



Optimaal besturen van temperatuur en CO₂ op basis van fotosynthese en energie

J.A. Dieleman & H.F. de Zwart





Optimaal besturen van temperatuur en CO₂ op basis van fotosynthese en energie

J.A. Dieleman¹ & H.F. de Zwart²

¹ Plant Research International

² Agrotechnology & Food Innovations

© 2004 Wageningen, Plant Research International B.V.

Plant Research International B.V.

Adres : Droeendaalsesteeg 1, Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 47 70 00
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : post.plant@wur.nl
Internet : <http://www.plant.wur.nl>

Voorwoord

In het kader van het convenant Glastuinbouw en Milieu (GLAMI) hebben de overheid (Ministeries van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en Economische Zaken) en de glastuinbouwsector (LTO Nederland) afspraken gemaakt over de maatschappelijke randvoorwaarden, met als horizon 2010. Als energiedoelen zijn afgesproken dat het energiegebruik per eenheid product met 65% gereduceerd moet worden ten opzichte van 1980 en dat het aandeel duurzame energie tot 4% toegenomen moet zijn. De overheid heeft hier recent aan toegevoegd dat de glastuinbouw haar bijdrage moet leveren aan het terugdringen van de CO₂-uitstoot.

Tegen deze achtergrond is in de periode van december 2002 tot en met juli 2004 in opdracht van het ministerie van LNV en het Productschap Tuinbouw (PT projectnummer 11291) door Plant Research International en Agrotechnology & Food Innovations te Wageningen onderzoek gedaan naar een efficiëntere kasklimaatregeling waarmee het energieverbruik voor verwarming en dosering van CO₂ gereduceerd kan worden.

Aan dit onderzoek is meegewerkt door Esther Meinen, Dik Uenk, Leo Marcelis, Pieter de Visser, Guus Broekhuijsen, Jaap Uittien, Anne Elings, Anja Dieleman (allen PRI), Eldert van Henten, Theo Gieling, Gert-Jan Swinkels, Wim van Meurs, Hans Janssen, Ferry Corver, Steef van Aggelen, Sjaak Jongejan en Feije de Zwart (allen A&F).

Samenvatting

Energiebesparing door andere instellingen van temperatuur en CO₂

Een energiebesparing van 7% (2.7 m³ gas per m² per jaar) in de paprikateelt is mogelijk door meer gebruik te maken van de (gratis) warmte van de zon. Gewasgroei en productie worden hierdoor niet negatief beïnvloed.

In de huidige kasklimaatregelingen wordt temperatuur meestal als vaste dag- en nachtwaarden ingesteld, met daar bovenop een lichtverhoging. Deze instellingen worden regelmatig handmatig bijgesteld aan de hand van de stand van het gewas. CO₂ wordt overdag in afhankelijkheid van de warmtevraag gedoseerd via een standaard buffervulcurve tot een vaste maximumconcentratie. Deze regelingen houden nauwelijks rekening met onderlinge samenhang tussen de effecten van licht, temperatuur en CO₂ op de productie. Door de instituten Plant Research International en Agrotechnology & Food Innovations in Wageningen is een nieuwe kasklimaatregeling ontwikkeld die hier wel rekening mee houdt. Dit onderzoek werd gefinancierd door Productschap Tuinbouw en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit.

Fotosynthese

Het doel van de nieuwe klimaatregeling is met minder energie tenminste dezelfde productie te realiseren. Hiervoor werd gebruik gemaakt van de kennis die aanwezig is over de effecten van licht, temperatuur en CO₂ op de fotosynthese. In de fotosynthese wordt CO₂ uit de lucht opgenomen en met behulp van lichtenergie omgezet in suikers, die gebruikt worden voor de groei. Als de CO₂ concentratie in de kaslucht wordt verhoogd, neemt de fotosynthese toe. Als er veel licht is, kan de fotosynthese meer toenemen dan wanneer er weinig licht is. De fotosynthese, en dus ook de gewasgroei is het hoogst als er veel licht is, veel CO₂ beschikbaar is en de temperaturen niet te hoog of te laag zijn. De nieuwe, optimaliserende klimaatregeling maakt hiervan gebruik door temperatuur en CO₂ gedurende de dag zo in te zetten dat ze de hoogste productie op kunnen leveren.

