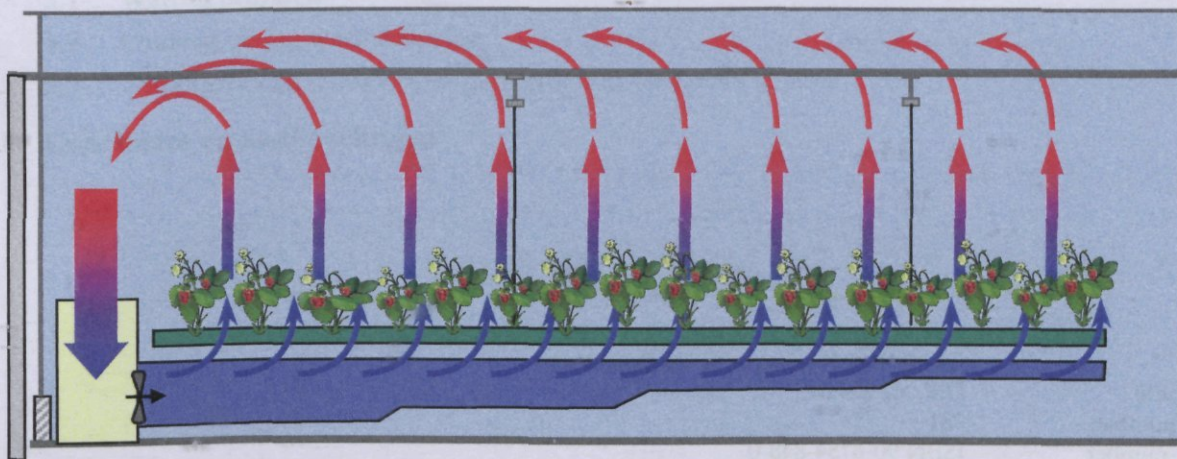


Quick Scan Koeling in de aardbeienteelt



H.F. de Zwart

rapportnummer 281

0577571 MS1

Colofon

Dit onderzoek is Gefinancierd door



Title	Quick Scan Koeling in de aardbeienteelt
Author(s)	H.F. de Zwart
A&F number	281
ISBN-number	ISBN 90-6754-848-0
Date of publication	November 2004
Confidentiality	non
Project code.	PJ' nr 11.883

Agrotechnology & Food Innovations B.V.
P.O. Box 17
NL-6700 AA Wageningen
Tel: +31 (0)317 475 024
E-mail: Feije.deZwart@wur.nl
Internet: www.agrotechnologyandfood.wur.nl

© Agrotechnology & Food Innovations B.V.

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, hetzij mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele fouten of onvolkomenheden.

All right reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publisher. The publisher does not accept any liability for the inaccuracies in this report.

This report is authorised by: H.F. de Zwart



The quality management system of Agrotechnology & Food Innovations B.V. is certified by SGS International Certification Services EESV according to ISO 9001:2000.

Inhoud

1 Inleiding	3
2 Warmte onttrekkingscapaciteit met koude oppervlakken	5
3 Koeling met luchtbehandelings-kasten	7
4 Resultaten	14
4.1 Koelvermogens	18
5 Koeling van aardbeien tegen de achtergrond van het Themato-concept	20
Inleiding	20
5.1 Warmtepompen	20
5.2 Ondergrondse warmteopslag	22
5.3 Ondergrondse energieopslagsystemen in de aardbeienteelt	23
6 Conclusies en aanbevelingen	26

1 Inleiding

In de aardbeien teelt wordt veel hinder ervaren van hoge nachttemperaturen. Het terugbrengen van die temperatuur naar een niveau van 8 tot 10 °C leidt tot een tragere opbouw van het aantal graaddagen en daarmee tot de mogelijkheid om de teelt te verlengen.

In de zomer is de gewenste nachttemperatuur vaak zelfs lager dan de buitentemperatuur dus de enige manier om zulke lage temperaturen te realiseren is de inzet van geforceerde koeling.

In dit rapport wordt getoond hoe zo'n systeem met geforceerde koeling er uit kan zien. Er wordt aangegeven dat koeling in de vorm van koude (gevinde) buizen weinig soelaas zullen bieden en dat daarom verder is gerekend met systemen op grond van luchtbehandelingskasten (hfdstk 2). Nadat deze keus is beargumenteerd wordt in hoofdstuk 3 uitgerekend welke prestaties van een luchtbehandelingssysteem kunnen worden verwacht. Hierbij worden twee capaciteiten vergeleken, namelijk een luchtbehandelingssysteem met een warmte-overdrachtscoëfficiënt van $7 \text{ W}/(\text{m}^2_{\text{kas}} \text{ K})$ en een systeem op basis van $14 \text{ W}/(\text{m}^2_{\text{kas}} \text{ K})$.

In hoofdstuk 4 wordt bekeken in hoeverre deze koelsystemen de nachtelijke kasluchttemperatuur kunnen verlagen, maar ook in hoeverre deze systemen kunnen worden ingezet om overdag de kas gesloten te kunnen houden. Voor beide functies wordt bepaald hoeveel koude hiervoor nodig is.

Koeling van de kas overdag leidt eveneens tot een verlaging van de etmaaltemperatuur en daarmee tot een mogelijke verlenging van het groeiseizoen. Bovendien kan in de kas de CO_2 concentratie hoger worden gehouden en/of kan er worden bespaard op zuivere CO_2 . Ook deze effecten worden in beeld gebracht.

Tenslotte wordt in hoofdstuk 5 beschreven in hoeverre de beoogde kaskoeling aansluit bij het concept voor verwarming van de kas in de winter met warmteoverschotten uit de zomer (het gesloten kas-concept).

In hoofdstuk 6 worden een aantal conclusies getrokken en wordt tevens het perspectief van een volledig gesloten aardbeienkas geschetst.

2 Warmte onttrekkingscapaciteit met koude oppervlakken

In 2002 heeft A&F onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om kassen te koelen met behulp van passieve koel-elementen (De kas als zonne-energie oogster, H.F. de Zwart en G.L.A.M. Swinkels, 2002). Uitgangspunt was dat er door de verwarmingsbuizen ook als koel-buizen te gebruiken op een goedkope wijze warmte aan de kas kon worden onttrokken.

Er is ge-experimenteerd met verschillende buis-vormen (gewone 51-ers, dikkere buizen, overlans gevinde buizen en ribbenbuizen). De metingen vonden overdag in volle zon in een vochtige las plaats. In dit project gaat de eerste aandacht uit naar de koelprestatie 's nachts en in een veel minder vochtige lucht. Daarom zijn de genoemde getallen op grond van de in het voornoemde rapport beschreven theorie wat aangepast



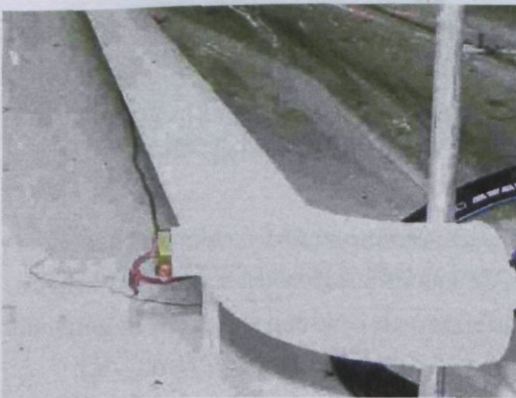
Ribbonbuis (buitendiameter 10 cm):

$$7 \text{ W}/(\text{m}_{\text{buis}} \text{ K})$$



Gevinde buis (3 vinnen van 5 cm):

$$3 \text{ W}/(\text{m}_{\text{buis}} \text{ K})$$



Gewone buizen:

$$2.8 \text{ W}/(\text{m}_{\text{buis}} \text{ K}) \text{ bij } 70 \text{ mm buis}$$

$$2 \text{ W}/(\text{m}_{\text{buis}} \text{ K}) \text{ bij } 51 \text{ mm buis}$$

Gegeven dat de warmtecapaciteit van een kas ongeveer 60 kJ per °C bedraagt en de kas op warme dagen in de nacht zo'n 10 °C moet afkoelen dan kan een grove inschatting worden gemaakt van het vereiste koelvermogen. Als er geen extra afkoeling door de buitenlucht en geen extra opwarming vanuit de ondergrond plaatsvindt dan zal bij een gemiddeld koelvermogen van 55 W/m² kas de afkoeling zo'n 3 uur duren.

Als we even aannemen dat gedurende de afkoeling de kasluchttemperatuur gemiddeld 15 °C is (tussen 20 en 10 °C) en een koelende buis gemiddeld 7.5 °C (5 °C aanvoer en 10 °C retour) dan is de koelcapaciteit van een 51 mm buisverwarmingssysteem met 1.15 meter buis per m² kas standaard verwarmingsnet 17 W/(m²_{kas}), wat zou betekenen dat in de zomer de nacht alweer bijna voorbij is tegen de tijd dat de gewenste temperatuur bereikt is.

Andere buistypen doen het beter. De gevinde buis komt op bijna 25 W/(m²_{kas}) en de ribbenbuis haalt 60 W/m². Hieruit zou dus geconcludeerd moeten worden dat alleen de dure ribbenbuis het afkoelen van de kas naar 10 °C in 3 uur binnen handbereik brengt.

