampers zo klein mogelijk worden gehouden.

Veelal is het mogelijk (een deel van) de door de verdampers afgegeven warmte op het bedrijf te benutten. De koelmachine werkt dan ook als warmtepomp. Veelal wordt het rendement op de warme kant als COP_{WP} gedefinieerd. Het is gemakkelijk in te zien dat:

$$\begin{aligned} COP_{WP, Carnot} &= Q_C / (Q_C - Q_V) \\ &= T_C / (T_C - T_V) \\ &= COP_{koel, Carnot} + 1 \end{aligned} \quad 3.5$$

In de bollenbewaring worden koelmachines vrijwel altijd elektrisch aangedreven, aandrijving met een gasmotor kan aantrekkelijk zijn als de afvalwarmte van de gasmotor ook benut kan worden, dus als de warmtevraag zeer groot is en niet gedekt wordt door de verdamperswarmte, of als de warmtevraag bij een hogere temperatuur geleverd moet worden dan door de verdampers bij een redelijke COP kan worden geleverd.

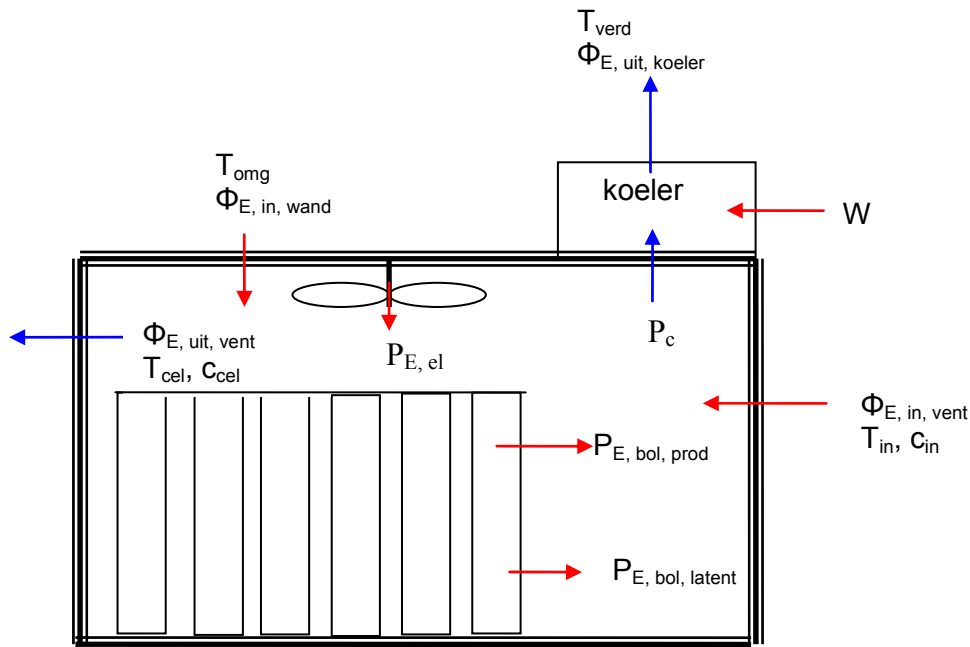
De koelmachine is opgenomen in de energiehuishouding van de koelcel zoals schematisch is weergegeven in Figuur 3.2. Waar de koeler fysiek is geplaatst, is voor de energiebalans niet van belang. In Figuur 3.2 wordt de systeemgrens om de lucht in de koelcel getrokken zodat de koeler buiten deze systeemgrens ligt. De koeler moet het energieoverschot, dus zowel voelbare als latente, aan de lucht in de koelcel onttrekken en afvoeren naar buiten. Voor het bepalen van de koellast of warmtebehoefte moeten de verschillende warmtestromen (voelbaar en latent) naar en van de cellucht bekend zijn.

De eerste warmtestromen worden bepaald door de ventilatie:

De binnenkomende energie door ventilatie $\Phi_{E, in, vent}$ ($J s^{-1}$) bestaat uit voelbare en latente warmte (de som wordt ook wel enthalpie genoemd):

$$\Phi_{E, in, vent} = \Phi_{E, in, voelbaar} + \Phi_{E, in, latent} = \Phi_{vent} (\rho C_p T_{in} + c_{in} \Delta H) \quad 3.6$$

met Φ_{vent} het ventilatiedebiet ($m^3 s^{-1}$), ρC_p de volumieke soortelijke warmte ($J m^{-3} K^{-1}$), T_{in} en c_{in} de temperatuur (K), respectievelijk waterdampconcentratie ($kg m^{-3}$) van de inkomende lucht en ΔH de verdampingswarmte ($J kg^{-1}$)



Figuur 3.2. Energiestromen bewaarcel, schematisch.

De uitgaande waterdampconcentratie van de cellucht wordt voor een groot deel bepaald door de temperatuur van de koelende warmtewisselaar (kww). Bij een krap gedimensioneerde kww kan dit temperatuurverschil oplopen en wordt de cellucht extra gedroogd door de zeer koude kww. Bovendien wordt de COP van de koelmachine lager, zie vergelijking 3.4. In onze berekeningen zullen we er van uitgaan dat de kww goed gedimensioneerd is en dus het temperatuurverschil klein is.

Analoog geldt voor de energie van de uitgaande ventilatielucht:

$$\Phi_{E, \text{ uit, vent}} = \Phi_{\text{vent}}(\rho C_p T_{\text{cel}} + c_{\text{cel}} \Delta H) \quad 3.7$$

met T_{cel} en c_{cel} de temperatuur, respectievelijk waterdampconcentratie van de uitgaande cellucht.

De volgende warmtestroom wordt bepaald door de warmte-inlek door de wanden:

$$\Phi_{E, \text{ in, wand}} = k_{\text{wand}} A_{\text{wand}} (T_{\text{omg}} - T_{\text{cel}}) \quad 3.8$$

met k_{wand} de warmtedoorgangscoefficiënt ($\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}$) van de (geïsoleerde) celwand en A_{wand} het oppervlak (m^2) tussen cel en omgeving op temperatuur T_{omg} .

In de cel opgestelde elektrische apparaten (vooral ventilatoren) genereren $P_{E, \text{ el}}$ (Js^{-1}) vermogen en dragen daarmee bij aan de koellast van de cel.

Ook de warmteontwikkeling $P_{E, \text{ bol, prod}}$ (Js^{-1}) door de bolademhaling draagt bij aan de koellast.

De vochtthuishouding draagt bij aan de warmtehuishouding, dus aan de koellast, bij de omzetting van voelbare naar latente warmte en vice-versa, dus bij verdamping en condensatie. Bij verdamping wordt warmte onttrokken dus wordt de koellast verminderd, bij condensatie wordt warmte toegevoerd en de koellast verhoogd. Als geen condensatie op de koeler plaats zou vinden neemt de verdamping vanuit de bollen een deel van de koellast voor zijn rekening door de opgenomen voelbare warmte. De daardoor gevormde latente warmte verlaat het systeem dan via de ventilatielucht. Als alle verdampende water op de koeler zou condenseren wordt de latente warmte afgegeven aan de koeler en verhoogt dus de koellast. Deze verhoging is dan gelijk aan de verlaging van de koellast door de verdamping vanuit de bollen. Vanuit de vochtbalans over de cellucht kan gemakkelijk worden ingezien dat de toe- of afname van de koellast wordt bepaald door de netto toe- of afvoer van latente warmte door de ventilatielucht. Stationaire vochtbalans (som toe- en afvoer van vocht = 0):

$$\Phi_{\text{vent}} c_{\text{in}} + \Phi_{\text{m, verd}} - \Phi_{\text{vent}} c_{\text{cel}} - \Phi_{\text{m, cond}} = 0 \quad 3.9$$

Met $\Phi_{\text{m, verd}}$ en $\Phi_{\text{m, cond}}$ de verdampende en gecondenseerde massastromen (kgs^{-1})

Zodoende:

$$\Phi_{\text{m, verd}} - \Phi_{\text{m, cond}} = \Phi_{\text{vent}} (c_{\text{cel}} - c_{\text{in}}) \quad 3.10$$

Omgerekend in latente warmtestromen:

$$= \Delta H (\Phi_{\text{m, verd}} - \Phi_{\text{m, cond}}) \quad 3.11$$

Met ΔH de condenswarmte (Jkg^{-1}). Als dus de cellucht meer waterdamp bevat dan de ingaande lucht doordat de verdamping groter is dan de condensatie, wordt netto warmte afgevoerd, deze hoeft niet door de koeler te worden geleverd. Andersom als de cellucht minder waterdamp bevat dan de ingaande lucht doordat de condensatie groter is dan de verdamping, wordt netto warmte door de koeler opgenomen. Dus door de som van voelbare en latente warmte in de ventilatielucht te nemen in de energiebalans van de cellucht wordt de bijdrage van de vochtthuishouding op de koellast in rekening gebracht. Door vermindering van condensatie op de koeler wordt dus de koellast verlaagd. De drijvende kracht voor condensatie is het dampconcentratieverschil tussen cellucht en koeler. De dampconcentratie aan de koeler wordt gegeven door de verzadigingsconcentratie die hoort bij de oppervlaktetemperatuur van de koeler. Als deze verzadigingsconcentratie lager is dan de dampconcentratie in de cellucht treedt condensatie aan de koeler op. Dit is door de lage koelertemperatuur vrijwel altijd het geval. De verzadigingsconcentratie neemt af bij afnemende temperatuur. Dus bij lagere koelertemperatuur neemt de condensatie toe en daarmee de koellast. Zoals eerder opgemerkt moet de koelende warmtewisselaar zo worden gedimensioneerd dat de condensatie minimaal is.

