

EINDRAPPORTAGE

Telen in een gesloten tuinbouwkas; praktijkexperiment

januari - december 2002

Ir. G.G. Schoonderbeek (Ecofys)
Ir. A. de Gelder (PPO)
Dr. E.M.B. Heller (Ecofys)
Dr. J.J.G. Opdam (Ecofys)

ECOFYS



PRAKTIJKONDERZOEK
PLANT & OMGEVING

Maart 2003
E48031

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het Convenant Glastuinbouw en Milieu met ondersteuning van:



landbouw, natuurbeheer
en visserij



COLOFON

Algemene projectgegevens

Titel: Telen in een gesloten tuinbouwkas; praktijkexperiment
Thema energieprogramma: Energie-GLAMI, kas en teelt concepten
Projectnummer PT: 11.110
Aanvangsdatum project: 1 november 2001
Looptijd project: 1 jaar en 2 maanden

Gegevens uitvoerende organisatie

Naam: Ecofys B.V.
Bezoekadres: Kanaalweg 16 g
Postadres: Postbus 8408, 3503 RK Utrecht

Naam: Praktijkonderzoek Plant & Omgeving BV
Bezoekadres: Bornsesteeg 47
Postadres: Postbus 167, 6700 AD Wageningen

Gegevens contactpersonen

Ecofys

naam: dr. J.J.G. Opdam
functie: Afdelingshoofd Energie Systeem Ontwikkeling
Postadres: Postbus 8408, 3503 RK Utrecht
adres: Kanaalweg 16-G 3526 KL Utrecht.
telefoon/fax/email: 030 2808346/ 030 2808301/ H.Opdam@ecofys.nl

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving

naam: ir. A. de Gelder
functie: Senior wetenschappelijk onderzoeker
adres: Kruisbroekweg 5, Postbus 8, 2670 AA Naaldwijk
telefoon/fax/email: 0174 636 802 / 0174 636835/ Arie.deGelder@wur.nl

Voorwoord

Deze eindrapportage “Telen in een gesloten tuinbouwkas; praktijkexperiment” betreft een weergave van een in 2002 uitgevoerd onderzoek naar de energie- en teelttechnische consequenties van het telen van tomaat in een gesloten kas, een kas waarvan de luchtramen gesloten zijn gehouden. Het concept “Gesloten kas” is door Ecofys te Utrecht in 1998 ontwikkeld en tot op heden doorontwikkeld. Het concept betreft een combinatie van installaties voor energievoorziening en klimaatbeheersing waardoor het mogelijk is om in een glastuinbouwkas gedurende het gehele jaar de luchtramen gesloten te houden.

Voorafgaand aan het praktijkexperiment zijn verschillende haalbaarheidsstudies door Ecofys uitgevoerd met financiële ondersteuning door Novem (contactpersoon de heer ir. O. Kleefkens). Eveneens is door Novem een studie gefinancierd waarin gezamenlijk door IMAG, PPO-Naaldwijk en Ecofys concepten met betrekking tot een “semi-gesloten kas” en “gesloten kas” onder meer op economische haalbaarheid werden onderzocht.

In 2000 – 2001 heeft Ecofys op het terrein van PPO in Naaldwijk een bestaande kas van 1400 m² omgebouwd tot een gesloten kas door het te voorzien van de nieuwe energievoorzienings- en klimaatbeheersingsinstallatie. In 2001 kon gestart worden met een eerste praktijkexperiment. PPO was als opdrachtnemer verantwoordelijk voor de teeltkundige verzorging en begeleiding. Een groot deel van de benodigde gelden werd voor dit experiment beschikbaar gesteld door Novem en LTO-Glastuinbouw op voorspraak van de werkgroep “Kas van de toekomst” (voorzitter de heer ir. W. Duffhues). Tijdens dit praktijkexperiment in 2001 kon de kas niet onder alle omstandigheden gesloten blijven door onvolkomenheden in de technische installatie.

Vanaf begin 2002 hebben Ecofys en PPO gezamenlijk het onderhavige praktijkexperiment uitgevoerd. Het productschap Tuinbouw (contactpersoon de heer dr. D. Bol) en het Ministerie van LNV (contactpersoon de heer drs. ing. L. Oprel) hebben dit onderzoek gefinancierd. Binnen dit onderzoek werden eind 2001 de noodzakelijke aanpassingen aan de installatie doorgevoerd.

PPO en Ecofys waren verantwoordelijk voor respectievelijk de teeltkundige en installatie/klimaattechnische aspecten. De Wageningen UR (vakgroep Tuinbouwproductieketens, de heer dr. E. Heuvelink) was verantwoordelijk voor de begeleiding van de teelt en evaluatie van de opbrengst op basis van gewaskundige modellen. De heer J. Mulder uit ‘s-Gravenzande heeft gedurende de gehele teeltperiode in 2002 als externe gewasdeskundige het experiment begeleid.

Het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van LNV hebben voor dit project een begeleidingscommissie samengesteld. De commissie bestond uit de heren T. Duijvestijn (tomatenteler in Wateringen), M. Groenewegen (tomatenteler in Sirjansland), L. Marcelis (Wageningen UR), J. Mulder uit ‘s-Gravenzande, P. van Schie (tomatenteler in Honselerdijk), J. Voogt (Hoogendoorn Groep, Vlaardingen) en F. de Zwart (IMAG, Wageningen).

De commissie en onderzoekers hebben vier maal vergaderd onder leiding van het Productschap Tuinbouw en het Ministerie van LNV.

Ecofys en PPO willen de subsidiegevers met hun projectbegeleiders, leden van de begeleidingscommissie en leden van de werkgroep “Kas van de Toekomst” bedanken voor hun positieve begeleiding en inbreng.

Samenvatting

Achtergrond

Deze eindrapportage "Telen in een gesloten tuinbouwkas; praktijkexperiment" betreft een weergave van een in 2002 uitgevoerd onderzoek naar de energie- en teelttechnische consequenties van het telen van tomaat in een gesloten kas, een kas waarvan de luchtramen gesloten zijn gehouden. Het concept "Gesloten kas" is door Ecofys te Utrecht in 1998 ontwikkeld.

Het concept betreft een combinatie van installaties voor energievoorziening en klimaatbeheersing waardoor het mogelijk is om in een glastuinbouwkas gedurende het gehele jaar de luchtramen gesloten te houden.

Hierbij wordt energie in de zomer opgeslagen en in de winter gebruikt om de kas te verwarmen. Dit levert een netto besparing aan primaire energie op.

Ter onderbouwing van de het praktijkexperiment zijn verschillende haalbaarheidstudies door Ecofys uitgevoerd met financiële ondersteuning door Novem.

Voorafgaand aan het onderhavige praktijkexperiment is in 2000 –2001 een eerste praktijkexperiment op 1400 m² uitgevoerd door Ecofys bij PPO. Door technische onvolkomenheden kon in die periode de kas niet langdurig gesloten blijven.

Deze rapportage beschrijft de volledige periode januari – november 2002 van het praktijkexperiment "Telen in een volledig gesloten tuinbouwkas; een praktijkexperiment" welke gezamenlijk uitgevoerd is door PPO en Ecofys bij het PPO in Naaldwijk.

Vraagstelling

De hoofdvraagstellingen in dit project luiden:

- Is het telen van tomaat in een gesloten tuinbouwkas teeltkundig verantwoord?
- Is een meerproductie aan te tonen en te kwantificeren?
- Wordt een wezenlijke bijdrage geleverd aan de invulling van het GLAMI-convenant van 1997?

Vier nevenvraagstellingen zijn geformuleerd:

- Levert het telen in een gesloten tuinbouwkas een bijdrage aan de individuele bedrijfsvoering, in eerste instantie in de vorm van een betere beheersbaarheid van de kasklimaat factoren?
- Heeft een gesloten kas gevolgen voor de arbeidsomstandigheden?
- Kan op grond van het experiment een uitspraak worden gedaan over de bedrijfszekerheid van de installaties voor energievoorziening en klimaatbeheersing?
- Kan op grond van een eerste orde economische berekening inzicht worden verkregen in de kansen van daadwerkelijke realisering in de praktijk op ware schaalgrootte?

Telen in een gesloten tuinbouwkas

Telen in een gesloten kas

- Het praktijkexperiment heeft aangetoond dat het telen van tomaat (Aromata) in een gesloten kas op teelttechnisch zeer verantwoorde wijze goed uitvoerbaar is. De plantontwikkeling en de opbrengsten zijn zeer bevredigend.
- Het verloop van het kasklimaat laat een andere karakteristiek zien dan een open kas. In de kasklimaatregeling biedt dit nieuwe mogelijkheden, met name voor de sturing van de temperatuur en luchtvochtigheid.
- De transpiratie in een gesloten kas met een geforceerde luchtbeweging is bij lage instraling hoger en bij hoge instraling lager dan in een open kas. Watergift en voeding moeten hiervoor worden aangepast.

Meeropbrengst

- De totale gemeten productie komt uit op 56,3 kg/m² (bij lichtinstraling van 70%). Dit betekent een extra productie van 22% ten opzichte van een gesimuleerde productie voor een conventionele open kas met minimaal 500 ppm CO₂. Een verdere verhoging van de CO₂ naar 1200 - 1600 ppm zal op basis van het model nog een kleine extra productie kunnen opleveren (validatie hiervan is nog niet uitgevoerd).
- De productie verhoging is vooral te vinden aan het einde van het voorjaar, in de zomer en in de herfst.
- De productie kent minder sterke pieken, omdat de kastemperatuur beter te sturen is.



Productkwaliteit

- De smaak van de tomaten in de gesloten kas was goed.
- De gemeten stevigheid (houdbaarheid) toonde een redelijke tot goede kwaliteit aan. Gaande het experiment werd de kwaliteit beter.

Gewasmodel aanpassing

- Uit een modelvalidatie blijkt dat louter een CO₂ –verhoging naar 500 naar 1000 ppm een productie verhoging oplevert van 9 %. De overige productiestijging van 13% om te komen tot de 22% is nog niet verklaarbaar maar moet worden gezocht in de blijkbaar gunstiger specifieke omstandigheden in de gesloten kas zoals beheersbare luchtvochtigheid, temperatuur en ook luchtbeweging.
- Het gewasmodel van Wageningen UR bleek de productie gedurende het teeltjaar systematisch te laag te voorspellen. De productie bij een combinatie van hoge lichtintensiteit, hoog CO₂ niveau, luchtbeweging en hogere relatieve luchtvochtigheid is met het model van tuinbouwproductie ketens te beschrijven als in het model de maximale bladfotosynthese met 50% wordt verhoogd.

Gesloten kas en het GLAMI-convenant

De hoofdconclusie luidt dat op basis van de resultaten uit het praktijkexperiment een gesloten tuinbouwkas aan de doelstellingen van GLAMI convenant uit 1997 ruimschoots kan voldoen.

Energiegebruik

- Het energiegebruik, berekend op basis van de gegevens uit het praktijkexperiment, van een gesloten kas in eilandbedrijf met een oppervlakte van 3 ha ligt met 42 aeq/m² 19% lager dan het energiegebruik van de referentie (vergelijking is gemaakt op basis van een gelijksoortige kas als gebruikt bij het praktijkexperiment; bouwjaar 1990) bij een identieke kastemperatuur en teeltperiode.
- Indien het jaarlijks warmteoverschot van de gesloten kas wordt ingezet voor de verwarming van nabijgelegen conventionele kassen met een oppervlakte die tweemaal zo groot is als die van de gesloten kas is het energiegebruik van deze cluster over het gehele areaal 33% lager dan dat van een conventionele kas. Deze besparing voldoet aan de gestelde doelstelling van 30%.
- De energie efficiëntie in een gesloten kas in eilandbedrijf is verbeterd tot 66% van de waarde voor een conventionele kas.
- De energie efficiëntie in een cluster van gesloten en open kassen is verbeterd tot 63% van de waarde voor een conventionele kas.
- De doelstelling ter verbetering van de energie efficiëntie tot 64% van de waarde voor een conventionele kas is gehaald.

Duurzame energie

- De hoeveelheid energie die uit de kas wordt onttrokken en op een later tijdstip weer wordt ingezet voor de verwarming van de kas is 44% van de warmtevraag van de kas. Dit is het aandeel duurzame energie. Dit geldt zowel voor de gesloten kas in eilandbedrijf als ook in combinatie met conventionele kassen.

Gewasbeschermingsmiddelen

- Uit het praktijkexperiment blijkt het mogelijk te zijn om op teeltkundig verantwoorde wijze de inzet van gewasbeschermingsmiddelen aanzienlijk te reduceren. Hiermee is de gestelde doelstelling t.a.v. het verbruik van gewasbeschermingsmiddelen bereikt
- In het uitgevoerde experiment was de infectie druk door insecten laag. De kans op schimmelaantasting, met name van Botrytis, is klein. Dit resulteerde in een laag gebruik aan gewasbeschermingsmiddelen.

Irrigatiewater

- Ongeveer de helft van het irrigatiewater dat door de teelt is verdampt werd teruggewonnen. De gestelde doelstelling t.a.v. het terugdringen van het waterverbruik is hiermee bereikt.
- Het kopergehalte bleek wel hoger dan toelaatbaar in irrigatiewater, dit komt door het gebruik van Cu/Al warmtewisselaars.



Beheersbaarheid van kasklimaat factoren

De beheersing van de relevante kasklimaat factoren CO₂, luchtvochtigheid en temperatuur was groot gedurende de gehele teeltperiode. Het systeem reageerde snel op wijzigingen in de setpoints. De horizontale en verticale temperatuurverdeling bleef binnen de grenzen van een gewenst kasklimaat.

Arbeidsomstandigheden

In het project werd in deze geen doelstelling geformuleerd maar de arbeidsomstandigheden zijn op basis van temperatuur- en luchtvochtigheidsmetingen en de subjectieve perceptie van de teeltverzorgers minstens zo "goed" als in een conventionele kas.

- Over de gehele teeltperiode waren de arbeidsomstandigheden in de kas acceptabel. In de zomer met hoge buitentemperaturen was werken in de gekoelde kas aangenaam.
- In het voorjaar met een forse lichtverhoging op de stooktemperatuur, was de combinatie van hoge temperatuur en hoge luchtvochtigheid niet aangenaam.
- Zonder kwantitatieve gegevens mag worden verondersteld dat de doelstelling t.a.v. luchtkwaliteit is bereikt. Er heeft zich naar verwachting geen ophoping van eventuele schadelijke stoffen in de kaslucht plaatsgevonden. Hiervoor zijn drie redenen:
 - In de eerste plaats is het verbruik van chemische gewasbeschermingsmiddelen aanzienlijk gereduceerd waardoor de blootstelling ook zal zijn afgenomen.
 - In de tweede plaats is het te verwachten dat door de actieve circulatie een groot deel van deze stoffen uit de kas wordt gehaald en in het condenswater op de warmtewisselaars wordt geabsorbeerd.
 - Tenslotte is de relatief grote natuurlijke ventilatie (relatief slechte lekdichtheid) van de kas gunstig voor het verdunnen van een eventueel hoge concentratie schadelijke stof.
- In het praktijkexperiment was er van enige geluidshinder binnen en buiten de kas geen sprake.

Bedrijfszekerheid

Op grond van de ervaringen in het experiment mag worden geconcludeerd dat de installatie goed heeft gefunctioneerd. De kas is gesloten gebleven behalve tijdens enkele korte perioden door toedoen van bewuste wijzigingen aan de installatie en door (externe) storingen. Voor toekomstige toepassing in de praktijk zal de installatie op basis van het bestaande principe op enkele aspecten nog worden aangepast en geoptimaliseerd. Naar verwachting zal het afbreukrisico van een nieuwe installatie in de praktijk aanvaardbaar klein zijn. Het blijft gewenst om in geval van een storing gebruik te kunnen maken van een ventilatiesysteem.

Economisch perspectief

Op basis van de resultaten in het praktijkexperiment zijn optimalisaties uitgevoerd wat betreft energiegebruik en investeringen voor een aantal deelinstallaties.

Voor de teelt van gewone tomaat in een combinatie een 1 ha gesloten kas met 2 ha conventionele open kas met een meeropbrengst van 20% in het gesloten deel, leiden bovengenoemde optimalisaties tot een terugverdientijd van 7 – 8 jaar (zonder subsidie) en 6 – 7 jaar met EIA-subsidie. Uit deze gegevens mag worden geconcludeerd dat er voor de inpassing van gesloten kassystemen een duidelijk gunstig perspectief ligt.

Informatieverstrekking

De Nederlandse glastuinbouw heeft met name op beleidsniveau (o.a. de beleidsdirectie van LNV) kennis kunnen nemen van het praktijkexperiment door middel van een bezoek aan de gesloten kas. Ook hebben er enkele tientallen tuinders en de LTO commissie tomaat de kas bezocht.

Een belangrijke informatieverstrekking heeft plaatsgevonden in de 'Kas van de Toekomst' op de Floriade. Daar werd een grafiek getoond met actuele gegevens van het kasklimaat in de gesloten kas in Naaldwijk.

Presentaties over de behaalde resultaten hebben plaatsgevonden tijdens de afgelopen landelijke tomaten-, paprika- en komkommerdagen. Ook in de vakbladen hebben de resultaten van het praktijkexperiment aandacht gekregen.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	7
1.1	Doelstellingen	8
2	PROJECTOPZET	10
2.1	Systeemconcept	10
2.2	Klimaatinstallatie	10
2.2.1	CO ₂ dosering	11
2.3	Klimaatregeling en monitoring	11
2.3.1	Luchtraamregeling	12
2.3.2	Energiemonitoring	12
2.3.3	Temperatuur en RV monitoring in de kas	12
2.3.4	Teelt	13
3	PROJECTRESULTATEN	15
3.1	Installatie	15
3.1.1	Klimaatregeling	15
3.1.2	Luchtramen	17
3.2	Kasklimaat	18
3.2.1	Kasklimaat over de hele periode	18
3.2.2	Horizontale en verticale temperatuursverdeling in de kas	19
3.2.3	CO ₂ dosering	22
3.3	Teelt	22
3.3.1	Productie in vers gewicht	22
3.3.2	Afwijkende vruchten	25
3.3.3	Vruchtgewicht	26
3.3.4	Resultaten smaak en houdbaarheidsonderzoek	27
3.3.5	Gewasbescherming	27
3.3.6	Watergift, terugvang en voeding	28
3.4	Simulatie teeltopbrengst en validatie van gewasmodel	31
3.4.1	Simulatie van biomassa en vruchtproductie	31
3.5	Vruchttopbrengst	33
3.6	Validatie van het gewasmodel	34
3.6.1	Model aanpassing	34
3.6.2	Invloed van CO ₂	36
3.6.3	Gevoeligheid voor temperatuur en CO ₂	37
3.6.4	Discussie teelt	38
3.6.5	Conclusies	39
3.7	Energie	40
3.7.1	De proefkas van het praktijkexperiment	40
3.7.2	Opschaling naar 3 ha gesloten kas	41
3.7.3	Primair energieverbruik en duurzame energie voor 3 ha gesloten kas	42
3.7.4	Conclusies	43
4	Arbeidsomstandigheden	45
5	Economie	46
6	Informatieverstrekking	48
7	Conclusies	49



1 Inleiding

In 1997 is het convenant Glastuinbouw en Milieu (GLAMI) afgesloten. In dit convenant hebben de sector en de overheid afspraken gemaakt om de energie-efficiëntie te verbeteren en daarnaast de hoeveelheid gewasbeschermingsmiddelen en de uitstoot van meststoffen te verminderen.

De doelstellingen voor 2010 worden als volgt in het convenant verwoord:

- 65% verbetering van de energie-efficiëntie ten opzichte van 1980.
- Vermindering van de inzet van bestrijdingsmiddelen ten opzichte van 1984-1988 met 72% voor de bloemisterij en 88% in de glasgroenteteelt.
- Uitstoot van meststoffen verminderen met 95% ten opzichte van 1980.
- 4% van totaal gebruikte energie opgewekt door duurzame energie.

Deze doelstellingen zullen naar bedrijfsniveau worden vertaald, zodat elke tuinder op de normen kan worden aangesproken. Deze normen zijn vastgelegd in het 'Besluit Glastuinbouw'.

Een gesloten kas kan in belangrijke mate aan de GLAMI normen voldoen. Immers in het concept van Ecofys wordt het overschot aan zomerse warmte opgeslagen om in periodes van warmtevraag weer te worden gebruikt. De hergebruikte warmte wordt beschouwd als duurzame energie. Het verbruik van gewasbeschermingsmiddelen kan worden teruggebracht omdat in een gesloten kas geen sprake kan zijn van het binnenkomen van ziekten en plagen via beluchtingsramen.

De *hoofdvraagstelling* in dit project luidt:

Levert het telen in een fysiek gesloten tuinbouwkas een wezenlijke bijdrage aan de invulling van het GLAMI-convenant?

Ondernemers in de tuinbouw zoeken naar een hoge mate van planmatige en gestuurde productie. In de bedrijfsvoering kan daardoor worden ingespeeld op de vraag vanuit de markt, binnen de kaders die gelden voor een duurzame inzet van productiemiddelen. Voor gegarandeerde kwaliteit en productie is beheersing van kasklimaatfactoren een belangrijk instrument. In de huidige kassen is de mogelijkheid van beheersing van luchtvochtigheid, temperatuur en CO₂ beperkt in vergelijking met die in een gesloten kas. Een gesloten kas geeft de ondernemer nog meer mogelijkheden om met het klimaat gericht te sturen op een kwalitatief hoogwaardig product.

Om te bewerkstelligen dat de uitkomsten van dit project tevens een impuls leveren aan het daadwerkelijk bouwen van gesloten tuinbouwkassen wordt een *nevenvraagstelling* geformuleerd:

Levert het telen in een fysiek gesloten tuinbouwkas een bijdrage aan de individuele bedrijfsvoering, in de vorm van

- *een betere beheersbaarheid van de relevante kasklimaatfactoren, en*
- *hogere teeltproductie?*

Deze rapportage beschrijft de volledige periode januari – december 2002 van het praktijkexperiment "Telen in een volledig gesloten tuinbouwkas; een praktijkexperiment" uitgevoerd door Ecofys en PPO bij PPO in Naaldwijk.

Voorafgaand aan deze eindrapportage zijn twee tussenrapportages geschreven. De eerste tussenrapportage in april 2002 diende als basis voor een go/no go beslissing over het voortzetten van het experiment. De begeleidingscommissie heeft in de vergadering van 25 april 2002 de tussenrapportage besproken. Mede op basis van die vergadering werd door PT/LNV positief beslist over de voortzetting van het praktijkexperiment. Het doel van de tweede voortgangsrapportage was de begeleidingscommissie in staat te stellen een antwoord te geven op de vraag of de doelstellingen (zie hieronder) in de onderzoeksaanvraag "Telen in een volledig gesloten tuinbouwkas; een praktijkexperiment" naar verwachting konden worden gehaald. De begeleidingscommissie heeft in de vergadering van 14 september 2002 de tussenrapportage besproken en was positief over de behaalde resultaten maar vroeg nog wel om een nadere uitleg over een aantal onzekerheden. Deze eindrapportage zal de genoemde onzekerheden en vragen zoveel mogelijk trachten te beantwoorden.



1.1 Doelstellingen

Voor het beantwoorden van de bovengeformuleerde hoofd- en nevenvraagstelling worden in deze paragraaf een aantal doelstellingen geformuleerd.

Teelttechnische doelstellingen

1. Het verhogen van de teeltopbrengst met minstens 10% (op basis van een eerdere haalbaarheidsstudie zal de verhoging volgens PPO- en IMAG-simulaties 10 - 20% bedragen (Raaphorst 2001).
2. Het handhaven of verbeteren van de productkwaliteit t.o.v. een normale "open"teelt.
3. Inzicht verkrijgen in de plantontwikkeling en in een goede wijze van telen onder de veranderde teeltomstandigheden in de praktijken.

Technische- en energiedoelstellingen

1. Realisatie van een bedrijfszekere energievoorziening en klimaatbeheersing in een gesloten kas.
2. Een duidelijke verbetering van de beheersbaarheid van de teeltcondities (CO₂-dosering, relatieve luchtvochtigheid, temperatuur) ten opzichte van die in een open kas. Enkele belangrijke voorwaarden daarbij zijn:
 - Een voldoende kleine luchtcirculatie ter voorkoming van schade aan de teelt.
 - Een beheersing van de temperatuur en luchtvochtigheid binnen acceptabele grenzen voor de teelt.
 - Een voldoende snel reagerende klimaatbeheersing (tegen invloeden van het buitenklimaat).
 - Goede homogene horizontale en verticale verdeling van de temperatuur.
 - Het handhaven van een gewenste (relatief lage) temperatuur bij hoge instralingen.
 - Een verhoogde CO₂-concentratie.
3. Een duidelijke terugdringing van het verbruik van primaire energie per eenheid product (efficiëntie verbetering). Volgens voorgaande onderzoek- en haalbaarheidstudies moet een reductie van ca. 30% (aardgasequivalenten) voor de tomatenteelt kunnen worden bereikt. Met de verwachte verhoging van de productie (10%) moet de energie efficiëntieverbetering verbeteren tot 64% van die bij een conventionele kas.
De verwachte 30% energiereductie is exclusief de mogelijke reducties door toepassing van energieschermen. Bij een uiteindelijke realisering van een gesloten kas in de praktijk zal de totale energiereductie aanzienlijk hoger kunnen uitkomen dan de genoemde 30% indien energieschermen en verregaande temperatuurintegratie (specifiek voor gesloten kas) meegenomen kunnen worden.
4. De uitstoot van CO₂ zal ongeveer 30% lager zijn. De te doseren CO₂ aan de gesloten kas zal in de praktijk bestaan uit toe te voeren gereinigde rookgassen, eventueel aangevuld met zuivere CO₂.
5. Het behalen van 4% duurzame energie moet ruimschoots kunnen worden bereikt. Het concept van energievoorziening is gebaseerd op het invangen van zonnewarmte, opslag en hergebruik door middel van ondergrondse warmte- en koudeopslag en warmtepompen. Bij realisatie van de gesloten kas zal ca. 30 % van de gebruikte energie uit duurzame energie bestaan in de vorm van warmte opslag in de bodem.
6. *Het vaststellen van een energetisch optimale dimensionering van de verschillende deelinstallaties ten behoeve van opschaling naar realistische bedrijfsgrootte. Hiertoe moet een goed inzicht in het reduceren van de hulpenergie worden verkregen. De energiegebruiken van de verschillende deelinstallaties worden gemeten, geregistreerd en geëvalueerd.