Optimalisatie van temperatuur en CO₂ dosering

De nieuwe klimaatregeling probeert temperatuur en CO₂ zodanig in te zetten dat met minimale inzet van energie de hoogste productie wordt gerealiseerd. Uitgangspunt hierbij is dat een door de tuinder gewenste etmaaltemperatuur gerealiseerd wordt, maar dat de klimaatcomputer binnen de grenzen van 16 en 30°C de vrije hand krijgt om te bepalen hoe die etmaaltemperatuur tot stand komt. De optimalisatieprocedure stuurt de temperatuur zo dat iedere dag de etmaaltemperatuur tegen het laagst mogelijke energiegebruik wordt gerealiseerd. Hierbij maakt de regeling gebruik van het principe van temperatuurintegratie. Overdag, als er gratis warmte van de zon beschikbaar is, mag de temperatuur verder oplopen dan gebruikelijk. Dat wordt gecompenseerd door 's nachts, wanneer er met duur gas gestookt moet worden, de temperatuur wat meer weg te laten zakken.

Na de optimalisatie van het temperatuurverloop over de dag, volgt de optimalisatie van de inzet van de beschikbare CO₂. De regeling beoordeelt van uur tot uur wat een eenheid extra CO₂ op kan leveren voor de gewasgroei en hoeveel er verloren gaat door ventilatie. Zo wordt de CO₂ zo goed mogelijk over de dag verdeeld.

Uit berekeningen met een kasklimaatmodel blijkt dat met de nieuwe klimaatregeling de verschillen tussen dag- en nachttemperaturen groter zijn dan volgens de gangbare klimaatregeling. Er wordt dus meer gebruik gemaakt van de (gratis) warmte van de zon en overdag minder geventileerd. Dit leidt tot een afname in het energieverbruik van 38.9 naar 36.2 m³ per m² per jaar, een daling van 7%. Door minder te luchten en de CO₂ beter over de dag te verdelen, wordt met de nieuwe klimaatregeling iets meer productie berekend dan met de standaard klimaatregeling.

In de kas

Om na te gaan of de resultaten van de berekeningen ook in de praktijk te realiseren zijn, is een kasproef uitgevoerd. In twee afdelingen werd in het voorjaar van 2003 een paprikagewas geteeld. In de ene afdeling werd het klimaat volgens de praktijk geregeld. In de andere afdeling werd het klimaat geregeld volgens de nieuwe optimaliserende regeling. In de optimaal geregelde afdeling bleken zoals verwacht de verschillen tussen dag- en nachttemperaturen groter te zijn dan in de standaard afdeling. Dit leverde een energiebesparing op van 6% voor de periode 1 april – 30 juni 2003. Wanneer dit met een model wordt doorvertaald naar een jaarrond situatie betekent dit 7% minder energieverbruik op jaarbasis.

De doseerstrategie voor CO₂ werd dagelijks bepaald door te berekenen op welk moment van de dag een extra eenheid CO₂ de meeste extra fotosynthese opleverde. Resultaat van deze optimalisatie was dat er ten opzichte van de referentie op warme dagen meer in de ochtend werd gedoseerd.

De gewasgroei en productie in de afdelingen waar het klimaat op de standaard manier en volgens de nieuwe regeling werden geregeld werden gedurende de proef beoordeeld. De veranderde temperaturen en CO₂ verdeling leidde niet tot aantoonbare verschillen in groei, vruchtzetting en productie tussen de beide behandelingen. De vruchtkwaliteit bleek in de optimaal geregelde afdeling iets beter te zijn dan in de standaard geregelde afdeling. De proef werd in juni bezocht door twee paprikatelers. Zij waren van oordeel dat het gewas er in beide afdelingen goed bij stond en dat er geen verschillen in gewasstand tussen de beide behandelingen was te constateren.