Opmerking: het gaat dus niet om verschillen in relatieve vochtigheid (RV) maar om verschillen in de waterdampconcentratie, dus in absolute vochtigheid. De verzadigingsdampspanning p_{sat} (Pa) kan bij omgevingstemperaturen worden berekend als functie van de temperatuur T (K) met de functie:

$$p_{\text{sat}}(T) = 133.32 \cdot \exp((1.0887 \cdot T - 276.4) / (0.0583 \cdot T - 2.1938)) \quad 3.12$$

Omdat waterdamp in lucht zich bij omgevingstemperaturen gedraagt als ideaal gas kan vervolgens de verzadigde waterdampconcentratie c_{sat} (kgm^{-3}) worden berekend als:

$$\begin{aligned} c_{\text{sat}}(T) &= (M/R T) p_{\text{sat}}(T) = \\ &= (18/8314T) p_{\text{sat}}(T) = (2,165 \cdot 10^{-3}/T) p_{\text{sat}}(T) \end{aligned} \quad 3.13$$

met M het molecuair gewicht van water (kgkmol^{-1}) en R de universele gasconstante ($\text{Jkmol}^{-1}\text{K}^{-1}$). Met behulp hiervan kan de absolute vochtigheid bij de range van koel- en omgevingstemperaturen worden berekend zoals in Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Verzadigingsdampspanning p_{sat} en -concentratie c_{sat} als functie van de temperatuur T .

T (°C)	K	p_{sat} (Pa)	c_{sat} (10^{-3}kg/m^3)
-5	268.15	424	3.42
-2.5	270.65	511	4.09
0	273.15	614	4.87
2.5	275.65	736	5.78
5	278.15	877	6.83
7.5	280.65	1043	8.05
10	283.15	1235	9.44
12.5	285.65	1458	11.1
15	288.15	1715	12.9
17.5	290.65	2011	15.0
20	293.15	2351	17.4
22.5	295.65	2740	20.07
25	298.15	3184	23.12
27.5	300.65	3690	26.57
30	303.15	4264	30.45
32.5	305.65	4914	34.80

Als bevrozing optreedt door een lage koelertemperatuur wordt ook de bevrozingswarmte $r \Phi_{\text{m, cond}}$ van het gecondenseerde water door de koeler opgenomen, met r de bevrozingswarmte van water (Jkg^{-1}). De term $r \Phi_{\text{m, cond}}$ draagt dan dus extra bij aan de koellast en moet in de warmtebalans van de cellucht ter bepaling van de koellast worden meegenomen.

De stationaire warmtebalans (warmtestroom in – uit = 0) van de cellucht kan dus aan de hand van Figuur 3.2 worden opgesteld:

$$\begin{aligned} \Phi_{E, \text{ in, vent}} - \Phi_{E, \text{ uit, vent}} + \Phi_{E, \text{ in, wand}} + P_{E, \text{ el}} + \\ + P_{E, \text{ bol, latent}} - P_{E, \text{ bol, voelbaar}} + P_{E, \text{ bol, prod}} - P_c = 0 \end{aligned} \quad 3.14$$

Aan de bol kan de voelbare warmtestroom naar de bol (uit de lucht) gelijk gesteld worden aan de latente warmtestroom vanuit de bol (naar de lucht) zodat alleen de warmteproductie van de bollen bijdraagt aan de energiebalans. Zodoende wordt de koellast P_c (Js^{-1}):

$$P_c = \Phi_{E, \text{ in, vent}} - \Phi_{E, \text{ uit, vent}} + \Phi_{E, \text{ in, wand}} + P_{E, \text{ el}} + P_{E, \text{ bol, prod}} + r \Phi_{\text{m, cond}} \quad 3.15$$

Ofwel:

$$\begin{aligned} P_c = \Phi_{\text{vent}} [\rho C_p (T_{\text{in}} - T_{\text{cel}}) + \Delta H(c_{\text{in}} - c_{\text{cel}})] + k_{\text{wand}} A_{\text{wand}} (T_{\text{omg}} - T_{\text{cel}}) \\ + P_{E, \text{ el}} + P_{E, \text{ bol, prod}} + r \Phi_{\text{m, cond}} \end{aligned} \quad 3.16$$

Vorenstaande benadering gaat uit van ingestelde temperatuurniveaus en is dus een stationaire benadering. Bij terugkoelen bij aanvang van de bewaarperiode zal de temperatuur in de cel moeten worden verlaagd tot de setpointtemperatuur en zal dus extra koelwarmte ter waarde van $Cap_{th}\Delta T$ worden onttrokken met Cap_{th} de warmtecapaciteit van de celinhoud (JK^{-1}) en ΔT de terug te koelen temperatuurdaling. Gedurende de bewaarperiode wordt aangenomen dat effecten van temperatuurstijgingen en -dalingen elkaar compenseren.

3.2 Warmteproductie bollen

Tulpenbollen geven tijdens de bewaarfase bij ongeveer $20^{\circ}C$ tussen de 5 en 10 liter koolzuur per ton per uur af; dit geldt alleen als de bollen zich nog niet beginnen te ontwikkelen. Dan neemt deze waarde namelijk toe. Deze afgifte is het gevolg van de ademhaling waarbij suikers worden verbrand om de levensprocessen in stand te houden. Suiker is een koolwaterstof ($C_{12}H_{22}O_{11}$ dus met $M=342 \text{ gmol}^{-1}$) die als volgt verbrand:



Dus per mol suiker worden 12 molen CO_2 gevormd. Bekend is dat 1 mol CO_2 , zoals ieder gas, een volume heeft van 22.4 l.

Voor de vorming van 10 liter CO_2 is dus $10 \times 1 / 22.4 \text{ mol } C_{12}H_{22}O_{11}$ nodig ofwel 12.7 gr suiker. Met de verbrandingswarmte van suiker van 16.5 kJ/gram wordt dus 210 kJ per uur per ton per uur warmte gegenereerd. Voor de referentiecél met 75.4 ton bollen wordt dus door de bollen een vermogen voelbare warmte gegenereerd van 4.4 kW.

Hierbij ontstaat ook $10 \times 11 \times 1 / 22.4 \text{ mol } H_2O$ ofwel 7.4 g waterdamp per ton per uur, waarvoor 16.7 kJ per ton verdampingswarmte nodig is. Hiervoor wordt in de referentiecél dus een vermogen voelbare warmte van 350 W in latente warmte omgezet. Dit is verwaarloosbaar ten opzichte van de warmteproductie.

3.3 Grootte-orde termen in de energiebalans

In de vorige paragrafen is beschreven welke termen voorkomen in de energiebalans over de bewaarcel. Als er een groot verschil in orde grootte is tussen deze termen bepalen de grootste termen het thermische gedrag en daarmee de koellast of de warmtebehoefte.

De ventilatieterm bestaat uit een voelbare en latente warmtestroom, deze wordt bepaald door het volumedebiet van de ventilatielucht, en de in- en uitgaande temperaturen en absolute vochtigheden zoals eerder gegeven:

$$\Phi_{E, \text{ in, vent}} - \Phi_{E, \text{ uit, vent}} = \Phi_{\text{vent}} [\rho C_p (T_{\text{in}} - T_{\text{cel}}) + \Delta H (c_{\text{in}} - c_{\text{cel}})] \quad 3.18$$

Het volumedebiet is 100 m^3 per m^3 bol. In de referentiebewaarcel staan 126 m^3 bol zodat bij 100 m^3 lucht per m^3 bol per uur 12.600 m^3 per uur wordt geventileerd, ofwel $3.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. In het na-traject voor bewaring is dit 50 m^3 lucht per m^3 bol per uur, dus de helft.

De voelbare warmtestroom is dan 4.2 kW per K temperatuurverschil tussen cel- en buitenlucht, en 2.1 kW in het na-traject.

De latente warmtestroom wordt bepaald door het ventilatiedebiet en het verschil in absolute vochtigheid dat weer wordt gegeven door de bolverdamping (verhoogt c) en de condensatie op het koelblok (verlaagt c). De bolverdamping werd geschat op 7 g waterdamp per ton bollen per uur. Een volume van 126 m^3 bollen weegt ca. 75 ton, zodat voor de referentiecél 525 g water per uur verdampt, ofwel 0.15 gs^{-1} . Dit is gekoppeld via de verdampingswarmte van 2250 Jg^{-1} aan een latente warmtestroom van 330 W. Dit is dus klein ten opzichte van de voelbare warmtestroom per K temperatuurverschil tussen cel- en buitenlucht. Met een groter temperatuurverschil neemt de grootte-orde van de latente warmtestroom dus verder af.

De warmtestroom door de wand wordt gegeven door de isolatiewaarde van de wand:

$$\Phi_{E, \text{ in, wand}} = k_{\text{wand}} A_{\text{wand}} (T_{\text{omg}} - T_{\text{cel}}) \quad 3.19$$

Buitenwanden van cellen worden over het algemeen geïsoleerd met 12 cm PU schuim ($\lambda = 0.03 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), binnenwanden meestal met 10 cm. In het meest ongunstige geval van een alleenstaande cel is het wandoppervlak naar buiten voor de referentiecél cel ($7 \times 10 \times 6$) ca. 300 m^2 . Met een k-waarde voor PU schuim van $0.03 / 0.12 = 0.25 \text{ Wm}^2\text{K}^{-1}$ betekent dat een warmtestroom per K temperatuurverschil tussen cellucht en omgeving van 75 W. Dit is dus ook verwaarloosbaar ten opzichte van de voelbare warmtestroom per K door ventilatie.

De warmteproductie door elektrische apparaten in de cel $P_{E,el}$ hangt uiteraard af van de in de cel geïnstalleerde apparaten. Voor de referentiecel was 7.4 kW elektrisch vermogen geïnstalleerd.