Nevendoelstellingen

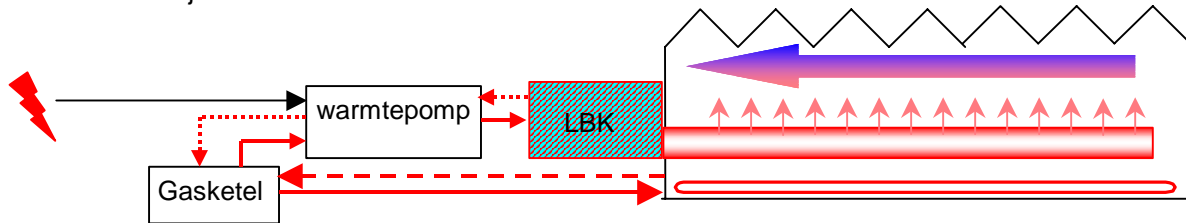
1. *Een economisch optimale dimensionering van de verschillende deelinstallaties ten behoeve van opschaling naar realistische bedrijfsgrootte. Daarvoor moet onder meer een goed inzicht in kostenverlagende mogelijkheden worden verkregen. Hiertoe worden de diverse installatieonderdelen apart en in samenhang getest op hun functionaliteit. Gezocht wordt naar vereenvoudigingen. Doel is de investeringen en daarmee de terugverdientijden verder omlaag te brengen.
2. Het terugdringen van het verbruik van gewasbeschermingsmiddelen; het verbruik is geregistreerd en vergeleken met die bij een normale tomatenteelt.
3. Het handhaven van een goede luchtkwaliteit.
4. Het terugdringen van het waterverbruik; het verbruik wordt geregistreerd. Het sterk gereduceerde waterverbruik in droge perioden zal ervoor zorgen dat de waterbassins kleiner kunnen worden uitgevoerd of niet uitgeput raken.
5. Het terugdringen van de uitstoot van meststoffen.
6. Het informeren van de glastuinbouwsector over de stand van zaken van de ontwikkelingen en mogelijkheden van een gesloten kas.

Opmerking: Met * aangegeven punten zullen niet uitputtend in de verslagleggingen naar voren komen.

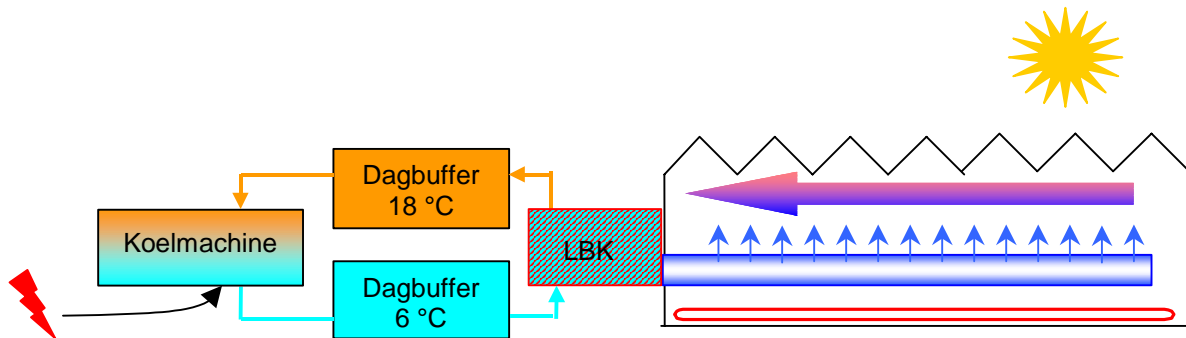
2 PROJECTOPZET

2.1 Systemconcept

Het klimaat in de kas is gestuurd op temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en CO₂ concentratie. De regeling van de temperatuur vindt plaats door installaties voor verwarming en koeling. De regeling van de luchtvochtigheid bestaat uit een ontvochtigingsinstallatie. Er is geen actieve bevochtiging aanwezig, dit is echter wel een mogelijkheid. De koeling en ontvochtiging zijn geïntegreerd en werken niet onafhankelijk van elkaar.



Figuur 1 Proefkas in verwarmingsbedrijf



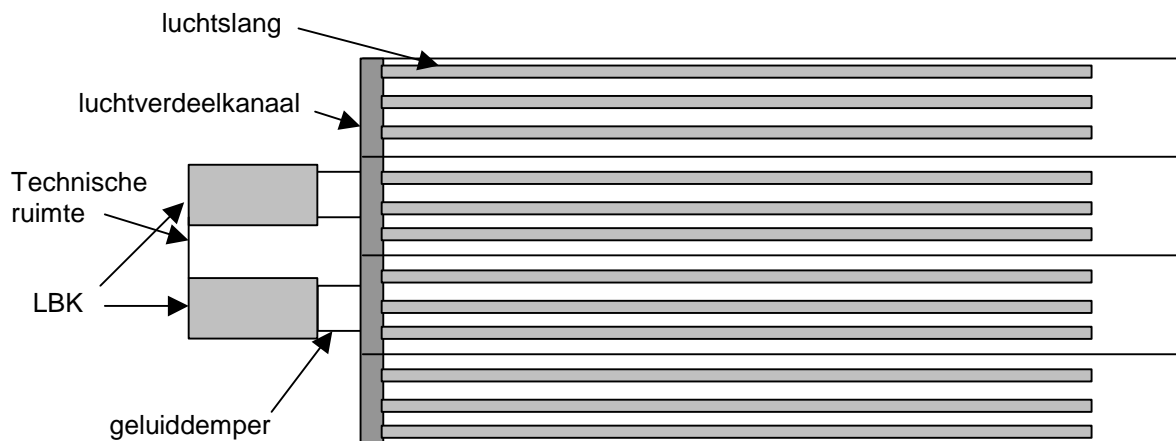
Figuur 2 Proefkas in koel- en ontvochtigingsbedrijf

2.2 Klimaatinstallatie

Het klimaatstelsel in de kas is opgebouwd uit een buisrailnet en luchtbehandelingskasten. Het buisrailnet levert warmte van de ketel.

De luchtbehandelingskasten (LBK) hebben de functies verwarming, koeling en ontvochtiging.

De twee buiten geplaatste luchtbehandelingskasten bestaan elk uit een ventilator en twee warmtewisselaars. De uitstromende lucht is via een luchtverdeelkanaal met 12 luchtslangen geïntegreerd in de kas verdeeld. De luchtslangen zijn onder de goten geplaatst.



Figuur 3 Plattegrond van kas 308 als gesloten kas



Figuur 4 De inrichting van kas 308 als gesloten kas

2.2.1 CO₂ dosering

De regeling voor de CO₂ dosering gebruikt als basis het bij PPO vrijkomende rookgas. Als de ketel installatie van PPO onvoldoende rookgas produceert wordt aanvullend zuiver CO₂ gedoseerd. Met deze regeling is de CO₂ concentratie overdag goed op 1000 ppm te handhaven. Alleen bij storingen aan de rookgasinstallatie en bij opening van de luchtramen wordt de gewenste concentratie niet gehaald, in die situaties wordt geen zuiver CO₂ gedoseerd.

2.3 Klimaatregeling en monitoring

De installatie is geregeld met een regeling van Honeywell. De regeling onderscheidt zich van de gebruikelijke regelsystemen in de glastuinbouw door de uitgebreide mogelijkheden om gedrag van componenten zoals kleppen en pompen te beïnvloeden. Deze regeling is in het bijzonder geschikt voor het besturen van de proefopstelling. Daarnaast biedt de software uitgebreide mogelijkheden om het gedrag van de regeling als geheel en op componentniveau te monitoren.

De regeling van Honeywell is niet uitgerust met een schermdeek regeling. De kasklimaatregeling van PPO zorgde er voor dat in de nacht bij buitentemperaturen onder de 5 °C het energiedoek gesloten werd.

Voor de regeling van het kasklimaat krijgt de Honeywell regeling vanuit de PPO computer gegevens over de kastemperatuur -gerealiseerd en setpoint - de buitentemperatuur en de relatieve luchtvochtigheid in de kas.

Het monitoringsysteem behorende bij de Honeywell regeling van de proefkas registreert:

- Warmtestromen, elektriciteitsverbruik van ventilatoren, pompen en warmtepompen.
- Temperaturen van diverse lucht- en waterstromen.
- Stand van kleppen in water- en luchtstromen.
- Druk in luchtverdeelkanaal en luchtslangen.

Bij een eventueel falen van de Honeywell regeling is de regeling van het kasklimaat overgenomen door de regeling van PPO.

Het computernetwerk van het PPO registreert het buitenklimaat en het kasklimaat. De vastgelegde gegevens zijn onder andere:

- Buiten: instraling, temperatuur, windsnelheid, windrichting.
- Binnen: temperatuur, luchtvochtigheid, CO₂-concentratie.
- Raamstanden.

2.3.1 Luchtraamregeling

Voor situaties waarbij de installatie met de Honeywell-regeling het kasklimaat niet goed kan sturen, is een automatische noodregeling aanwezig op de kasklimaatcomputer van PPO. Deze regeling heeft twee functies:

- Overname van de regeling door PPO als de temperatuur 3 °C onder de gewenste kasttemperatuur zakt.
- Opening van luchtramen zonder overname van de regeling:
 - * als de temperatuur 8°C boven de gewenste kasttemperatuur stijgt.
 - * als de relatieve luchtvochtigheid boven de 93 % komt.

2.3.2 Energiemonitoring

Warmtemeting.

Voor de energiemonitoring zijn 3 warmtemeters (WM) geplaatst:

- WM1 voor het meten van de koudelevering naar de LBK's.
- WM2 voor het meten van de warmtelevering door de warmtepompen.
- WM3 voor het meten van de warmtelevering van de gasketel.

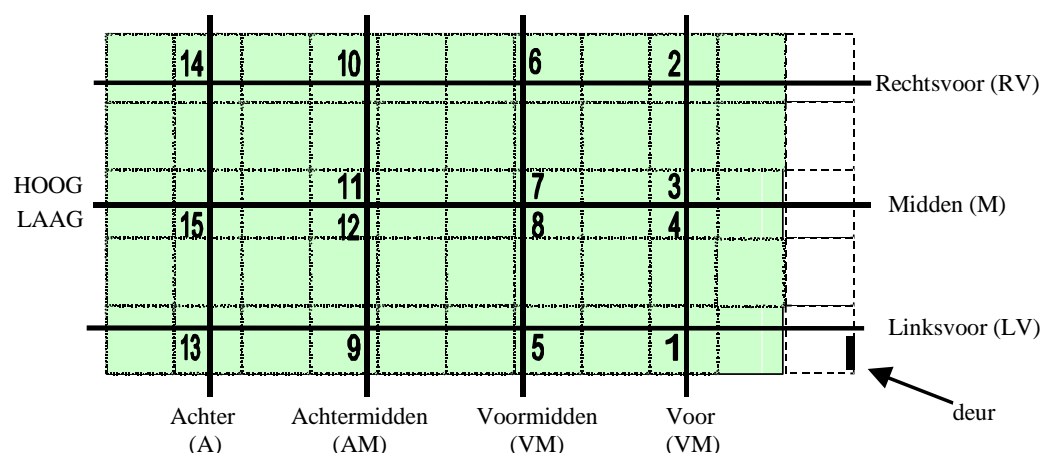
De warmtemeters zijn voorzien van niet-demontabele PT-100 opnemers. Deze zijn niet in de regeling opgenomen.

Elektriciteitsverbruik.

Alle elektrische verbruiken van warmtepompen, pompen en ventilatoren, uitgezonderd de koelmachine, worden geregistreerd.

2.3.3 Temperatuur en RV monitoring in de kas

Naast de meetbox voor het PPO- besturingsysteem werden 15 extra meetboxen opgehangen. Deze hingen tussen de vierde en vijfde rij (nummers meetbox: 1,5,9,13), tussen de 16^e en 17^e rij (nummers 4,8,12,15) en tussen de 28^{ste} en 29^{ste} rij (nummers 2,6,10,14) ter hoogte van de 4^e, 13^e, 22^{ste} en 31^{ste} mat op 1,35 m hoogte. Tussen rij 16 en 17 hingen nog drie boxen (nummers 3,7,11) op 2,50 m ter hoogte van de 4^e, 13^e en 22^{ste} mat. Deze meetboxen worden apart geregistreerd. Er zijn 15 temperatuuropnemers geplaatst waarvan 12 in een horizontaal vlak op 1,35 m hoogte en 3 in een horizontaal vlak op 2,50 m hoogte. Op deze manier is er in het midden van de kas een verticaal vlak met 6 metingen gerealiseerd. In het verticale vlak op 2,5 m hoogte zijn de meetboxen 3, 7 en 11 geplaatst. De plaats van de temperatuuropnemers is Figuur 5 in weergegeven (zie ook bijlage 2). De temperatuuropnemers registreren de temperatuur in stappen van 0,1°C.



Figuur 5 Plaats en nummer van temperatuuropnemers in de kas; het gestippelde raster geeft een afstand van 5 x 5 m aan.

2.3.4 Teelt

De basis van het teeltsysteem is de inrichting zoals die gekozen is voor het experiment in 2001. Dat wil zeggen twee teeltgoten boven elke luchtslang, of aan weerszijden van de kolommen. Voor de start van de teelt zijn, op basis van de ervaring van 2001, de teeltgoten 10 cm opgeschoven naar het midden van de gewasrij om de stengels voor de teeltgoten te kunnen opvangen in haken. Hierdoor komen de vruchten lager te hangen en is bij het oogsten de werkhouding beter. Vanwege het huidige uitblaasp patroon van de luchtslangen was het niet mogelijk te kiezen voor een V-systeem.

Op 24 januari zijn de planten van het ras Aromata in de kas gebracht. De plantdichtheid is 2,5 planten per m². Bij de helft van de planten is een extra kop aangehouden toen de planten voldoende ontwikkeld waren, zodat het aantal koppen 3.75 per m² wordt.

De overige teeltomstandigheden zoals watergift en bemesting zijn standaard voor tomaat. De voeding in de mat wordt een maal per twee weken geanalyseerd om zondig het bemestingsschema aan te passen.

In de kas zijn tien proefvelden van 12 planten uitgezet waarvan versgewicht productie wordt gemeten (zie bijlage 2). Twee van de meetvelden, veld 9 en 10, vormen samen een gedeelte waarvan met een weeggoet de watergift, verdamping en toename in versgewicht is gemeten. Deze velden liggen onder de goot en hebben door de boven de velden aanwezige draagconstructie minder licht gekregen.

Op basis van een reeks (onderstaande) gewaswaarnemingen is de ontwikkeling van het gewas nauwgezet gevolgd.

Gewaswaarnemingen

Non-destructief

Wekelijks aan een aantal planten (8 veldjes van 12 planten, zie bijlage 2) vaststellen welke tros bloeit.

Aan deze veldjes is ook geregistreerd hoeveel blad en dieven er geplukt zijn (gewicht) en is de vruchtoogst geregistreerd en op kwaliteit beoordeeld.

Bladtemperatuur in relatie tot kasklimaat condities

Verdamping

Destructief

Iedere 4 weken worden 12 planten at random geoogst voor destructieve metingen; gaten in kas worden opgevuld door een extra stengel aan buurplant aan te houden.

Aan iedere plant is gemeten:

Lengte, aantal bladeren (>0,5 cm), aantal trossen, bladoppervlak, vers- en drooggewicht van vruchten (per tros), stengel, en bladeren.

Deze metingen leveren gegevens over:

- verloop van bladoppervlakte-index in de tijd (belangrijk voor simulatie)
- verloop biomassaproductie in de tijd
- verdeling van biomassa over vruchten en vegetatieve delen.
- drogestofgehalten van bladeren en vruchten.
- Vergelijking van de waargenomen groeiparameters in combinatie met het gerealiseerde klimaat met door modellen voorspelde groei op basis van het gerealiseerde klimaat. Deze benadering is gekozen omdat het experiment niet in meerdere afdelingen (met controlekassen) kan worden uitgevoerd. De koppeling van proefresultaten aan simulaties (modelvoorspellingen) maakt het mogelijk om telen onder een gesloten dek te vergelijken met een normale teelt.

Bewaarbaarheid en smaak

Bewaarbaarheid en smaak worden in de loop van het experiment twee maandelijks onderzocht en vergeleken via een model voor smaak met een dataset die bij PPO beschikbaar is.



Watergift, voeding en verdamping

Een logboek van de afdeling "bedrijf" is bijgehouden waarin alle zaken rond meststoffen dosering, watergift, inzet van biologische en chemische gewasbeschermingsmiddelen is geregistreerd. De waterterugvang is geregistreerd door middel van condensbakken.

Met een weegopstelling is de verdamping en drain geregistreerd. Dit systeem verschaft inzicht in het verloop van het versgewicht van het gewas.

Gewasbescherming

Voor de teelt is een protocol gebruikt om alle waarnemingen aan ziekten, plagen en gewasbescherming te registreren.

De binnenluchtkwaliteit is niet gemeten omdat de concentratie van gewasbeschermingsmiddelen in de binnenlucht naar verwachting zeer laag zal zijn vanwege:

- De zeer lage dampspanning van de middelen.
- De actieve recirculatie van de kaslucht waardoor sporen in de lucht worden afgevoerd via het condenswater.
- Een relatief groot ventilatievoud in de bestaande kas bij PPO (lekkage naar buiten).

De bedrijfszekerheid is gewaarborgd en het afbreukrisico is geminimaliseerd door een onderhouds- en controlesysteem. Dit heeft bestaan uit:

Dagelijks (elke ochtend op werkdagen)

- De controle van gemeten temperatuur, RV en CO₂ niveau. Deze controle kan vanuit diverse werkplekken op het PPO worden uitgevoerd. Eerst verantwoordelijke hiervoor is de projectleider bij PPO (A. de Gelder). In geval van afwezigheid is deze taak overgenomen door een collega.
- Controle van de werking van de installatie op afstand door de projectleider van Ecofys (J. Schoonderbeek). Bij afwezigheid is deze taak door een collega overgenomen.
- Wederzijdse bevestiging van de geconstateerde bevindingen per e-mail.
- Indien nodig is de technische installatie ter plekke gecontroleerd door de projectleider PPO of zijn vervanger.
- Alle bevindingen bij PPO worden aan Ecofys doorgegeven. Ecofys onderhoudt de contacten met de leveranciers van de installaties en maakt afspraken over onderhoud en reparatie. Afspraken worden in overleg met PPO gepland en de werkzaamheden worden indien nodig ter plekke begeleid door PPO-personeel.

Einde werkdag:

- Controle van het functioneren van de technische installatie ter plekke door PPO.
- Indien noodzakelijk zijn de bevindingen direct aan Ecofys doorgegeven of is door PPO zelfstandig actie ondernomen.

Wekelijks

- Handmatige registratie van de meetgegevens: energie (warmtepompen, pompen, verwarming en koeling), uren (koelmachine, warmtepompen) en water (condenswater). Dit is ter vaststelling van ijkpunten van de elektronische dataregistratie.

3 PROJECTRESULTATEN

3.1 Installatie

In vergelijking met het experiment van 2001 is de installatie op een aantal punten aangepast. Begin mei was de koelvraag volgens verwachting zover gestegen dat een tweede koelmachine moest worden ingezet. De inpassing van deze tweede machine heeft tot enige instabiliteit in de koudwater systemen geleid. Daardoor ontstonden zowel in de koelmachines als in de koelblokken in de luchtbehandelingkasten problemen door het optreden van luchtblokkades in de waterstromen. Dit verklaart het relatief groot aantal minuten dat in mei en juni de luchtramen open zijn geweest, (zie Tabel 2). Als de storingen waren verholpen bleef de kas wel dicht. De oorzaak van de instabiliteit is weggenomen door de hydraulische systemen van koeling door de koelmachines en gebruik van koud water in de koelblokken als twee aparte circuits uit te voeren. Deze aanpassing in juni 2002 heeft de bedrijfszekerheid van de installatie vergroot (Tabel 2).

In juni is de isolatie van de koude dagbuffers aangebracht. Dit heeft geleid tot een verhoging van de beschikbaarheid van voldoende koud water voor koeling en ontvochtiging.

Eind juni is het koelvermogen in de kas verhoogd door 6 van de 12 slangen om en om in de kas te vervangen. Met nieuwe slangen gecombineerd met de oude slangen is het totale luchtdebiet en daarmee het koelvermogen aanzienlijk toegenomen. Dit heeft geresulteerd in de mogelijkheid om op lagere temperatuur te telen bij eenzelfde instraling, en tevens werd een kleinere temperatuurgradiënt in verticale richting bereikt (3.2.2).

De aanpassingen aan de installatie hebben tot een verhoging van het koelvermogen en de betrouwbaarheid geleid.

Na de aanpassingen in juni is het kasklimaat tot het einde van het experiment binnen de vooraf gestelde grenzen gehandhaafd en is het kasdek niet geopend om het kasklimaat te corrigeren. Door een elektrische storing met een onbekende externe oorzaak zijn eind juli de luchtramen gedurende enkele uren in geringe mate geopend.

3.1.1 Klimaatregeling

Telen in een gesloten kas met een nieuwe manier van verwarmen, ontvochtigen en koelen kent een aantal specifieke kenmerken. Hiermee is geen ervaring. Naast de eigen inbreng van deskundigen van PPO is tijdens de teelt wekelijks overleg geweest met een externe proefbegeleider, de heer Jan Mulder. De keuzes voor aanpassingen in de klimaatinstelling tijdens de wekelijkse beoordeling van de gewasontwikkeling zijn afgeleid van de keuzes voor een normale teeltwijze. Het instelpunt van de gewenste kastemperatuur is wekelijks in overleg vastgesteld. In bijlage 1 is een voorbeeld van het verloop van het setpoint kastemperatuur gedurende een etmaal voor twee verschillende dagen weergegeven.



Tabel 1 Wijzigingen in het instelpunt verwarming

Datum	Temperatuur		Maximale temperatuur verlaging vanaf 1 uur voor zon- onder t.o.v. dag temperatuur ¹⁾	Lichtverhoging		
	Dag	Nacht		Begin niveau (W/m ²)	Max. stijging (°C)	Mate van verhoging
25/1	23	23	0			
31/1				200	3	1°C per 100 W/m ² max 1 °C per 20 minuten
13/2				50	4	
22/2				50	7	1°C per 50 W/m ²
8/3				50	7	1°C per 100 W/m ²
27/3	23	23	2	100	6	max 1 °C per 30 minuten
3/4	21	21	2			
24/4				100	2	
29/4	23	23	2	100	5	
7/5				Geen lichtverhoging meer op dagtemperatuur.		
14/5	21	21	2			
6/6	21	20	2			
11/6	20	20	2			
26/6	20	18	3			
17/7	20	18	4			
6/8	19	17	4			
6/9	19	17	3			
19/9	18	16	3			
7/10	19	17	3			

¹⁾ Verhoging en verlaging van setpoint temperatuur met maximaal 1 °C per 30 minuten. Het tijdstip waarop de laagste temperatuur bereikt werd is daarmee afhankelijk van de maximale daling die ingesteld was.

In de gesloten kas is gewerkt met een koeltemperatuur in plaats van met een ventilatietemperatuur. De koeltemperatuur staat standaard op 1,5 °C boven de stooktemperatuur. Het is in de huidige regeling niet mogelijk om de koeltemperatuur onafhankelijk van deze stooktemperatuur in te stellen. Het verschil tussen koeltemperatuur en stooktemperatuur was wel te veranderen, maar hier is geen gebruik van gemaakt.

Voor de regeling van de kastemperatuur is in het traject tot de koeltemperatuur de luchtvochtigheid de sturende grootheid van de koeling, daarboven is de temperatuur de sturende grootheid. De luchtvochtigheid daalt bij koeling op basis van de temperatuur tot onder de ingestelde grens voor de regeling op luchtvochtigheid. Op zomerse dagen met sterke instraling kwam de luchtvochtigheid echter niet onder de 75% bij een kas temperatuur van maximaal 26 °C.

Een regeling waarbij de koeltemperatuur afzonderlijk van de stooktemperatuur te regelen is geeft een grotere vrijheid in de regeling van het kasklimaat. Met name is dit van belang voor de regeling van de lichtverhoging. In de gebruikte regeling was de lichtverhoging alleen te realiseren door lichtafhankelijke verhoging van de stooktemperatuur.

Om de ingestelde kastemperatuur inclusief lichtverhoging te bereiken moest extra gestookt worden omdat door actieve ontvochtiging gelijktijdig warmte aan de kas werd onttrokken.

De kastemperatuur in de gesloten kas wordt in sterke mate door instraling bepaald. In een gesloten kas zal in het voorjaar als de instraling hoog is en de buitentemperatuur laag de verdamping door de instraling toenemen en zal de koelvraag voor ontvochtiging al groot zijn. Om de temperatuur op het gevraagde niveau te houden moet de lucht na ontvochtiging weer worden verwarmd.

Dit heeft vooral invloed als een lichtverhoging op de stooktemperatuur wordt toegepast. Door de ontvochtiging wordt de kasluchttemperatuur verlaagd, waardoor voor het bereiken van een ingestelde lichtverhoging extra moet worden verwarmd.

Aanvankelijk is vanwege de gewasontwikkeling gewerkt met een lichtverhoging op de stooktemperatuur. De lichtverhoging is begin mei uit de klimaatregeling gehaald.

In de zomer bleek dat de kasluchttemperatuur pas boven de ingestelde koeltemperatuur uit steeg bij een instraling van ongeveer 450 W/m² (Bijlage 3).

In de periode vanaf begin april is het setpoint voor de stooktemperatuur geleidelijk verlaagd. Eind juni is een verschil tussen dag- en nachttemperatuur van 2°C ingesteld.

Om de opname van Calcium te stimuleren is na 27 maart vanaf een uur voor zon-onder de stooktemperatuur verlaagd tot 2, 3 of 4 °C onder de dagtemperatuur. Vanaf een uur na zon-onder werd het set-point weer verhoogd tot de nachttemperatuur (voor voorbeelden zie bijlage 1).

De luchtvochtigheid is het grootste deel van de teelt geregeld op een maximumwaarde van 90%. In de regeling werd met een P-band van 5 % gewerkt zodat de ontvochtiging werkte vanaf een relatieve luchtvochtigheid van 85 %.

In september is de maximumwaarde verlaagd naar 85 % om de risico's op Botrytis bij de lagere kastemperaturen te verkleinen.

3.1.2 Luchtramen

Op de kasklimaatcomputer van PPO was een automatische luchtraamregeling aanwezig. Deze regeling heeft bij de enkele storingen goed gewerkt. Zonodig werden de luchtramen geopend bij een luchtvochtigheid boven de 93 %.

Zodra de luchtbehandelinginstallatie op momenten met een hoge instraling wordt uitgeschakeld blijken de temperatuur en luchtvochtigheid zeer snel te stijgen, d.w.z binnen 10 minuten, tot onacceptabele waarden. Een goede noodventilatie is voor de praktische toepassing een belangrijke voorwaarde.

Maand	Periode van 10 minuten open	Tijd	Tijd (%)	Gemiddelde raamstand (%)
Februari	1	10 min	0,0	15
Maart	0		0,0	0
April ¹	7	1 uur+10 min	0,2	9
Mei ²	77	12 uur+ 50 min	1,8	35
Juni ³	221	36 uur en 50 min	5,1	54
Juli ⁴	3	30 min	0,1	2
Augustus ⁵	28	4 uur, 40 min	0,6	6
September ⁶	3	30 min	0,1	27
Oktober	0		0,0	0
November ¹	1	10	0,0	1
Totaal	341	56 uur, 50 min	0.8	

¹ enkele kortdurende overschrijdingen RV

² gedurende twee etmalen langdurige storing in levering koud water na plaatsing twee koelmachine

³ gedurende drie etmalen langdurige storing in levering koud water, onder meer bij aanpassing installatie

⁴ enkele kortdurende overschrijdingen RV

⁵ storing in elektronica door externe oorzaak

⁶ gewasbespuiting waarbij RV kortdurend de grenswaarde overschrijdt.