De bovenbeschreven sommetjes dienen slechts als grove indicaties en gaan voorbij aan het feit dat rondom de koelende elementen gebieden met koude lucht zullen ontstaan. Dit maakt dat het best kan zijn dat het gewas al behoorlijk is afgekoeld terwijl de grond en de kasconstructie nog warm is. Het daadwerkelijk uitrekenen van dit soort nuancerings is zeer arbeidsintensief en valt daarom buiten de scope van dit onderzoek.

De algemene conclusie is echter dat passieve koeling door koude buizen veel of dure buizen vergt en dan nog tot een beperkte capaciteit zal leiden.

Ter oriëntatie: indien de kaslucht ook overdag gekoeld moet worden bij een kasluchttemperatuur van 25 °C en een (zeer lage) gemiddelde buistemperatuur van 7.5 °C dan zal één ribbenbuis per teeltrij 140-180 W/m² kunnen koelen. Dit is ongeveer 28% van de koelbehoefte op warme zomerse dagen.

Daarbij komt nog dat deze lage gemiddelde buistemperatuur een weinig realistische situatie is omdat het bijbehorende koelwaterdebiet in dat geval (door het geringe temperatuurverschil (van 5 naar 10 °C)) 300 m³/(ha uur) bedraagt, wat ruim 3 keer zo groot is als het gebruikelijke debiet door een verwarmingssysteem)

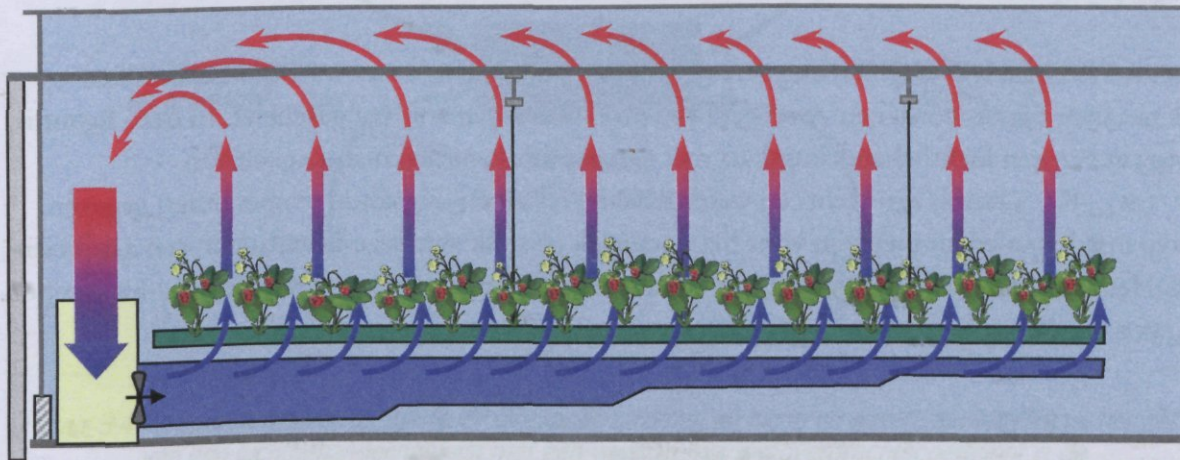
Op grond van de bovenstaande overwegingen zal in de rest van dit onderzoek worden uitgegaan van een andere vorm van koeling, namelijk een systeem op basis van geforceerde ventilatie. Bij geforceerde ventilatie kunnen veel grotere warmte-overdrachtscoëfficiënten worden gerealiseerd en kan bovendien worden gezorgd voor een homogenere temperatuurverdeling.

Gegeven de ervaringen met het sommetje voor de ribbenbuis zou een warmte-overdrachtscoëfficiënt van 7 W/(m²_{kas} K) voldoende moeten zijn om de kas in 3 uur koud te kunnen krijgen. Om gevoel te krijgen voor het effect van grotere capaciteiten wordt ook een berekening gemaakt met een systeem dat twee maal zo groot is, dus warmte kan uitwisselen met 14 W/(m²_{kas} K).

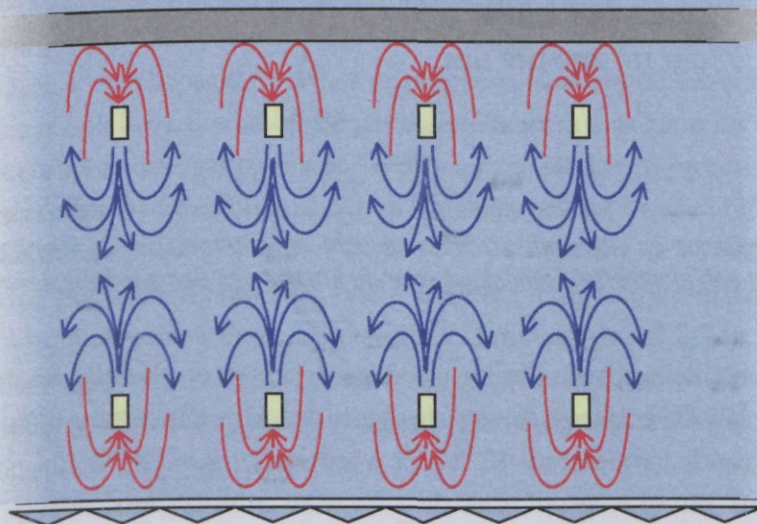
3 Koeling met luchtbehandelings-kasten

In een koelsysteem dat gebaseerd is op luchtbehandelingskasten wordt kaslucht uit de kas gezogen en over een koud oppervlak geblazen.

Ter oriëntatie worden in figuur 3-1 en 3-2 schetsjes gegeven van mogelijke systemen.



Figuur 3-1 Zijaanzicht van het luchtcirculatiesysteem, vergelijkbaar met het systeem dat beproefd wordt bij *themato*

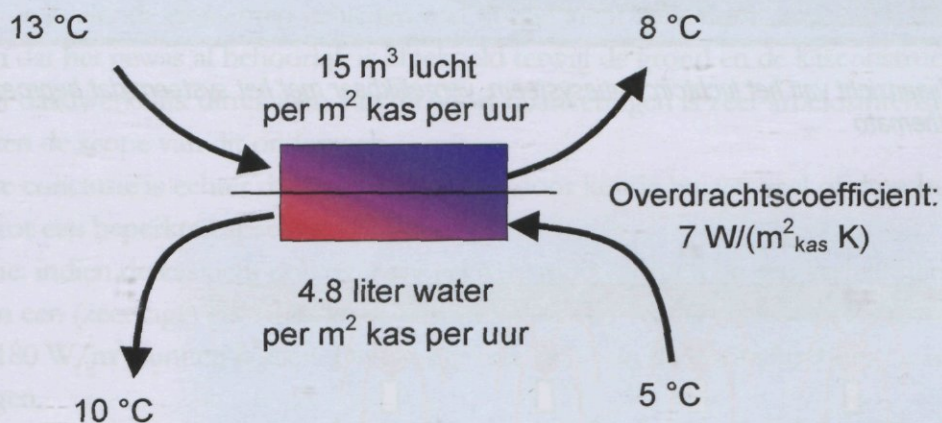


Figuur 3-2 Bovenaanzicht koelsystemen op basis van koelunits met een vrije uitblaas. Dit soort systemen wordt gebruikt bij teelten zoals *phalenopsys* en *fresia*.

Het systeem dat in figuur 3-1 wordt getoond is vergelijkbaar met de installatie die op dit moment bij de gesloten tomatenteelt bij Themato wordt beproefd. Hierbij wordt lucht onder de teeltgoten ingeblazen en wordt de warme lucht aan de kopgevels aangezogen. Er is in dit ontwerp één luchtbehandelingskast per teeltrij.

Het systeem dat in figuur 3-2 is geschetst maakt gebruik van koel-units zoals die in koelcellen worden toegepast. Met dit soort systemen is in de tuinbouw al aardig wat ervaring in de teelt van phalenopsys (een orchidee-soort).

In beide systemen wordt de koeling gerealiseerd door een lucht/water warmtewisselaar. In onderstaande figuur wordt een voorbeeld van zo'n overdrachtsproces geschetst. In deze figuur is uitgegaan van een luchtbehandelingskast met een warmte-overdrachtscapaciteit van $7 \text{ W}/(\text{m}^2_{\text{kas}} \text{ K})$. Daarbij zijn lucht- en waterdebieten en in- en uitgaande temperaturen gegeven die typerend zouden kunnen zijn voor het nachtelijk gebruik van deze installatie in een aardbeienteelt. Het luchtdebiet is in dit geval 15 m^3 lucht per m^2 kas per uur en het waterdebiet 4.8 liter per m^2_{kas} per uur (48 m^3 water per ha per uur). Er wordt $28 \text{ W}/\text{m}^2_{\text{kas}}$ overgedragen



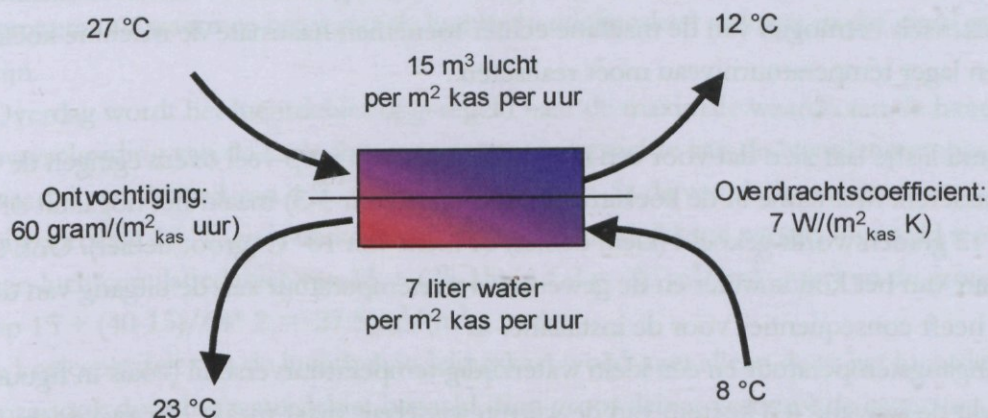
Figuur 3-3 Temperaturen van ingaande en uitgaande stromen en lucht- en waterdebieten tijdens het nachtelijk bedrijf van een luchtbehandelingskast voor de koeling van een aardbeienteelt.