De warmteproductie van de bollen door ademhaling $P_{E,bol,prod}$ werd voor de referentiecel geschat op 4.4 kW. Dit is vergelijkbaar met de voelbare warmtestroom door ventilatie per K temperatuurverschil. Naarmate het temperatuurverschil toeneemt wordt de bijdrage van de warmteproductie van de bollen dus kleiner maar in berekeningen van de koellast of warmtebehoefte moet zij wel worden meegenomen.

Voor de verdamping vanuit de bollen was in de referentiecel 350W nodig, dit kan worden verwaarloosd.

Zodoende kan de stationaire warmtebalans voor de bewaarcel worden vereenvoudigd tot:

$$P_c = \Phi_{vent} \rho C_p (T_{in} - T_{cel}) + \Phi_{vent} \Delta H (c_{in} - c_{cel}) + P_{E,el} + P_{E,bol,prod} \quad 3.20$$

Als P_c positief is betekent dit een koelbehoefte, als zij negatief is betekent dat een warmtevraag.

Het aandeel van de condensatie op de koeler wordt bepaald door het verschil in waterdampconcentratie van de in- en uitgaande ventilatielucht. De vochtproductie door de bollen zou een condensatie geven van ca. 0.5 l per uur waarmee een vermogen van 350W is gemoeid. Dit is verwaarloosbaar ten opzichte van de andere termen. Onder omstandigheden dat de buitenlucht een hogere absolute luchtvochtigheid heeft dan de cellucht zal een bijdrage aan de condensatie worden geleverd. Dit treedt sporadisch op en kan dus in de analyse worden weggelaten.

Zodoende kan de warmtebalans voor de referentie bewaarcel verder worden vereenvoudigd tot:

$$P_c = \Phi_{vent} \rho C_p (T_{in} - T_{cel}) + P_{E,el} + P_{E,bol,prod} \quad 3.21$$

Omdat de balans ingezet wordt om een energieanalyse uit te voeren voor verschillende situaties zijn de vereenvoudigingen geoorloofd.

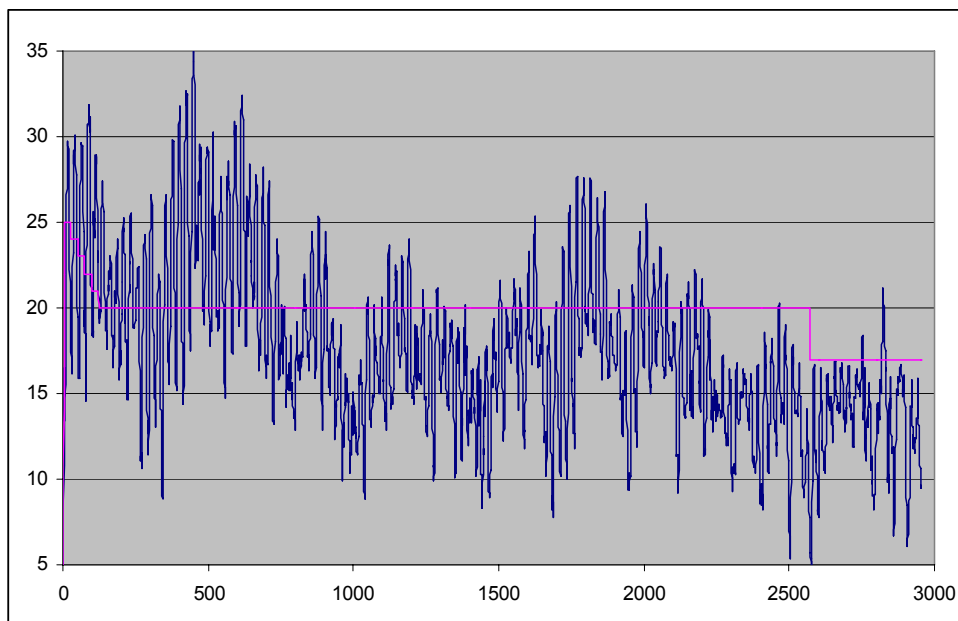
Omdat de warmtebalans stationair is moet de grootteorde van het terugkoelen worden geschat. In de referentiecel moeten 75.4 ton bollen bij aanvang van de bewaarperiode worden teruggekoeld van ca. 25 naar 20 °C. Als we aannemen dat bollen een soortelijke warmte hebben van 3 kJkg⁻¹K⁻¹ dan moet dus 75400x 3000x5 = 1.13 GJ worden afgevoerd. Hiermee zal in de koelbehoefte rekening worden gehouden. Of de verlaging van het setpoint tot 17 °C die 2 weken voor het einde van de bewaarperiode plaatsvindt extra koelbehoefte geeft zal in het weerbestand worden nagegaan. Verwacht wordt dat de buitentemperaturen dan laag genoeg zijn om deze setpointverlaging zonder koeling mogelijk te maken.

4 Resultaten modelberekeningen referentiebewaarcel tulpenplantgoed

4.1 Uitgangspunten tulpenbewaring

De uitgangspunten voor de modelberekeningen zijn in H3 aangegeven en worden hier samengevat:

- Referentiecel: 126 m³ bol (75.4 ton) met bewaarperiode van 1 juli tot en met 31 oktober, met een tijdsduur van 2952 uur. Omdat er in 2006 behoorlijk gekoeld moest worden zijn de weerdata van dit jaar voor de voorbeeldberekeningen als randvoorwaarden genomen.
- De setpointtemperatuur in de bewaarcel wordt bij aanvang van de bewaarperiode (1 juli) in 5 dagen van 25 naar 20 °C teruggebracht, daarna op 20 °C gehouden, tot 2 weken voor het einde van de bewaarperiode, waarbij hij is teruggezet op 17 °C. In H2 is al aangegeven dat dit de bewaaroptie is die de meeste koelenergie vraagt en dus bij uitstek geschikt om de mogelijkheden naar energiebesparing tijdens koeling te onderzoeken.
- Om dezelfde reden wordt de bewaarperiode in 2006 gekozen, een relatief warm jaar waarin dus veel moest worden gekoeld. In Figuur 4.1 wordt de buitenluchttemperatuur te De Bilt en de setpointtemperatuur over de bewaarperiode getoond.

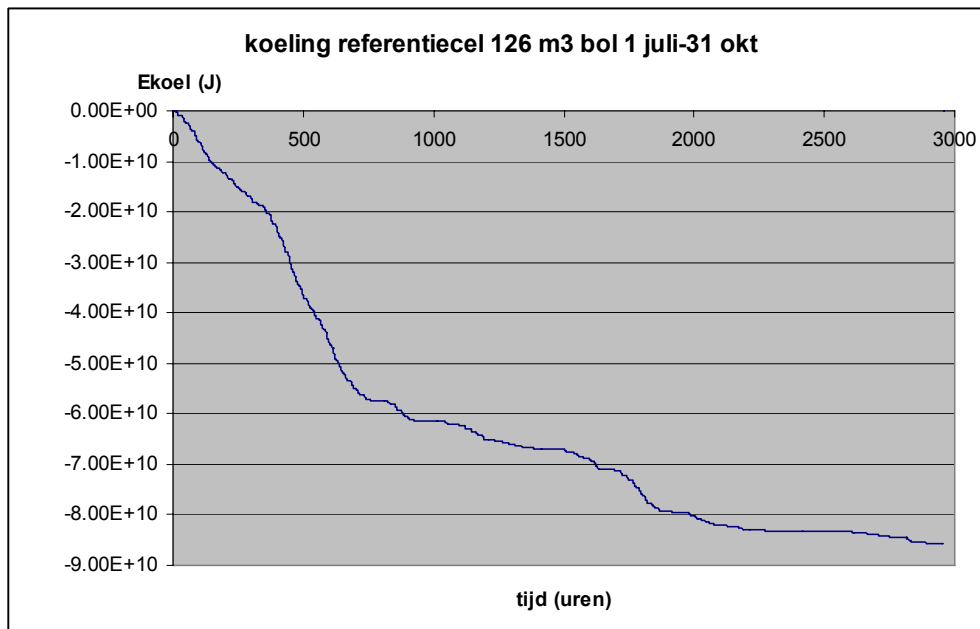


*Figuur 4.1. Temperatuur van buitenlucht en setpoint in de cel over de bewaarperiode van 1 juli tot en met 31 oktober (2952 uur) 2006.
(1 juli 0u00 = 0, 1 aug 0u00 = 744, 1 sept 0u00 = 1488, 1 okt 0u00 = 2208 uur)*

- In de referentiecel zijn voor ventilatie en recirculatie 4 ventilatoren geïnstalleerd met gemiddeld vermogen van 1.85 kW, zodat het totale vermogen komt op 7.4 kW.
- Voor de koelmachine wordt in deze verkenning aangenomen dat er geen beperking is op het vermogen, en dat de COP op de koelkant (COP_{koel}) 3 bedraagt.
- Voor de verwarming wordt een verwarmingsketel ingezet met een rendement van 80% op bovenwaarde (88% op onderwaarde).
- De ventilatie is 100 m³ per m³ bol per uur van 1 juli tot 15 september, daarna is tot 30 oktober geventileerd met 50 m³ per m³ bol per uur. Voor het ventilatorvermogen is aangenomen dat dit kwadratisch verloopt met het ventilatiedebiet, zodat bij het halve debiet het motorvermogen 1.85kW is. Theoretisch verloopt het ventilatorvermogen met de derde macht van het ventilatordebiet, praktisch loopt het wat minder geprononceerd, zodat voor een kwadratisch verloop is gekozen.

4.2 Berekeningen uitgangssituatie

Voor de bewaarperiode van 1 juli tot en met 31 oktober is met behulp van het vereenvoudigde model en de gehanteerde uitgangspunten de benodigde koeling en verwarming uitgerekend. In Figuur 4.2a wordt de voor koeling onttrokken energie cumulatief getoond.



Figuur 4.2a. Cumulatieve koelenergie over de bewaarperiode.