Tabel 2 Het aantal perioden van 10 minuten waarin de luchtramen zijn geopend en de gemiddelde raamopening in die periode

In bovenstaande tabel is te zien dat in mei en juni de luchtramen gedurende langere perioden op enkele dagen zijn open gegaan. De oorzaak was de instabiliteit van het hydraulische systeem na het plaatsen van een tweede koelmachine en het veelvuldig ontstaan van luchtbellens in de waterleidingen. Eind juni is de installatie aangepast waarna de levering van koud water voor koeling van de kas betrouwbaar bleek.

De regeling voor de CO₂ dosering gebruikt als basis het bij PPO vrijkomende rookgas. Als de ketel installatie van PPO onvoldoende rookgas produceert wordt aanvullend zuiver CO₂ gedoseerd.

Er is niet aan te geven hoeveel CO₂ is gedoseerd omdat de hoeveelheid afhankelijk is van de klepstand van de rookgas installatie, terwijl ook in andere kassen CO₂ wordt gebruikt.

Uit het gemeten verloop van de CO₂ concentratie in de eerste nachten van februari is berekend dat de luchtuitwisseling door lekkage 2 keer zo groot is als de waarde die hiervoor in het ECP model wordt gebruikt. In ECP wordt gewerkt met de factor $4,5 \cdot 10^{-5}$ x windsnelheid. Voor de gesloten kas is de factor $10 \cdot 10^{-5}$.

3.2 Kasklimaat

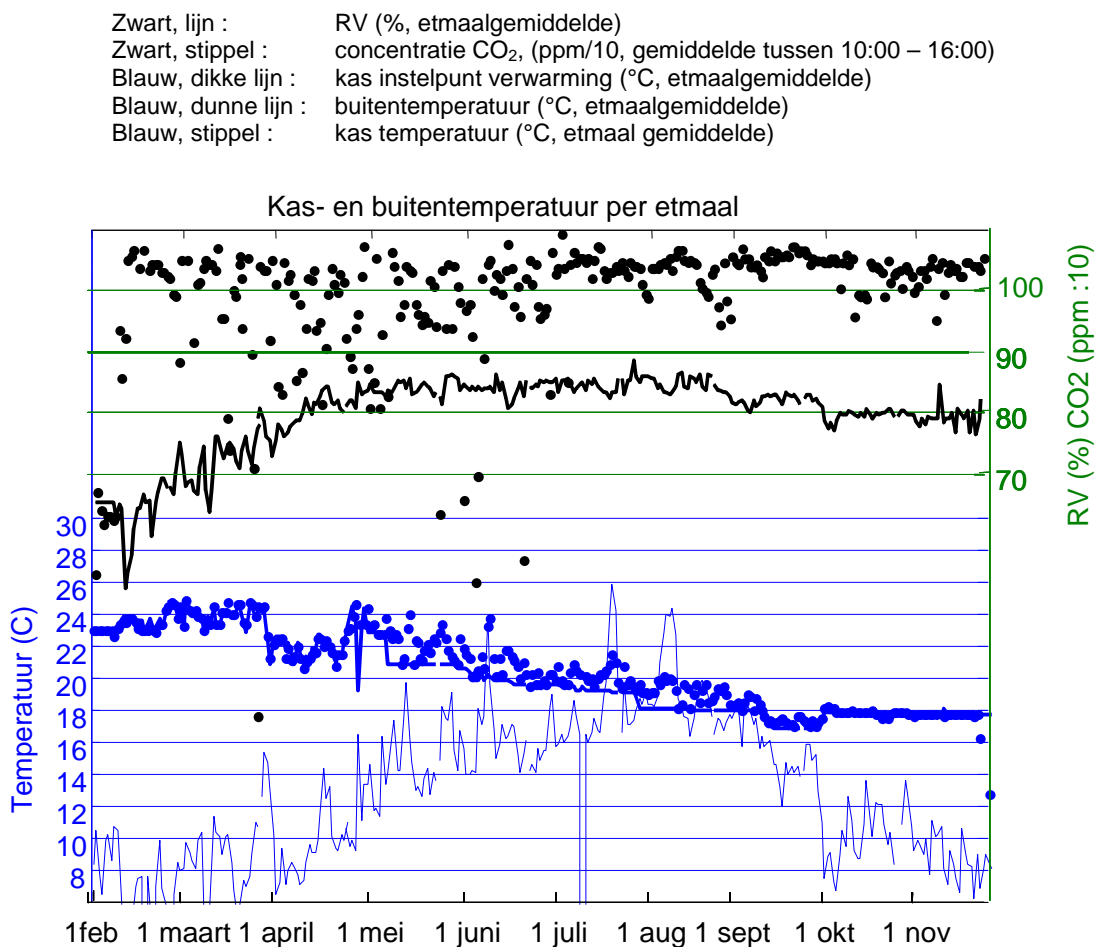
3.2.1 Kasklimaat over de hele periode

Het etmaalgemiddelde van het gerealiseerde klimaat is weergegeven in figuur 6. Hierin is het verloop in de gehele teeltperiode weergegeven. In deze grafiek zijn de kas- en buitentemperatuur en het instelpunt verwarming als etmaalgemiddelde weergegeven. Tot begin mei is de kastemperatuur gelijk gebleven aan het instelpunt. Er werd gestookt om de temperatuur te bereiken. Half mei is de lichtverhoging op het instelpunt verwijderd en is de temperatuur in de kas hoger geweest dan het instelpunt. Naast temperatuur zijn ook CO₂ en relatieve luchtvochtigheid over deze periode weergegeven. De luchtvochtigheid is in april nog iets gestegen door de ontwikkeling van het gewas en daarna gestabiliseerd. De CO₂-concentratie is een gemiddelde van de periode van 10:00 tot 16:00 uur

Eind juni zijn 6 van de 12 slangen vervangen door slangen met een hoger debiet en zijn de koude dagbuffers geïsoleerd. Dit heeft geleid tot een hoger en langer beschikbaar koelvermogen. Het is zichtbaar door de daling van de gemiddelde temperatuur in de kas in maanden juli en augustus ten opzichte van de temperatuur in mei en juni. Eind september is de instelling van de RV met 5% verlaagd.

In de bijlage is de kas- en buitentemperatuur per maand weergegeven.

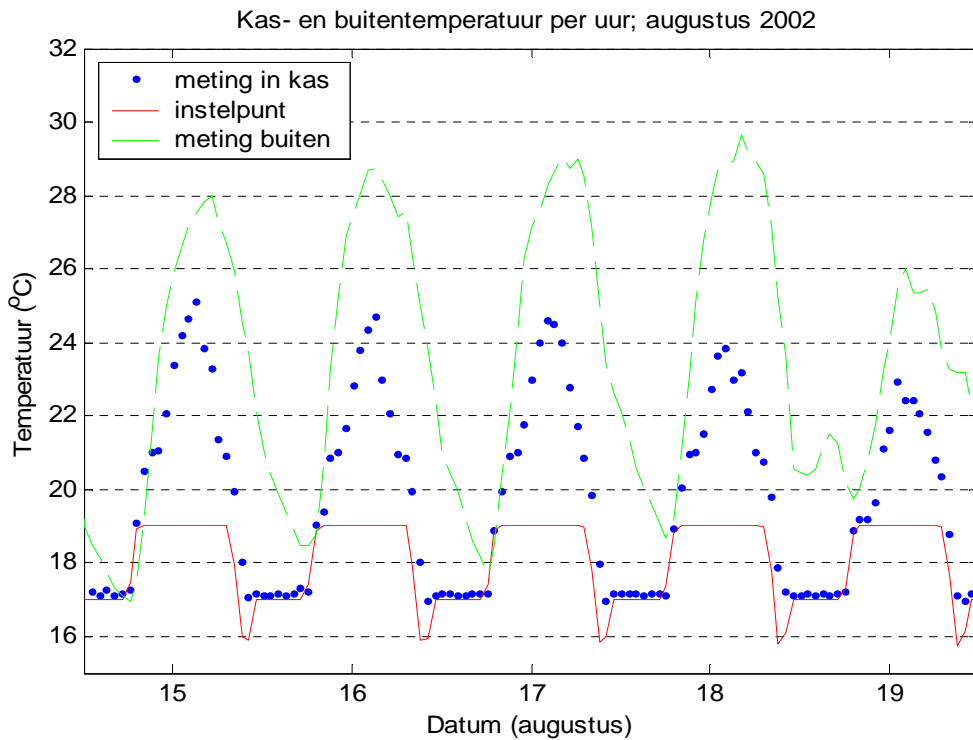
Figuur 6 Kas- en buitentemperatuur april – augustus 2002



Uit Figuur 6 blijkt duidelijk de toenemende buitentemperatuur in combinatie met dalend instelpunt voor de kastemperatuur.

In Figuur 7 is kas- en buitentemperatuur gedurende een zeer warme periode van 5 dagen weergegeven. De instraling is gedurende deze periode vrijwel maximaal geweest. Duidelijk is te zien dat de temperatuur in de kas 3 tot 5 °C lager is dan buiten en dat de gewenste waarde in de nacht snel gehaald wordt terwijl het buiten warmer is.

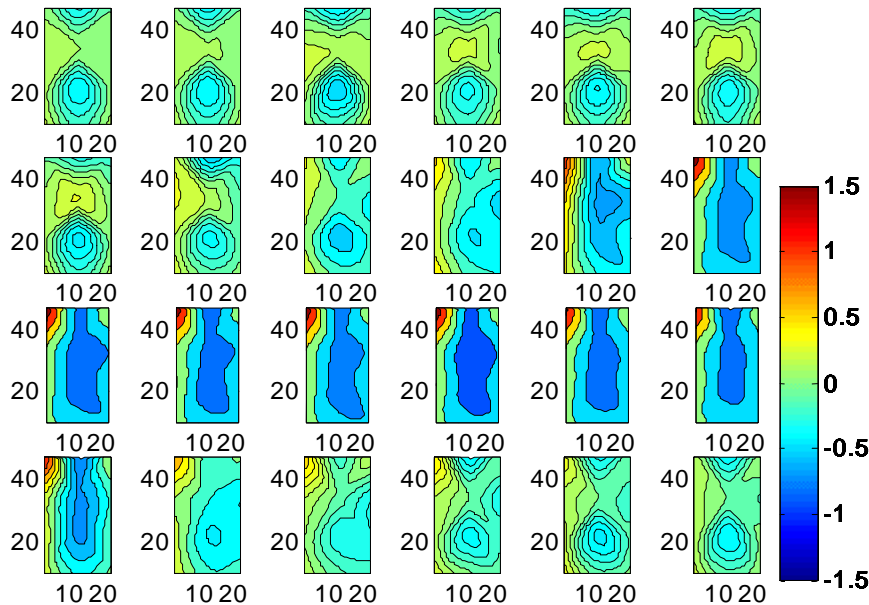
Figuur 7 Kas- en buitentemperatuur, 5 warme dagen in augustus 2002



3.2.2 Horizontale en verticale temperatuursverdeling in de kas

Binnen het vlak van de meetvelden is de horizontale temperatuurverdeling geregistreerd. De variatie binnen dit vlak wordt geïllustreerd voor een dag met volgende figuur.

Figuur 8 Horizontale temperatuurverdeling (uurgemiddelde) op 16 augustus. De kleuren geven de afwijking ten op zichte van de gemiddelde temperatuur voor die gemeten is met de meetbox van PPO. Linksboven is uur 1, rechtsonder is uur 24.



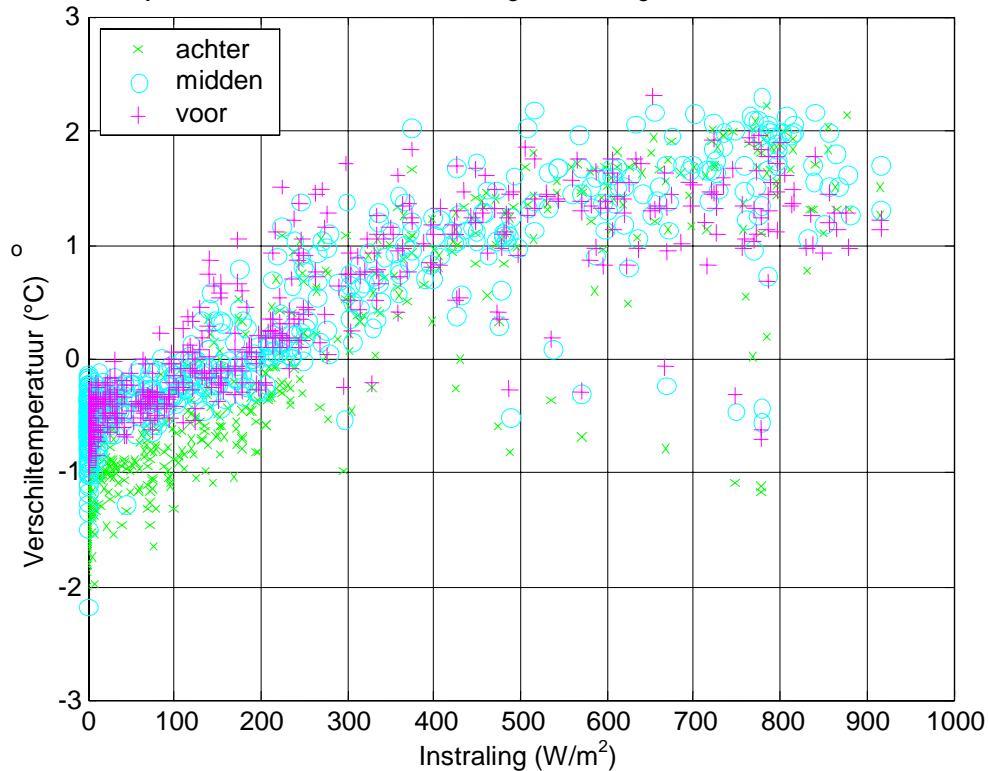
Gedurende nacht is de temperatuurverdeling evenwichtig. Vanaf uur 10 tot en met uur 19 is een duidelijke koude zone in het midden van de kas zichtbaar. Dit betekent dat het midden van de kas beter wordt gekoeld dan de randen van de kas. Het rode gebied linksboven is het gevolg van de zoninstraling.

In de volgende 2 figuren zijn de temperatuurverschillen tussen de onderste en bovenste rij temperatuuropmeters weergegeven. Er zijn drie opnemers op 1,35 m en drie opnemers op 2,50 m hoogte opgehangen, zie 2.3.3.

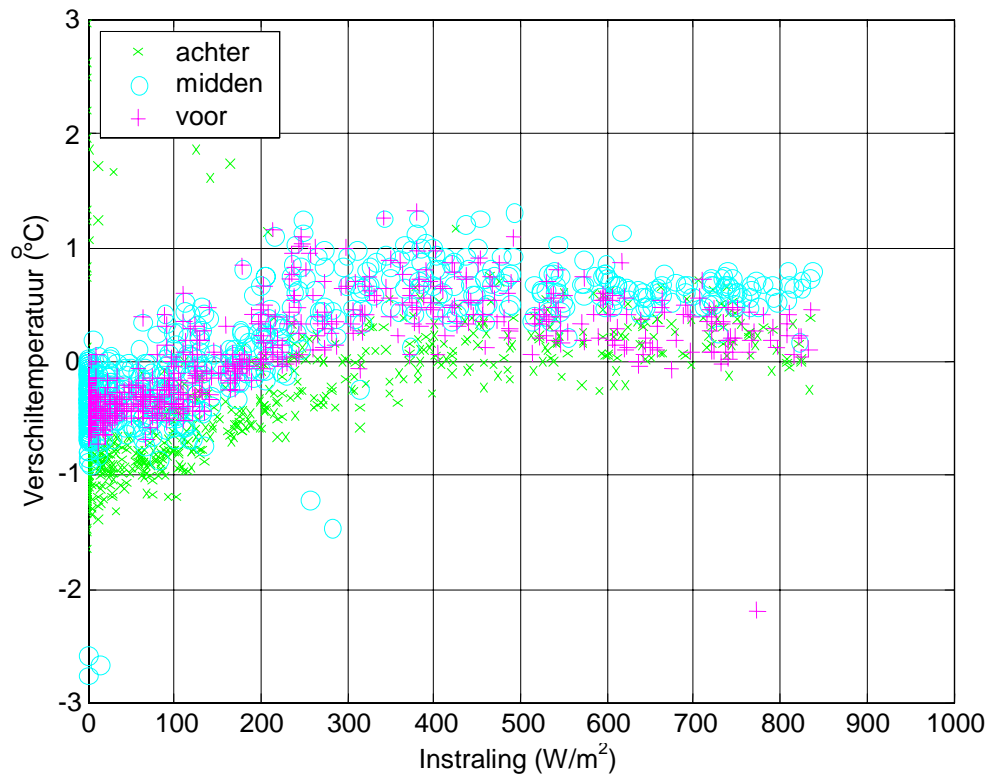
Figuur 9 is de verticale gradiënt weergegeven van de maand juni met de 12 oorspronkelijke slangen. De gradiënt neemt toe met de instraling tot circa 2°C bij 800 W/m^2 . De punten onder de puntenband met een temperatuurverschil tussen -1 en $+1^{\circ}\text{C}$ zijn gemeten bij het geopend zijn van de luchtramen door storing in de koeling.

In Figuur 10 is de gradiënt weergegeven na het vervangen van 6 slangen door 6 nieuwe slangen met een vergroot debiet. Duidelijk is te zien dat de gradiënt kleiner is dan in de vorige figuur en beperkt blijft tot circa 1°C bij 800 W/m^2 . Omdat de luchtramen in juli slechts in totaal 30 minuten in zeer kleine mate zijn geopend zijn er geen significante punten onder de puntenband.

Figuur 9 Verschiltemperatuur verticaal met 12 oorspronkelijke slangen, uurgemiddelde, juni 2002. Plaats van metingen zie Figuur 5, nr 3,4,7,8,11,12.



Figuur 10 Verschiltemperatuur verticaal met 6 nieuwe slangen, uurgemiddelde, juni 2002 (plaats van metingen zie Figuur 5)



3.2.3 CO₂ dosering

Er is niet aan te geven hoeveel CO₂ is gedoseerd omdat de hoeveelheid afhankelijk is van de klepstand van de rookgasinstallatie, terwijl ook in andere kassen CO₂ is gebruikt.

In Figuur 6 is de gemiddelde van de concentratie CO₂ tussen 10:00 en 16:00 weergegeven. De CO₂ concentratie is steeds op circa 1000 ppm gehouden. Tijdens de zeer kortdurende periodes van het gedwongen openen van de luchtramen is de concentratie gedaald. Dit is vooral in de maand juni gebeurd.

De CO₂ dosering is voor onderhoud een keer uitgezet. Bij gesloten luchtramen daalde de CO₂ concentratie op de dag in een uur tijd van 1000 ppm tot onder de 300 ppm. Bij stopzetten van de dosering aan het einde van de dag is de daling veel langzamer; in een periode van zes uur van 1000 naar 500 ppm.

3.3 Teelt

Op 24 januari zijn de planten van het ras Aromata in de kas gebracht. De planten waren relatief klein. De plant dichtheid is 2,5 planten per m². Half maart is bij 1 op de 4 planten een extra kop aangehouden. Half april is dit nogmaals gedaan bij een op de 4 planten. Tot half juli is geteeld met 3,75 koppen per m². Half juli is bij een op de vier koppen de top eruit gehaald om de stengeldichtheid te verminderen. Bij de overige stengels is de top op 25 september eruit gehaald.

De eerste bloei is geregistreerd op 19 februari. De zetting is steeds goed geweest. De eerste oogst werd gedaan op 4 april. De teelt is beëindigd op 28 november.

De gewasontwikkeling was in het algemeen goed. De lengtegroei was in het begin beperkt, waardoor korte internodiën ontstonden. Tijdens de wekelijkse gewasbespreking van PPO met J. Mulder zijn de te nemen teeltkundige maatregelen besproken. Deze maatregelen hadden betrekking op de voeding, zoals verhoging of verlaging van de Ec, de frequentie van de watergift, de stooktemperatuur, de verlaging van de temperatuur aan het einde van de dag, gewasonderhoud e.d. In overleg is getracht om met handhaving van de onderzoeksdoelstellingen een optimale teelt te bereiken.

In juli is verbranding aan de bladranden waargenomen. Op dat moment waren de vruchten ook minder homogeen van kleur. Er zijn bladmonsters geanalyseerd om na te gaan of er sprake was van kalium gebrek. Dit was niet aantoonbaar.

De bladeren bleven in juli en augustus vrij klein van oppervlak. Een mogelijke oorzaak is de hogere luchtvochtigheid in de zomer met een lage verdamping. Hierdoor komt er minder Calcium in de bladeren. De ontwikkeling van de bladeren is daardoor geremd. Dit symptoom is vroeger beschreven als Short Leaf Syndrome (Nederhoff, 1994. p140).

In september nam de grootte van de bladeren weer toe.

3.3.1 Productie in vers gewicht

In de kas zijn tien proef velden van 12 planten uitgezet waarvan versgewicht productie wordt gemeten (zie bijlage 2). Twee van de meetvelden, veld 9 en 10, vormen samen een gedeelte waarvan met een weegoot de watergift, verdamping en toename in versgewicht is gemeten. Deze velden liggen onder de kasgoot en hebben door de boven de velden aanwezige draagconstructie minder licht gekregen.

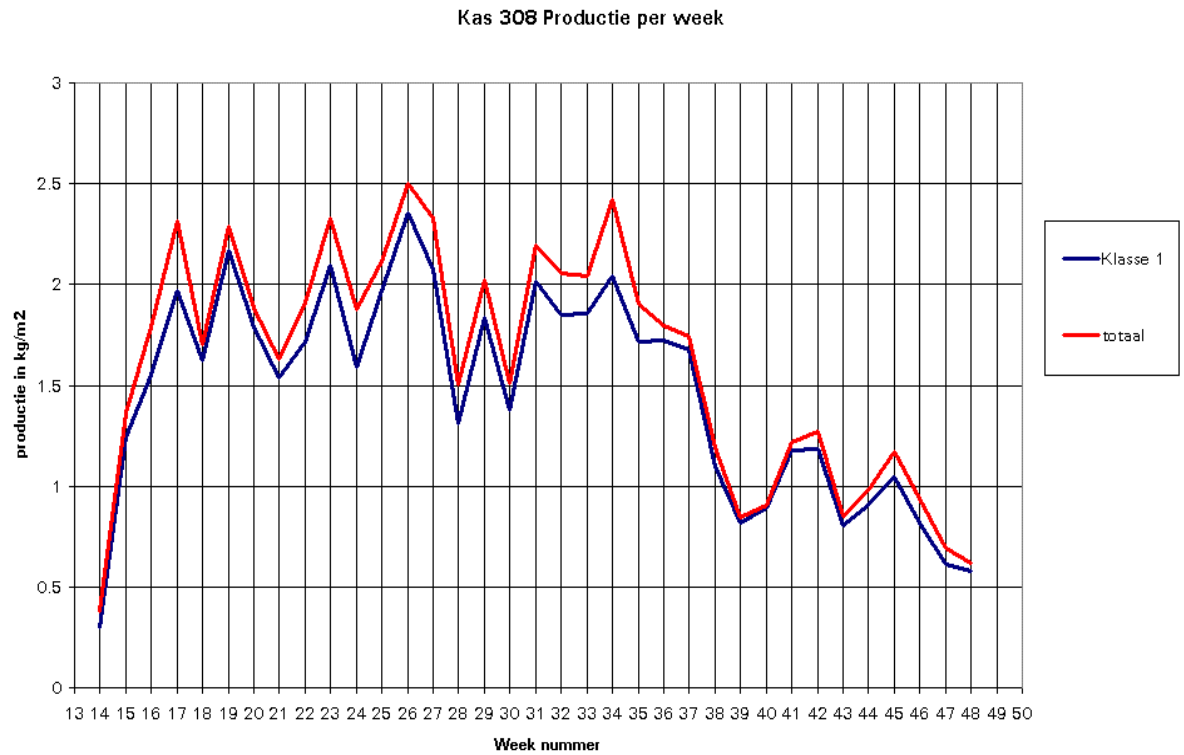
Productie in kg per m ² per veld uitgesplitst naar kwaliteit											
Veld	Klasse 1	Grof	Klein	Neusrot	Zwelscheur	Goudspikkel	Temperatuur schade	Overig	Totaal	Groene vruchten bij einde teelt	Vruchten bij gewas onderhoud
1	52.1	1.53	0.72	0.84	0.42	0.98	0.12	0.28	57.0	1.2	0.8
2	50.5	1.99	0.91	1.39	0.49	0.69	0.02	0.49	56.5	1.3	0.5
3	54.0	1.47	0.68	0.37	0.41	1.44	0.05	0.28	58.7	1.4	0.4
4	50.0	1.51	0.69	0.92	0.11	0.71	0.17	0.38	54.5	1.3	0.4
5	50.9	1.03	0.92	1.10	0.27	1.07	0.20	0.26	55.7	1.3	0.4
6	53.2	1.62	0.38	0.83	1.32	1.07	0.12	0.33	58.9	1.6	0.4
7	53.0	1.54	0.74	0.77	0.48	0.48	0.11	0.33	57.4	1.6	0.4
8	55.4	1.32	0.79	0.84	0.30	0.79	0.09	0.50	60.0	1.3	0.5
9	46.4	1.27	1.44	0.76	0.43	0.69	0.08	0.34	51.4	1.4	0.8
10	47.9	0.75	1.11	0.80	0.61	0.73	0.05	0.51	52.5	1.7	0.5
Gemiddeld	51.3	1.40	0.84	0.86	0.49	0.87	0.10	0.37	56.3	1.4	0.5

Tabel 3 Productie per veld, uitgesplitst naar kwaliteit (kg/m²)

De totale productie komt op 56,3 kg/m². Omdat aan het einde van de teelt geen gebruik is gemaakt van ethrel kon nog 1,4 kg/m² groene vruchten worden geoogst. Tijdens het gewas onderhoud zijn enkele keren kleine vruchten die moeilijk afrijpten weggenomen. Dit was gemiddeld 0,5 kg/m². Bij de productie per veld is op te merken dat de productie op de velden van de weegoot, veld 9 en 10, duidelijk lager is dan van de overige velden. Zoals eerder is aangegeven gaf de draagconstructie van de weegoot in combinatie met de kasgoot een verlaging van de lichtintensiteit op deze velden. De invloed hiervan is niet gekwantificeerd. De gemiddelde productie is daarom ook niet voor deze invloed aangepast.