Wanneer deze zelfde luchtbehandelingskast overdag wordt toegepast in een kas waarin de gemiddelde luchttemperatuur $25 \text{ }^\circ\text{C}$ bedraagt dan zal de ingaande luchttemperatuur bijvoorbeeld $27 \text{ }^\circ\text{C}$ kunnen zijn en de uitgaande temperatuur $12 \text{ }^\circ\text{C}$. Er wordt in dat geval $84 \text{ W}/\text{m}^2_{\text{kas}}$ voelbare warmte overgedragen, wat dus 3 maal zo groot is als de warmte-overdracht die deze luchtbehandelingskast s' nachts weet te realiseren.

Als er daarbij ook nog condensatie van waterdamp in de luchtbehandelingskast optreedt geeft dit nog een zekere extra koeling, waardoor de kas op dat moment met zo'n $120 \text{ W}/\text{m}^2$ gekoeld wordt en er bijna 60 gram ontvochtiging per m^2 per uur optreedt.

De getalsmatige uitwerking van deze situatie wordt weergegeven in figuur 3-4.

Het blijkt dat in dit plaatje een ruim 4 keer zo grote warmte-verdracht plaatsvindt als in figuur 3-3 ($120 \text{ W/m}^2_{\text{kas}}$ in plaats van $28 \text{ W/m}^2_{\text{kas}}$), terwijl het luchtdebiet gelijk is en het waterdebiet niet veel groter. Dit komt door de grotere temperatuurverschillen over de waremtewisselaar.



Figuur 3-4 Temperaturen van ingaande en uitgaande stromen en lucht- en waterdebieten tijdens het gebruik van een luchtbehandelingskast met een voelbare warmteoverdrachtscoëfficiënt in de aardbeienteelt overdag

Bestudering van de figuren 3-3 en 3-4 geeft al aan dat er bij het gebruik van een koelinstallatie een aantal variabelen in het spel zijn die de performance van de installatie beïnvloeden.

In onderstaand lijstje worden de belangrijkste genoemd.

- Overdrachtscoëfficiënt:

Deze wordt bepaald door het warmtewisselend oppervlak in de luchtbehandelingskast, maar ook beïnvloed door de stroomsnelheid van de lucht die door de luchtbehandelingskast blaast. In de praktijk zal de productspecificatie iets zeggen over de maximale overdrachtscapaciteit, die gerealiseerd zal worden bij het maximaal luchtdebiet

- Luchtdebiet:

Hoe hoger het luchtdebiet, hoe kleiner het temperatuurverschil tussen ingaande en uitgaande lucht. Voor een homogeen klimaat in de kas is een hoog debiet wenselijk, maar als de lucht wordt verspreid met slangen of buizen zullen deze een grote diameter moeten hebben om het benodigde ventilatorvermogen nog een beetje binnen de perken te houden.

- Waterdebiet:

Een hoog waterdebiet geeft een luchtbehandelingskast een groot koelvermogen, maar bemoeilijkt de mogelijkheden om van seizoensopslag-systemen gebruik te maken. Immers, als het koelwater maar een beetje wordt opgewarmd, moeten er veel liters gebruikt worden om een zekere hoeveelheid energie weg te koelen en zal een opslagsysteem gauw leeg zijn.

- **Temperatuur van het koude water**

In het voorbeeld van figuur 3-3 en 3-4 is uitgegaan van water met een temperatuur van 5 en 8 °C. Zou hier een lagere temperatuur zijn gekozen dan was de koelcapaciteit groter geworden en/of het waterdebiet zijn afgenomen. Bij gebruik van een koelmachine zal het elektrisch vermogen van de machine echter toenemen naarmate de machine koeling op een lager temperatuurniveau moet realiseren..

Bovenstaand lijstje laat zien dat voor een uitgebalanceerd ontwerp veel overwegingen de revue moeten passeren. Met name in de koelsituatie overdag (figuur 3-3) maakt het nogal uit of er met lucht van 12 graden wordt gekoeld (klein debiet) of lucht van 18 °C (groot debiet). Ook de temperatuur van het koude water en de gewenste watertemperatuur aan de uitgang van de installatie heeft consequenties voor de installatie.

Een lage ingangstemperatuur en een klein waterzijdig temperatuurverschil (zoals in figuur 3-3 en 3-4) beperkt de omvang (en kosten) van de warmtewisselaar, maar maakt een zwaardere koelmachine noodzakelijk, welke duurder zal zijn en meer elektriciteit zal verbruiken.

Al deze afwegingen vragen om een uitgebreide analyse, waarbij de invloed van de verschillende keuzen moet worden beoordeeld aan de hand van de vaste en variabele kosten. Een dergelijke optimalisatie valt buiten de scope van dit project zodat in het vervolg van dit rapport met min of meer intuïtieve keuzen zal worden gewerkt.

Hieronder worden de gemaakte keuzes verwoord en beargumenteerd.

- **Koudwatertemperatuur**

De temperatuur van het koude water voor de koeling wordt 's nachts (van een uur na zonsondergang tot een uur voor zonop) op 5 °C ingesteld. De rest van het etmaal (dus ten behoeve van koeling overdag) wordt de aanvoertemperatuur op 8 °C ingesteld.

Deze keus is gemaakt omdat op deze manier aan de ene kant overdag het gebruik van minder extreem koud koelwater mogelijk wordt en aan de andere kant 's nachts toch de beoogde 8 °C kasluchttemperatuur gerealiseerd kan worden met acceptabele waterdebieten. In de resultaten zal worden beschreven hoeveel m³ koud water van 5 °C en hoeveel m³ van 8 °C per jaar nodig zal zijn

- **Luchtdebiet**

De in figuur 3-3 geschetste situatie wordt als mooie combinatie van temperaturen en debieten beoordeeld. Het temperatuurverschil van tussen de aangezogen en uitgeblazen lucht in figuur 3-4 wordt als erg groot beoordeeld. In de berekeningen zal daarom in de koelcondities overdag het luchtdebiet groter worden gekozen, namelijk maximaal 25 m³/(m²_{kas} uur) voor de warmtewisselaar met een maximale overdrachtscapaciteit van 7 W/(m²_{kas} K) en 40 m³/(m²_{kas} uur) bij de berekeningen met de grotere installatie.

Deze luchtdebieten betekenen dat bij gebruik van luchtverdeelslangen zoals in figuur 3-1 is getoond de slangdiameter bij de luchtbehandelingskast bij de kleine variant (met maximaal 25 m³/(m²_{kas} uur)) 31 cm zal moeten zijn en bij de zwaardere variant 39 cm. In de berekeningen zal worden uitgegaan van een regelbaar luchtdebiet. Dit om de

elektriciteitskosten te beperken. In beide installaties (dus bij de kleine en bij de grote variant) wordt 's nachts gekoeld met een luchtdebiet $15 \text{ m}^3/(\text{m}^2_{\text{kas}} \text{ uur})$. Het zal uit de rekenresultaten blijken dat onder dit uitgangspunt bij de installatie met de grotere warmtoverdrachts capaciteit minder liters koud water nodig zijn omdat de gemiddelde temperatuur waarmee het water de luchtbehandelingskast uitkomt in dat geval groter zal zijn.

Overdag wordt het luchtdebiet opgeregeld naar de maximale waarde aan de hand van de overschrijding van de kasluchttemperatuur ten opzichte van de 'ventilatietemperatuur', waarbij een P-band van $4 \text{ }^\circ\text{C}$ wordt aangehouden. Is de ventilatietemperatuur bijvoorbeeld $18 \text{ }^\circ\text{C}$ en is de kaslucht $20 \text{ }^\circ\text{C}$ dan zal de kleine variant ingesteld worden op een luchtcirculatie debiet van $15 + (25-15)/4 * 2 = 20 \text{ m}^3/(\text{m}^2_{\text{kas}} \text{ uur})$ en de grote variant op $15 + (40-15)/64 * 2 = 27.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2_{\text{kas}} \text{ uur})$.

- De koelcapaciteit van de luchtbehandelingskast wordt niet alleen door het luchtdebiet, maar ook door het waterdebiet bepaald. Een groot debiet vergroot de capaciteit, maar zal ook tot grote hoeveelheden koelwater leiden. Daarom wordt ook op dit punt een min of meer intuïtieve keus gemaakt en wel de volgende:

Het waterdebiet wordt zodanig geregeld dat de uitgaande watertemperatuur niet lager wordt dan $2 \text{ }^\circ\text{C}$ onder de luchttemperatuur, met een minimum van $8 \text{ }^\circ\text{C}$.