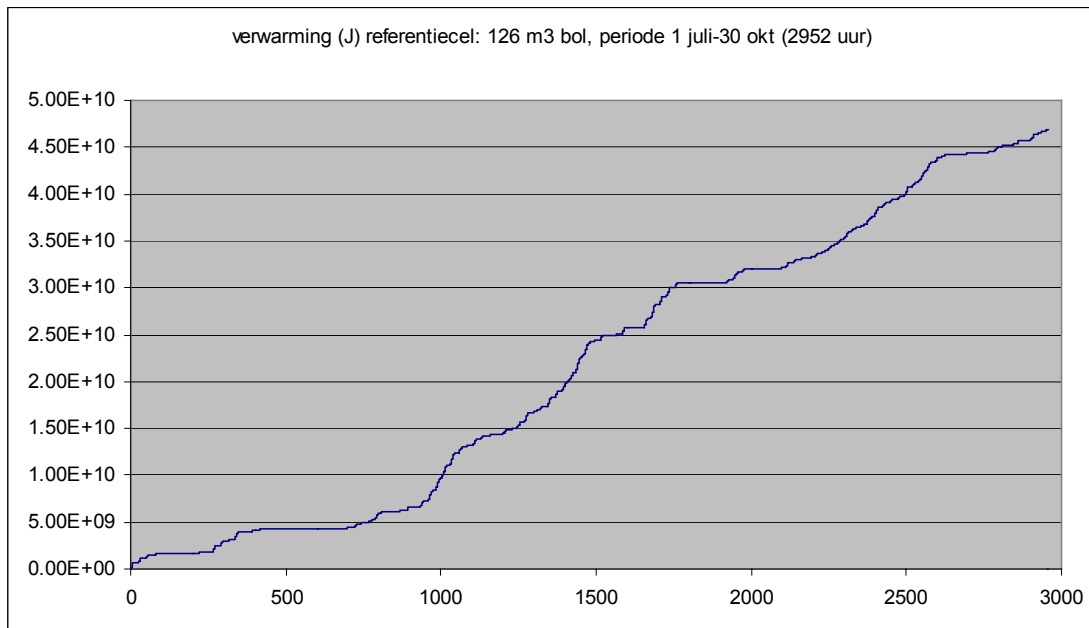
In totaal is de onttrokken energie 85.7 GJ, Dit moet onttrokken worden door de koelmachine met $COP_{koel} = 3$, dus is hiervoor nodig: $85.7 \text{ E}9 / 3 / 3.6 \text{ E}6 = 7\,935 \text{ kWh}$.

De berekeningen gaven aan dat hiervan 6 480 kWh overdag (tussen 8.00 en 19.59 u) en 1 455 kWh 's nachts (andere uren) nodig was.

De berekende benodigde verwarming wordt cumulatief gegeven in Figuur 4.2b.

In totaal is voor verwarming totaal 46.8 GJ geleverd door een verwarmingsketel met efficiëntie 80%, (geen condensor) op bovenwaarde. Hiervoor dus nodig $46.8 \text{ E}9 / 0.8 / 35 \text{ E}6 = 1672 \text{ m}^3$ aardgas.

In de uitgangssituatie is het ventilatorvermogen 7.4 kW tot ca. half september, gedurende 1824 uur, bij $100 \text{ m}^3/\text{m}^3$ bol en 1128 uur met 1.85 kW bij $50 \text{ m}^3/\text{m}^3$ bol zodat dit 15 584 kWh vergt.



Figuur 4.2b. Cumulatieve verwarmingsenergie over de bewaarperiode.

In de uitgangssituatie is uitgerekend wat het effect is van de warmteproductie door de bollen. Daarom is de koel- en warmtebehoefte nogmaals uitgerekend met een warmteproductie van 2.2 kW, dus gekoppeld aan een CO₂ productie van 5 l per ton per uur. Het resultaat laat zich als volgt samenvatten:

E koel = 7.42 E10 J met benodigd 6 872 kWh

Hiervan 5 774 kWh overdag (tussen 8.00 en 19.59 u) en 1 098 kWh 's nachts.

E Verwarming = 5.88 E10 J = 2 098 m³ aardgas

E Ventilatoren = 1824x4.162 + 1128x1.041 = 15 584 kWh

Dit zal in paragraaf 4.2.1 aan de hand van Tabel 4.1 nader worden besproken.

4.3 Energiebesparende maatregelen

De energiebesparende maatregelen die kunnen worden toegepast zijn:

- Vermindering van het ventilatiedebiet
- Warmte- en koudeterugwinning uit de ventilatielucht
- Buffering van warmte en koude
- Gebruik van koud grondwater om de condensortemperatuur laag te houden en zodoende met een hoge COP te koelen

Deze opties worden hieronder verder uitgewerkt.

4.3.1 Vermindering van het ventilatiedebiet

In voorgaand onderzoek is aangetoond dat het ventilatiedebiet kan worden verlaagd. Door de inzet van ethyleen-sensoren kan zij worden aangepast aan de ethyleenproductie zodat het ventilatiedebiet zonder risico voor de productkwaliteit kan worden verlaagd. Hierdoor wordt de warmteproductie in de cel moeilijker afgevoerd maar belangrijker is dat er minder lucht hoeft te worden afgekoeld of opgewarmd. Bovendien is aanmerkelijk minder ventilatorvermogen nodig.

De resultaten van de berekeningen zijn samen met de uitgangssituatie (100% ventilatie met 100 en 50% warmteproductie van de bollen) in Tabel 4.1 samengevat waarbij de ventilatie wordt gereduceerd tot een denkbeeldige 0%. Bij ventilatie lager dan 25% zal de vereenvoudigde energiebalans minder nauwkeurig worden, de berekeningen in dit gebied zijn wel indicatief om het verschil tussen de verschillende situaties aan te geven.

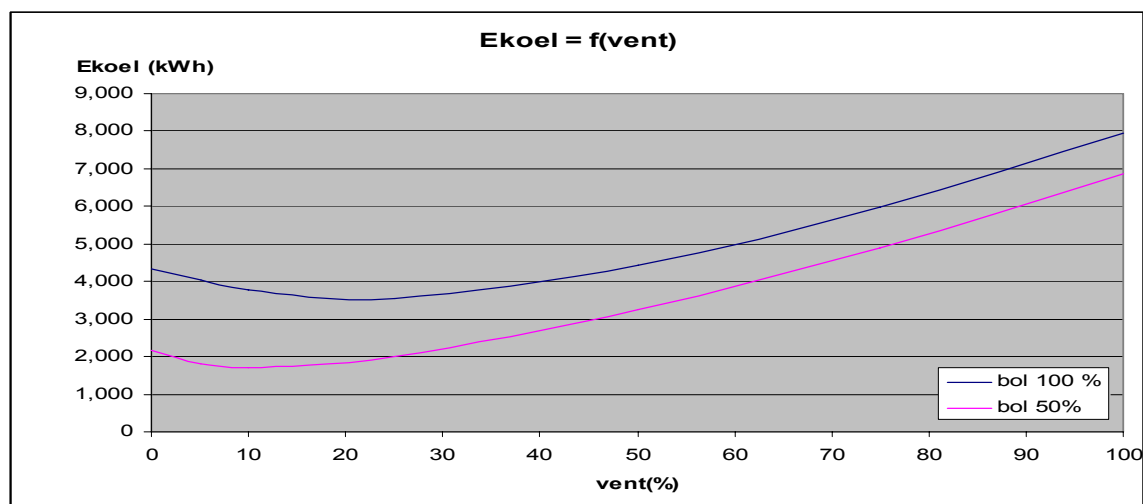
Er is te zien dat halvering van de warmteproductie in de uitgangssituatie (100% ventilatie) de koelbehoefte met 13% verlaagd maar de warmtebehoefte met 25% verhoogd. Dat de invloed op de verwarming groter is dan op de koeling

is in te zien doordat bij 50% warmteproductie het temperatuurverhogende effect van de warmteproductie lager is, waardoor de koeling eerder effectief is, maar ook eerder verwarming nodig is.

Tabel 4.1. *Energiegebruik door koeling (kWh) en verwarming (m³ aardgas) voor de uitgangssituatie (100% ventilatie, 100 en 50 % warmteproductie door de bollen) en voor gereduceerde ventilatie.*

Ventilatie %	Ekoel (P _{bol} = 100 %) kWh	Ekoel (P _{bol} = 50 %) kWh	Everwarm (P _{bol} = 100 %) m ³ aardgas	Everwarm (P _{bol} = 50 %) m ³ aardgas	Eventilator kWh
100	7 933	6 872	1 672	2 098	15 584
75	5 965	4 903	1 219	1 644	8 766
50	4 426	3 268	680	1 068	3 896
25	3 551	2 017	146	389	974
10	3 790	1 722	1	38	156
5	4 046	1 822	0	0	39
0	4 330	2 165	0	0	0

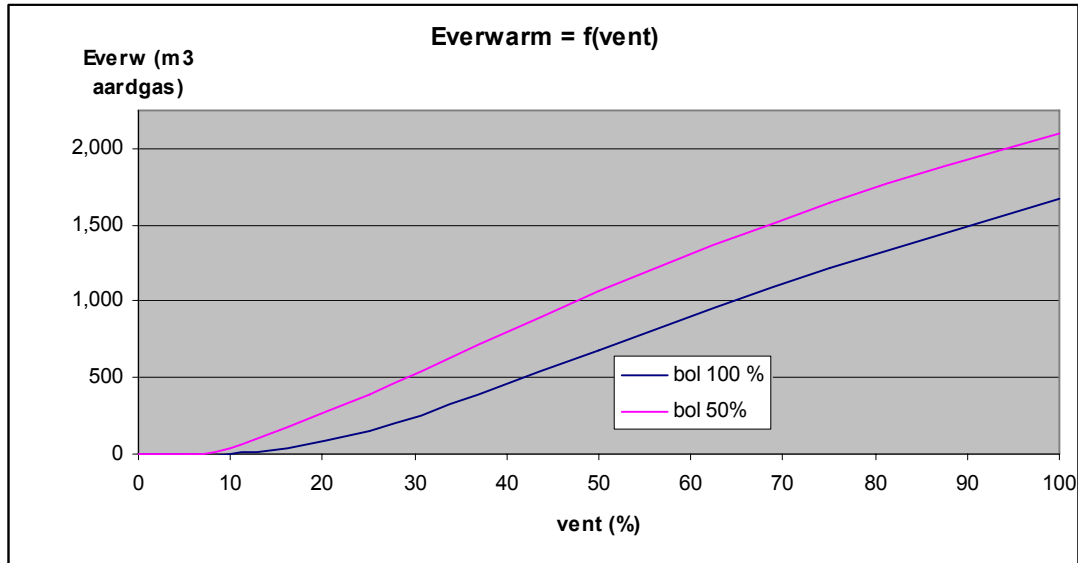
Vermindering van ventilatie heeft als eerste effect dat het benodigde ventilatorvermogen vermindert en daarmee het energiegebruik van de ventilatoren (zie laatste kolom). Hierbij is aangenomen dat zowel ventilatoren voor ventilatie als circulatie kunnen worden teruggeregeld. Verder is er het belangrijke effect dat minder lucht hoeft te worden afgekoeld of opgewarmd maar ook dat de warmteproductie in de cel moeilijker afgevoerd wordt.