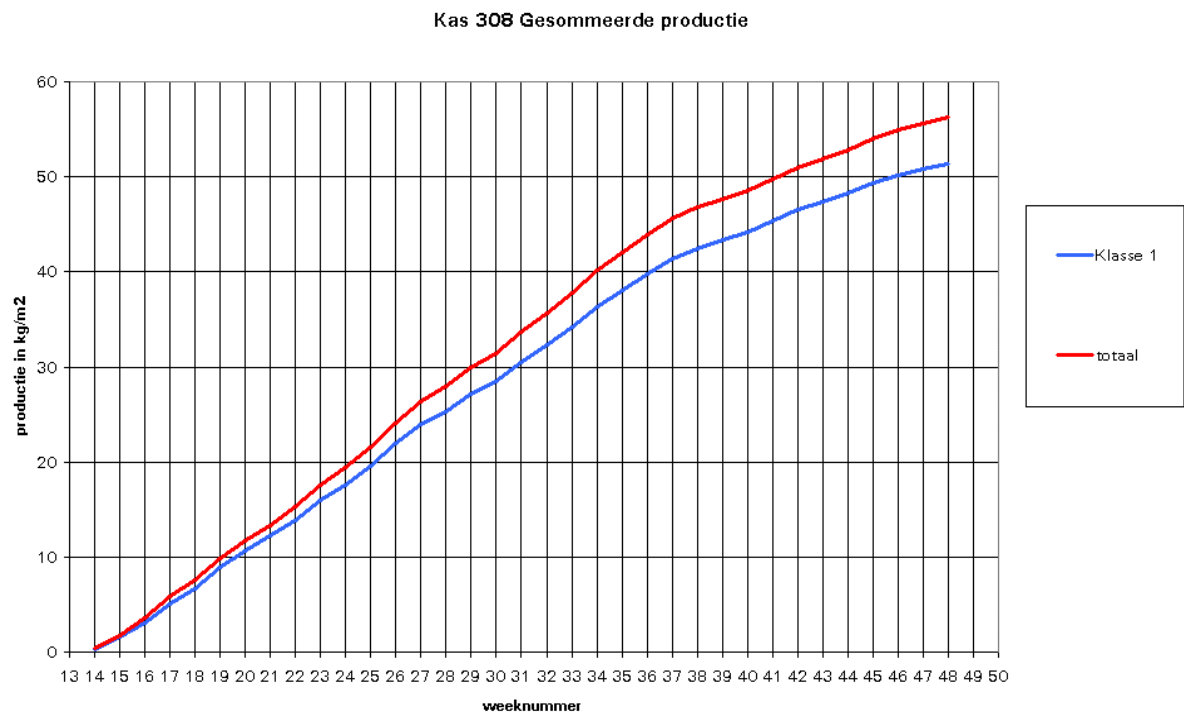
Twee of drie keer per week werd geoogst. De weekproductie is weergegeven in Figuur 11. De productie kende een regelmatig patroon. Met name in korte warme perioden werd geen piek productie gevonden, maar bleef de productie per week op een gemiddeld niveau. De reden hiervoor is het handhaven van een gelijkmatige temperatuur.

Figuur 11 Productie per week



De voortschrijdende cumulatieve productie is weergegeven in de Figuur 12

Figuur 12 Gesommeerde productie

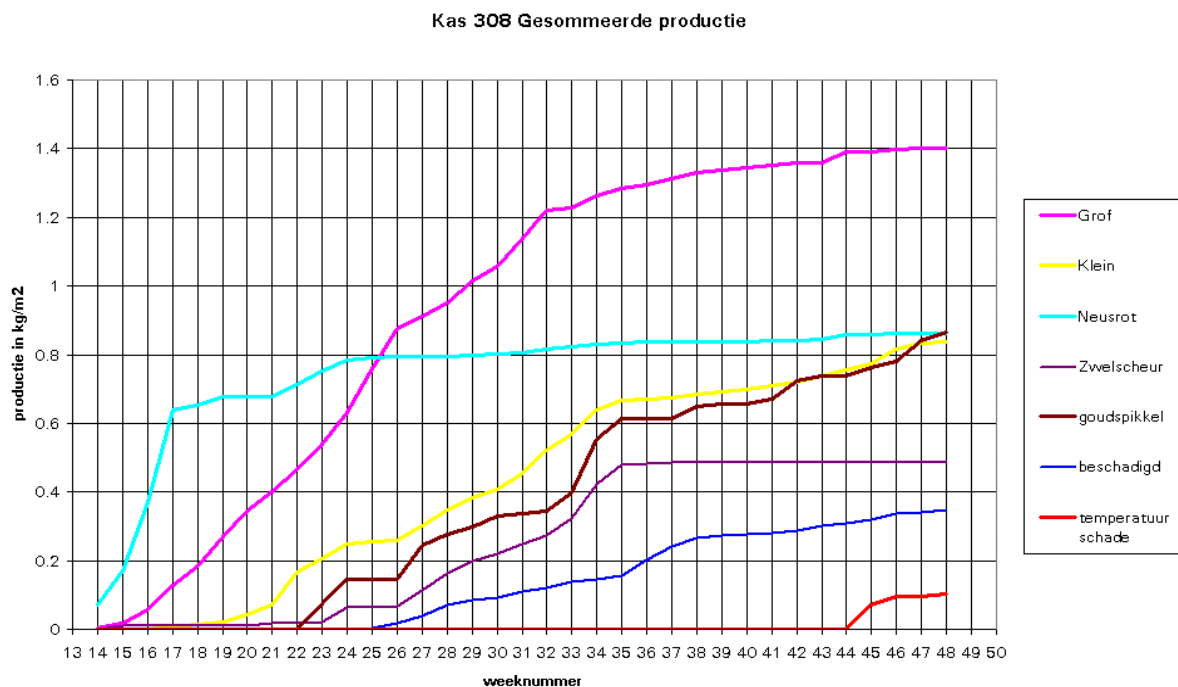


3.3.2 Afwijkende vruchten

In Figuur 13 is de gesommeerde productie van afwijkende vruchten (niet klasse 1) weergegeven. In het begin van de teelt kwam er nogal wat neusrot voor. De late plantdatum in combinatie met een sterke vegetatieve groei had als resultaat dat de vruchten te weinig Calcium konden opnemen. Een hogere dan normale gewasverdamping werkte daarbij niet bevorderlijk (3.3.6). Na week 17 is de neusrot vrijwel volledig verdwenen. Regelmatig worden bonkige vruchten geoogst. Ook kwamen vrij veel kleine vruchten voor aan het einde van de trossen. Deze vruchten zetten wel, maar groeiden onvoldoende uit.

De afwijkende vruchten zijn bij gewasonderhoud niet verwijderd, maar pas bij de oogst apart gemeten. In Figuur 13 worden de cumulatieve producties weergegeven onderscheiden naar klassen van vruchten die niet onder klasse 1 vallen. Deze vruchten zijn wel meegerekend in de totale productie zoals weergegeven in Figuur 11 en Figuur 12.

Figuur 13 Gesommeerde productie afwijkende vruchten



Een opvallende afwijking (“temperatuurschade”) ontstond in week 44. De neus van de vruchten vertoonde een soort glazigheid en vormde necrotische plekje. De oorzaak hiervan wordt gezocht bij het uitvallen van alle warmtepompen gedurende 3 dagen, waardoor de verwarming tijdelijk volledig via het buisrailnet moest worden geregeld. Gelijktijdig wordt voor ontvochtiging lucht zonder naverwarming met een temperatuur van ca 14 °C de kas ingebracht. De combinatie van koude ingeblazen lucht en sterke verwarming via buisrailnet is blijkbaar nadelig voor de vruchtkwaliteit. Mogelijk is er sprake van hoge worteldruk en onvoldoende verdamping. Na de opheffing van de storing aan de warmtepompen zijn geen nieuwe vruchten meer aangetast.

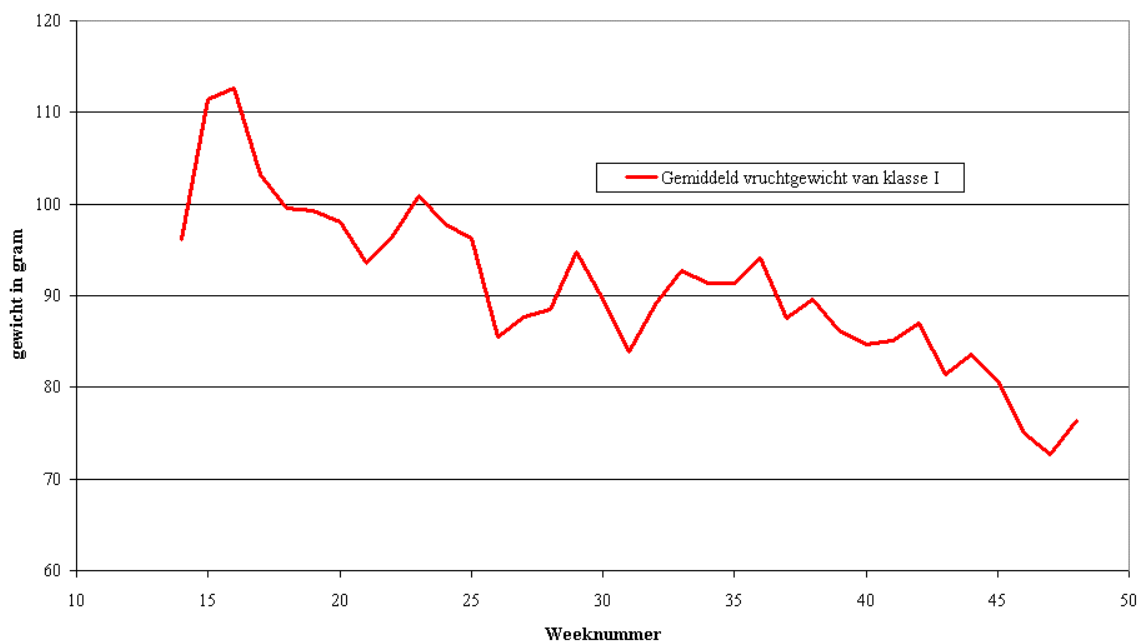
Figuur 14 Temperatuurschade aan de vrucht als gevolg van een tijdelijke combinatie van koude ingeblazen lucht en sterke verwarming via het buisrailnet.



3.3.3 Vruchtgewicht

Het gemiddelde vruchtgewicht van de eerste kwaliteit is in het begin ruim boven de 100 gram gekomen. Gedurende de teelt is het gemiddelde vruchtgewicht gedaald. Vooral de laatste vruchten aan de trossen blijven klein. Bij de bepaling van droge stof voor de simulaties blijkt het droge stof percentage van de vruchten (5.7 % aan het einde oplopend naar 6 %) hoger te zijn dan in een normale teelt (tussen de 5 en 5.5 %).

Figuur 15 Vruchtgewicht per week



3.3.4 Resultaten smaak en houdbaarheidsonderzoek

Er zijn vier smaaktesten uitgevoerd met het PPO smaakmodel.

Voor de bepaling van de houdbaarheid is de stevigheid van vruchten akoestisch gemeten met de AFS op 0, 7 en 14 dagen na de oogst van de monsters tomaat. Bij een AFS waarde kleiner dan 2.0 is een vrucht te zacht. Weergegeven staat de gemiddelde AFS waarde en het percentage te zachte vruchten dat onder deze norm komt.

Datum oogst	Smaak		Sap (%)	Stevigheid					
	Smaak	R		Dag 0		Dag 7		Dag 14	
				gem. AFS	te zacht	gem. AFS	Te zacht	gem. AFS	te zacht
18/ 4	49	4.5	28	5.0	0%	3.2	15%	1.9	73%
20/ 6	53	4.9	39	4.5	4%	3.3	7%	3.2	11%
14/ 8	51	4.6	38	4.6	0%	3.6	0%	2.7	4%
10/10	61	5.5	37	5.4	0%	3.7	4%	2.7	7%

Tabel 4 Resultaten smaaktest en houdbaarheid

In april was de houdbaarheid van de tomaten (dag 14) niet goed. Later in het jaar werd dit steeds beter.

In oktober smaakten de tomaten het beste. De refractie was toen zeer hoog. In april was het percentage sap nog heel laag. In april, juni en augustus is de smaak redelijk tot goed te noemen. In oktober is de smaak goed.

3.3.5 Gewasbescherming

Voor de schimmelbestrijding is gezwaveld tegen meeldauw. De zwavelpotten zijn aanvankelijk bij de eerste poot (ca 4 meter vanaf het begin van het gewas) in de kas boven het gewas gehangen. Omdat de voorste planten niet goed beschermd bleken is drie keer een bespuiting tegen meeldauw uitgevoerd. Verder is het zwavelen geïntensiveerd en zijn de zwavel potten aan de voorkant van de kas boven het einde van de slangen gehangen. De verplaatsing van de zwavel potten is nodig vanwege de veranderde luchtstroming in de kas. Vanaf de voorkant van de kas kwam de zwavel overal. Na het verplaatsen van de zwavelpotten is geen meeldauw meer geconstateerd.

In mei zijn twee stengels met botrytis waargenomen. De oorzaak was het nat worden van de stengel vanuit de teeltgoot.

Op de bladrandjes die in juli en augustus ontstonden groeide schimmel pluus. Daarom is begin september één maal preventief gespoten tegen botrytis. Tevens is het setpoint voor de relatieve luchtvochtigheid verlaagd van 90 naar 85 %. Aan het einde van de teelt vormden de afge oogste stengels waar half juli de kop uitgehaald was een extra bron van botrytis infectie. Eind oktober zijn 15 planten verwijderd vanwege botrytis.

Bestrijding van insecten is zo veel mogelijk biologisch gedaan.

Na de periode in juni waarin de luchtramen langere tijd open stonden (voor oorzaak zie Tabel 2) werd mineervlieg waargenomen. Met biologische bestrijding bleef die volledig onder controle.

Aan de gevel werd een plek met spint waargenomen. Deze is pleksgewijs bestreden en is niet uitgebreid. Aan het einde van de teelt werd een plek met witte vlieg waargenomen. Hier is geen extra actie meer op ondernomen.

In Tabel 5 is de totale inzet aan biologische en chemische bestrijding weergegeven voor de kas van 1400 m².

Biologisch			
<i>Bestrijder</i>	<i>Product</i>	<i>Aantal kaartjes/kokers</i>	<i>Opmerking</i>
Encarsia formosa	En-Strip	126	Ca 5.4 bestijders/m ²
Encarsia formosa + Eretmocerus eremicus	Enermix	294	Ca 12.6 bestrijders/m ²
Sluipwespen	Minex	6	Ca 1 bestrijder/ m ²
Macrolophus caliginosus	Mirical	4	Ca 1.4 bestrijders/m ²
Chemisch		Weeknummer	
Meeldauw	Zwavel	Wekelijks	
Meeldauw	Bitertanol (Baycor)	21	
Meeldauw	Bupirimaat (Nimrod)	22	
Meeldauw	Bitertanol (Baycor)	27	eerste vak
Spint	fenbutatinoxyde(Torque) + hexythiazox(Nissorun)	29	10 planten aan gevel
Spint	fenbutatinoxyde(Torque) + hexythiazox(Nissorun)	35	10 planten aan gevel
Botrytis	tolyfluanide (Eupareen)	36	

Tabel 5 Inzet biologische en chemische bestrijding

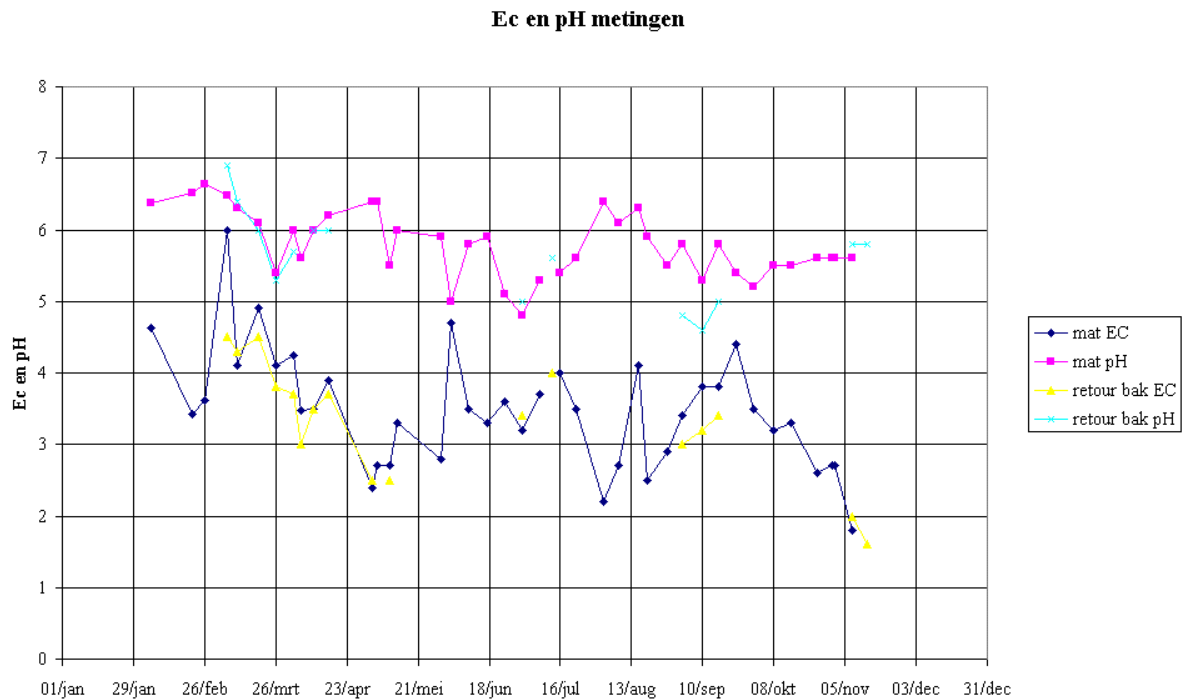
3.3.6 Watergift, terugvang en voeding

De watergift is geregeld door een VOCOM substraat unit. In de periode direct na het planten is op tijd watergegeven. Nadat de planten op het plantgat kwamen is op basis van instraling water gegeven. De substraat unit krijgt daarvoor op basis van een transpiratie model een stuursignaal.

Vanaf begin april is het drainwater gerecirculeerd. Het condenswater uit de LBK is niet hergebruikt maar na registratie van de hoeveelheid geloosd.

Vanwege neusrot is in maart de Ca hoeveelheid in de voeding aangepast en de EC (Electrical Conductivity) in de mat verlaagd. Verder is gewerkt met een normaal voedingsschema. De volgende figuur geeft het gemeten verloop van EC en pH (zuurgraad) aan.

Figuur 16 EC en pH-metingen



In maart startte de watergift 1,5 uur na zon-opgang en ging door tot 1,5 uur voor zononder. Begin juni is de starttijd "watergeven" gezet op 3,5 uur na zon-opgang en werd gestopt 2 uur voor zononder. De watergift van een druppelaar per kraanvak en de drain van een mat per kraanvak zijn dagelijks handmatig geregistreerd.

Daarnaast is met een prototype van een weeggoot de watergift, verdamping en groei geregistreerd. Uit de registraties, de gewasgroei en de condensopvang van de luchtbehandeling is een balans van het waterverbruik te maken. Deze balans is zonder het water dat voor de aanvang van de teelt is gebruikt om de matten met water te verzadigen. Er zit in de handregistratie een vrij grootte onnauwkeurigheid door de wijze van waarnemen. Hiermee rekening houdend is in de luchtbehandelingskast ongeveer 50 % van het verdampte water teruggevangen.

Dit water is zuiver op sporen koper na, die afkomstig zijn van de warmtewisselaars. De concentraties koper in de monsters condenswater waren 196 en 412 $\mu\text{g/l}$. Dit is echter voor voedingswater nog te hoog. De norm voor koper is ca 65 $\mu\text{g/l}$.

Uit optelling in Tabel 6 blijkt dat er een behoorlijk verlies aan water is. Een belangrijk deel hiervan is afvoer van vocht via condensatie tegen het kasomhulling. Een ander deel is via de grotere natuurlijke ventilatie (hogere lek van de proefkas 308) verloren gegaan. In een moderne kas met een gewijzigde inpassing van de installatie is het verlies beperkt.

		Registratie tuin	
Watergift		1.52	m^3/m^2
Drain		0.53	-
Watergebruik		0.99	
Condensaat	0.43		
Gewas	0.07	+	
		0.50	-
Verlies		0.49	

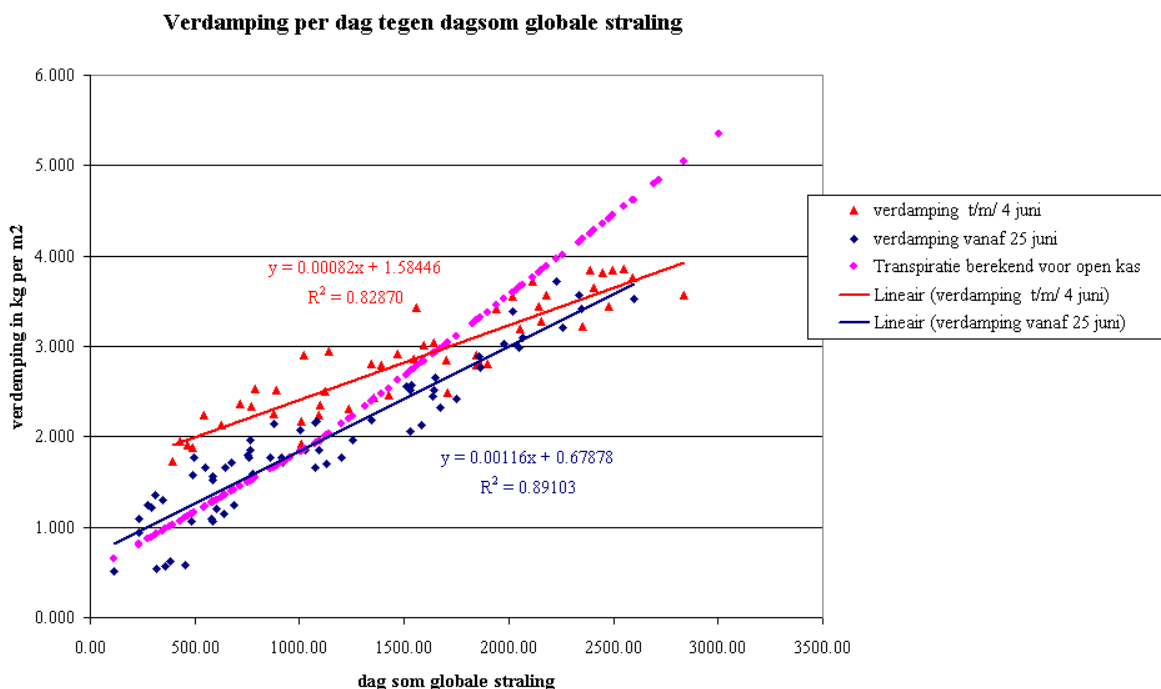
Tabel 6 Waterhuishouding van de gesloten kas praktijkexperiment

Het prototype van de weeggoot is ook gebruikt om de verdamping te meten. Daaruit blijkt dat de verdamping op twee momenten in de teelt een duidelijk ander gedrag is gaan vertonen. Het eerste moment was na het veranderen van de starttijd van de watergift op 4 juni. Het tweede moment was na het vervangen van de luchtslangen eind juni. In de periode tussen 4 en 25 juni lag de verdamping tussen de twee in de figuur getrokken lijnen in.

Opmerkelijk is dat tot 4 juni de verdamping vrij hoog is, zeker bij lage instraling. Bij hoge instraling is de verdamping lager dan in een open kas. De verschillen bij lage instraling tussen de periode voor 4 juni en na 25 juni kunnen meerdere oorzaken hebben. De ene oorzaak is de veranderde luchtbeweging door de andere slangen die werden gebruikt. Het luchtdebiet werd hoger en de slangen bliezen meer direct tegen het gewas. Hierbij nam ook de temperatuurgadiënt in het gewas af. Een tweede oorzaak kan het verschil in kastemperatuur zijn. De verdamping is hiervoor niet gecorrigeerd. De verdamping voor een open kas is benaderd door gebruik te maken van een eenvoudig transpiratie model waarbij de transpiratie lineair afhankelijk is van de instraling. Een meer gedetailleerde benadering met onder meer buistemperaturen is niet zinvol omdat het buisrailsysteem als secundair net functioneerde.

Bij de hoge instraling is met beide typen luchtslangen de verdamping lager dan in een normale kas. Dit is het gevolg van een combinatie van koude lucht langs het gewas, hogere waterdampdruk, lager vochtdeficiet en lagere kastemperatuur. Een lagere verdamping zou kunnen resulteren in een hogere planttemperatuur. In een periode met lagere straling is de planttemperatuur met een Brinkman IR meter gemeten. De planttemperatuur bleek niet veel af te wijken van de ruimte temperatuur.

Figuur 17 Verdamping



De verandering in de transpiratie vraagt in de praktijk om een aangepaste watergeef- en voedingstoediening strategie. Dit is in dit onderzoek niet onderzocht. Het ontstaan van kleine vruchten en vruchten met een hoog droge stof gehalte kan hier mogelijk wel mee worden voorkomen. De verdamping in de nacht in combinatie met luchtbeweging zorgde mogelijk voor een te sterke verdamping in de nacht zodat de vruchten niet konden zwellen.

3.4 Simulatie teeltopbrengst en validatie van gewasmodel.

Het experiment met de gesloten kas kende geen vergelijkingafdeling met een standaard tomatenteelt onder identieke condities. Om toch een uitspraak te kunnen doen over de meer productie die in dit systeem mogelijk is, is er voor gekozen om de productie te vergelijken met een gesimuleerde productie door toepassing van een model van de vakgroep Tuinbouwproductieketens van Wageningen UR.

Hiervoor zijn per 4 weken de vers en droog gewichten van 12 planten gemeten.

De belangrijkste data staan in onderstaand overzicht.