- In alle berekeningen worden de ramen overdag alleen op temperatuur geopend op het moment dat het luchtbehandelingssysteem uitgeregeld is (dus op maximaal luchtdebiet staat). De raamregeling loopt dan als een soort nageschakelde regelaar achter de luchtbehandelingsinstallatie aan en begint dus pas te werken als de temperatuur $4 \text{ }^\circ\text{C}$ boven de ventilatietemperatuur ligt. De ramen worden vervolgens ook weer met een Pband van $4 \text{ }^\circ\text{C}$ geopend.

's Nachts is er niet zo'n groot voordeel van het gesloten houden van de kas. Op die momenten zou het dus zonde van de energie zijn om mechanisch te koelen, als er ook met buitenlucht gekoeld kan worden. Daarom wordt er in de regeling van de gekoelde kas gestreefd naar gebruik van ramen als koelsysteem gedurende de nacht zolang het buiten $3 \text{ }^\circ\text{C}$ kouder is dan de ventilatietemperatuur. Is het buiten warmer dan 3 graden onder de ventilatietemperatuur, dan worden de ramen uiteraard niet geopend.

Naast de regeling op temperatuur worden de ramen ook gebruikt voor de afvoer van vocht. De koelinstallatie voert echter ook vocht af, zodat de behoefte aan ventilatie op vocht in de situatie waarbij een koelsysteem gebruikt wordt veel kleiner zal zijn. In principe kan de koel-installatie ook voor de ontvochtiging sec worden gebruikt. In dat geval zal er, tegelijk met de koeling, ook verwarmd moeten worden. Het perspectief van deze theoretische mogelijkheid vereist een uitgebreide analyse en wordt derhalve in dit rapport buiten beschouwing gelaten.

- De drukval over de luchtbehandelingskasten wordt op 400 Pa gesteld. Het elektriciteitsverbruik dat vervolgens nodig is voor de luchtcirculatie volgt dan bij een willekeurig debiet uit

$$E_{\text{verbruik}} = 400 \text{ Pa} * \text{totaalLuchtdebiet} / (0.6 * 3.6 * 10^6) \quad [\text{kWh}]$$

Hierin is 0.6 het rendement waarmee de ventilator elektrisch vermogen omzet in arbeid ten behoeven van de verplaatsing van de lucht. De luchtbehandeling die in figuur 3-3 wordt getoond in een kast die 69 m² kas bedient (1.15 * 60) gebruikt dus bijna 0.2 kWh elektriciteit per uur (dat is een vermogen van 200 W).

Met alle bovengenoemde uitgangspunten wordt het effect van het gebruik van de koeling voor een aardbeienteelt gesimuleerd. Er wordt daarbij uitgegaan van een moderne kas met twee kappen op een 8 meter tralie.

Er worden twee (verlengde) teelten doorgerekend.

De eerst teelt start op 20 januari en loopt door tot 25 juni. De tweede teelt start op 27 juli en loopt tot 1 januari.

De stooklijn is 's nachts 8 °C en overdag 16 °C. Op een zonnige dag wordt de stooklijn 2 °C verhoogd in een lichttraject van 100 tot 300 W/m².

De ventilatielijn ligt overdag 1.5 °C boven de stooklijn. In de voornacht, tijdens de afkoeling van de kas wordt de ventilatielijn wat verder van de stooklijn afgelegd om niet alle warmte van de dag meteen weg te (hoeven) halen. In de nanacht, wordt er echter naar echt lage temperaturen gestreefd en wordt de ventilatietemperatuur vlak boven de stooklijn gelegd (1 °C er boven).

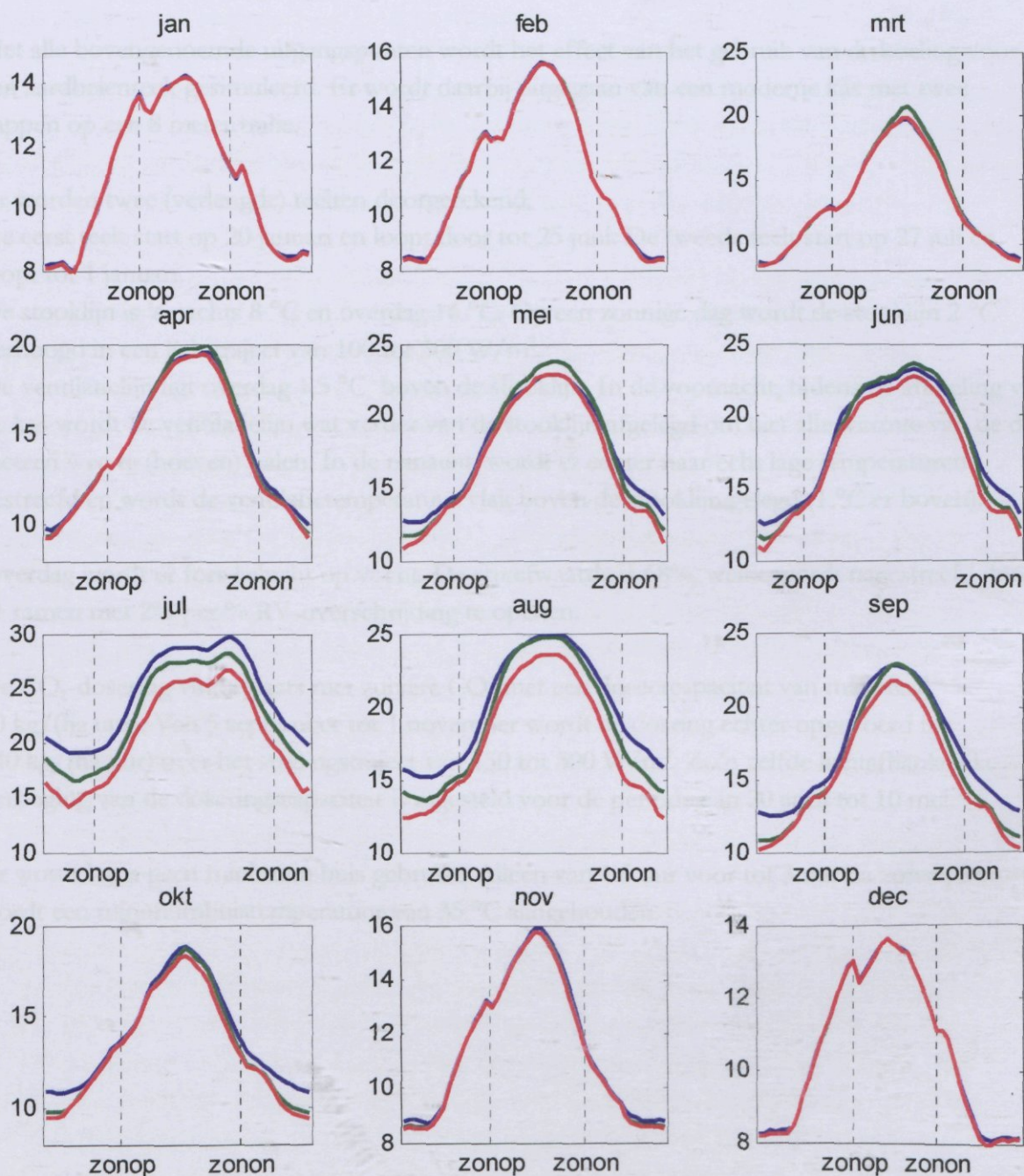
Overdag wordt er fors gelucht op vocht. De streefwaarde is 68%, welke wordt nagestreefd door de ramen met 2% per % RV-overschrijding te openen.

De CO₂-dosering vindt plaats met zuivere CO₂ met een doseercapaciteit van maximaal 60 kg/(ha uur). Van 5 september tot 1 november wordt de dosring echter opgevoerd tot 140 kg/(ha uur) over het stralingstraject van 150 tot 500 W/m². Zo'n zelfde lichtafhankelijke verhoging van de doseringscapaciteit is ingesteld voor de periode van 20 april tot 10 mei.