Figuur 4.3. *Energiegebruik voor koeling (kWh) bij afnemende ventilatie.*

Als de benodigde koelenergie wordt afgezet tegen de ventilatie (Figuur 4.3) is inderdaad te zien dat de koelbehoefte afvlakt bij afnemende ventilatie, met een sterker effect naarmate de warmteproductie van de bollen hoger is. Bij de denkbeeldige situatie zonder ventilatie wordt de doorsnijding van de y-as gegeven door de warmteproductie van de bollen. Dan moet de warmteproductie, bij 100% bolproductie van 4,4 kW, volledig worden weggekoeld. Hiervoor heeft de koelmachine een energiegebruik van $4.4 \times 2952/3 = 4\,330$ kWh. Bij zeer lage ventilatie zal het energiegebruik van de koelmachine dus stijgen omdat dan het koelende vermogen van de ventilatielucht in de koudere perioden wegvalt.

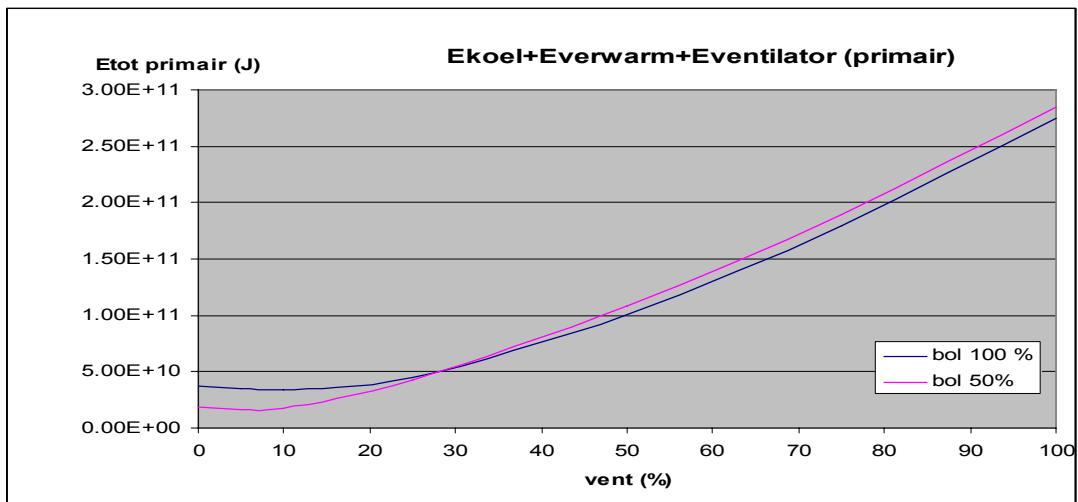
Het energiegebruik voor verwarming bij afnemende ventilatie wordt getoond in Figuur 4.4. Meer warmteproductie betekent minder warmtebehoefte. Als het ventilatieniveau onder een bepaalde waarde daalt, kan de warmteproductie (plus uiteraard het ventilatorvermogen) in de bewaarperiode niet meer worden afgevoerd.



Figuur 4.4. Energiegebruik voor verwarming (m³ aardgas) bij afnemende ventilatie.

Het is interessant om het totale energiegebruik voor koeling en verwarming plus ventilatoren te herleiden op primaire energie. Daarbij kan het elektriciteitsverbruik van koelmachine en ventilatoren worden omgerekend naar primair via het rendement van de elektriciteitsopwekking bij de gebruiker, dat in Nederland nu op 42% ligt. Voor de verwarmingsketel is het rendement gegeven op 80% op bovenwaarde.

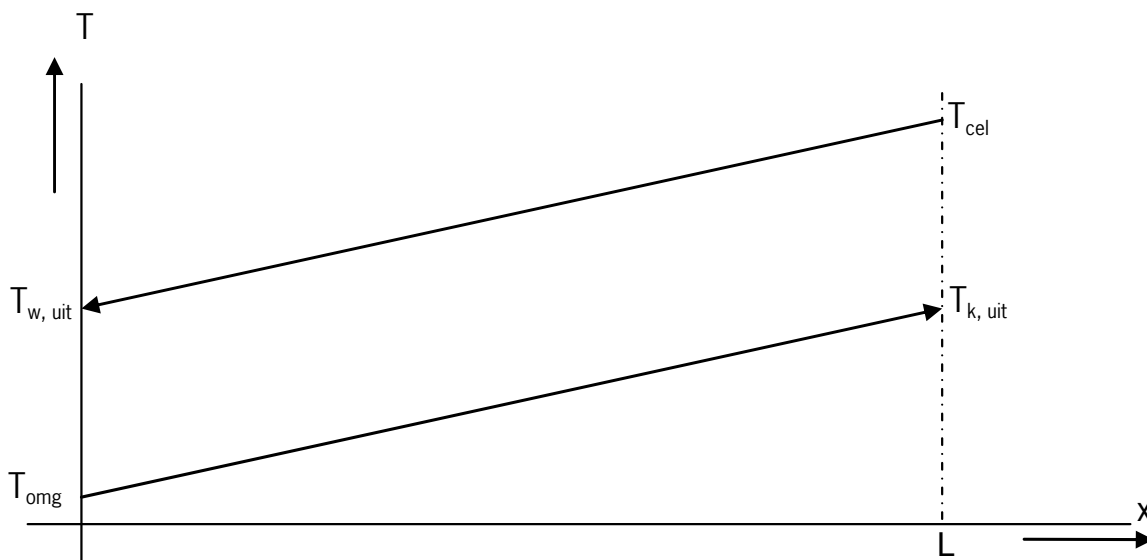
Met de gegeven uitgangspunten is te zien dat het totale primaire energiegebruik niet sterk afhangt van de warmteproductie door de bollen. Bij een gekozen ventilatieniveau is het ventilatorvermogen er niet van afhankelijk, de toename van de koelbehoefte wordt herleid op primair ongeveer gecompenseerd door de afname van de warmtebehoefte.



Figuur 4.5. Totaal primair energiegebruik gedurende de bewaarperiode bij afnemende ventilatie.

4.3.2 Warmteterugwinning uit de ventilatielucht

Omdat grote hoeveelheden lucht moeten worden verwarmd en gekoeld en dus grote hoeveelheden verwarmde en gekoelde lucht worden afgevoerd, ligt het voor de hand om de warmte of koude uit de afgevoerde lucht terug te winnen om hiermee de aangezogen ventilatielucht voor te verwarmen of voor te koelen. Bij 100% ventilatiedebiet en 100% warmteproductie door de bollen is daarom het effect van warmteterugwinning berekend met een oplopend rendement van de warmtewisselaar.



Figuur 4.6. Principeschets warmteterugwinning met temperatuurverlopen.

Voor een denkbeeldige warmtewisselaar met lengte L kan het rendement van warmtewisseling aan de principeschets Figuur 4.6 worden afgelezen voor het geval dat koude buitenlucht met temperatuur T_{omg} door de uitstromende cellucht wordt opgewarmd naar $T_{k,uit}$, waarbij het instroomt in de bewaarcel die op de temperatuur T_{cel} wordt gehouden. De celluchttemperatuur koelt daarbij af tot $T_{w,uit}$. Het rendement van warmteterugwinning η wordt gedefinieerd als:

$$\eta = (T_{k,uit} - T_{omg}) / (T_{cel} - T_{omg})$$

Naarmate het rendement toeneemt nadert $T_{k,uit}$ steeds dichter de celtemperatuur en hoeft de verwarming steeds minder te leveren om de celtemperatuur op peil te houden.

Naarmate het rendement toeneemt, zal een warmtewisselaar met toenemende drukval moeten worden toegepast. Uiteraard stijgt daardoor het benodigde ventilatorvermogen. Dit is in de berekening meegenomen. In Tabel 4.2 zijn de resultaten van de modelberekeningen samengevat.