In de praktijk

- Door de strakke temperatuursinstellingen los te laten is het mogelijk energie te besparen. Als de temperaturen mogen variëren tussen de 16 en 30°C kan bij paprika's ruim 2.5 m³ gas per m² per jaar worden bespaard. Deze temperatuurschommelingen hebben geen effect op de vruchtzetting en productie.
- Als overdag de temperaturen verder op mogen lopen, hoeft minder gelucht te worden. Er gaat dan minder CO₂ verloren door de luchtramen, waardoor een hogere concentratie in de kas kan worden aangehouden. Dit kan een positief effect hebben op de productie.
- Qua buffer-vulstrategie kan op gangbare tuinbouwcomputers het beste gekozen worden voor een vulcurve die de buffer in het eerste kwart van de dagperiode (van zon op tot zon onder) tot 15% vult, vervolgens de buffer gedurende de halve dagperiode tot 85% vult en de laatste 15% reserveert voor het laatste kwart van de dagperiode. Ten opzichte van deze algemene instellingen kan een geavanceerde klimaatregelaar, die gebruik maakt van weersverwachtingen, nog ongeveer 1% extra productie realiseren door nog wat bewuster met de CO₂-dosering om te gaan.

Inhoudsopgave

	pagina
Voorwoord	
Samenvatting	
1. Inleiding	1
Modelberekeningen	3
2. Calibratie van de fotosynthesemodule	5
3. Optimalisatie van temperatuur en CO ₂ setpoints	7
3.1 Inleiding	7
3.2 Overzicht van relevante parameters in de referentieteelt	8
3.3 Optimalisatie van temperatuur en CO ₂ -dosering	10
4. Simulatieresultaten	13
5. Conclusies modelberekeningen	15
Experiment	17
6. Opzet van het experiment	19
6.1 Proefopzet	19
6.2 Klimaat	19
6.3 Periodieke oogsten	20
6.4 Fotosynthesemetingen	20
7. Resultaten klimaat en energieverbruik	21
7.1 Kasklimaat en energie	21
7.2 CO ₂ -dosering en productie	26
8. Resultaten gewasgroei	29
8.1 Plantgroei	29
8.2 Vegetatieve groei	29
8.3 Generatieve groei	30
8.4 Conclusies	33
9. Fotosynthese	35
9.1 Resultaten	35
9.2 Conclusies	37
10. Modelcalibratie en -validatie	39
10.1 Modelbeschrijving	39
10.2 Calibratie van de fotosynthesemodule	39
10.3 Modelvalidatie	40
10.4 Conclusies	40
11. Conclusies	43
12. Discussie en aanbevelingen	45
12.1 Discussie	45
12.2 Aanbevelingen	46
13. Literatuur	47
Bijlage I. Kasuitrusting en teeltbeschrijving	4 pp.
Bijlage II. Verslag van de go/no go bijeenkomst	2 pp.
Bijlage III. Verslag van de bijeenkomst met de gewascommissie paprika	2 pp.

1. Inleiding

In de huidige kasklimaatregeling wordt temperatuur over het algemeen als vaste dag- en nachtwaarden ingesteld, met daar bovenop een lichtverhoging. Deze instellingen worden regelmatig handmatig bijgesteld aan de hand van de stand van het gewas. CO₂ wordt overdag in afhankelijkheid van de warmtevraag gedoseerd tot een vaste maximumconcentratie. In deze regeling wordt nauwelijks rekening gehouden met interacties die er zijn tussen de effecten van de klimaatfactoren licht, temperatuur en CO₂ op fotosynthese en gewasgroei. In het project 'Efficiënt gebruik van CO₂', dat in 2002 door Plant Research International is uitgevoerd, zijn deze interacties gekwantificeerd (Dieleman *et al.*, 2003). Als de hoeveelheid licht bijvoorbeeld hoog is, zijn temperatuur en CO₂ beperkend voor de fotosynthese. Onder deze omstandigheden heeft het verhogen van de CO₂ concentratie en temperatuur meer effect op de fotosynthese dan bij een lage instraling. Verder bleek dat verhogingen van temperatuur en CO₂ elkaars effect versterken. Hier liggen dus mogelijkheden om temperatuur en CO₂ efficiënter te gebruiken voor fotosynthese dan nu gebruikelijk is en daarmee naar verwachting voor de groei van het gewas.