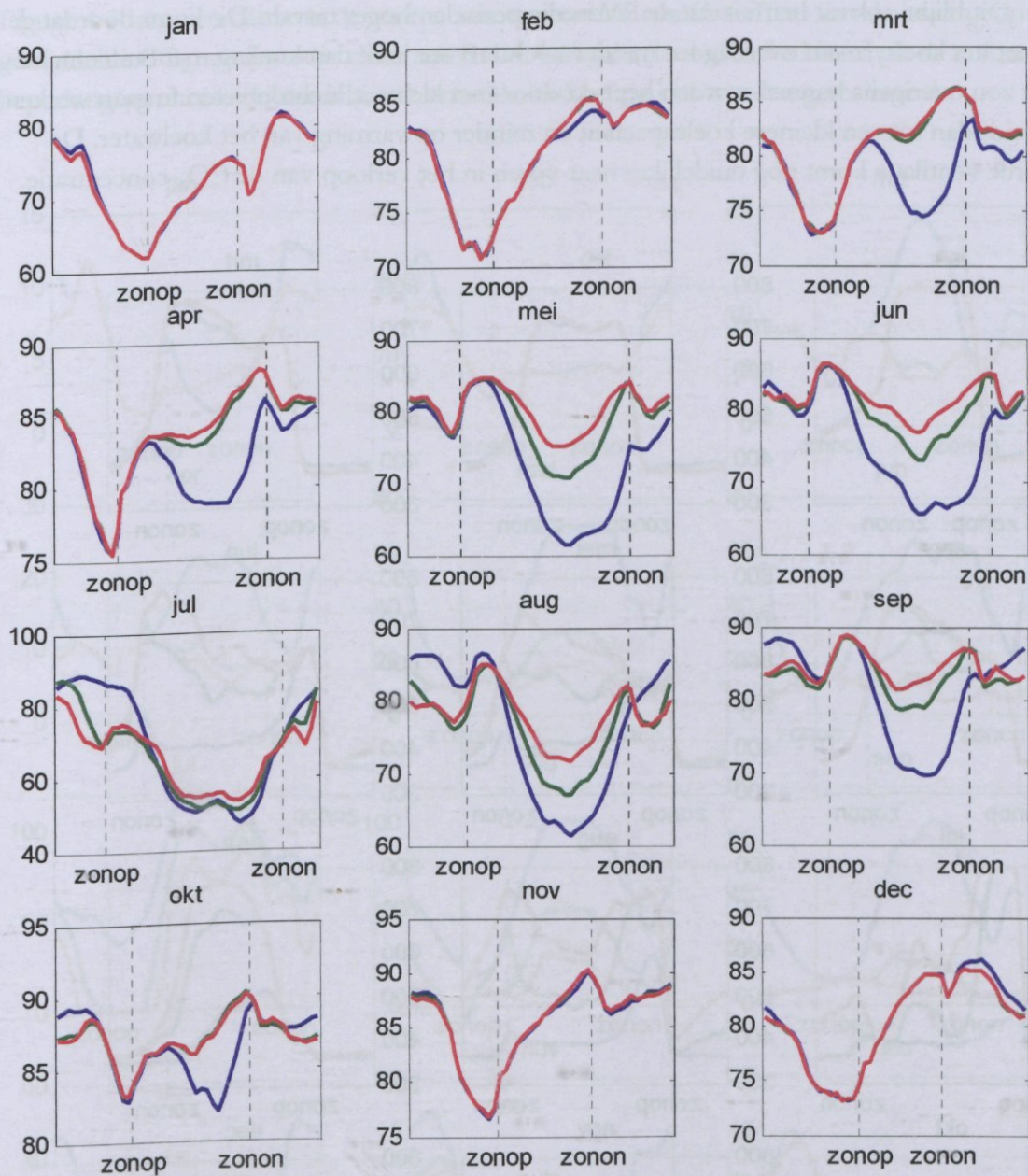
Er wordt bijna geen minimum buis gebruikt. Alleen van 1.5 uur voor tot 3 uur na zonsopkomst wordt een minimumbuis temperatuur van 35 °C aangehouden.

4 Resultaten

In onderstaande figuren worden overzichten gepresenteerd van het effect van de koel-installatie op de belangrijkste grootheden in de kas (temperatuur, luchtvochtigheid en CO₂-concentratie)



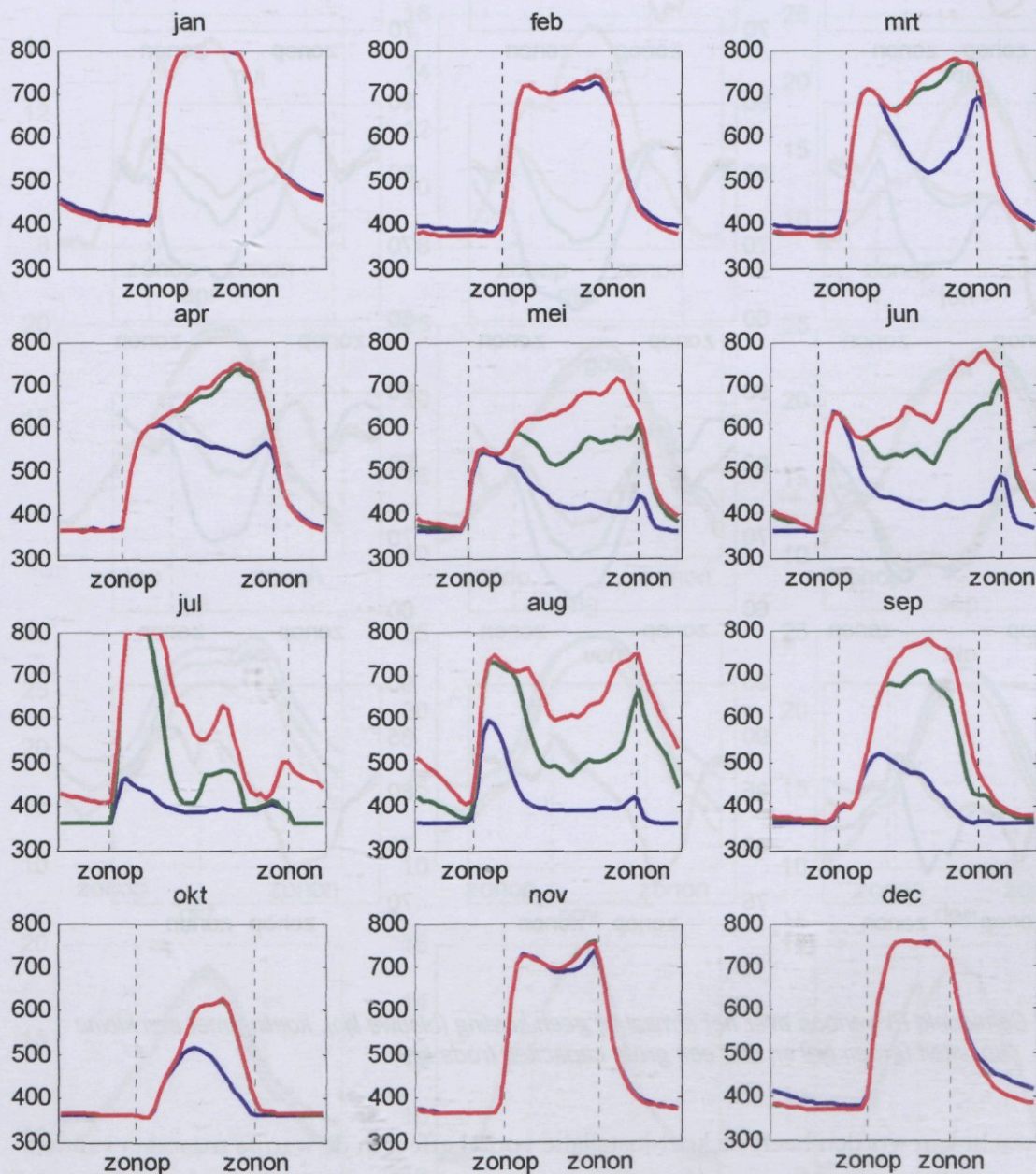
Figuur 4-1 Temperatuurverloop over het etmaal bij geen koeling (blauwe lijn), koeling met een kleine capaciteit (groene lijn) en met een grote capaciteit (rode lijn)



Figuur 4-2 Gemiddeld RV-verloop over het etmaal bij geen koeling (blauwe lijn), koeling met een kleine capaciteit (groen lijn) en met een grote capaciteit (rode lijn)

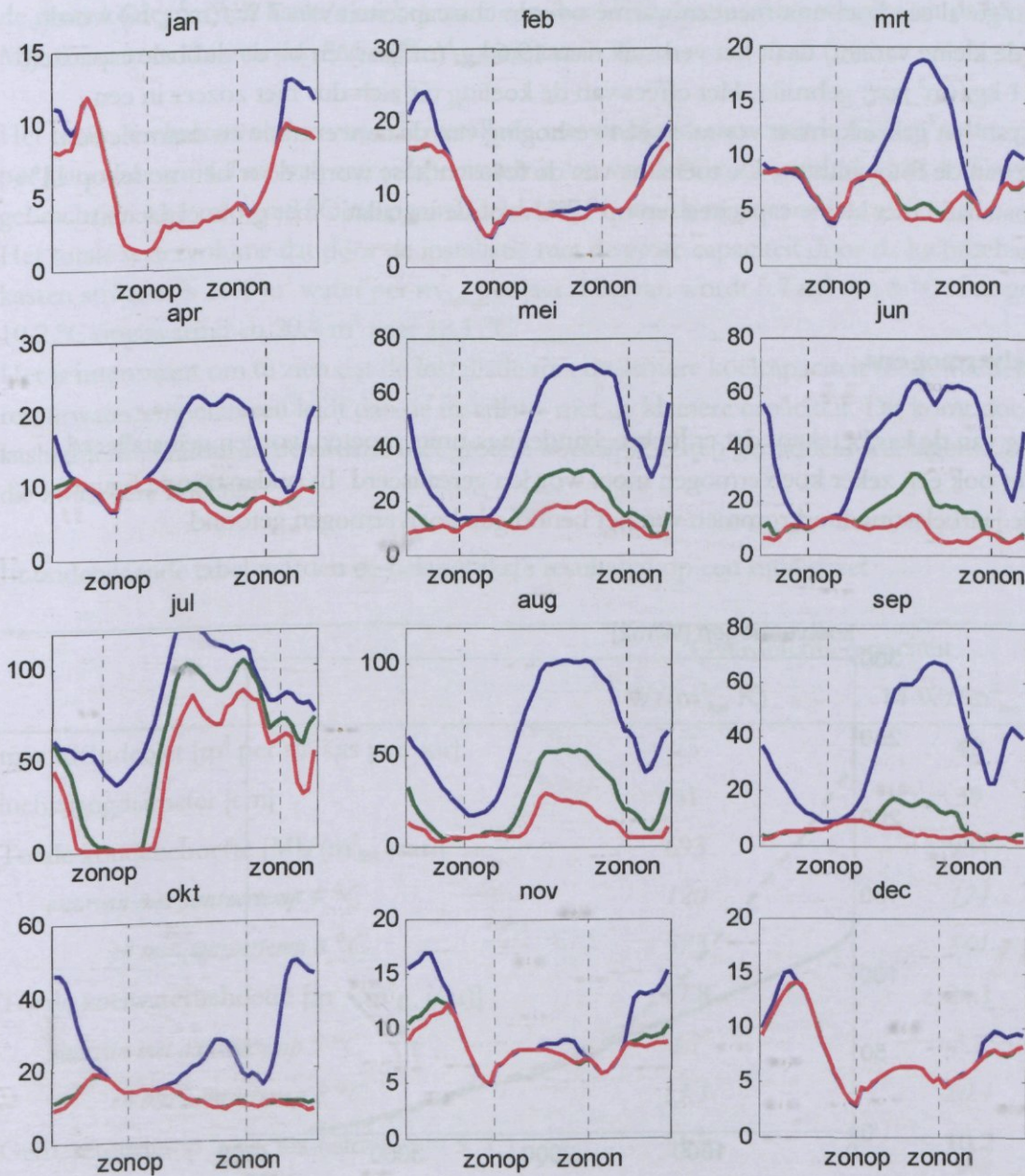
Zoals verwacht kan worden heeft de koel-installatie vooral effect in de warme maanden van het jaar (mei, juni, juli, augustus en september). Qua temperatuur is het duidelijk dat de koeling in het midden van de zomer over het hele etmaal effect heeft, terwijl in het voor- en najaar de koeling eigenlijk alleen 's nachts bijdraagt aan het realiseren van een lagere nachttemperatuur. In mei, september en oktober zijn de temperaturen overdag niet duidelijk lager omdat er in die perioden sprake is van substitutie van koeling middels ramen naar koeling met de luchtbehandelings-