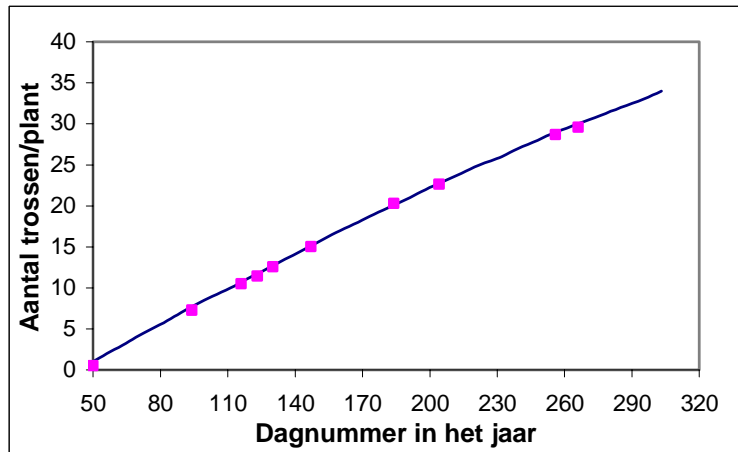
	Oogst datum											
		31-01-02	26-02-02	27-03-02	22-04-02	23-05-02	18-06-02	23-08-02	13-08-02	9-09-02	8-10-02	5-11-02
Aantal bladeren per plant		5.9	17	30	21	24	25	22	19	22	24	24
Stengel lengte	cm	11.9	85	181	278	388	466	569	598	743	781	763
Stengel lengte twee kop	cm				108	229	289	392	496	568	452	472
Stengelvers gewicht	g	1.8	106	331	375	502	650	728	732	910	842	854
Stengel drooggewicht	g	0.1	8	31	38	55	77	91	92	114	109	110
Blad opper vlak	cm ²	209.6	6954	16320	8339	8629	7379	7115	5731	6266	7466	7356
Blad vers gewicht	g	4.1	244	708	452	468	450	397	310	345	379	429
Blad droog gewicht	g	0.3	23	67	52	51	55	53	41	43	47	49
Totaal vruchten			5	31	31	42	41	40	38	37	29	18
Totaal vers gewicht vruchten	g		6	1362	1693	1746	2052	1903	1978	1853	1296	976
Totaal droog gewicht vruchten	g		1	74	91	103	135	133	127	130	97	81
Versgewicht per plant	g	5.9	357	2400	2520	2716	3151	3027	3019	3108	2517	2259
Drooggewicht per plant	g	0.4	31	173	181	208	267	277	261	287	253	240
% droge stof totaal		6.3	8.8	7.2	7.2	7.7	8.5	9.1	8.6	9.2	10.0	10.6
% droge stof stengel		3.4	7.3	9.4	10.2	10.9	11.9	12.5	12.5	12.5	13.0	12.9
% droge stof blad		7.5	9.5	9.5	11.5	10.8	12.2	13.3	13.4	12.5	12.3	11.5
% droge stof vrucht			9.0	5.5	5.4	5.9	6.6	7.0	6.4	7.0	7.5	8.3

Tabel 7 Overzicht gegevens uit destructief onderzoek van de teelt gedurende experiment

3.4.1 Simulatie van biomassa en vruchtproductie

Het gemeten productieverloop in de tijd en de totale biomassa-productie (vruchten, maar ook stengels en blad) is vergeleken met simulaties op basis van een bestaand model voor tomaat (TOMSIM; Heuvelink, 1996). In dit model is het gemeten kasklimaat ingevoerd (uurwaarden voor temperatuur en CO₂), evenals de gemeten dagsom van de globale straling buiten de kas. Er is uitgegaan van een kasdektransmissie voor diffuse straling van 70% hetgeen door metingen geverifieerd is.

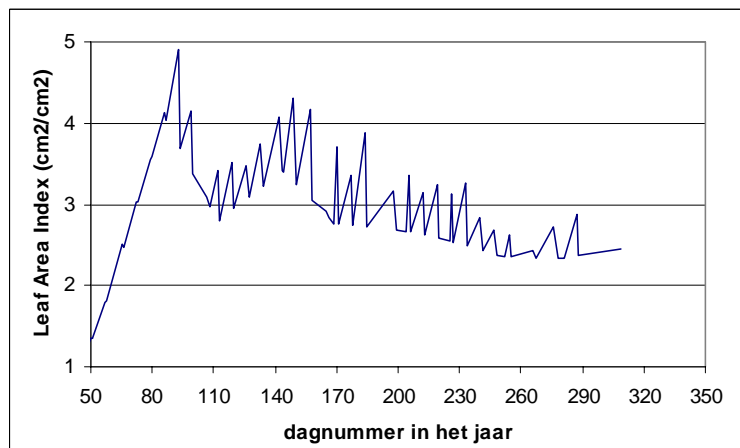
De gewasontwikkelingssnelheid (trosafplitsingssnelheid) is in het model uitsluitend afhankelijk van de gemiddelde etmaaltemperatuur. Deze temperatuurrespons is cultivar-onafhankelijk (De Koning, 1994) maar het niveau van de afsplitsingssnelheid verschilt wel per cultivar. Zo is bij 20 °C voor Counter de afsplitsingssnelheid 1,05 trossen per week, terwijl het voor het hier gebruikte ras Aromata 0,88 trossen per week bedroeg. Op basis van dit rasverschil in niveau van trosafplitsingssnelheid bij gelijke temperatuur is het model aangepast voor de gebruikte cultivar omdat het model standaard is ingesteld voor het ras Counter. Vervolgens bleek de gemeten trosafplitsing gedurende het gehele seizoen prima beschreven te kunnen worden met het model (Figuur 18).



Figuur 18 Gemeten (symbolen) en op basis van uitsluitend etmaaltemperatuur gesimuleerde (lijn) aantal aangelegde trossen aan de hoofdstengel (dus extra dieven niet meegeteld). Laatste meting vond plaats op 23 september (dag 266).

Er is dus geen sprake van een lagere trosafplitsingsnelheid naar het eind van de teelt toe als gevolg van veroudering van het gewas. Zo'n effect is namelijk niet in het model opgenomen en als veroudering was opgetreden zou aan het eind van de teelt de modelsimulatie boven de gemeten waarden uit komen het geen niet het geval is (Figuur 18).

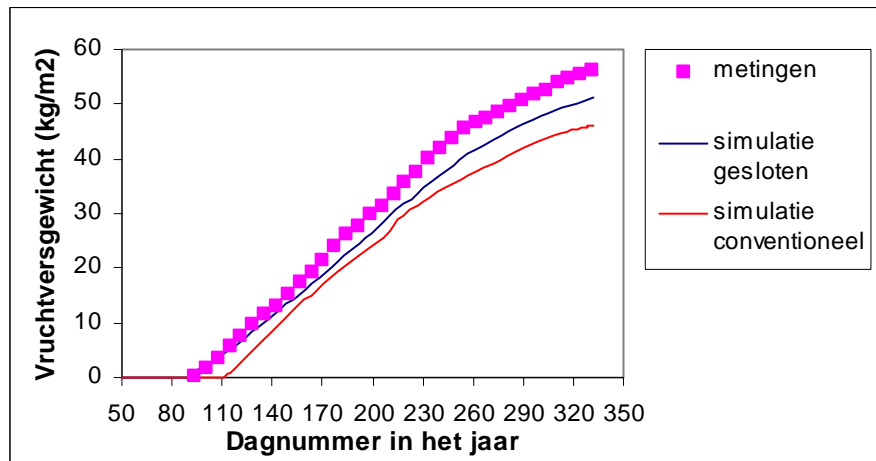
Voor het simuleren van de biomassaproductie en de vruchtopbrengst is de gemeten bladoppervlakte-index (Figuur 19) op basis van destructieve metingen en bladplukgegevens (versgewicht op basis van gemiddeld specifiek bladoppervlak omgerekend naar geplukt bladoppervlak) ingevoerd in het model.



Figuur 19 Verloop van de gemeten bladoppervlakte-index (LAI) gedurende de teelt. Zaagtandverloop is gevolg van bladplukken

De gerealiseerde drogestofproductie is berekend door drooggewichten van geplukt blad en geogoste vruchten op te tellen bij gemeten drooggewichten uit destructieve plantmetingen. De drooggewichten van geplukt blad en van geogoste vruchten werden berekend door de versgewichten uit bladpluk en vruchtoogst te vermenigvuldigen met een drogestofgehalte van 11% (blad) en 5.7% (rijpe vruchten); deze drogestofgehalten zijn uit metingen door het seizoen heen afgeleid. Het gemeten productieverloop (in versgewicht) en de totale biomassa (in drooggewicht) waren ongeveer 10% hoger dan hetgeen op basis van het model verwacht mocht worden.

3.5 Vruchtopbrengst

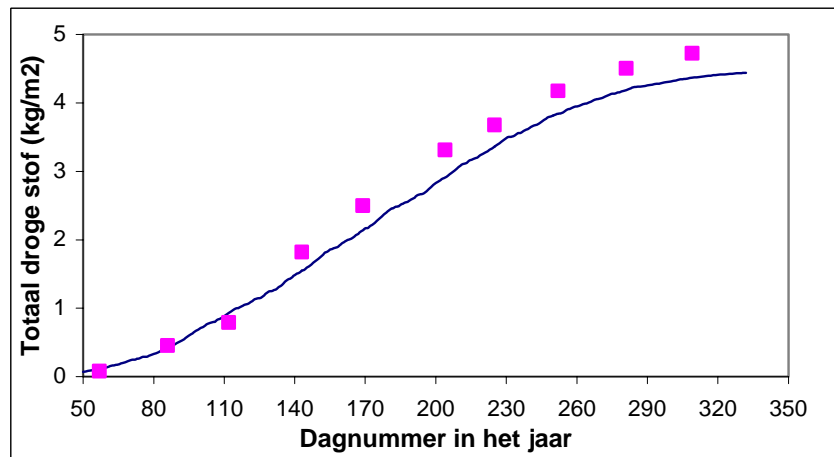


Figuur 20 Gemeten (symbolen) en gesimuleerd (lijnen) productieverloop gedurende de teelt. In het praktijkexperiment is een vruchtproductie (tot laatste oogst op dag 332) van 56,3 kg/m² gerealiseerd. Het model voor een conventionele kas voorspelt met als uitgangspunten de gegevens van de gesloten kas, gebruik makend van kasklimaatgegevens uit 2002 van een tuinder die op zijn bedrijf een normale, een productie van 46,2 kg/m² (Figuur 20). Deze teler realiseerde in de zomermaanden een CO₂ niveau van minimaal 500 ppm. (zie Tabel 8). Een gesimuleerde productie van 46,2 kg/m² lijkt enigszins laag, maar er dient wel bedacht te worden dat bij de berekening van een vruchtdrogestofgehalte van 5,7% is uitgegaan (gemeten in de gesloten kas), hetgeen vrij hoog is. Zouden we met 5,5% rekenen dan wordt de productie al 1,5 kg/m² hoger. Er moet ook rekening gehouden worden met het feit dat in deze simulatie pas eind februari de eerste tros bloeide, terwijl dat in een conventionele teelt rond 10 januari zal zijn. Toch is een simulatie van een conventionele teelt zonder al deze aanpassingen (dus volgens schema zoals in gesloten kas gerealiseerd) de zuiverste vergelijking (minste aannames bij nodig). De meeropbrengst in het praktijkexperiment is vastgesteld op 22% (56,3 / 46,2) ten opzichte van een conventionele kas met minimaal 500 ppm CO₂.

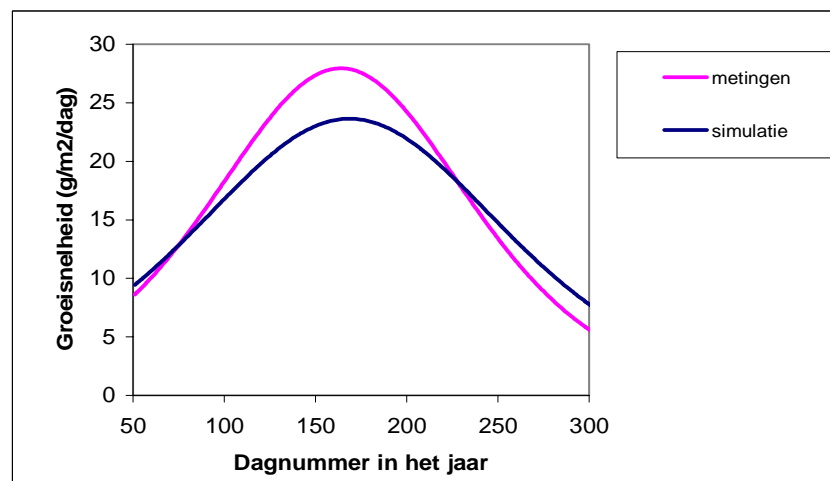
3.6 Validatie van het gewasmodel

3.6.1 Model aanpassing

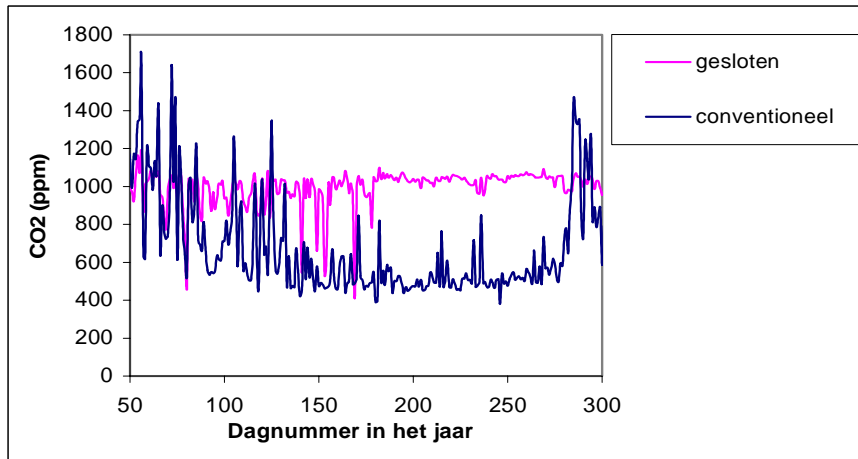
De totaal voorspelde productie op basis van het model voor de gesloten kas met het gerealiseerde CO₂ niveau (ca.1000 ppm) komt op 51,2 kg/m². Deze voorspelling ligt dus 10% onder de gerealiseerde productie. Dit geldt ook voor de gesimuleerde biomassa. De totaal geproduceerde biomassa (tot de laatste destructieve meting op dag 309) was 4,72 kg/m² en het simulatiemodel kwam uit op 4,37 kg/m² (Figuur 21). Het verschil tussen gemeten en gesimuleerde biomassa ontstond vooral in de zomerperiode, dat wil zeggen de periode met veel licht en een hoge CO₂-concentratie (Figuur 22). Dit duidt erop dat het model onder die omstandigheden een te lage groei simuleert, hetgeen mogelijk is omdat onder die omstandigheden in het verleden geen modelvalidatie heeft kunnen plaatsvinden. Veel licht en hoog CO₂ is nu eenmaal in een conventionele kas niet realiseerbaar (Figuur 23), omdat bij veel instraling de ventilatieramen open staan om de temperatuur niet te hoog op te laten lopen. Mogelijk wordt dus het positieve effect van veel licht en veel CO₂ door het model iets te laag ingeschat.



Figuur 21 Gemeten (symbolen) en gesimuleerde (lijn) drogestofproductie gedurende de teelt.



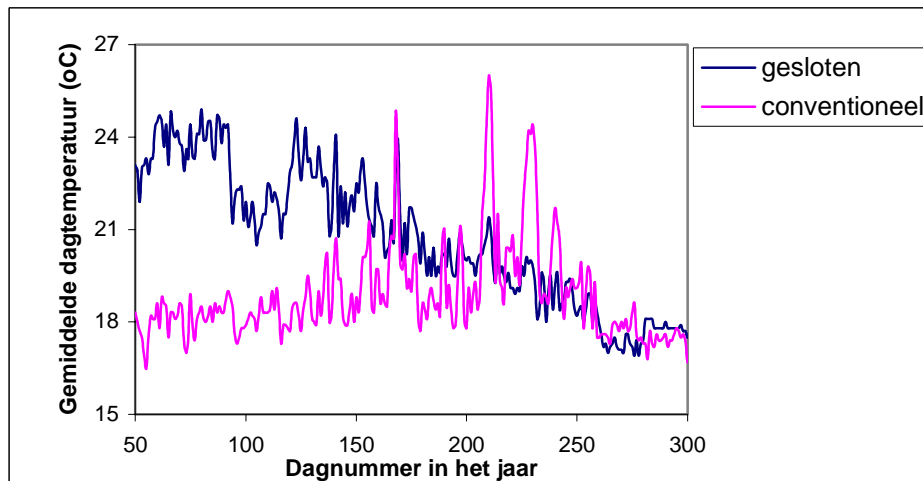
Figuur 22 Gewasgroei snelheid gedurende de teelt voor gemeten en gesimuleerde drogestof-productie (waarden uit Figuur 20). Voor zowel de metingen als voor de gesimuleerde biomassa op de data dat metingen plaatsvonden is een sigmoïde gefit (4 parameters; R²>0.99). Uit deze gefitte curven is de groeisnelheid zoals weergegeven afgeleid.



Figuur 23 CO₂-concentraties in een conventionele kas en in een gesloten kas gedurende het teeltseizoen (uitgedrukt in gemiddeld CO₂-nivo gemeten tussen 10:00 en 16:00 uur).

Periode (dagnrs)	Conventioneel	Gesloten	Gesloten/conv. x100(%)
50-79	1043	1000	96
80-109	758	958	126
110-139	675	967	143
140-169	527	923	175
170-199	515	1024	199
200-229	508	1037	204
230-259	516	1034	200
260-289	721	1040	144
290-303	955	1016	106

Tabel 8 Gemiddelde CO₂-concentraties (over 30 dagen) tussen 10 en 16 uur gemeten in een conventionele kas (metingen bij teler) en in de gesloten kas.



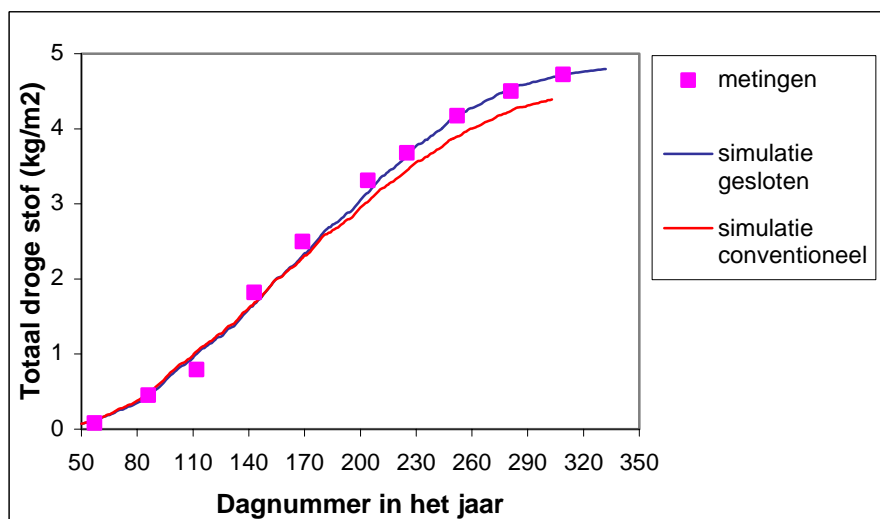
Figuur 24 Gemiddelde etmaaltemperaturen in conventionele kas en gesloten kas

3.6.2 Invloed van CO₂.

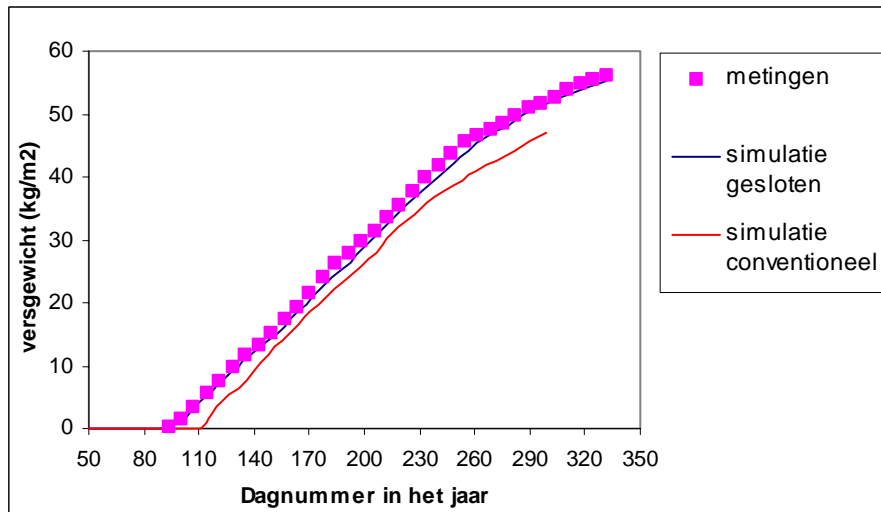
Om het effect van constant een hoge CO₂-concentratie in de gesloten kas ten opzichte van de CO₂-concentratie in een conventionele kas zo goed mogelijk in te schatten is het model eerst aangepast aan de gemeten waarden voor de totale biomassa (metingen uit Figuur 20). Dit is gebeurd door de maximale bladfotosynthese met 50% te verhogen, omdat deze parameter vooral van belang is in een situatie met veel licht en veel CO₂. Met deze aanpassing kon het model de waargenomen toename van de biomassa in de tijd goed simuleren (Figuur 25). Ook de vruchtproductie werd dan goed gesimuleerd (Figuur 26).

Dit aangepaste model is gebruikt om in te schatten hoeveel extra productie gerealiseerd is als gevolg van de hoge CO₂-concentratie in de gesloten kas. Hiertoe is een simulatie uitgevoerd met als invoer het kasklimaat zoals gemeten in de gesloten kas, en daarnaast een simulatie waarbij CO₂-concentratie (Figuur 23 en Tabel 8) en temperatuur (Figuur 24) zijn gebruikt zoals in 2002 gemeten in een conventionele kas.

In de eerste maanden van het jaar is er vrijwel geen verschil in CO₂-concentratie tussen een gesloten kas en een geventileerde kas, omdat de conventionele kas dan ook vrijwel altijd dicht zal zijn. Echter zomers, op stralingsrijke warme dagen, kan in de geventileerde kas max. 500 ppm gerealiseerd worden, terwijl de gesloten kas ook dan 1000 ppm CO₂ behaalt (Figuur 23).



Figuur 25 Gemeten en gesimuleerde drogestofproductie voor gesloten kas en voor temperatuur- en CO₂-verloop zoals gemeten in een conventionele kas. Aangepast model met 50% hogere maximale bladfotosynthesesnelheid



Figuur 26 Gemeten en gesimuleerde vruchtproductie voor gesloten kas en voor temperatuur- en CO₂-verloop zoals gemeten in een conventionele kas. Aangepast model met 50% hogere maximale bladfotosynthesesnelheid.

De gemiddelde temperatuur was in het begin van de teelt zo'n 6 °C hoger in de gesloten kas (bewuste keuze), terwijl vanaf juni de etmaalgemiddelden niet veel meer verschilden (Figuur 24). Wel waren de pieken in temperatuur midden op de dag vrijwel geheel afwezig in de gesloten kas.

Uit de simulaties kwam naar voren dat, uitsluitend tengevolge van de hogere CO₂-concentratie vanaf april, in een gesloten kas ruim 9% extra productie kan worden gerealiseerd (Figuur 26, tot dag 303 omdat de conventionele teelt dan eindigt). Additionele positieve effecten van de gesloten kas (zoals meer luchtbeweging) zijn hierin dus niet meegenomen. Simulatie van de teelt in de conventionele kas, met alleen CO₂-concentraties als in de conventionele kas (en dus met zowel straling als temperaturen als in de gesloten kas), gaf vrijwel dezelfde totaalproductie (46,4 kg/m², tot dag 303) als de hier weergegeven simulatie met zowel CO₂-concentraties als temperaturen als in de conventionele kas (46,8 kg/m²). Wel kwam de productie later op gang wanneer het conventionele temperatuurverloop werd gebruikt, omdat de eerste 3 maanden de temperatuur in de gesloten kas veel hoger werd gehouden (Figuur 24).

De extra productie van 9% door louter CO₂-invloed is een conservatieve inschatting, daar in de conventionele kas ook 's zomers tussen 10 en 16 uur gemiddeld nog 500 ppm CO₂ gerealiseerd kon worden, terwijl er veel telers zullen zijn die dat een deel van de zomer niet halen. Simulaties met voor die periode (1 juni – 8 september) een opgelegde CO₂-concentratie van 400 ppm in de conventionele kas resulteren in de berekening van een ruim 13% lagere productie (invloed door louter CO₂) dan in de gesloten kas.

3.6.3 Gevoeligheid voor temperatuur en CO₂

Het model is tenslotte nog gebruikt om de relatieve effecten van CO₂-concentratie (ook boven 1000 ppm) en van temperatuur te bepalen (Tabel 9). Hiertoe zijn simulaties uitgevoerd met verschillende combinaties van temperatuur en CO₂-concentratie, die gedurende de hele teelt constant werden gehouden.

% opbrengst t.o.v. T=18 oC en CO ₂ =400 ppm					
temp/CO ₂	400	800	1000	1200	1600
18	100	122	124	126	128
21	101	124	127	129	132
24	88	121	125	127	130

Tabel 9 Relatieve productie (tot dag 250, 7 september) voor een tomatenteelt (bloei eerste tros op 10 januari, kop eruit op dag 250), gesimuleerd met TOMSIM. Stralingsgegevens SELYEAR (Breuer en v.d. Braak, 1989). Simulaties werden uitgevoerd met niet-aangepast model en voor een standaard teelt. Uitgedrukt t.o.v. productie bij 18 °C en CO₂-concentratie van 400 ppm (100%=ca. 40 kg/m²)

In deze scenario's wordt als basis een situatie met continu 400 ppm gebruikt. Dit is lager dan in een conventionele kas wordt gerealiseerd. Een extra effect van CO₂ verhoging van 400 naar 1000 ppm wordt in de tabel berekend als 24%. Terwijl het CO₂ effect ongeveer 9 % bedraagt bij vergelijking tussen conventionele teelt met 500 ppm met op momenten van geen ventilatie 1000 ppm enerzijds en anderzijds een gesloten kas met continu 1000 ppm.

Een voorzichtige conclusie is dat van CO₂-concentraties continu boven 1000 ppm CO₂, die in een gesloten kas goed mogelijk zijn, enige extra kleine productieverhoging verwacht mag worden boven op de gevonden 22% zoals die in het praktijkexperiment aannemelijk is gemaakt.

3.6.4 Discussie teelt

Een belangrijke doelstelling van het experiment was het aantonen van de meerproductie zoals door PPO voor een haalbaarheidsonderzoek berekend. De bepaling van de meerproductie wordt uitgevoerd door de gemeten waarden te vergelijken met een berekening van een model van Wapeningen UR (Tuinbouwproductieketens) omdat een referentie afdeling met een normale teelt onder gelijke condities ontbrak. De gegevens die voor het model nodig zijn (o.m. leaf area index, droge stofgehalte) moeten komen uit dit experiment. Een belangrijke voorwaarde is dat het experiment teeltkundig en technisch goed moet zijn verlopen. Het kasdek is ruim 99% van de teeltperiode gesloten geweest. De teelttechnische aspecten zijn in dit hoofdstuk naar voren gebracht. De ontwikkeling van het gewas is goed geweest. Er zijn wel kleine problemen opgetreden, maar dit heeft niet geleid tot een gewas dat niet voldeed aan de eisen voor een goede teelt. De plantdatum is later dan een normaal praktijk bedrijf. Hierop is door de sturing van het kasklimaat ingespeeld. Voor de simulatie berekeningen is de latere plantdatum geen beperking.

In het praktijkexperiment is een vruchtproductie (tot laatste oogst op dag 332) van 56,3 kg/m² gerealiseerd. Het model voor een conventionele kas voorspelt een productie van 46,2 kg/m². De voorspelling voor de conventionele kas geldt voor een tuinder die in de zomermaanden ondanks het openen van zijn ramen toch het CO₂ niveau op minimaal 500 ppm kan handhaven. De meeropbrengst in het praktijkexperiment is vastgesteld op 22% (56,3 / 46,2) ten opzichte van een conventionele kas met minimaal 500 ppm CO₂.