In dit project 'Optimaal besturen van CO₂ en temperatuur op basis van fotosynthese en energie' worden de mogelijkheden voor een efficiënter gebruik van CO₂ en temperatuur verkend. De relaties tussen CO₂, temperatuur en licht op de fotosynthese worden ingebracht in het kasklimaatmodel KASPRO. Door middel van optimaliserende regelalgoritmen worden temperatuur en CO₂ gedurende de dag zodanig ingezet dat ze de hoogste fotosynthese en daarmee gewasgroei kunnen realiseren. Gewasgroei en energieverbruik bij deze optimaliserende regeling worden vergeleken met die bij een standaard klimaatregeling. De doelstelling is om met de optimaliserende regelaar het aardgasverbruik met 10-15% te reduceren in vergelijking tot het gemiddelde verbruik in de paprikateelt (42 m³/(m² jaar)) en het CO₂ verbruik met 5-15%.

Het project is ingedeeld in twee onderdelen. In het onderdeel 'modelberekeningen' wordt via een modelstudie bepaald wat het effect van de optimaliserende kasklimaatregeling is op productie en energiegebruik. In het onderdeel 'experiment' wordt de optimaliserende regeling getest in een kasexperiment. In twee afdelingen worden paprika's geteeld. In de ene afdeling wordt een 'standaard' kasklimaatregeling toegepast, in de andere afdeling wordt het kasklimaat gestuurd op een optimale fotosynthese, waarbij temperatuur en CO₂ worden afgestemd op het licht buiten. In dit experiment worden kasklimaat, gewasgroei, vruchtproductie, fotosynthese en energieverbruik in beide afdelingen gemeten en vergeleken. Hieruit moet blijken of de resultaten uit de modelstudie ook in een teelt te realiseren zijn.

Modelberekeningen

2. Calibratie van de fotosynthesemodule

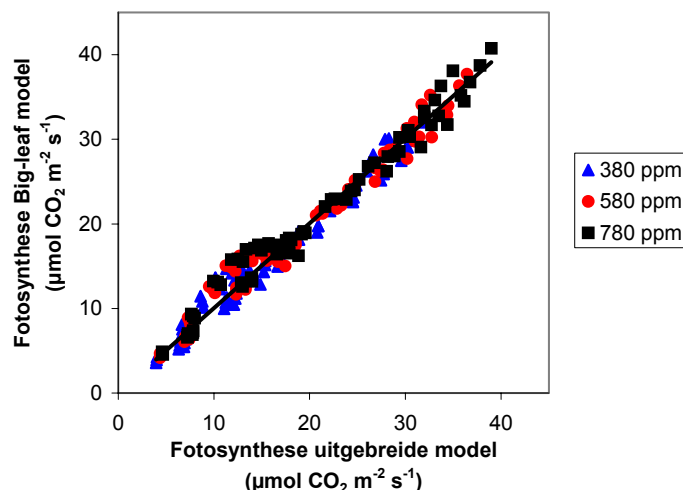
Voor dit project wordt de gewasgroei door het kasklimaatmodel KASPRO berekend met het door PRI ontwikkelde 'Big-leaf' model (Gijzen, 1994). In dit model, een vereenvoudigde versie van het door PRI ontwikkelde gewasgroei-model INTKAM, wordt het gewas beschouwd als één bladlaag. Dit betekent dat de fotosyntheseparameters andere waarden aannemen dan bij het uitgebreide model, waarin de fotosynthese berekend wordt over meerdere bladlagen. De berekening van de fotosynthesesnelheid is verder vrijwel identiek aan die van het uitgebreide model.