installatie. Dit blijkt ook uit het feit dat de RV in die perioden hoger uitvalt. Dit komt doordat de koeling met het koelsysteem overdag tot minder vocht-afvoer leidt dan koeling met buitenlucht. Dit effect zou overigens kunnen worden beperkt door met kleinere luchtdebieten te gaan werken, maar dit leidt dan tot een kleinere koelcapaciteit en minder opwarming van het koelwater. De verminderde ventilatie komt nog duidelijker naar voren in het verloop van de CO₂-concentratie.



Figuur 4-3 Gemiddeld verloop van de CO₂-concentratie (ppm) over het etmaal bij geen koeling (blauwe lijn), koeling met een kleine capaciteit (groen lijn) en met een grote capaciteit (rode lijn)

Figuur 4-3 laat zien dat er in de warme zomermaanden een fors effect van de koeling op de gemiddelde CO₂ concentratie zichtbaar is. Dit kan geheel worden verklaard uit de enorme beperking van het ventilatiedebiet dat met de kaskoeling kan worden gerealiseerd.



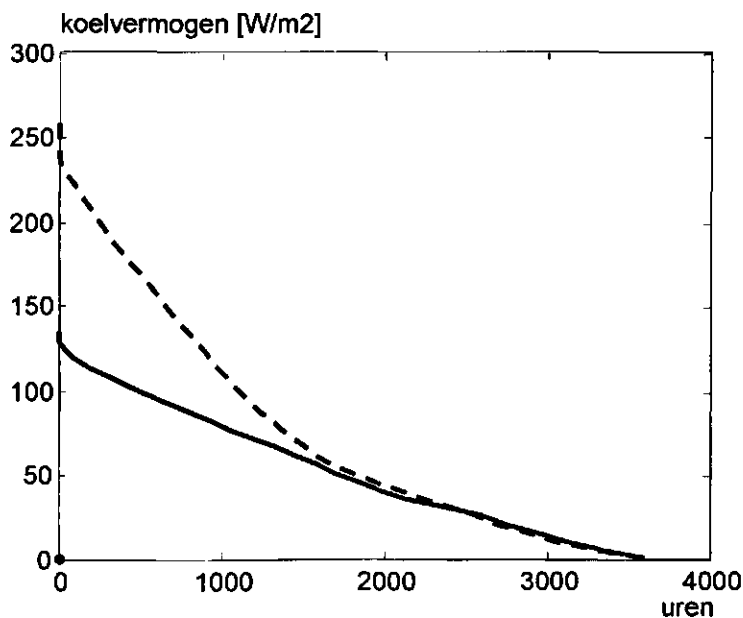
Figuur 4-4 Gemiddeld verloop van het ventilatiedebiet in m³ per m² per uur bij geen koeling (blauwe lijn), koeling met een kleine capaciteit (groen lijn) en met een grote capaciteit (rode lijn).

De vermindering van het ventilatieverlies leidt tot een verhoging van de CO₂-concentratie in periodes waarin de doseercapaciteit de beperkende factor is en tot een afname van het verbruik in periodes waarin de CO₂ verliezen gecompenseerd kunnen worden met de dosering.

Het simulatiemodel berekent voor de referentie-situatie een CO₂-gebruik van bijna 20.8 kg per m² per jaar. In geval een koel-unit met een warme-overdrachtscapaciteit van 7 W/(m²_{kas} K) wordt gebruikt (de kleine variant) daalt het verbruik naar 19.6 kg/(m² jaar) en bij de dubbele capaciteit wordt 18.1 kg/(m² jaar) gebruikt. Het effect van de koeling uit zich dus niet zozeer in een verlaging van het gebruik, maar vooral in een verhoging van de concentratie en daarmee een verhoging van de fotosynthese. De toename van de fotosynthese wordt door het model op 11% voor de installatie met kleine capaciteit en op 17% voor de installatie met grote capaciteit berekend.

4.1 Koelvermogens

De koeling van de kas betekent dat er luchtbehandelings-units moeten worden geïnstalleerd, maar dat er ook een zeker koelvermogen moet worden gerealiseerd. In onderstaande figuur worden de jaarbelastingduurkrommen van het benodigde koelvermogen getoond.



Figuur 4-5 Jaarbelastingduurkrommen van het benodigde koelvermogen voor de installatie met de kleine capaciteit (getrokken lijn) en met de grote capaciteit (onderbroken lijn).

De figuur laat zien dat de koelinstallatie ongeveer 3500 uur in werking is. De maximale koelcapaciteit voor de kleine installatie is 125 W/m²_{kas} en voor de grote installatie 230 W/m²_{kas}.

In totaal wordt in de kleine koelinstallatie $693 \text{ MJ/m}^2_{\text{kas}}$ onttrokken en in de installatie met de grote capaciteit wordt bijna $984 \text{ MJ/m}^2_{\text{kas}}$ onttrokken.

De koeling wordt voor het grootste deel overdag gerealiseerd. De kleine installatie onttrekt 120 MJ per m^2 per jaar gedurende de nachten en 573 MJ m^2 per jaar overdag. De installatie met de grote koelcapaciteit haalt 's nachts maar een heel klein beetje meer warmte uit de kas (124 MJ), maar onttrekt overdag $861 \text{ MJ/m}^2_{\text{kas}}$ per jaar.

Het totale koelwatervolume voor de installatie met de kleine capaciteit is 17.8 m^3 water per m^2_{kas} per jaar, waarvan 4.7 m^3 van een temperatuurniveau van $5 \text{ }^\circ\text{C}$ naar gemiddeld $11.1 \text{ }^\circ\text{C}$ wordt gebracht en 13.1 m^3 van $8 \text{ }^\circ\text{C}$ naar gemiddeld $18.5 \text{ }^\circ\text{C}$ wordt opgewarmd.

Het totale watervolume dat door de installatie met de grote capaciteit door de luchtbehandelingskasten stroomt is 26.1 m^3 water per m^2_{kas} per jaar. Hiervan wordt 5.7 m^3 van $5 \text{ }^\circ\text{C}$ naar gemiddeld $10.2 \text{ }^\circ\text{C}$ opgewarmd en 20.4 m^3 naar $18.1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Het is interessant om te zien dat de installatie met de grotere koelcapaciteit tot gemiddeld lagere retourwatertemperaturen leidt dan de installatie met de kleinere capaciteit. Dit komt doordat de kasluchttemperatuur in de situatie met grotere koelcapaciteiten gemiddeld wat lager is (juist door die zwaardere koeling).