Het model onderschatte de drogestof productie en de vruchtopbrengst in een gesloten kas met ongeveer 10 %. Het model heeft echter bewezen conventionele teelten goed te simuleren (zie proefschrift Heuvelink, 1996). Deze onderschatting kan zijn ontstaan doordat het model niet voor de condities in een gesloten kas is gevalideerd. De combinatie van hoog licht, hoog CO₂, temperatuur en hoge relatieve luchtvochtigheid heeft een effect dat niet door het model wordt beschreven. Voor CO₂ is onderzocht wat het effect van deze factor op productie zou zijn als de overige omstandigheden gelijk blijven. Hiervoor is het model aangepast zodat de berekende droge stof productie wel overeen kwam met de gemeten waarden. Voor CO₂ is een data set van een teler gebruikt. Uit die simulatie bleek dat verhoging van louter het CO₂ niveau in voorjaar en zomer van ca 500 ppm naar 1000 ppm een productie verhoging van ca 9% geeft.

Als een open kas met een normaal CO₂ niveau van ca 500 ppm moet worden vergeleken met een gesloten kas met een CO₂ niveau van 1000 ppm dan is er over de productie verhoging te zeggen dat alleen al het CO₂ niveau een stijging van 9 % voor de productie geeft. Daarnaast is er dus nog 13% onderschatting van de productie in de gesloten kas, wanneer met het standaardmodel vergeleken wordt dat onder conventionele omstandigheden de productie goed voorspelt. De extra 13% productie (bovenop de toename door louter hogere CO₂) om op een totaal van de extra gemeten meerproductie van 22% te komen, zal dus mogelijk verklaard moeten worden op grond van specifieke beheersbare omstandigheden binnen een gesloten kas zoals luchtbeweging, luchtvochtigheid, temperatuur. De verklaring hiervan vergt nader onderzoek.

Bij het vergelijken tussen de waargenomen productie en de modelvoorspelling moet met een zekere onnauwkeurigheid rekening worden gehouden. De gemeten productie per m² is bijvoorbeeld 56.3 ± 2.8 kg. Als rond de simulatie een zelfde onnauwkeurigheid wordt gehanteerd is het resultaat daarvan 46.2 ± 2.3 kg. Dan kan de meerproductie relatief variëren tussen 10 en 34 %.



In de praktijk zou de meerproductie hoger kunnen zijn dan de 22 % indien een hogere dosering dan 1000 ppm CO₂ wordt gebruikt. Echter bij dit scenario past voorzichtigheid omdat dit nog niet door experimenten gestaafd is. In een toekomstige gesloten kas zonder luchtramen kan eveneens nog enkele procenten meerproductie worden verwacht vanwege de hogere lichttransmissie.

Voor de huidige lichtere kassen (waarmee al hogere producties worden bereikt) gecombineerd met de onnauwkeurigheid in het model (het is niet automatisch zo dat discrepantie tussen model en metingen volledig aan extra productieverhogend effect van gesloten kas toegeschreven mag worden) wordt de extra productie voorzichtigheidshalve op minimaal 17 - 20% geschat. In deze schatting is geen rekening gehouden met een productieverhoging als gevolg van teeltoptimalisatie, gericht op telen in een gesloten kas.

Dat een verdere optimalisatie mogelijk nodig is komt naar voren uit een aantal aspecten van de teelt. Hiervoor is te wijzen op de waargenomen verdamping van het gewas, de ontwikkeling van het blad en de vruchtgrootte.

Voor de gewasbescherming is een minimale inzet van bestrijdingsmiddelen nodig geweest. Dit is overeenkomstig de verwachting. Als toch inzet van middelen nodig is moet met de luchtbeweging en de absorptie van middelen in het condens water rekening gehouden worden.

3.6.5 Conclusies en leerpunten

- In een gesloten kas systeem is telen van tomaat goed mogelijk. Het verloop van het kasklimaat laat een andere karakteristiek zien dan een open kas. In de kasklimaatregeling biedt dit nieuwe mogelijkheden, met name voor de sturing van de temperatuur en luchtvochtigheid.
- De totale gemeten productie komt uit op 56,3 kg/m² (bij 70% lichtinstraling). Dit betekent een extra productie van 22% ten opzichte van een gesimuleerde productie voor een conventionele open kas met minimaal 500 ppm CO₂. Hiermee is ruimschoots aan de doelstelling 10 % meerproductie voldaan.
- De productieverhoging is vooral te vinden aan het einde van het voorjaar, in de zomer en herfst.
- De productie kent minder sterke pieken, omdat de kastemperatuur beter te sturen is.
- De transpiratie in een gesloten kas met een geforceerde luchtbeweging is bij lage instraling hoger en bij hoge instraling lager dan in een open kas. Watergift en voeding moeten hiervoor worden aangepast.
- Het vruchtgewicht bij telen in een gesloten kas bleef laag. Het opsporen van de oorzaak vergt nader onderzoek. Dit zelfde geldt voor de bladgrootte in de zomer maanden.
- In het uitgevoerde experiment was de infectie druk door insecten laag. De kans op schimmelaantasting, met name van Botrytis, is klein. Dit resulteerde in een laag gebruik aan gewasbeschermingsmiddelen.
- De smaak van de tomaten in de gesloten kas was goed.
- Uit de modelvalidatie blijkt dat louter de CO₂-verhoging naar 500 naar 1000 ppm een productie verhoging oplevert van 9%. De overige productiestijging van 13% om te komen tot de 22% is nog niet verklaarbaar maar moet worden gezocht in de blijkbaar gunstiger specifieke omstandigheden in de gesloten kas zoals beheersbare luchtvochtigheid, temperatuur en ook luchtbeweging.
- De productie bij een combinatie van hoge lichtintensiteit, hoog CO₂ niveau, luchtbeweging en hogere relatieve luchtvochtigheid is met het model van tuinbouwproductie ketens te beschrijven als in het model de maximale bladfotosynthese met 50% wordt verhoogd. Deze verhoging is nodig omdat het model, gevalideerd voor een teelt in een open kas, de productie met 10 % onderschat.
- Uit de simulaties met temperatuur en CO₂ blijkt dat de meerproductie vooral wordt behaald door de hogere CO₂ niveaus en in mindere mate door de hogere temperatuur die mogelijk zou zijn. Over effecten van luchtvochtigheid en luchtbeweging is op basis van dit onderzoek geen uitspraak te doen.
- De combinatie van koude ingeblazen lucht met verwarming via buisrailnet vergroot de kans op beschadiging van de vruchten. In de opbouw van de installatie op praktijkniveau moet hiermee rekening worden gehouden.
- De koeltemperatuur moet onafhankelijk van de stooktemperatuur kunnen worden ingesteld.
- Bij storingen is luchten noodzakelijk om de kastemperatuur en luchtvochtigheid niet te hoog te laten oplopen.

3.7 Energie

Eén van de doelstellingen van het praktijkexperiment is het aantonen van een vermindering van het gasverbruik van een gesloten kas ten opzichte van een conventionele open kas.

Voor het interpreteren van het gemeten energiegebruik van de proefkas in vergelijking met het gebruik in een conventionele kas is een vergelijking gemaakt op basis van 3 ha glasoppervlak. Het proefexperiment is uitgevoerd in een kas met bouwjaar 1990. Een vergelijking op basis van huidige moderne kassen zou een aantal arbitraire aannames vereisen zoals bijvoorbeeld een vertaling naar veranderde verdamping door toegenomen huidige lichtinstraling.

Er is daarom besloten om de vergelijking uit te voeren met een fictieve 3 ha kas eveneens met bouwjaar 1990.

Voor de vergelijking is het noodzakelijk enkele uitgangspunten eenduidig vast te leggen. Deze zijn:

- De kenmerken van de proefkas van het praktijkexperiment.
- De kenmerken van een bedrijfskas van 3 ha, met name het verschil in geveloppervlakte en de wijze van energievoorziening.
- Het referentieverbruik.

3.7.1 De proefkas van het praktijkexperiment.

Gedurende het praktijkexperiment is de warmtevraag van en de warmteonttrekking aan de kas en de elektriciteitsvraag van alle componenten exclusief de koelmachine gemeten. Deze gegevens worden weergegeven in Tabel 10.

Warmtevraag (GJ)	3.333
Warmte onttrekking (GJ)	3.342
Elektriciteitsvraag (kWh)	219.500
• Warmtepompen (kWh)	102.200
• Luchtbehandeling (kWh)	85.700
• Pompen (kWh)	31.600

Tabel 10 Gemeten energiegebruik praktijkexperiment 24 januari – 28 november 2002

De hoeveelheid warmte die de warmtepompen in de proefkas hebben geleverd aan de kas is 1.533 GJ en daarmee 46% van de warmtevraag. De gemiddelde COP (ook wel Seasonal Performance Factor: SPF) is 4,16 en daarmee is de hoeveelheid warmte die de warmtepomp als bronwarmte heeft gebruikt is 1.164 GJ. Dit is 35% van warmtevraag.

De warmtevraag van de proefkas als conventionele kas is bepaald met het simulatieprogramma PREGAS (PPO). Hierbij is uitgegaan van:

- De afmetingen van kas 308.
- De lekdichtheid van een kas uit 1990 (bouwjaar van kas 308).
- De teeltperiode van het praktijkexperiment.
- De klimaatinstellingen van het praktijkexperiment.
- Gebruik van luchtramen voor de sturing van het kasklimaat.
- Het buitenklimaat tijdens het praktijkexperiment.

De warmtevraag van de kas volgens het model PREGAS is 2.848 GJ.

De gemeten warmtevraag (niet identiek aan het energiegebruik) bedraagt 3.333 GJ en is daarmee 17% hoger dan de berekende warmtevraag.

Buiten de onnauwkeurigheid van de simulatie met het model PREGAS kan het verschil veroorzaakt zijn door de wijze van ontvochtiging van de proefkas in vergelijking met het model. Bij het ontvochtigen van lucht in de proefkas door de LBK is naast condensatiewarmte (latente warmte) ook voelbare warmte aan de kas onttrokken. Deze voelbare warmte is direct weer aan de kas geleverd door de warmtepomp. Deze warmtelevering is geregistreerd en telt mee als warmtevraag van de kas.



Enkele typische kenmerken van het praktijkexperiment zijn van belang, dit zijn:

- De teeltperiode loopt van 24 januari tot en met 28 november is daarmee circa 4 weken korter dan gebruikelijk in de tomatenteelt.
- De gerealiseerde kastemperatuur is in de eerste drie maanden van de proef aanzienlijk hoger geweest dan gebruikelijk in de tomatenteelt.

3.7.2 Opschaling naar 3 ha gesloten kas

In deze paragraaf wordt een vergelijking gemaakt tussen een gesloten en conventionele kas van 3 ha. Deze bedrijfskas heeft een breedte van 173 m en een lengte van 173 meter.

De lichttransmissie van de bedrijfskas is identiek verondersteld aan die van de proefkas om de vergelijking tussen de gemeten resultaten uit het praktijkexperiment zo goed mogelijk te kunnen maken.

Voor het omrekenen van de gegevens uit het praktijkexperiment naar een bedrijfsmatige situatie van een gesloten kas met een oppervlakte van 3 ha is een aantal correctiefactoren toegepast. Deze zijn noodzakelijk omdat:

- De verhouding gevel/kas oppervlak sterk verschillend is.
- De wijze van elektriciteits- en warmtelevering essentieel anders is.
- Het lek van de proefkas met het luchtverdeelsysteem van het praktijkexperiment tweemaal zo groot is als dat van een bedrijfskas met een nieuw gedimensioneerde luchtbehandelingsinstallatie.

De uitgevoerde correcties zijn:

- Een kas met een lengte en breedte van 173 m en een goothoogte van 4,5 m heeft een omhullend verliesoppervlak ter grootte van 110% van de kasoppervlakte. De proefkas heeft een omhullend verliesoppervlak van 146% van de kasoppervlakte. De correctiefactor is dan $110/146 = 0,75$. Daarmee is de warmtevraag van een bedrijfskas per m^2 25% lager dan die van de proefkas.
- De hoeveelheid elektriciteit ten behoeve van de verwarming van de kas met de elektrische warmtepompen is direct gerelateerd aan de warmtevraag. De hoeveelheid elektrische energie voor de warmtepompen en de warmtedistributie per m^2 is met dezelfde factor 0,75 gecorrigeerd.
- De hoeveelheid elektrische energie voor de gedwongen luchtcirculatie is voor 50% toegerekend aan verwarming en voor 50% toegerekend voor ontvochtiging en koeling. Het aandeel elektriciteit voor circulatie bij verwarming is met de factor 0,75 gecorrigeerd. Het aandeel elektriciteit voor circulatie bij ontvochtiging en koeling is niet gecorrigeerd.
- Een kleinere lek van een bedrijfskas (50%) t.o.v. een proefkas.

Op basis van de resultaten van het praktijkexperiment en de beschikbaarheid van grote warmtepompen met een hoog rendement is een aantal verbeteringen t.o.v. de behaalde resultaten op kleine schaal van de proefkas te verwachten. Deze zijn onder andere:

- Hoger aandeel warmtelevering door de warmtepompen, 55% i.p.v. 46%. De warmtepompen zijn aan het begin (aanpassing regeling) en einde (storing in week 40) van de teeltperiode niet volledig ingezet. Door extrapolatie van het aandeel warmtedekking van de warmtepompen is met een aandeel van 55% gerekend.
- Hoger rendement van de warmtepompen, COP 20% hoger. De gemeten gemiddelde COP (SPF) van de warmtepompen is 4,16. Grotere warmtepompen hebben een aanzienlijk hogere COP. Er is gerekend met een SPF van 5,0.
- Lager energiegebruik voor gedwongen ventilatie. Het huidige luchtverdeelsysteem leidt tot aanzienlijke drukverliezen. Er is gerekend met een verlaging van het drukverlies en het energiegebruik met 30%.
- Het energiegebruik van de LBK komt voor 50% ten gunste van de warmtevraag van de kas. De overige 50% wordt als verloren beschouwd of wordt afgevoerd als onttrokken warmte.

De onttrokken warmte uit de kas wordt voor 100% in de aquifer opgeslagen en weer gebruikt als bronwarmte voor de kas. De hoeveelheid hulpenergie voor het verpompen van de warmte en koude van en naar de aquifer is op 3% van de verpompte hoeveelheid warmte gesteld. Dit komt overeen met 20 kWh/m^2 kasoppervlakte.

Het volume water in de aquifer dat gebruikt wordt voor de opslag van warmte en koude is bij een kasgrootte van 3 ha circa $1.500.000 \text{ m}^3$. Bij een laagdikte van 30 m en 6 paar boorgaten is de diameter van elke 'bel' warmte of koude circa 100 m. Hiermee wordt het oppervlakte van energieopslagsysteem in de bodem groter dan die van de gesloten kas.

3.7.2.1 De energievoorzieningsinstallatie

Wat betreft de wijze van energievoorziening is er een essentieel verschil tussen het praktijkexperiment en een bedrijfsmatige situatie. De proefkas is niet aangesloten op een aquifer en kan daarom geen onttrokken warmte uit de kas opslaan voor gebruik op een later tijdstip. De hoeveelheid onttrokken warmte is wel geregistreerd. De warmte die is onttrokken aan de kas is na registratie vernietigd door een koelmachine. Deze warmte is wel meegenomen in de modelberekening. In het praktijkexperiment is geen gasmotor geplaatst. Alle elektriciteit wordt uit het openbare net onttrokken.

In de bedrijfskas wordt uitgegaan van een WKK, een warmtepomp en seizoensopslag van warmte en koude.

De onttrokken warmte uit de gesloten kas is bij een temperatuur van 14 tot 20°C vrijgekomen en is niet direct voor verwarming van een kas te gebruiken. Er is een warmtepomp nodig om de temperatuur van de te leveren warmte te verhogen tot circa 40°C. Deze warmtepomp wordt aangedreven door elektriciteit afkomstig van een WKK installatie. De warmte van de WKK wordt ook ingezet voor de verwarming van de kas. Warmte wordt eerst geleverd door de combinatie warmtepomp en WKK. Een eventueel tekort aan warmte zal door een gasgestookte ketel worden geleverd.

De rendementen zoals gebruikt voor de modelberekeningen zijn weergegeven in Tabel 11.

Rendement (op o.w. 31,65 MJ/m ³)	WKK	Warmtepomp	Ketel
Elektrisch	38%		n.v.t.
Thermisch	53%		100%
SPF		500%	

Tabel 11 Gehanteerde rendementen van de energievoorziening

3.7.3 Primair energieverbruik en duurzame energie voor 3 ha gesloten kas

Referentieverbruik open kas

Op basis van PREGAS berekeningen is het referentieverbruik bepaald van een conventionele bedrijfskas van 3 ha. Hiervoor zijn de volgende uitgangspunten toegepast:

- Breedte 173 m, lengte 173 m.
- De lektheid van een kas uit 1990 (bouwjaar van kas 308).
- De teeltperiode van het praktijkexperiment.
- De klimaatinstellingen van het praktijkexperiment.
- Gebruik van luchtramen voor de sturing van het kasklimaat.
- Het buitenklimaat tijdens het praktijkexperiment.

De warmtevraag is berekend op 45,0 aeq/m² voor 3 ha open kas. Het primair energieverbruik voor elektriciteit in 1,6 aeq/m² (bron: KWIN 2002). Er is uitgegaan van een hoeveelheid warmtevernietiging voor CO₂-dosering van 5,5 m³/m² (PPO, PREGAS model). Het primair energiegebruik van de referentie komt daarmee op 52,1 m³/m².

Bij een oppervlakte van 3 ha is de hoeveelheid onttrokken warmte 72.542 GJ. Bij opschalen van de resultaten van de proefkas naar een bedrijfskas van 3 ha worden de correcties zoals hierboven zijn genoemd toegepast (zie 3.7.2.).

Gesloten kas als eilandbedrijf

De gesloten kas kan als eilandbedrijf worden gezien. Het overschot warmte dient dan te worden vernietigd om tot een thermisch evenwicht op jaarbasis te komen. In Tabel 12 zijn de warmtestromen van een gesloten kas in eilandbedrijf weergegeven (kolom 2 en 3). Het aandeel duurzame energie in de warmtelevering aan de kas is 44% en het primaire energiegebruik is 19% lager t.o.v. de referentie van 52,1 m³/m². De besparing op het primaire energiegebruik is lager dan het aandeel duurzame energie in de warmtelevering omdat er hulpenergie nodig is om de overtollige warmte uit de gesloten kas in de bodem te brengen en terug te halen.

De hoeveelheid energie per hoeveelheid product is afgenomen tot 66% t.o.v. een teelt in een conventionele kas (energiegebruik is 81% / productie van 122%). De energie efficiëntie is hiermee verbeterd met 34%.

Gesloten kassen in combinatie met 'open' kassen.

Omdat een gesloten kas een warmteoverschot heeft is het zinvol om de overtollige warmte te gebruiken voor bijvoorbeeld een nabijgelegen 'open' kas. In Tabel 12 zijn de warmtestromen van deze combinatie weer gegeven (kolom 4 en 5). De beschikbare hoeveelheid warmte uit 3 ha de gesloten kas is 72.542 GJ. Uit eerder gemaakte berekeningen blijkt dat bij een tomatenteelt de oppervlakte van de open kas circa 200% kan zijn van de oppervlakte van de gesloten kas. De 3 hectare gesloten kas kan daarmee nog 6 ha open kas voor een aanzienlijk deel verwarmen met een warmtepomp. Bij een warmte dekking van de warmtepomp van 55% is de geleverde hoeveelheid warmte 76.140 GJ. Bij een COP van 5 is de noodzakelijke hoeveelheid bronwarmte 60.912 GJ. Hiermee wordt circa 80% van de geogste warmte uit de gesloten kas weer terug geleverd aan de kas. Het overige deel van de onttrokken en opgeslagen warmte (circa 20%) zijn verliezen die optreden in de dag- en seizoensopslag. Het aandeel duurzame energie in de levering van warmte aan de gesloten kas is 44%. De besparing op primair energiegebruik is 33% voor het totale areaal van 9 ha. De besparing bij de combinatie van gesloten en open kassen is veel hoger dan bij het eilandbedrijf omdat de open kassen geen luchtbehandelingssysteem met gedwongen ventilatie hebben. Het energiegebruik per hoeveelheid product in een cluster van gesloten en open kassen is afgenomen tot 63% van het energiegebruik in een conventionele teelt. De energie efficiëntie is daarmee 37% toegenomen.

Warmtestroom	Gesloten kas 3 ha (2003)		Combinatie 3 ha gesloten met 6 ha open (totaal 9 ha)	
	Aeq/m ²	Aandeel (%)	Aeq/m ²	Aandeel (%)
Referentie	52,1		52,1	
Warmte oogst uit kas	76,4	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Warmtevraag kas	57,5	100	52,8	100
Warmtepomp (COP = 5,0)	31,6	55	29,1	55
WKK ($n_{el} = 38\%$ / $n_{th} = 53\%$)	20,6	36	12,7	24
Ketel ($n = 100\%$ o.w.)	3,1	5	11,0	21
Deel duurzame energie	25,3	44	23,3	44
Primair gasverbruik	42,0	-19	35,0	-33

Tabel 12 Energiebalans van een gesloten kas in eilandbedrijf en in combinatie met open kassen.

De absolute energiegebruiken zijn van toepassing op een kas van 1990. Voor een kas uit 2003 is het energiegebruik van de referentie en van een gesloten lager als in 1990. Verbeteringen in de constructie en eigenschappen van een moderne kasomhulling zijn van toepassing op de conventionele kas en op de gesloten kas. Daarom mag aangenomen worden dat anno 2003 de relatieve besparing van de gesloten kas ten opzichte van de referentie in eerste orde benadering hetzelfde is.

3.7.4 Conclusies

- Het energiegebruik van een gesloten kas in eilandbedrijf met een oppervlakte van 3 ha zal, berekend op basis van de verkregen gegevens uit het huidige praktijkexperiment, met 42 aeq/m² 19% lager dan het energiegebruik van de referentie (vergelijking is gemaakt op basis van een gelijksoortige kas als gebruikt bij het praktijkexperiment, bouwjaar 1990).
- Indien het jaarlijks warmteoverschot van de gesloten kas wordt ingezet voor de verwarming van nabijgelegen conventionele kassen met een oppervlakte die tweemaal zo groot is als die van de gesloten kas is het energiegebruik van deze cluster over het gehele areaal 33% lager dan dat van een conventionele kas. Deze besparing voldoet aan de gestelde doelstelling van 30%.
- Voor een eilandbedrijf ligt bovengenoemde 19% lager dan de verwachte besparing van ca. 30% voorkomend uit haalbaarheidsstudies. Gecombineerd met de hoger dan verwachte gerealiseerde meeropbrengst (22% versus minstens 10%) zijn de verwachte en "gerealiseerde" energie-efficiëntie verbeterd tot respectievelijk 66% en 45%. Ook hier blijft nog een verschil over.

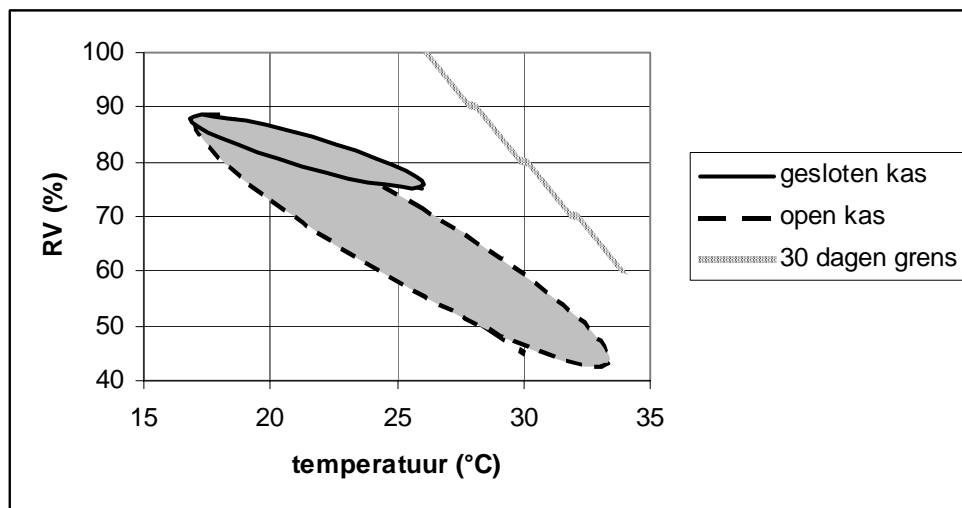


- De hoeveelheid energie die uit de kas wordt onttrokken en op een later tijdstip weer wordt ingezet voor de verwarming van de kas is 44% van de warmtevraag van de kas. Dit is het aandeel duurzame energie. Dit geldt zowel voor de gesloten kas in eilandbedrijf als voor een cluster met conventionele kassen.
- De energie efficiëntie in een gesloten kas in eilandbedrijf is verbeterd tot 66% van die van een conventionele kas.
- De energie efficiëntie in een cluster van gesloten en open kassen is verbeterd tot 63% van die van een conventionele kas.
- De doelstelling ter verbetering van de energie efficiëntie tot 64% van die van een conventionele kas is gehaald.

4 Arbeidsomstandigheden

Over de gehele teelt periode waren de arbeidsomstandigheden in de kas acceptabel. In de zomer met hoge buitentemperaturen was werken in de gekoelde kas zelfs een aangename bezigheid. De temperatuur in de kas wordt in sterke mate bepaald door de instraling. Een lage buitentemperatuur heeft een kleine verlaging van de temperatuur in de kas tot gevolg. Bij maximale instraling in de maanden mei tot en met augustus is de kastemperatuur maximaal 26°C bij een RV van 75%. In een conventionele kas wordt de temperatuur vooral bepaald door de buitentemperatuur en in mindere mate door de instraling. De temperatuur in een vergelijkbare conventionele kas is meestal ongeveer gelijk of hoger dan de buitentemperatuur. In onderstaande figuur is schematisch het klimaatgebied in een open en een gesloten kas weergegeven. De variatie in temperatuur en luchtvochtigheid is bij een gesloten kas veel kleiner dan bij een open kas. De schuine lijn rechts geeft de acceptatiegrens aan wat betreft de werkomstandigheden gedurende een aangesloten periode van 30 werkdagen. Uitgaande van die lijn zijn de werkomstandigheden in zowel de open als de gesloten kas acceptabel.

Figuur 27 Globale weergave van de gebieden van temperatuur en RV in open en gesloten



kas (lijn: 30 aaneengesloten werkdagen grens uit Grandjean, 1965)

In het voorjaar toen in het praktijkexperiment gewerkt werd met een forse lichtverhoging op de stooktemperatuur, was de combinatie van hoge temperatuur en hoge luchtvochtigheid niet aangenaam. Op die momenten werd zondig de lichtverhoging tijdelijk uitgezet zodat de kastemperatuur aangenaam bleef.

Er zijn geen metingen gedaan om ophoping van eventuele schadelijke stoffen in de lucht te detecteren. Om drie redenen werden er geen problemen verwacht. In de eerste plaats is de natuurlijke ventilatie van de kas groter dan normaal vanwege zijn ouderdom. In de tweede plaats is het te verwachten dat een groot deel van deze stoffen in het condenswater op de warmtewisselaars kan worden geabsorbeerd. In de derde plaats bleek, naar verwachting, het verbruik van gewasbeschermingsmiddelen aanzienlijk lager dan in een conventionele kas.