De fotosyntheseparameters van het Big-leaf model zijn gekalibreerd door de uitkomsten van de berekeningen van de fotosynthesesnelheden bij een reeks klimaatomstandigheden te fitten op de berekende fotosynthesewaarden van het uitgebreide gewasgroeimodel (Dieleman *et al.*, 2003).

De kalibratieprocedure werd als volgt opgezet:

- Met het uitgebreide model werd de bruto gewasfotosynthese berekend voor CO₂ concentraties van 380, 580 en 780 ppm, luchttemperaturen van 15, 20 en 25°C en LAIs van 1, 3 en 5.
- Met het Big-leaf model werd de bruto gewasfotosynthese berekend bij dezelfde omstandigheden.
- De kalibratie is uitgevoerd met optimalisatie-software die gebruik maakt van een genetisch algoritme. In deze optimalisatieprocedure wordt het verschil in de berekende bruto gewasfotosyntheses van het uitgebreide model en het Big-leaf model geminimaliseerd door bijstelling van de waarden van J_{\max} (maximale snelheid van elektronentransport), θ (kromming van de lichtresponscurve) en α (efficiëntie van lichtgebruik, initiële helling van de lichtresponscurve).

In Figuur 2.1 staan de resultaten van de berekeningen van de bruto gewasfotosynthese door het Big-leaf model uitgezet tegen de berekende bruto fotosynthese door het uitgebreide model. Hieruit blijkt dat de door het Big-leaf model berekende fotosynthesesnelheden goed overeenstemmen met die van het uitgebreide model (richtingscoëfficiënt van 1.00 en correlatiecoëfficiënt van 0.97).



Figuur 2.1. Bruto fotosynthesesnelheid berekend door het Big-leaf model uitgezet tegen de bruto fotosynthesesnelheid berekend door het uitgebreide model bij 3 CO₂ concentraties (zie legenda).

Het gekalibreerde Big-leaf model is als input gebruikt voor de berekeningen die in hoofdstuk 3 staan beschreven.

3. Optimalisatie van temperatuur en CO₂ setpoints

3.1 Inleiding

In de gangbare kasklimaatregelaars wordt de kasluchttemperatuur geregeld op basis van een vrij strak verloop van de kasluchttemperatuur over het etmaal. Op sombere dagen varieert de temperatuur tussen zo'n 18 en 20°C. Op warme dagen is de variatie wat groter (18 tot 25°C) en op hele hete dagen piekt de temperatuur tot waarden boven de 30°C. In grote lijnen kan echter gesteld worden dat de gangbare kasklimaatregelaar veel gewicht toekent aan de beperking van temperatuurfluctuaties. In de zomer betekent dit intensief ventileren gedurende de dag en vaak stoken in de nacht. De langzamerhand in opkomst zijnde temperatuurintegratie regelaars bieden zicht op een belangrijk energiebesparingspotentieel doordat deze er van uitgaan dat niet zozeer het precieze temperatuursverloop over het etmaal, maar veeleer de gemiddelde etmaaltemperatuur maatgevend is voor de gewasgroei en -ontwikkeling. Door nu toe te staan dat de kasluchttemperatuur overdag oploopt, kan bij een lagere nachttemperatuur de beoogde gemiddelde temperatuur worden behaald en hoeft 's nachts minder gestookt te worden. Verschillende klimaatcomputers hebben inmiddels meer of minder uitgekende algoritmen om van deze mogelijkheid gebruik te maken.