In onderstaande tabel worden de belangrijkste resultaten op een rijtje gezet

	Overdrachts capaciteit	
	$7 \text{ W}/(\text{m}^2_{\text{kas}} \text{ K})$	$14 \text{ W}/(\text{m}^2_{\text{kas}} \text{ K})$
max luchtdebiet [m^3 per m^2 kas per uur]	25	40
luchtslangdiameter [cm]	31	39
Totale koudebehoefte [$\text{MJ}/(\text{m}^2_{\text{kas}} \text{ jaar})$]	693	984
<i>waarvan met aanvoertemp $5 \text{ }^\circ\text{C}$</i>	<i>120</i>	<i>124</i>
<i>en met aanvoertemp $8 \text{ }^\circ\text{C}$</i>	<i>573</i>	<i>861</i>
Totale koelwaterbehoefte [$\text{m}^3/(\text{m}^2_{\text{kas}} \text{ jaar})$]	17.8	26.1
<i>waarvan met aanvoertemp $5 \text{ }^\circ\text{C}$</i>	<i>4.7</i>	<i>5.7</i>
<i>en met aanvoertemp $8 \text{ }^\circ\text{C}$</i>	<i>13.1</i>	<i>20.4</i>
Gem. retourtemp 's nachts (aanvoer = $5 \text{ }^\circ\text{C}$)	11.1	10.2
Gem. retourtemp overdag (aanvoer = $8 \text{ }^\circ\text{C}$)	18.5	18.1

5 Koeling van aardbeien tegen de achtergrond van het Themato-concept

Inleiding

In het themato-concept wordt gebruik gemaakt van luchtbehandelingskasten die in de zomer de overtollige warmte uit de kas verzamelen en op een temperatuurniveau van ongeveer 18 °C opslaan in een ondergronds energieopslagsysteem. Dit opslagsysteem bestaat uit bronnen en infiltratieputten die water uit een aquifer (een ondergronds waterhoudende zandlaag) oppompen, opwarmen of uitkoelen en vervolgens een eindje verderop (bijvoorbeeld 200 m) weer terugpersen.

In de utiliteitsbouw wordt hiervan al veelvuldig gebruik gemaakt. In de simpelste variant wordt er in de winter met buitenlucht koud water gemaakt dat in de zomer kan worden opgepompt voor koelingsdoeleinden. In een uitgebreidere variant, zoals bij themato, wordt het koude water niet met winterse buitenlucht gemaakt, maar met een koelmachine, waarbij de warmte die bij de koelmachine vrij komt wordt gebruikt om de kas te verwarmen. Omdat de warmte direct gebruikt wordt spreekt men in dit geval echter niet over een koelmachine, maar meestal over een warmtepomp. In wezen is een warmtepomp echter hetzelfde als een koelmachine. In § 5.1 wordt wat achtergrond over warmtepompen gegeven en in § 5.2 wordt ingegaan op ondergrondse energieopslagsystemen. Beide stukjes zijn overgenomen uit een ander rapport en daarom wellicht niet voor de volle 100% toegesneden op de situatie in de aardbeien-teelt. Deze stap wordt evenwel in § 5.3 gemaakt.

5.1 Warmtepompen

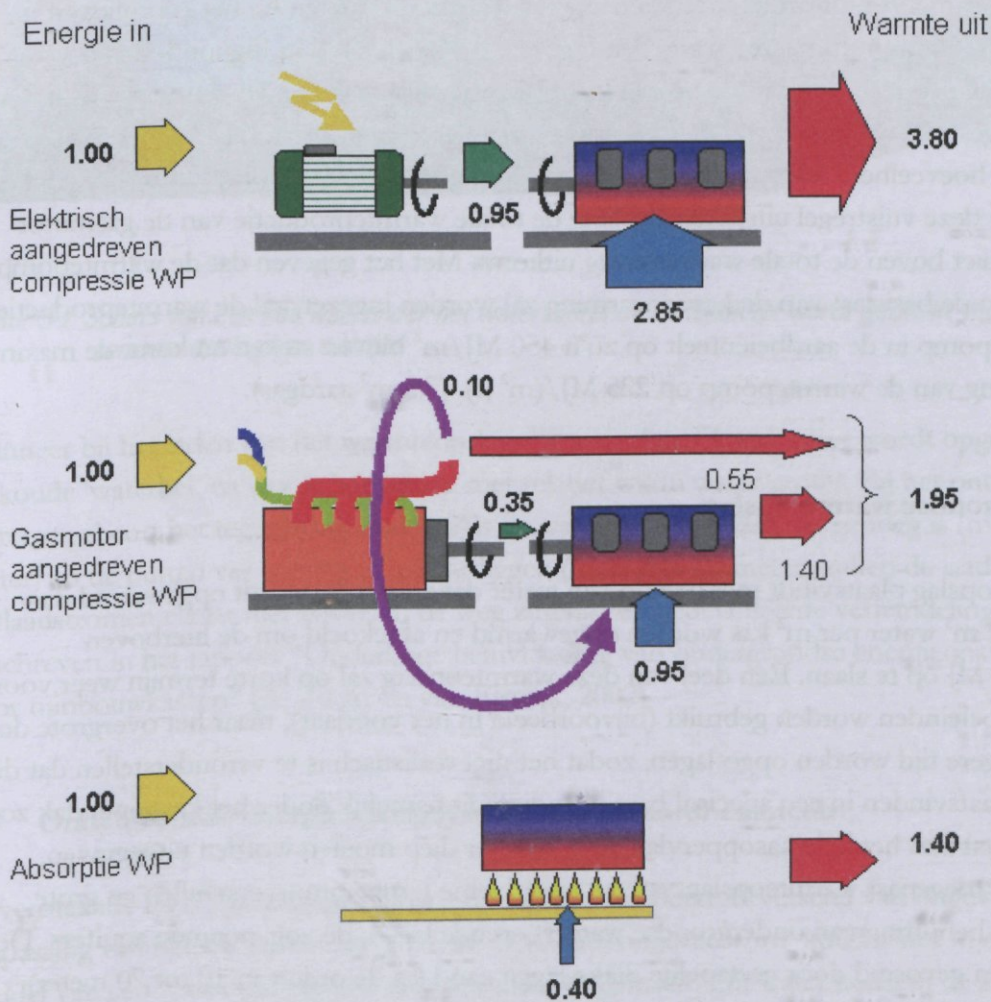
Een warmtepomp is een machine, waarmee warmte van een laag temperatuurniveau (de energie-input) op een hoger temperatuurniveau kan worden gebracht (de energie-output). Dit is een tegennatuurlijk proces, zodat dit proces alleen aan de gang kan worden gehouden door toevoer van een tweede, hoogwaardige energie-input. De verhouding tussen de hoeveelheid warmte aan de output van de machine en de hoeveelheid hoogwaardige energie die nodig is voor de aandrijving van de installatie wordt de COP (Coefficient Of Performance, in het Nederlands: Opbrengstfactor) van de warmtepomp genoemd.

In Figuur 5-1 wordt een aantal typische kengetallen, die voor verschillende typen warmtepompen gelden, getoond.

In alle drie de gevallen wordt aan de linkerkant één eenheid aandrijfenergie ingevoerd en wordt aangegeven langs welke weg de warmteoutput aan de rechterzijde tot stand komt. De verhouding tussen het getal links en het getal rechts is de eerder genoemde COP. De figuur laat zien dat bij de elektrisch aangedreven warmtepomp het grootste deel (bijna $\frac{3}{4}$) van de warmte die rechts

wordt afgegeven, afkomstig is van de laagwaardige warmtebron (de dikke pijl naar de warmtepomp toe). Bij de absorptie warmtepomp is de bijdrage van de laagwaardige warmtebron nog niet een derde van de warmteoutput.

Bij de gasmotor aangedreven warmtepomp is ongeveer de helft van de warmteoutput afkomstig uit de laagwaardige warmtebron. Overigens zal een gasmotor aangedreven warmtepomp in de praktijk een combinatie van een WK-installatie en een elektrisch aangedreven warmtepomp zijn.



Figuur 5-1 Typische kentallen voor verschillende typen warmtepompen

Figuur 5-1 wekt de indruk dat vanuit energiebesparingsoogpunt de elektrisch aangedreven warmtepomp verreweg te verkiezen is boven de anderen. Deze geeft immers de meeste warmte per eenheid energie input. Wanneer echter het opwekkingsrendement van de elektriciteit in de beschouwing wordt meegenomen komt de gasmotor aangedreven warmtepomp bovenaan te staan. Immers, met het huidige gemiddelde rendement van 43% van een elektriciteitscentrale, is er

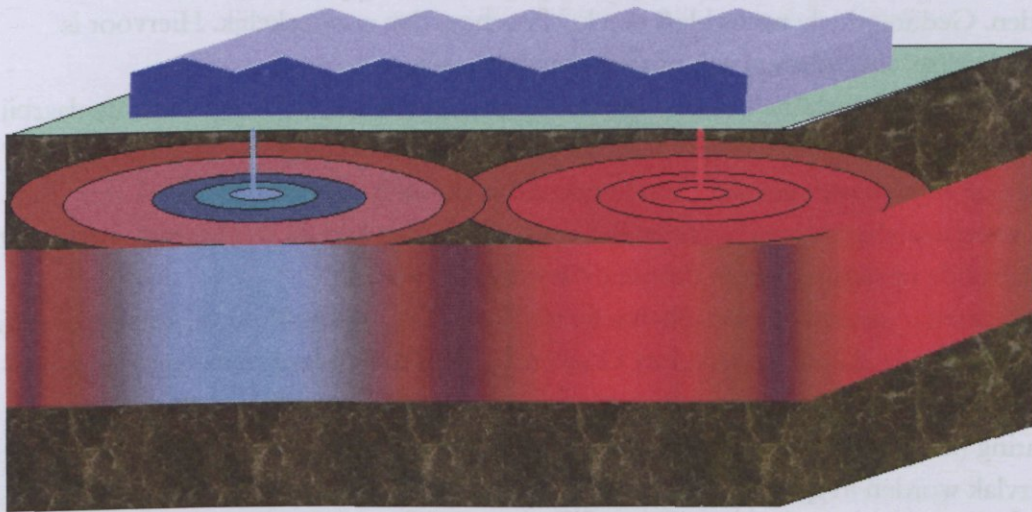
voor de productie van 1 eenheid elektriciteit 2.3 eenheden primaire energie nodig, wat de warmte-output per eenheid *primaire* energie terugbrengt tot $3.8/2.3 = 1.65$.