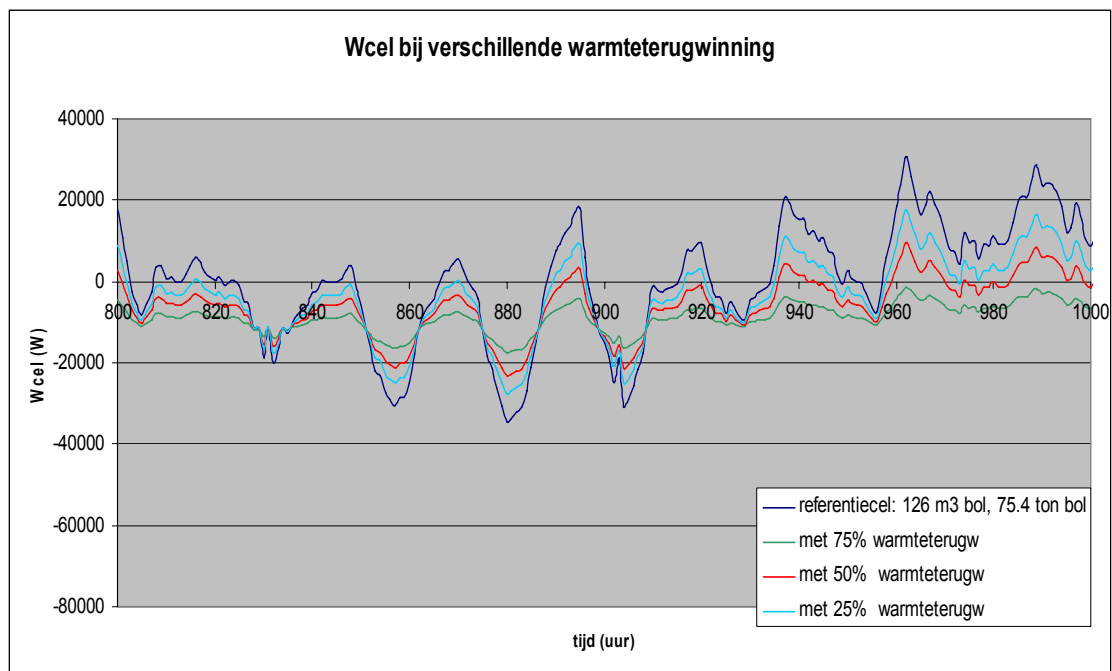
Tabel 4.2. Energiegebruik door koeling (kWh) en verwarming (m^3 aardgas) voor toenemende rendementen van warmteterugwinning (100% ventilatie, 100% warmteproductie door de bollen).

Rendement	Ekoel kWh	Everwam m^3 aardgas	Eventilator kWh
0	7 933	1 672	15 584
25	7 397	894	17 084
50	7 240	262	18 584
75	8 046	1.5	20 084

De berekeningsresultaten laten zien dat de benodigde koelenergie over de bewaarperiode bij toenemend rendement van warmteterugwinning eerst iets afneemt maar daarna zelfs gaat stijgen. De benodigde verwarmingsenergie neemt wel duidelijk af met toenemend rendement van de warmteterugwinning. Uiteraard neemt de benodigde ventilatorenergie toe met toenemend rendement.

De geringe afname van de benodigde koelenergie en zelfs de toename ervan bij een hoog rendement van warmteterugwinning kan begrepen worden als het verloop van het onttrokken (koelen) of toegevoerde (verwarmen) vermogen in de bewaarcel nader wordt bekeken. In Figuur 4.7 wordt dit gegeven voor een illustratieve periode van uur 800 (3 aug. 20u) tot uur 1000 (11 aug. 16u) uur waarin in de uitgangssituatie zowel gekoeld als verwarmd wordt. Hierin wordt gekoeld als W_{cel} negatief is, met W_{cel} positief wordt verwarmd.

In de uitgangssituatie (referentiecel) zijn de koel- en verwarmingsperioden duidelijk te onderscheiden. Van uur 800 tot uur 880 vrijwel onafgebroken koelen met een duidelijk dag- nachtritme daarna overdag koelen en 's nachts verwarmen en vanaf uur 960 onafgebroken verwarmen tot uur 1000. Met warmteterugwinning worden de benodigde koel- en verwarmingsvermogens kleiner, de amplitudo van de variatie in W_{cel} wordt duidelijk kleiner. Er is echter ook te zien dat de perioden met verwarming kleiner worden maar ook dat de perioden met koeling toenemen, het niveau van het verloop van W_{cel} daalt. Bij 75% warmteterugwinning wordt over de gehele getoonde periode gekoeld. Er is dus met toenemend rendement van warmteterugwinning minder koelvermogen nodig maar wel over langere perioden. Dit wordt veroorzaakt doordat de in de cel geproduceerde warmte (bolwarmteproductie plus ventilatorvermogen) moet worden afgevoerd. Om dit te kunnen zou de buitenlucht eigenlijk ca. 3 graden koeler moeten zijn.



Figuur 4.7. Verloop van aan de cel onttrokken/ toegevoerde vermogen bij toenemend rendement van warmteterugwinning voor uur 800 (3 aug. 20u) tot 1000 (11 aug. 16u).

Door het kleinere temperatuurverschil tussen toegevoerde lucht en cellucht bij warmterugwinning moet de koeler dus eerder inkomen om weer minimaal de ca. 3 graden temperatuurverschil te leveren. Het is technisch mogelijk om de warmteterugwinning alleen te laten werken om de verwarmingsenergie te beperken en bij koeling in te laten komen als dit vermindering van het koelvermogen oplevert maar dat vereist een complexe regeling van de warmteterugwinning en voorzieningen om deze in- en uit te schakelen. Dit is niet kant en klaar beschikbaar zodat dat in deze deskstudie niet verder wordt uitgewerkt.

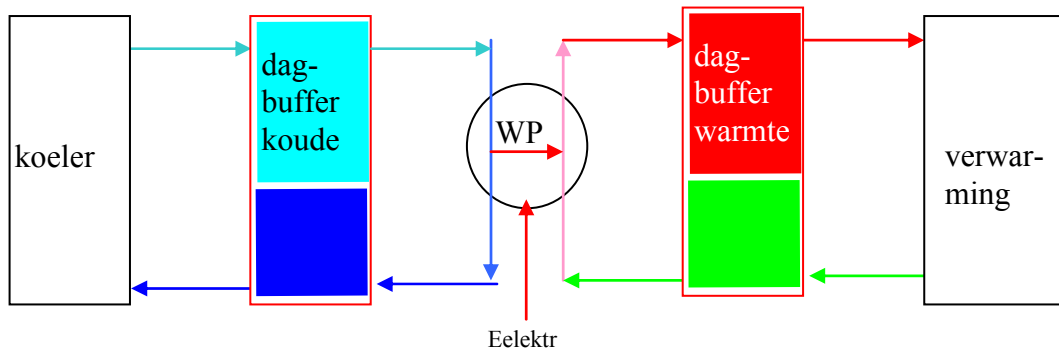
4.3.3 Ventilatormotoren buiten de cel

Het lijkt voor de hand te liggen om de ventilatormotoren buiten de cel te plaatsen om de warmteproductie hiervan niet weg te hoeven koelen. Er moet echter bedacht worden dat elektrische motoren een hoog rendement hebben zodat slechts ca. 10% van het motorvermogen als directe warmte wordt gedissipeerd. Het motorvermogen waarmee de luchtbeweging wordt gegenereerd blijft in de cel want dit is nodig om alle luchtweerstand te overwinnen. Uiteindelijk wordt dit zeer verdeeld in de cel in warmte omgezet zodat het ventilatorvermogen bijdraagt aan het benodigde koelvermogen. Een correctie zou nog via de kinetische energie van de uitgaande ventilatielucht (dit is immers een uitgaande energiestroom) moeten worden toegepast, maar die kan verwaarloosd worden ten opzichte van het ventilatorvermogen (12600 m³ per uur = 3.5 m³/s heeft kinetische energie/s van 50 W bij een luchtsnel-

heid van 5 m/s of 200 W bij 10 m/s). Zodoende hoeft de optie ventilatormotoren buiten de cel niet verder te worden uitgewerkt.

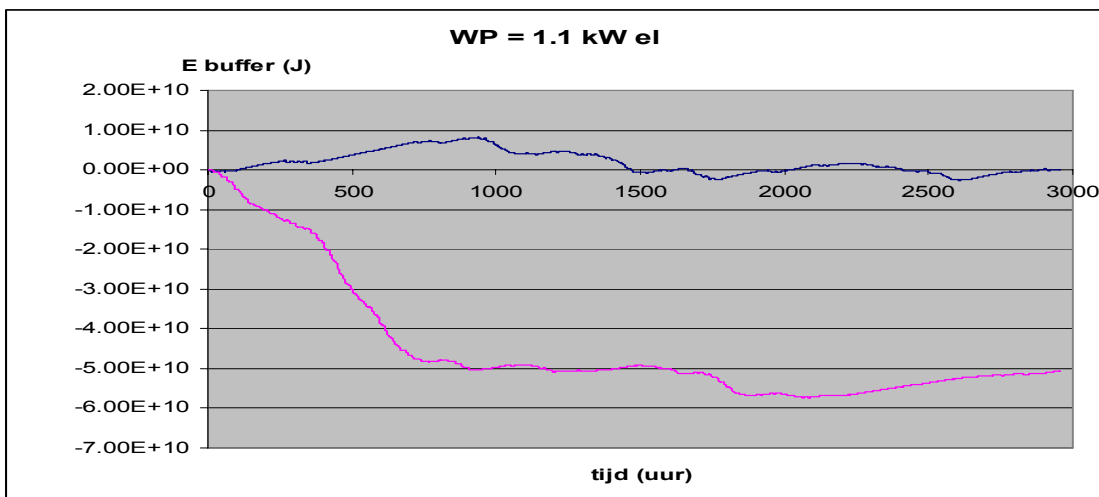
4.3.4 Buffering van koude of warmte

Warmte- en koudebuffering maken het in principe mogelijk de koelmachine ook te gebruiken als warmtepomp en het aantal uren dat hij 's nachts met goedkope nachtstroom wordt ingezet te verhogen. In onderstaand schema is dit gevisualiseerd.



Figuur 4.8. Schematische weergave dag-/nachtbuffering van koude en warmte.