Een conventionele kas in de winter houdt ook langdurig luchtramen gesloten en is dan te vergelijken met een gesloten kas. Er is niet bekend dat er in die situatie een accumulatie van schadelijke stoffen is waargenomen.

Het geluidsniveau binnen en buiten de kas en leidt niet tot enige geluidshinder.



5 Economie

Voor de bepaling van de kosten en baten van een gesloten kas concept zijn de belangrijkste parameters:

- het investeringsniveau,
- de meerproductie,
- de energiebesparing

In het praktijkexperiment is aan een optimalisatie gewerkt van al deze zaken.

In het praktijkexperiment is in juni 2002 een zestal luchtslangen vervangen door eenvoudigere en goedkopere slangen. Deze bleken goed te werken. Dit betekent dus dat kosten voor luchtslangen lager kunnen zijn dan eerder is aangenomen.

De energetische optimalisatie gaf aan dat de grootste energiebesparing is te halen in een combinatie van gesloten met open kassen. Dit concept geeft ook de laagste investeringskosten per oppervlakte-eenheid, omdat met geringe meerinvesteringen voor uitbreiding van de gasmotor en warmtepomp het warmteoverschot van de gesloten kas nuttig kan worden ingezet.

De teeltproductie is in het praktijkexperiment continu gemonitord om het kasklimaat aan te kunnen passen om een zo hoog mogelijke productie te halen. Daar het hierbij om een experiment met 1 teelt gaat en de keuzes die gemaakt zijn niet omkeerbaar waren is het zo dat bij een volgende teelt met de opgedane kennis in het praktijkexperiment een hogere productie verwacht kan worden (leereffect). Wat betreft de geldopbrengst die gemoeid is met de meerproductie, deze hangt sterk af van het type tomaat (gewone tomaat, vleestomaat, cherrytomaat of pruimtomaat hebben), het moment van de meerproductie en via welk afzetkanaal de teler zijn product verkoopt. Het moment van de meerproductie bleek in het praktijkexperiment in de zomer en najaar te liggen. Zeker in het najaar is vaak een hogere prijs te halen. De tomatenprijzen op de veiling fluctueren echter sterk over de jaren, maar een groot deel van de telers verkoopt hun product niet meer via de veiling, maar rechtstreeks aan de handelaar tegen andere, vastere prijzen, prijzen die niet openbaar zijn. De gevoeligheid voor deze verschillen op de baten van het concept is groot.

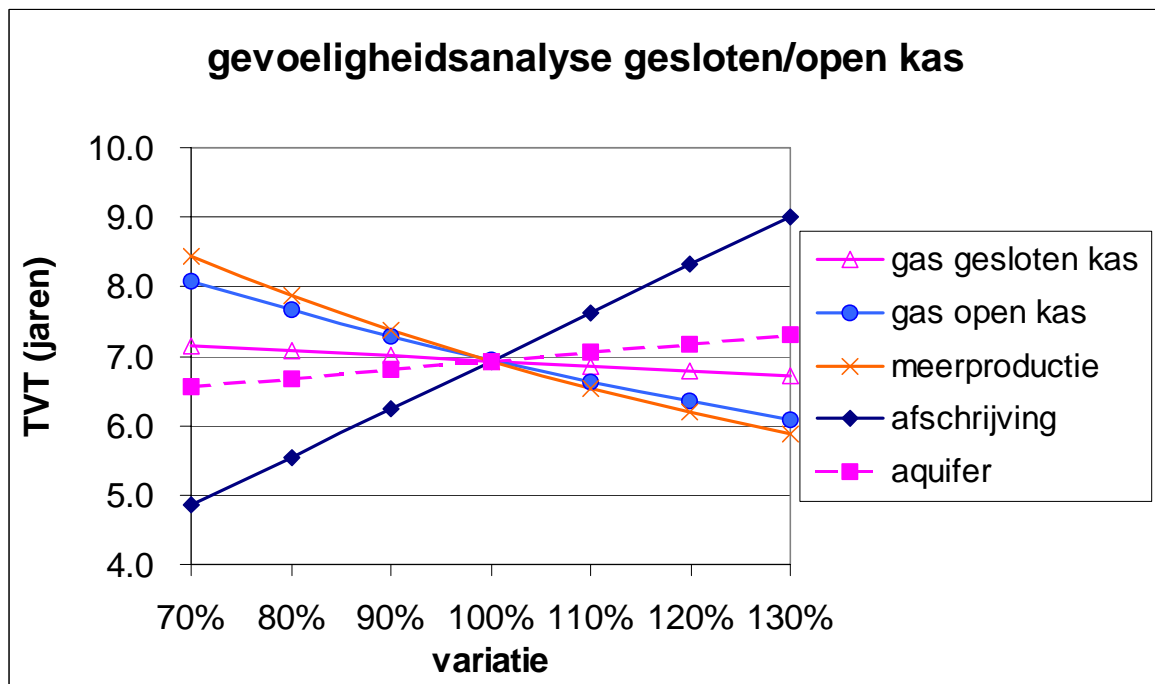
In het praktijkexperiment is gewerkt aan optimalisatie van de hulpenergie, het aandeel van de warmtepompen en hun rendement.

De hulpenergie is in het praktijkexperiment continu gemonitord en waar mogelijk verkleind. Voor de luchtverdeelkast is door metingen in het vorige praktijkexperiment aangetoond dat het drukverlies in het centrale systeem groot is. Voor opschaling naar de praktijk wordt daarom gewerkt aan het ontwerpen van een meer decentraal systeem. Hiervan zal de besparing op de hulpenergie zo'n 30% zijn.

Door gesprekken met fabrikanten van warmtepompen is tot een andere keuze voor de warmtepompen gekomen voor een opgeschaald systeem in bedrijfssituatie dan nu in het praktijkexperiment. Van deze warmtepompen is de COP hoger dan 5.

Verdere optimalisatie lag buiten het kader van dit praktijkexperiment daar de installatie in het praktijkexperiment duidelijk anders is dan in toekomstige situatie op een bedrijf gerealiseerd zal gaan worden. Hierdoor konden optimalisaties op het gebied van het energieopslagsysteem, de gasmotor, de decentrale luchtbehandeling en hun inpassing niet verder worden gekwantificeerd op basis van experimentele gegevens. Er zijn daarom uitvoerige contacten opgebouwd met het bedrijfsleven waardoor het nu mogelijk is om goed onderbouwde aannames te maken over de prijzen van de verschillende systeemcomponenten.

Bovenstaande optimalisaties leiden tot een globale terugverdientijd van 7 - 8 jaar voor een gesloten kas van 1 ha gecombineerd met 2 ha open kas zonder EIA subsidie en 6 - 7 jaar met subsidie. Hierbij is uitgegaan van een tomatenteelt met 20% meerproductie en 33% energiebesparing op basis van de verkregen gegevens in het praktijkexperiment.



In de bovenstaande grafiek is aangegeven hoe gevoelig de terugverdientijd is voor de verschillende parameters voor een combinatie van 1 ha gesloten kas en 2 ha open kas. Het gaat hierbij om nieuwbouw. Bij nieuwbouw kunnen de kosten lager zijn omdat er ook minder investeringen zijn, zoals bijvoorbeeld de gasketel die kleiner gedimensioneerd kan worden of een aantal luchtramen dat verminderd kan worden.

De terugverdientijd van het concept is niet zo gevoelig voor de energiebesparing (gasprijsverhoging geeft hetzelfde effect). Een verbetering van 30% (of een verhoging van de gasprijs met 30%), geeft een verbetering van de terugverdientijd van ongeveer 1 jaar. Het concept is ook niet zo gevoelig voor een verbetering van de meerproductie (de tomatenprijs geeft hetzelfde effect), omdat maar op 1 ha (het gesloten deel) van de 3 ha meerproductie voorkomt. Een verhoging van de meerproductie met 30% (= 6% bovenop de 20%) geeft ook een verbetering van de terugverdientijd van ongeveer 1 jaar (net als een verhoging van de tomatenprijs). Het concept is gevoeliger voor de investeringen. Een verhoging van het investeringsniveau (dus ook afschrijvingen) met 30% geeft een terugverdientijd verhoging van 2 jaar. De kosten voor de aquifer zijn een behoorlijk deel van de investeringen en deze zijn locatieafhankelijk. De kosten kunnen zeker 50% variëren afhankelijk van de bodemopbouw ter plekke. In dat geval varieert de terugverdientijd met ongeveer $\frac{3}{4}$ jaar.

In alle hier getoonde meest ongunstige scenario's is met de bestaande subsidies een rendabel project mogelijk. De subsidies verlagen de terugverdientijd zoals boven aangegeven namelijk met minstens 1 jaar zodat in de geschetste ongunstige scenario's terugverdientijden van ca. 8 jaar haalbaar zijn.



6 Informatieverstrekking

De informatieverstrekking aan de praktijk is met name gericht geweest op beleidsmakers, geïnteresseerde telers en de LTO commissie tomaat.

De beleidsdirectie van LNV heeft bij een bezoek aan het proefstation het praktijkexperiment bezocht. Van 6 april tot en met 20 oktober werd in de 'Kas van de Toekomst' op de Floriade een grafiek gepresenteerd met de actuele gegevens van het kasklimaat in de gesloten kas in Naaldwijk.

Een belangrijke informatie verstrekking heeft plaatsgevonden op de landelijke tomaten-, paprika- en komkommerdagen afgelopen januari en februari 2003. Ook in de vakbladen hebben de resultaten van het praktijkexperiment aandacht gekregen.



7 Conclusies

Dit hoofdstuk geeft puntsgewijs de conclusies van dit praktijkexperiment weer.

De hoofdconclusie luidt dat in het praktijkexperiment alle geformuleerde doelstellingen zijn bereikt ten aanzien van:

- Het telen in een gesloten kas.
- De meeropbrengst.
- De GLAMI-doelstellingen.
- Bedrijfszekere energievoorziening en klimaatbeheersing.
- Economisch perspectief.

Telen in een gesloten kas.

Het praktijkexperiment heeft aangetoond dat het telen van tomaat (Aromata) in een gesloten kas op teeltechnisch zeer verantwoorde wijze goed uitvoerbaar is. De plantontwikkeling en de opbrengsten waren zeer bevredigend.

De hoofddoelstelling van dit onderzoek is hiermee bereikt.

- De smaak van de tomaten in de gesloten kas was goed.
- De gemeten stevigheid (houdbaarheid) toonde een redelijke tot goede kwaliteit aan. Gaande het experiment werd de kwaliteit beter.
- Het vruchtgewicht bij telen in een gesloten kas bleef laag. Het opsporen van de oorzaak vergt nader onderzoek. Dit zelfde geldt voor de bladgrootte in de zomer maanden.
- Het verloop van het kasklimaat laat een andere karakteristiek zien dan een open kas. In de kasklimaatregeling biedt dit nieuwe mogelijkheden, met name voor de sturing van de temperatuur en luchtvochtigheid.
- De beheersbaarheid van de relevante kasklimaatfactoren CO₂ luchtvochtigheid en temperatuur was groot gedurende de gehele teeltperiode. Het systeem reageerde snel op wijzigingen in de setpoints. De horizontale en verticale temperatuurverdeling bleef binnen de grenzen van een gewenst kasklimaat.

Leerpunten

- De koeltemperatuur moet onafhankelijk van de stooktemperatuur kunnen worden ingesteld.
- De combinatie van koude ingeblazen lucht met verwarming via buisrailnet vergroot de kans op beschadiging van de vruchten. In de opbouw van de installatie op praktijkniveau moet hiermee rekening worden gehouden.
- Bij storingen is luchten noodzakelijk om de kastemperatuur en luchtvochtigheid niet te hoog te laten oplopen.
- De transpiratie in een gesloten kas met een geforceerde luchtbeweging is bij lage instraling hoger en bij hoge instraling lager dan in een open kas. Watergift en voeding moeten hiervoor worden aangepast.

Meeropbrengst

De totale gemeten productie komt uit op 56,3 kg/m² (lichtinstraling 70%). Dit betekent een extra productie van 22% ten opzichte van een gesimuleerde productie voor een conventionele open kas met minimaal 500 ppm CO₂.

Hiermee is ruimschoots aan de doelstelling van 10 % meerproductie voldaan.

- De productieverhoging is vooral te vinden aan het einde van het voorjaar, in de zomer en in de herfst.
- De productie kent minder sterke pieken, omdat de kastemperatuur beter te sturen is.
- Uit een modelvalidatie blijkt dat louter een CO₂ –verhoging naar 500 naar 1000 ppm een productie verhoging oplevert van 9 %. De overige productiestijging van 13% om te komen tot de 22% is nog niet verklaarbaar maar moet worden gezocht in de blijkbaar gunstiger specifieke omstandigheden in de gesloten kas zoals beheersbare luchtvochtigheid, temperatuur en ook luchtbeweging.



- Het gewasmodel van Wageningen UR bleek de productie gedurende het teeltjaar systematisch te laag te voorspellen. De productie bij een combinatie van hoge lichtintensiteit, hoog CO₂ niveau, luchtbeweging en hogere relatieve luchtvochtigheid is met het model van tuinbouwproductie ketens te beschrijven als in het model de maximale bladfotosynthese met 50% wordt verhoogd. Deze verhoging is nodig omdat het model, gevalideerd voor een teelt in een open kas, de productie met 10 % onderschat.
- Een verdere verhoging van de CO₂ naar 1200 - 1600 ppm zal op basis van het model nog een kleine extra productie kunnen opleveren (validatie hiervan is nog niet uitgevoerd)

Gesloten kas en het GLAMI-convenant

Energiegebruik

Het energiegebruik van een gesloten kas in eilandbedrijf met een oppervlakte van 3 ha zal, berekend op basis van de verkregen gegevens uit het huidige praktijkexperiment, met 42 aeq/m² 19% lager dan het energiegebruik van de referentie (vergelijking is gemaakt op basis van een gelijksoortige kas als gebruikt bij het praktijkexperiment, bouwjaar 1990).

Indien het jaarlijks warmteoverschot van de gesloten kas wordt ingezet voor de verwarming van nabijgelegen conventionele kassen met een oppervlakte die tweemaal zo groot is als die van de gesloten kas is het energiegebruik van deze cluster over het gehele areaal 33% lager dan dat van een conventionele kas. Deze besparing voldoet aan de gestelde doelstelling van 30%.

- De bovengenoemde 19% voor een eilandbedrijf ligt lager dan de verwachte besparing van ca. 30% voorkomend uit haalbaarheidsstudies. Gecombineerd met de hoger dan verwachte gerealiseerde meeropbrengst (22% versus minstens 10%) zijn de verwachte en “gerealiseerde” energie-efficiënties verbeterd tot respectievelijk 64% en 66% van die van een conventionele kas. In de energie-efficiëntie wordt de lagere energiebesparing vrijwel gecompenseerd door de hogere meeropbrengst. De energie-efficiëntie in een gesloten kas in eilandbedrijf is dus verbeterd tot 66% van die van een conventionele kas.
- De energie-efficiëntie in een cluster van gesloten en open kassen is verbeterd tot 63% van die van een conventionele kas.
- De doelstelling ter verbetering van de energie-efficiëntie tot 64% (= uitgaande van 10% meeropbrengst en 30% energiebesparing) van die van een conventionele kas is gehaald.
- De hoeveelheid energie die uit de kas wordt onttrokken en op een later tijdstip weer wordt ingezet voor de verwarming van de kas is 44% van de warmtevraag van de kas. Dit is het aandeel duurzame energie. Dit geldt zowel voor de gesloten kas in eilandbedrijf als voor een cluster met conventionele kassen. Hier wordt het gestelde doel van 4% duurzame energie ruimschoots overtroffen.

Gewasbeschermingsmiddelen

- Uit het praktijkexperiment blijkt het mogelijk te zijn om op teeltkundig verantwoorde wijze de inzet van gewasbeschermingsmiddelen aanzienlijk te reduceren. Hiermee is de gestelde doelstelling t.a.v. het verbruik van gewasbeschermingsmiddelen bereikt.
- In het uitgevoerde experiment was de infectie druk door insecten laag. De kans op schimmelaantasting, met name van Botrytis, is klein. Dit resulteerde in een laag gebruik aan gewasbeschermingsmiddelen.

Irrigatiewater

- Ongeveer de helft van het irrigatiewater dat door de teelt is verdampt werd teruggewonnen. De gestelde doelstelling t.a.v. het terugdringen van het waterverbruik is hiermee bereikt.
- Het kopergehalte bleek wel hoger dan toelaatbaar in irrigatiewater, dit komt door het gebruik van Cu/Al warmtewisselaars.

Arbeidsomstandigheden

In het project werd ten aanzien van de arbeidsomstandigheden geen doelstelling geformuleerd maar deze zijn op basis van temperatuur- en luchtvochtigheidsmetingen en de subjectieve perceptie van de teeltverzorgers minstens zo “goed” bevonden als in een conventionele kas.

- Over de gehele teeltperiode waren de arbeidsomstandigheden in de kas acceptabel. In de zomer met hoge buitentemperaturen was werken in de gekoelde kas aangenaam.
- In het voorjaar met een forse lichtverhoging op de stooktemperatuur, was de combinatie van hoge temperatuur en hoge luchtvochtigheid niet aangenaam.



- Zonder kwantitatieve gegevens mag worden verondersteld dat de doelstelling t.a.v. luchtkwaliteit is bereikt. Er heeft zich naar verwachting geen ophoping van eventuele schadelijke stoffen in de kaslucht plaatsgevonden. Hiervoor zijn drie redenen:
 - In de eerste plaats is het verbruik van chemische gewasbeschermingsmiddelen aanzienlijk gereduceerd waardoor de blootstelling ook zal zijn afgenomen.
 - In de tweede plaats is het te verwachten dat door de actieve circulatie een groot deel van deze stoffen uit de kas wordt gehaald en in het condenswater op de warmtewisselaars wordt geabsorbeerd.
 - Tenslotte is de relatief grote natuurlijke ventilatie (relatief slechte lektheid) van de kas gunstig voor het verdunnen van een eventueel hoge concentratie schadelijke stof.
- In het praktijkexperiment was er van enige geluidshinder binnen en buiten de kas geen sprake.

Bedrijfszekerheid

De doelstelling voor de realisatie van een bedrijfszekere energievoorziening en klimaatbeheersing in een gesloten kas is bereikt.

- Op grond van de ervaringen in het experiment mag worden geconcludeerd dat de installatie goed heeft gefunctioneerd. De kas is gesloten gebleven behalve tijdens enkele korte perioden door toedoen van bewuste wijzigingen aan de installatie en door (externe) storingen. Voor toekomstige toepassing in de praktijk zal de installatie op basis van het bestaande principe op enkele aspecten nog worden aangepast en geoptimaliseerd. Naar verwachting zal het afbreukrisico van een nieuwe installatie in de praktijk aanvaardbaar klein zijn. Het blijft gewenst om in geval van een storing gebruik te kunnen maken van een ventilatiesysteem.

Economisch perspectief

De doelstelling t.a.v. economische optimalisatie is bereikt.

- Op basis van onder meer verkregen gegevens in het praktijkexperiment is een verdere onderbouwing verkregen om de investeringen en daarmee de terugverdientijden omlaag te brengen. Hiertoe zijn optimalisaties uitgevoerd wat betreft energiegebruik en investeringen voor een aantal deelinstallaties.
- Voor de teelt van gewone tomaat in een combinatie een 1 ha gesloten kas met 2 ha conventionele open kas met een meeropbrengst van 20% in het gesloten deel en een energiebesparing van 33% over het totale areaal, leiden de optimalisaties tot een terugverdientijd van 7 – 8 jaar (zonder subsidie) en 6 – 7 jaar met EIA-subsidie. Uit deze gegevens mag worden geconcludeerd dat er voor de inpassing van gesloten kassystemen een duidelijk gunstig perspectief ligt.



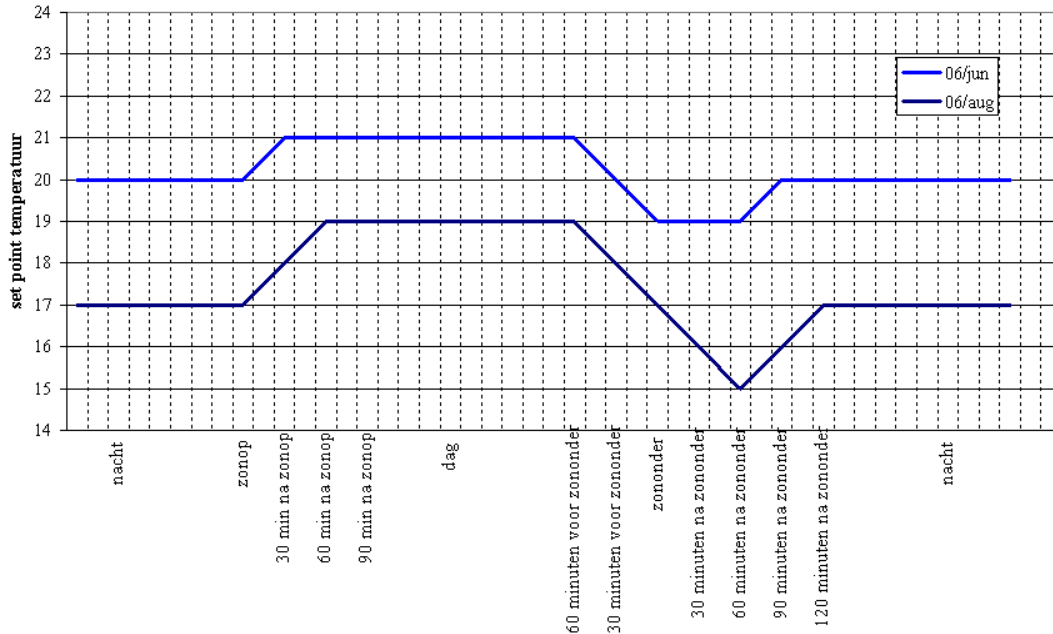
Referenties

- Breuer JJG, Van de Braak, NJ. 1989.** *Reference year for Dutch greenhouses.* Acta Horticulturae 248, 101-108.
- De Koning ANM. 1994.** *Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: a quantitative approach.* Dissertatie Wageningen, Agricultural University, Wageningen.
- Heuvelink E. 1996.** *Tomato crop growth and yield: analysis and synthesis.* Dissertatie Wageningen, Agricultural University, Wageningen.
- Grandjean E. 1965.** *De werkende mens en zijn omgeving.* J.H. de Bussy, Amsterdam.
- Nederhoff EM. 1994.** *Effects of CO₂ concentration of photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops.* Dissertatie Wageningen, Agricultural University, Wageningen.

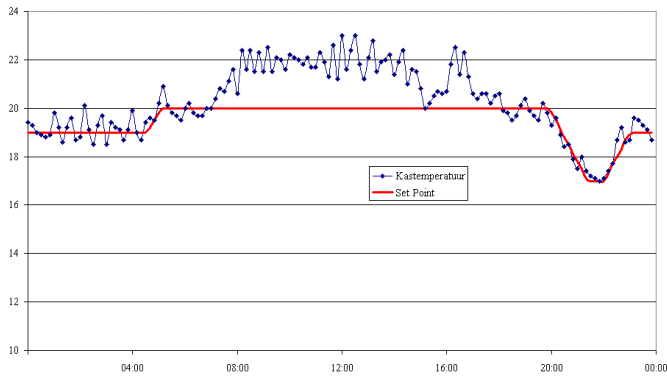


Bijlage 1

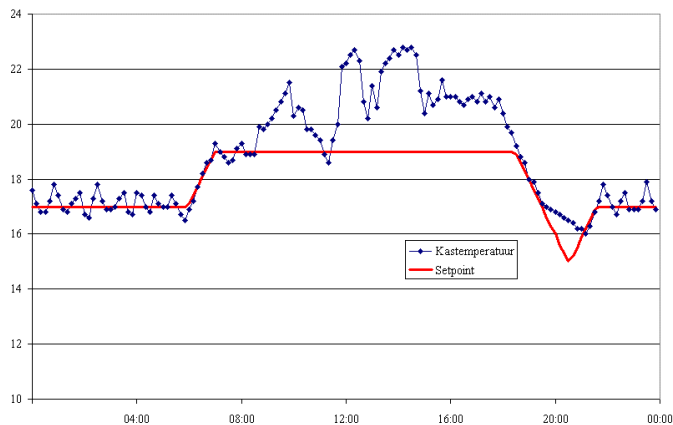
Voor beelden van verloop Set Point kasttemperatuur per dag



Temperatuur verloop op 8 juli



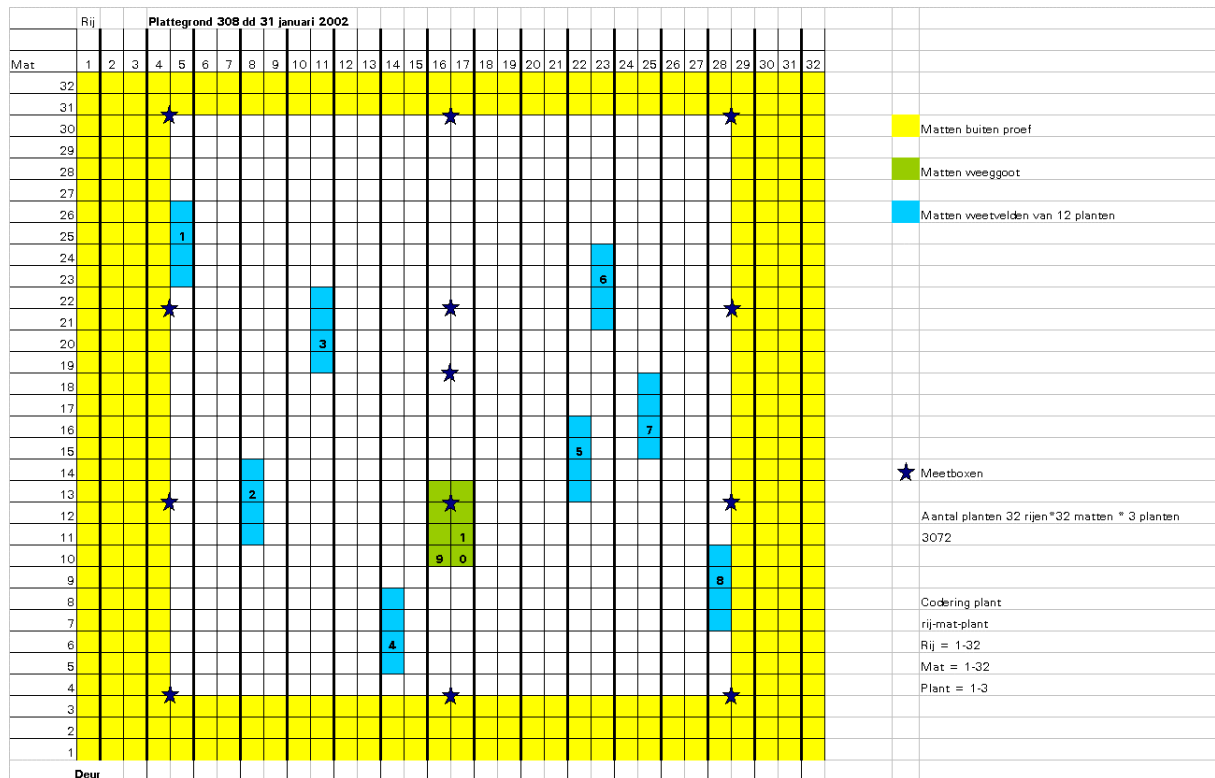
Temperatuur verloop op 1 september



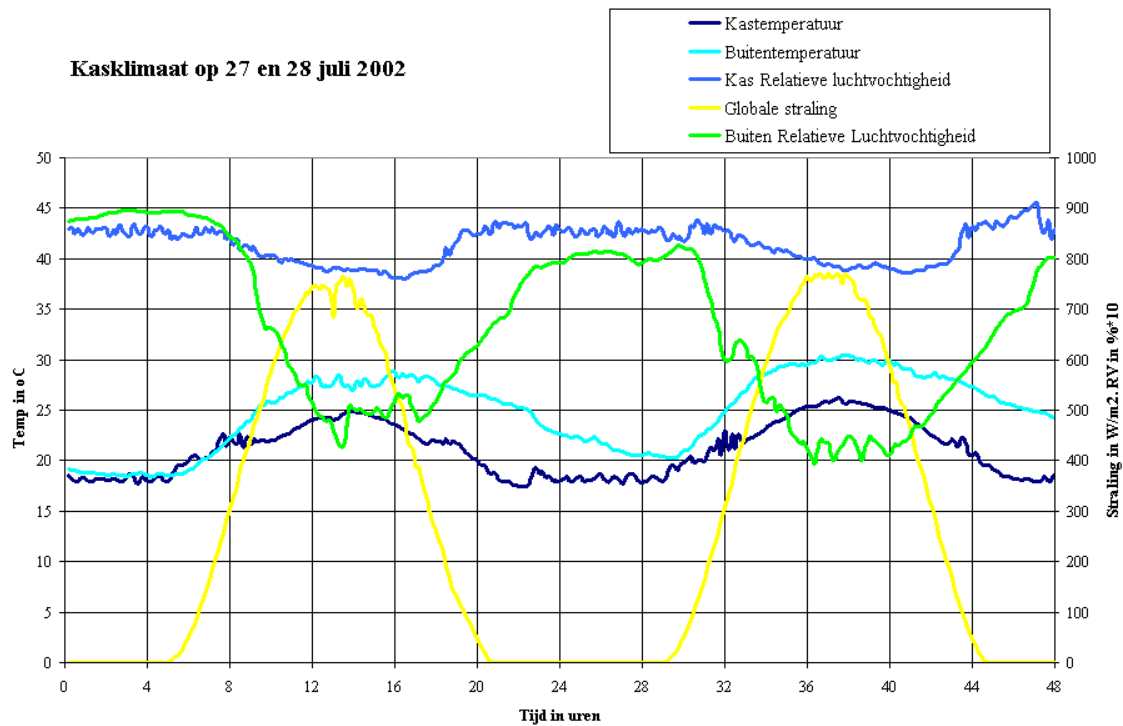


Bijlage 2

Plattegrond van de kas met de meetvelden voor de productie



Bijlage 3



De koeltemperatuur stond overdag op 21,5 °C. De kastemperatuur stijgt hierboven als de lichtintensiteit boven de 450 W/m² komt.