Pas bij een opwekkingsrendement van meer dan 50% wordt de energiebesparingspotentie van de elektrische warmtepomp beter dan die van de warmtepomp aangedreven door een gasmotor. Vanwege het feit dat het gemiddeld opwekkingsrendement nog ver van deze 50% af ligt zal voorlopig vanuit energetisch oogpunt de gasmotor warmtepomp te verkiezen zijn boven de andere typen. Uitgaande van de gasmotor aangedreven warmtepomp wordt er per eenheid warmte die aan de output wordt afgegeven $0.95 / 1.95 = 0.49$ eenheid warmte aan de laagwaardige warmtebron onttrokken. Indien alle restwarmteproducten bij het gebruik van de gasmotorwarmtepomp nuttig kunnen worden ingezet, zoals getekend in Figuur 5-1, is de energiebesparing precies gelijk aan de hoeveelheid laagwaardige warmte die gebruikt wordt. Hierdoor kan gesteld worden dat bij gebruik van een gasmotor warmtepomp de energiebesparing gelijk is aan de hoeveelheid warmte die aan de laagwaardige bron (de aquifer) wordt onttrokken. Uiteraard geldt deze vuistregel uitsluitend zolang de totale warmteproductie van de gasmotor warmtepomp niet boven de totale warmtevraag uitkomt. Met het gegeven dat de warmtepomp voornamelijk in de basislast van de kasverwarming zal worden ingezet, zal de warmteproductie van de warmtepomp in de aardbeienteelt op zo'n 450 MJ/m^2 blijven steken en komt de maximale energiebesparing van de warmtepomp op $225 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ jr})$. (7.5 m^3 aardgas).

5.2 Ondergrondse warmteopslag

Indien warmteopslag plaatsvindt met behulp van water dat zo'n $8 \text{ }^\circ\text{C}$ wordt opgewarmd dan moet er bijna 7 m^3 water per m^2 kas worden opgewarmd en afgekoeld om de hierboven genoemde 225 MJ op te slaan. Een deel van deze warmteopslag zal op korte termijn weer voor verwarmingsdoeleinden worden gebruikt (bijvoorbeeld in het voorjaar), maar het overgrote deel moet voor langere tijd worden opgeslagen, zodat het niet realistisch is te veronderstellen dat dit zou kunnen plaatsvinden in een speciaal bassin. Indien dit namelijk onder het kasoppervlak zou worden geplaatst zou het hele kasoppervlak zo'n 7 meter diep moeten worden uitgegraven. Een reeds veel toegepast warmteopslagsysteem voor kleine temperatuurverschillen en grote volumina is de benutting van ondergrondse watervoerende lagen, de zogenoemde aquifers. Deze aquifers worden gevormd door gestapelde dikke lagen zand (in de orde van 10 tot 20 meter), afgewisseld met dunne kleilagen. Wanneer zuig en persleidingen tot in deze zandlagen geboord worden, kan verwarmd of afgekoeld water in de ondergrond worden opgeslagen voor later gebruik.

In Figuur 5-2 wordt hiervan een schetsmatige situatie getoond.



Figuur 5-2 Schets van een kas waaronder het watervoerende zandpakket wordt gebruikt voor de seizoensopslag van warmte

Wanneer bij het laden van het warmteopslagsysteem relatief koud water wordt opgepompt slinkt de koude ‘waterbel’ en wordt het gebied met relatief warm water groter. Bij het ontladen van het systeem gebeurt het tegenovergestelde. Als de watervoerende laag dik genoeg is (meer dan 10 meter) en de putten ver genoeg uit elkaar liggen (meer dan 60 meter) zullen de laad- en ontladstromen elkaar niet zoveel in de weg zitten. Een gedetailleerde verhandeling hierover is beschreven in het rapport “Onderlinge beïnvloeding van ondergrondse energieopslagsystemen voor tuinbouwkassen” (de Zwart en van Elswijk, 2002)

5.3 Ondergrondse energieopslagsystemen in de aardbeienteelt

Bovenstaande tekst laat zien dat, uitgaande van een temperatuurverschil van ongeveer 8 °C er bij toepassing van het themato-concept in de aardbeien ongeveer 7 m³ koud water in de winter door middel van een warmtepomp zou kunnen worden gemaakt. Dit water komt in de zomer met een temperatuur van ongeveer 8 °C beschikbaar voor koeling. In hoofdstuk 4 is berekend dat er 13 tot 20 m³ water van dit water nodig is voor de koeling van de kas met respectievelijk de kleine en de grote koelcapaciteit. Dit betekent dat de helft tot een derde van de kas overdag gekoeld zou kunnen worden wanneer de kas in de winter met een warmtepomp zou worden verwarmd. De daarbij geproduceerde koude wordt dan op seizoensbasis opgeslagen om in de zomer op een deel van het bedrijf te worden gebruikt voor de koeling.

De opgeslagen koude kan niet direct worden toegepast voor de koeling gedurende de nacht. Het is namelijk niet realistisch dat het, zonder al te veel verliezen, mogelijk is in de winter koude te

maken die op een later tijdstip, met een temperatuur van 5 °C weer beschikbaar gemaakt zou kunnen worden. Gedurende de nacht blijft een koelmachine dus noodzakelijk. Hiervoor is ongeveer 4 m³ aardgas equivalenten aan primaire energie nodig.

In de periode dat de koelmachine 's nachts aan het werk is om de kas te koelen moet de daarbij vrijkomende warmte worden afgevoerd. Dit kan middels een koeltoren, maar indien er voor de koeling overdag gebruik wordt gemaakt van koude die in de winter gemaakt is en via een ondergronds energieopslagsysteem het seizoen over getild is, dan kan de afvalwarmte beter met behulp van datzelfde opslagsysteem in de winter worden afgevoerd.

In plaats van de eerder genoemde opslagbehoefte van 7 m³/m²_{kas} water (voor de koeling overdag) wordt de opslagbehoefte dan in de orde van 12 m³/m²_{kas}. Om het ondergronds energieopslagsysteem in de winter weer te koelen met benutting van het zomerse warmte-overschot voor energiebesparing (het themato-concept) moet het gesloten deel 1/3.5 van het totale bedrijfsoppervlak worden in geval met de kleine capaciteit gekoeld wordt en 1/5 van het totale oppervlak bij gebruik van de koelinstallatie met de grote capaciteit.

Deze verhoudingen kunnen evenwel naar believen veranderd worden door in de winter gebruik te maken van een koeltoren die koud water maakt met behulp van de koude winterse temperaturen.

6 Conclusies

Het bovenbeschreven onderzoek laat zien dat een aardbeienkas bij gebruik van luchtbehandelingskasten met een warmte-overdrachtscapaciteit van $7 \text{ W}/(\text{m}^2_{\text{kas}} \text{ K})$ gedurende de nacht goed kan worden gekoeld naar de gewenste temperaturen. Overdag kan met deze installatie eveneens een forse vermindering van de ventilatie worden gerealiseerd, wat tot uiting komt in een kleine afname van de CO_2 vraag (deze zakt van 20.7 naar 19.6 $\text{kg}/(\text{m}^2_{\text{kas}} \text{ jaar})$), maar vooral een belangrijke toename van de productie (11%).

Bij een twee keer zo grote capaciteit worden de effecten in de nacht niet zoveel sterker, maar wordt er overdag wel duidelijk minder geventileerd. De vermindering van de CO_2 -vraag zet dan door naar 18.1 $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ en de productietoename wordt door het model op 17% berekend. Is de capaciteit nog wat groter, bijvoorbeeld 18 $\text{W}/(\text{m}^2_{\text{kas}} \text{ K})$ dan kan de aardbeienkas geheel gesloten gehouden worden zonder dat de kasluchttemperatuur noemenswaardig boven de 25 °C uit komt. Het maximale koelvermogen komt in dat geval uit op zo'n 350 W/m^2 .

Het CO_2 -verbruik zakt in dat geval naar 11 $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ jaar})$ en de productiestijging wordt door het simulatiemodel op 26% berekend. Hieruit moet worden geconcludeerd dat het effect van een hogere CO_2 -concentratie in de aardbeienteelt groter is dan in de glasgroenteteelt (bijvoorbeeld de tomatenteelt). Dit wordt vooralsnog verklaard uit het feit dat een aardbeigewas een kleinere bladhoeveelheid heeft dan een tomatengewas, daardoor meer blad in de volle zon heeft en dus beter kan profiteren van hogere CO_2 -concentraties.

De totale hoeveelheid koude die in een gesloten aardbeienkas nodig is om de kas te koelen bedraagt 1200 MJ/m^2 per jaar. Gegeven de ongeveer 225 MJ koude die in de winter in een aardbeienteelt gemaakt kan worden bij gebruik van een warmtepomp zou het themato-concept kunnen worden toegepast wanneer 1/6 van de kas gesloten zou zijn. Hierbij is rekening gehouden met het feit dat de koeling in de nacht ondersteund moet worden met een koelmachine (zie § 5.3).