De koelenergie voor de cel wordt geleverd vanuit het koudebuffer, dit wordt gevuld door de koelmachine/warmtepomp. Evenzo wordt de verwarming geleverd vanuit het warmtebuffer dat gevuld wordt door de koelmachine/warmtepomp. Bij een ideaal symmetrisch dag-nachtpatroon van koelen/verwarmen worden beide buffers frequent geleegd en gevuld zodat zij efficiënt worden ingezet en kan de koelmachine/warmtepomp op een constant vermogen blijven. De vraag is hoe de buffers voor de gegeven bewaarperiode moeten worden gedimensioneerd en of zij daarbij efficiënt kunnen worden ingezet. Daarom wordt bij een constant koelmachine/warmtepompvermogen nagegaan hoe de koude- warmtebuffers vullen/leggen. Het constante vermogen, waarbij het warmtebuffer over de bewaarperiode weer in zijn uitgangssituatie uitkomt, blijkt na enkele berekeningen 1.1 kW elektrisch te zijn. In Figuur 4.9 wordt getoond hoe het warmte- en koudebuffer zich gedragen.

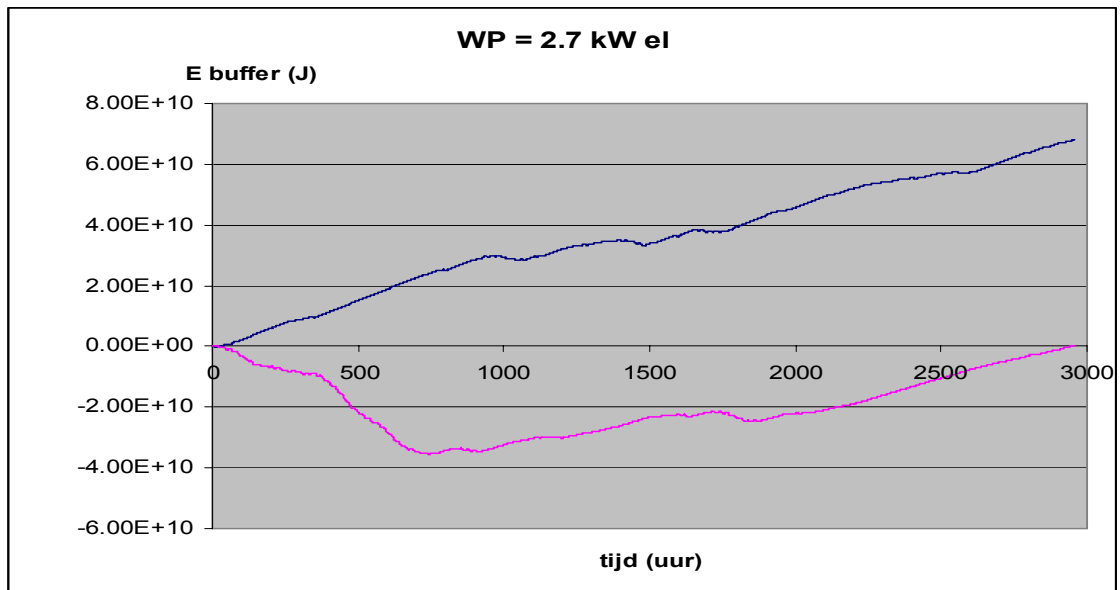


Figuur 4.9. Warmte- en koudebuffer verloop bij een constant warmtepompvermogen van 1.1 kW (nb: $E+10 = 10^{10}$, dus $1.00 E+10 J = 10 GJ$).

Het warmtebuffer vertoont geen ideaal dag/nacht patroon en wordt in het eerste deel van de bewaarperiode, waarin weinig verwarming nodig is, vooral gevuld. Pas na 100 uur is er enkele malen legen en vullen van het buffer. Het gedrag lijkt dus meer op een seizoensbuffer dan op een dag/nachtbuffer. In de eerste periode zou de benodigde

buffercapaciteit ca. 8GJ zijn. Dit is een waterbuffer van ca. 95 m³ met een ΔT van 20K of ca. 40 ton Phase Change Material (PCM met warmteopslagcapaciteit van ca. 200 kJkg⁻¹). In de tweede periode zou een buffer van 2 GJ voldoende zijn, dit is altijd nog ca. 24 m³ water of 10 000 kg PCM. Het hoeft geen betoog dat buffering op deze basis niet haalbaar is. Aan de koudebuffer is te zien dat in de eerste periode te weinig is opgeslagen zodat dit door een extra koelmachine moet worden geleverd. In de tweede periode zou ca. 5 GJ voldoende zijn, echter vraagt dit ook een te groot fysiek buffer, te meer daar hier de ΔT ca. 10 K zal zijn.

Als het continue koelmachine/ warmtepompvermogen wordt afgestemd op de koudebuffer is dit vermogen ca. 2.7 kW elektrisch. De bufferverlopen worden in Figuur 4.10 getoond. Duidelijk is dat er dan een fors warmteoverschot is en dat ook hier het koudebuffer buiten haalbare dimensies ligt



Figuur 4.10. Warmte- en koudebuffer verloop bij een constant warmtepompvermogen van 2.7 kW.

Als een klein buffer wordt gekozen om alleen korte termijn fluctuaties te bufferen zou ook energie bespaard kunnen worden. Voor een warmtebuffer van 0.5 GJ (ca. 6 m³ water of 2500 kg PCM) is berekend dat de besparing 410 m³ aardgas bedraagt. Bij 0.1 GJ buffer wordt dit 295 m³ aardgas. Het buffer wordt te weinig frequent geleegd en gevuld om een redelijke bijdrage aan energiebesparing over de bewaarperiode te kunnen leveren.

4.3.5 Toepassing van koud grondwater

Grondwater zal vanaf een diepte vanaf ca. 5 meter een temperatuur hebben die gelijk is aan de gemiddelde jaartemperatuur die in Nederland ca. 11 °C bedraagt. Dit kan in principe worden gebruikt om de ventilatielucht bij koelbehoefte te koelen. Ook zou het kunnen worden gebruikt om via koeling van de condensor het temperatuurverschil tussen verdampers en condensoren klein te houden zodat de koelmachine met een zo hoog mogelijk COP werkt.

Bij direct koelen van de ventilatielucht zal het koude grondwater warmte op kunnen nemen vanaf 11 °C tot ca. 15 °C. In de uitgangssituatie moet over de bewaarperiode ca. 100 GJ energie worden afgevoerd, waarbij de maximale koelcapaciteit ca. 80 kW thermisch bedraagt. Hiervoor is dan over de bewaarperiode 6000 m³ koud grondwater nodig met een maximaal benodigd debiet van 17 m³ per uur.

Bij afvoeren van de condensorwarmte moet 4/3^{de} van de koelwarmte worden afgevoerd, ofwel ca. 130 GJ. Als de condensortemperatuur op 25 °C wordt gehouden kan het grondwater 12 K opwarmen, zodat 2700 m³ koud grondwater nodig is met een maximaal benodigd debiet van 7.5 m³ per uur.

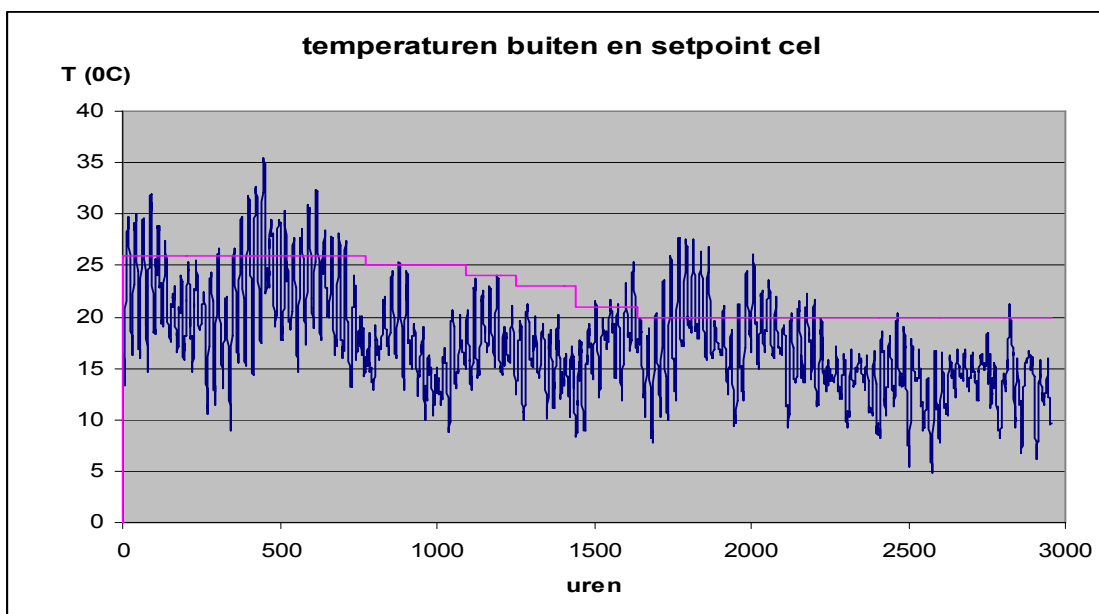
Hoewel beide opties technisch mogelijk zijn is er, afgezien van de economie, toch een belangrijk probleem. Bij de vergunningverlening voor de onttrekking van grondwater voor thermische doeleinden wordt vereist dat warmte-onttrekking en warmtetoevoer over een jaar gezien met elkaar in evenwicht zijn zodat gemiddeld geen thermische

belasting van de bodem optreedt. Daarom wordt bij dit soort opslagsystemen altijd warmteonttrekking voor verwarming in de winter gecombineerd met koudeonttrekking voor koeling in de zomer. Bij de warmteonttrekking wordt een warmtepomp gebruikt om de warmte op te waarden naar een voor verwarming bruikbaar temperatuurniveau en wordt het door de warmtepomp afgekoelde grondwater teruggebracht voor de koudeonttrekkingsperiode. In de toepassing van bewaring van bollenplantgoed treedt deze combinatie niet op.