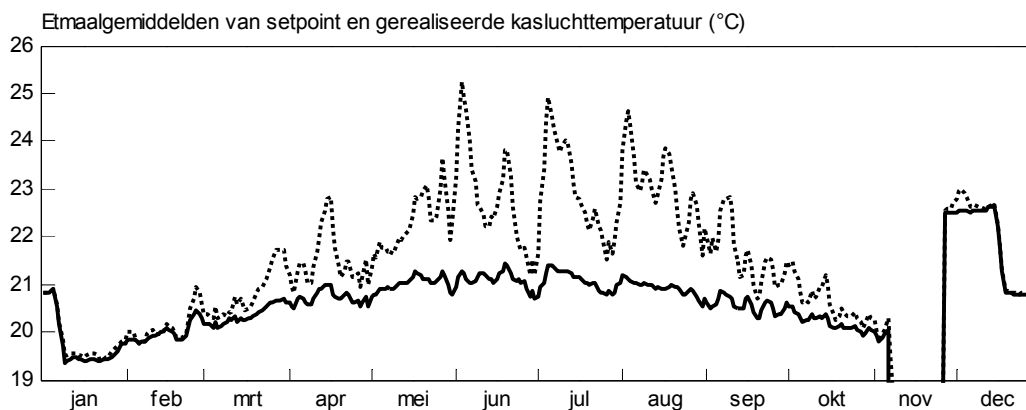
Naast de energiebesparingspotentie leidt het toestaan van een hogere temperatuur overdag tot een geringere ventilatiebehoefte. Dit betekent dat CO₂-dosering op een efficiëntere wijze kan worden ingezet. Immers, bij een kleiner ventilatieverlies zal de CO₂-concentratie bij een gegeven dosering hoger komen te liggen (of dezelfde concentratie kunnen worden gerealiseerd bij een lagere dosering). Een nadeel van de energiebesparing die een temperatuurintegratie algoritme oplevert is echter dat er minder CO₂ uit rookgassen beschikbaar is. Indien de in de vorige alinea beschreven verbetering van de CO₂ benuttinggraad niet maximaal wordt benut, zal de toepassing van temperatuurintegratie dus kunnen leiden tot een afname van het productieniveau.

In het eerste gedeelte van dit project zal daarom worden onderzocht in hoeverre het mogelijk is om door een optimalisatie van de CO₂-doseringstrategie de negatieve effecten van het temperatuurintegratie algoritme te voorkomen en daardoor de energiebesparingspotentie ten volle te benutten. Om dit te analyseren wordt in eerste instantie een referentieberekening gemaakt voor een standaard paprikateelt. Deze standaard omvat de gangbare kasuitrusting, kasklimaatsetpoints, CO₂-doseersystemen en warmtebuffer. Een beschrijving hiervan is opgenomen in Bijlage I. Vanuit deze beschrijving van de standaardsituatie kan met het kasklimaatmodel KASPRO voor een willekeurig jaar een kasklimaatdataset worden gegenereerd van kasluchttemperaturen, luchtvochtigheid en CO₂-concentraties en de lichtintensiteit in de kas. Met het gekalibreerde Big-leaf model (zie hoofdstuk 2) kan bij deze kasklimaatdataset de fotosynthese worden berekend. Deze voor de standaardsituatie berekende fotosyntheseresultaten zullen als maat worden gehanteerd voor de standaard productie. Naast een vergelijking van de optimaliserende regeling met een standaardregeling voor paprika, wordt de optimaliserende regeling ook vergeleken met een standaardregeling met temperatuurintegratie en de instellingen van de tuinder met het laagste energieverbruik uit het project 'Effecten temperatuurintegratie en energieschermen' (Van de Braak *et al.*, 2002). Nadere informatie over deze twee regelingen is te vinden in Bijlage I.

In paragraaf 3.2 wordt een exposé geleverd van het klimaat in de referentiesituatie. Vervolgens wordt in paragraaf 3.3 uiteengezet met welke aanpak het temperatuurverloop en het CO₂-doseringprofiel zodanig kan worden geoptimaliseerd dat de verbeterde kasklimaatregelaar ten minste hetzelfde productieresultaat behaalt bij een lager energieverbruik. In hoofdstuk 4 worden vervolgens de resultaten hiervan getoond en geanalyseerd.