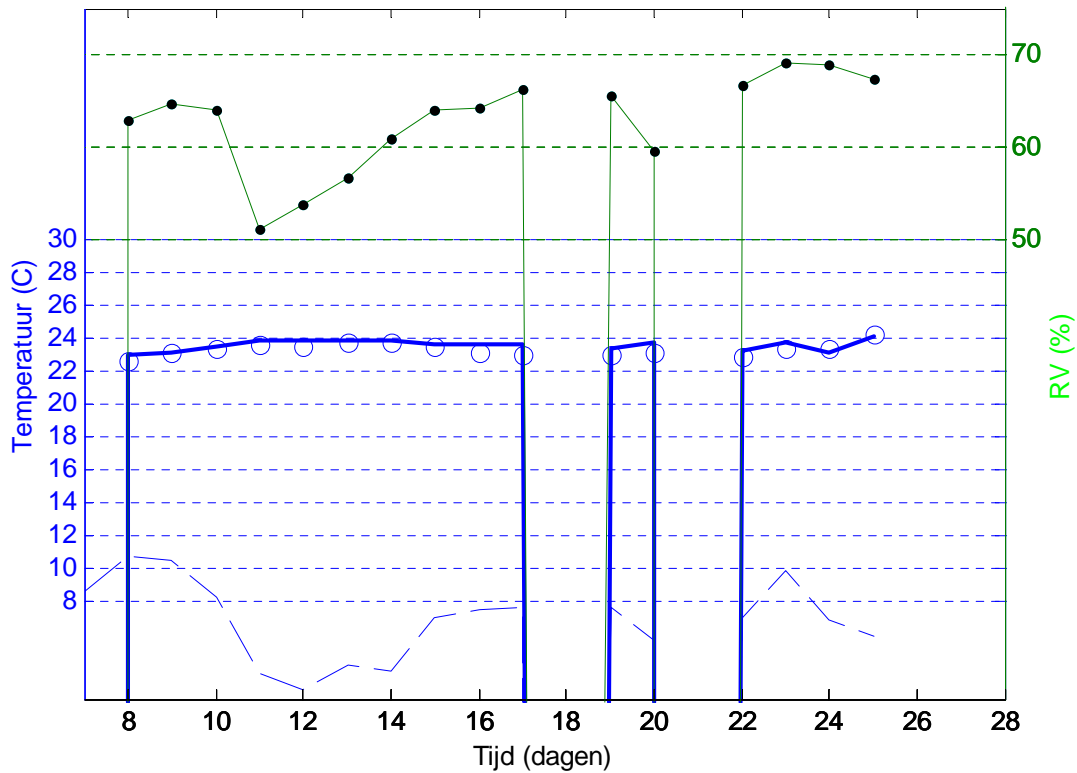
Bijlage 4

Grafieken met temperaturen en relatieve vochtigheid RV in gesloten kas van april tot en met augustus 2002

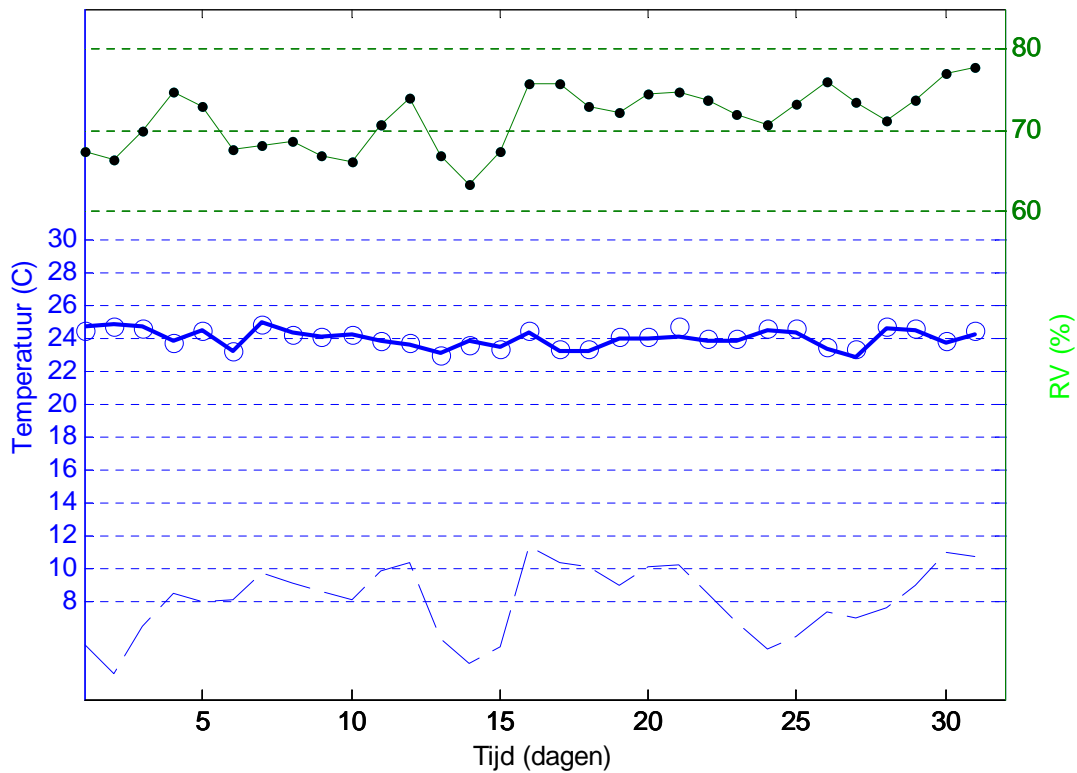
Getrokken dikke blauwe lijn: het instelpunt verwarming.
o-o-o: de kastemperatuur.
Onderbroken dunne blauwe lijn: de buitentemperatuur,
Groene lijn met punten: de RV in de kas.
Linkeras geeft temperatuur aan, de rechteras de RV. Alle data zijn gemiddeld over een etmaal..



Kas- en buitentemperatuur per etmaal; februari 2002

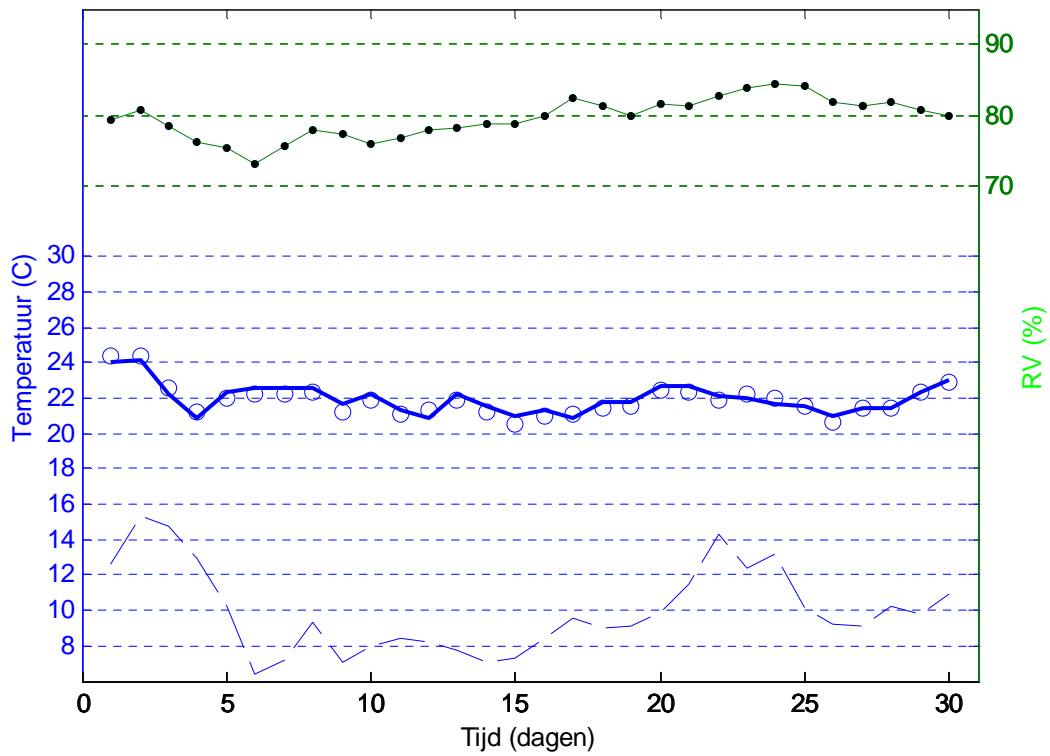


Kas- en buitentemperatuur per etmaal; maart 2002

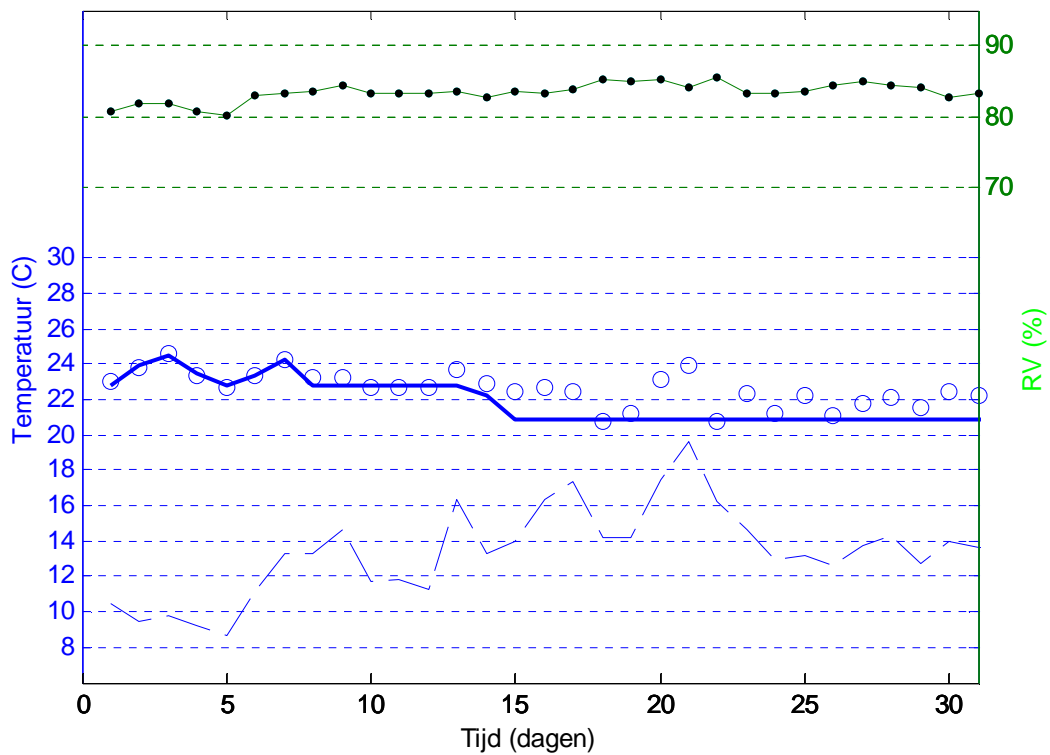




Kas- en buitentemperatuur per etmaal; april 2002

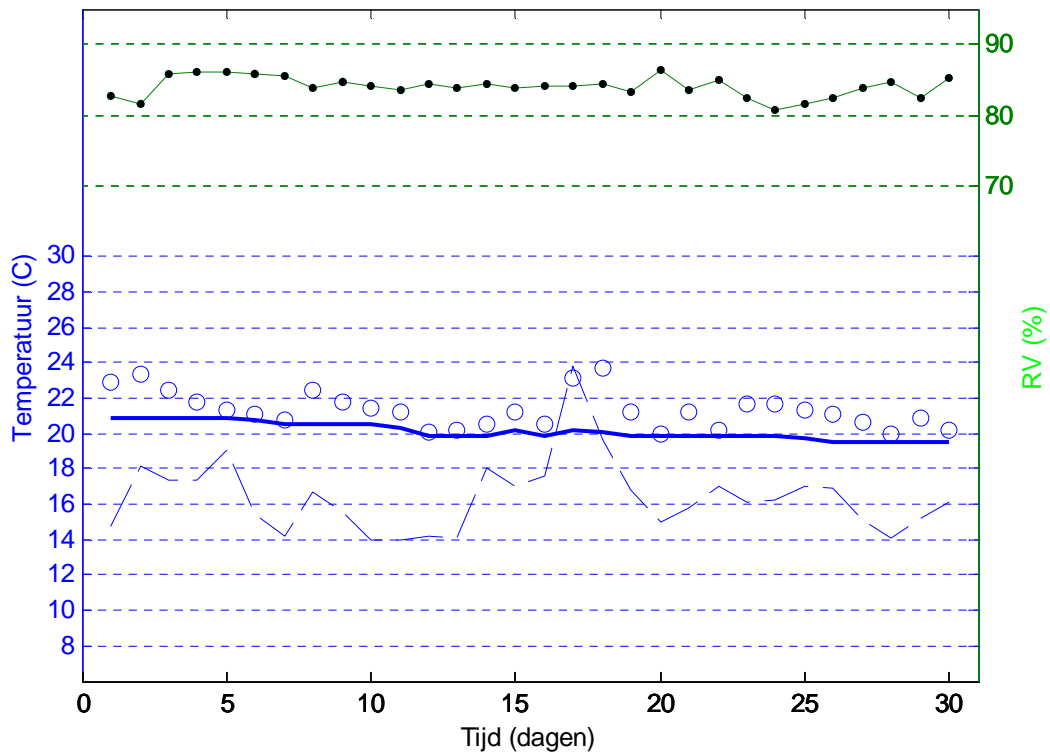


Kas- en buitentemperatuur per etmaal; mei 2002

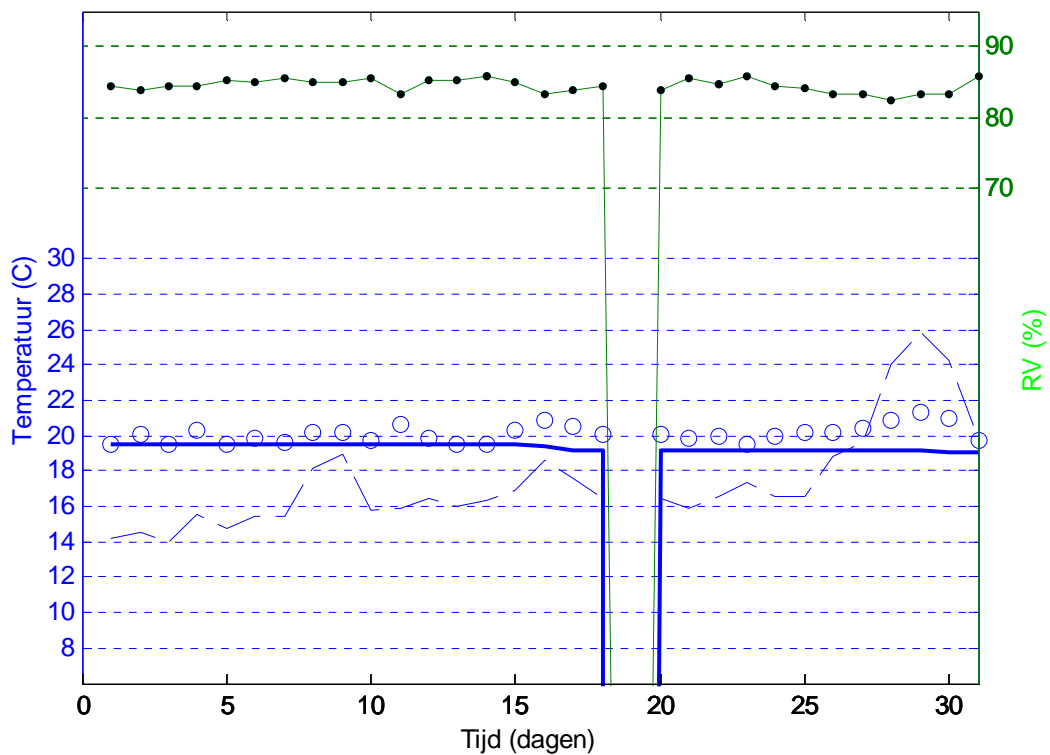




Kas- en buitentemperatuur per etmaal; juni 2002

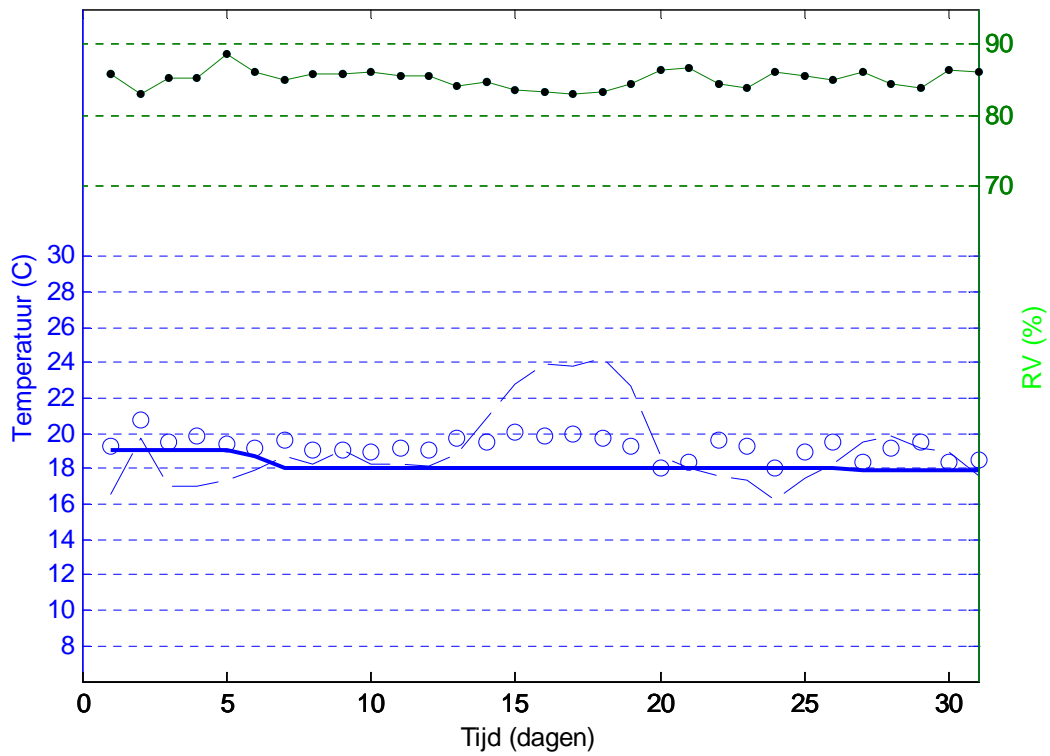


Kas- en buitentemperatuur per etmaal; juli 2002

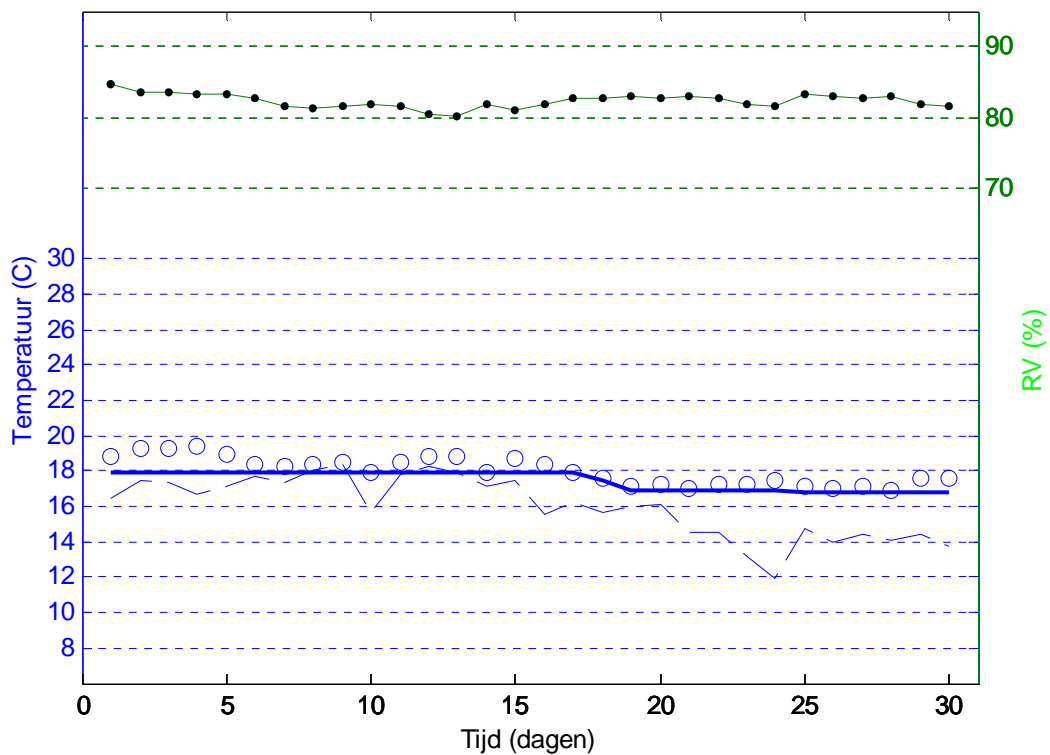




Kas- en buitentemperatuur per etmaal; augustus 2002

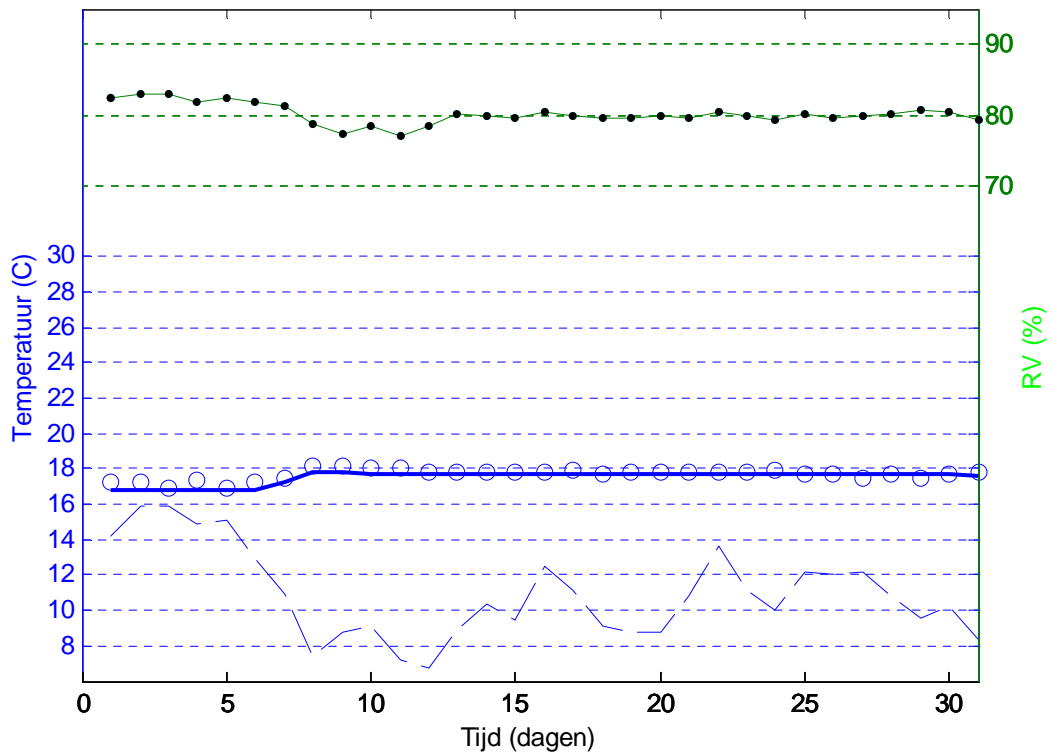


Kas- en buitentemperatuur per etmaal; september 2002





Kas- en buitentemperatuur per etmaal; oktober 2002



Kas- en buitentemperatuur per etmaal; november 2002