Economisch gezien is een behoorlijke investering nodig (ordegrootte 250 k€) voor de aanleg van de twee benodigde grondwaterputten. Dit is rendabel als uitgegaan wordt van een systeemcapaciteit vanaf ca. 1 MW thermisch voor koeling. Dit is een capaciteit die nodig is voor ca. 1 ha glastuinbouwareaal waarbij de in de zomer aan de kas onttrokken warmte in de winter via een warmtepomp wordt benut voor de verwarming.

4.3.6 Tulpenbewaring bij ander setpointregime

Het doorgerekende setpointregime vraagt relatief grote koelvermogens. In H 2, referentiebewaarcel worden andere geadviseerde setpointregimes genoemd. In de praktijk wordt het daarin eerst genoemde regime: handhaaf ca. 4 tot 6 weken 25 °C, ga dan terug naar 20 °C en ga na 1 november terug tot 17 °C, veel toegepast, vooral bij soorten waarbij men verklijstering wil stimuleren. Daarom wordt dit regime doorgerekend om in de uitgangssituatie het effect op de koel- en verwarmingsenergie te bepalen. In Figuur 4.11 wordt dit regime samen met het verloop van de buitentemperatuur getoond.



Figuur 4.11. Verloop temperaturen buitenlucht en setpoint cel bij ander setpoint regime.

De berekende koelenergie bij warmteproductie door de bollen gebaseerd op een productie van 10 l CO₂ per ton per uur bedraagt nu 3 229 kWh (was 7 933 kWh) en voor verwarming is nu 4 089 m³ aardgas (was 1 672) nodig. Het ventilatorvermogen blijft 15 584 kWh.

Uit het verschil tussen figuren 4.1 en 4.11 is te zien dat er verschuiving van koelen naar verwarmen optreedt. De berekening laat zien dat de koelbehoefte meer dan gehalveerd is maar de verwarmingsbehoefte meer dan verdubbeld.

Bij een warmteproductie door de bollen gebaseerd op een productie van 5 l CO₂ per ton per uur zal de koelbehoefte verminderen tot 2 664 kWh en de warmtebehoefte toenemen tot 4 706 m³ aardgas.

Het setpointregime heeft dus een zeer grote invloed op het energiegebruik voor koeling en verwarming. Een koelvriendelijk regime vraagt meer verwarming en vice versa.

4.3.7 Bewaring lelie

Lelie wordt niet in de zomer maar in het najaar geoogst en wordt bewaard van oktober tot en met half januari bij een temperatuur van 2 °C en daarna tot en met maart bij -1 °C. Daarbij is de RV zo hoog mogelijk en omdat de leliebollen in plastic zijn ingepakt, geven deze geen waterdamp af. Verder is lelie niet gevoelig voor ethyleen zodat de ethyleenconcentratie bij leliebewaring geen rol speelt. Daarom wordt bij deze bewaring nauwelijks geventileerd. Verder zal bij deze lage temperaturen de ademhaling van de bollen laag zijn zodat de eigen warmteproductie kan worden verwaarloosd.

Als bij leliebewaring niet of nauwelijks wordt geventileerd dan zal het energiegebruik voor koeling dus vooral afhangen van de transmissieverliezen door de celwanden. Voor de referentiecél met afmetingen 7x10x6m is aangenomen dat de wanden met buurcellen voorzien zijn van 10cm PU schuim en buitenwanden met 12 cm PU schuim. Voor de benodigde koelingsenergie is verder van belang welke wanden grenzen aan binnenruimten, welke aan buurcellen met hetzelfde setpoint en welke aan buitenwanden. Aangenomen wordt hier dat in de voor koeling meest ongunstige situatie 3 wanden plus plafond grenzen aan een binnenruimte (schuur) die op een temperatuur van 15 °C wordt gehouden en de achterwand aan een buitenmuur. Voorts dat de vloer extra zwaar is geïsoleerd om opvriezen van de bodem en daardoor schade aan de betonvloer te voorkomen.

Als in het geheel niet wordt geventileerd zou voor de bewaarperiode van 1 oktober tot eind maart de benodigde energie voor koeling van de referentiecél slechts ca 1200 kWh bedragen en kan de verwarmingsenergie worden verwaarloosd. Dit is een lage energiebehoefte vergeleken met die voor de bewaring van tulpenplantgoed. Als echter geventileerd wordt met een kwart van die gebruikelijk bij tulpenplantgoed neemt de benodigde koelenergie toe tot ca. 11.500 kWh met daarbij ca. 2.500 kWh voor de ventilatoren. Bij celventilatie die een tiende is van die bij tulpenplantgoed is de benodigde koelenergie wordt dit ca. 5.200 kWh met daarbij ca. 500 kWh voor de ventilatoren. De eerdere bevindingen rond energiebesparende opties bij bewaring van tulpenplantgoed zijn dus ook hier geldig.

Voor efficiënt energiegebruik is ook hier de lay out van de cel van groot belang. De koeler moet zo zijn gedimensioneerd dat het temperatuurverschil tussen verdampers en cellucht minimaal is, de condensator moet zo zijn opgesteld en gedimensioneerd dat hij zijn warmte gemakkelijk kwijt kan zodat de condensortemperatuur dicht bij de minimaal te bereiken temperatuur blijft. Zodoende wordt met maximaal haalbare COP gekoeld en hoeft dus minimaal elektrische energie (kWh) te worden gebruikt om de benodigde koelenergie te leveren. In de berekeningen is, zoals eerder opgemerkt, steeds met een COP op koeling van 3 gerekend.

5 Conclusies

De bewaarperiode van tulpenplantgoed wordt gekarakteriseerd door periodes waarin gekoeld of waarin verwarmd moet worden. Een overwegend patroon van koeling overdag en verwarmen 's nachts komt niet algemeen voor. Perioden met verwarmen en koelen wisselen elkaar af met uiteraard hun dag-nachtpatronen.

De in de cel geproduceerde warmte door de ventilatoren en door de bollen zelf vergroot de koelbehoefte en verkleint de warmtebehoefte.

Van de energiebesparende maatregelen is beperking van het ventilatiedebiet de enig haalbare optie, die bovendien zowel de koelbehoefte, de verwarmingsbehoefte als het benodigde ventilatorvermogen vermindert. Dit zal alleen toegepast kunnen worden als dit geen negatieve gevolgen heeft voor de kwaliteit van het product. Eerder onderzoek heeft aangetoond dat de veiligheidsmarge bij 100% ventilatie wel heel ruim is. Monitoren van het ethyleengehalte van de cellucht maakt scherpe ventilatie bij kleine debieten mogelijk en is daarom de meest effectieve en goedkope methode om energie te besparen.

Bij volledige ventilatie is de energieconsumptie door de ventilatoren de grootste energiepost, daarna komt dat voor de koeling en daarna dat voor de verwarming.

De optie warmte/koudeterugwinning uit de ventilatielucht vermindert wel sterk de warmtebehoefte maar nauwelijks de koelbehoefte zodat dit niet haalbaar is. Naarmate meer warmte- koudeterugwinning wordt toegepast wordt de periode waarin koeling nodig is langer, daarbij is wel de benodigde koelcapaciteit lager.

Warmte-/koudebuffering is ook niet haalbaar door te weinig periodiciteit in de warmte-/koudebehoefte waardoor het aantal keren dat het warmte- en/of koudebuffer wordt geladen en ontladen te laag is. Hierdoor zijn grote buffers nodig die niet efficiënt gebruikt worden. Bovendien is er geen evenwicht in het koude- en warmtebuffer.

Gebruik van grondwater voor de koeling van de ventilatielucht of afvoer van de condensorwarmte is technisch mogelijk. Het stuit evenwel op het feit dat de afvoer van warmte niet gecombineerd kan worden met de afvoer van kou zodat de bodem over een periode van een jaar niet thermisch neutraal wordt gebruikt. Het minimaal benodigde investeringsniveau is hoog zodat ook dit toepassing in de weg zit.

Een algemeen probleem bij de bewaring van tulpenplantgoed is dat de installaties een beperkte periode in het jaar gebruikt worden. Hoewel momentaan het energiegebruik hoog is, moeten eventuele energiebesparende maatregelen in 4 maanden worden terugverdiend. Er wordt in een koelinstallatie geïnvesteerd om de kwaliteit van het product te garanderen. Het terugverdienen van energiebesparende maatregelen uit energiebesparing over een korte periode is daarbij moeilijk.

De conclusies over energiebesparende opties die voor de bewaring voor tulpenplantgoed zijn getrokken blijven voor de bewaring van lelie onverkort gelden.

In de beschouwingen is er van uit gegaan dat de bewaar- koelcel alleen voor tulpenbewaring, resp. leliebewaring wordt gebruikt. Op veel bedrijven is een combinatie van functies mogelijk, bv een broeierij heeft kassen voorzien van seizoensopslag voor warmte en koude. Dan is het zeer aantrekkelijk om het dan beschikbare koude grondwater ook in te zetten voor directe koeling of om de condensor op lage temperatuur te houden en zo de COP van de installatie te verhogen. Ook komt het voor dat meerdere gewassen worden geteeld of dat bij bewaring zowel gekoeld als verwarmd moet worden, zodat jaarrond tegelijkertijd warmte en koude nodig is op het bedrijf. Dan is het zeer aantrekkelijk de koelmachine tegelijkertijd als warmtepomp in te zetten, eventueel, bij voldoende periodiciteit in de warmte- en koudevraag, via dag-nacht buffers. Deze mogelijkheden moeten per bedrijf worden geëvalueerd en kunnen niet in de voorliggende brede verkenning worden meegenomen.