3.2 Overzicht van relevante parameters in de referentie-teelt

In dit hoofdstuk worden een aantal relevante kenmerken van een standaard paprikateelt zonder temperatuur-integratie getoond. De kasklimaat-regelaar instellingen en de belangrijkste installatie eigenschappen van deze referentie staan beschreven in Bijlage I.

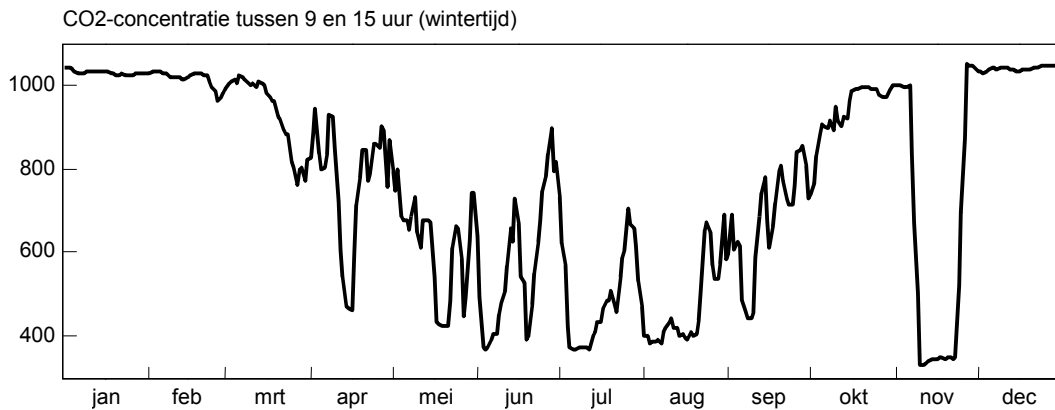


Figuur 3.1. Verloop van de etmaal gemiddelde kasluchttemperatuur (gestreept) en de temperatuur die op de klimaatcomputer is ingesteld (getrokken lijn) over de teeltperiode van een standaard paprikateelt.

Figuur 3.1 laat zien dat de gerealiseerde temperatuur in de zomer vaak aanzienlijk hoger ligt dan de ingestelde temperatuur. Dit komt in de eerste plaats doordat een temperatuuroverschrijding bij het gebruik van de algemeen gangbare proportionele raamregeling als het ware in de klimaatregeling zit ingebakken. Een proportionele regelaar onderneemt immers een actie die proportioneel is ten opzichte van de afwijking. Dit in tegenstelling tot een PI-regeling die net zo lang actie onderneemt totdat afwijkingen zijn weggeregeld. In de tweede plaats wordt de koelcapaciteit van een kas nu eenmaal beperkt door de maximale ventilatiecapaciteit en zal ook bij volledig geopende ramen de temperatuur op een aantal dagen flink oplopen.

Een ander belangrijk facet van de kasklimaatregelaar is de CO₂ dosering. In de standaardregeling wordt de dosering gebaseerd op de vergelijking tussen CO₂-concentratie in de kaslucht en de gewenste concentratie. De gewenste concentratie is ingesteld op 900 ppm. Eén uur voor zonsondergang wordt de CO₂-dosering gestopt. Als de concentratie in de kaslucht lager is dan de gewenste concentratie wordt de ketel aangezet om in de CO₂-behoefte te voorzien. De brander wordt daarbij op de zogenaamde CO₂-branderstand ingesteld. Daarnaast wordt de branderstand echter ook bepaald door de mate waarin de buffer gevuld is. Is de CO₂-vraag groot en de warmtevraag klein, dan loopt de buffertemperatuur snel op. De klimaatregelaar beoordeelt de snelheid van de temperatuurstijging en als deze te hoog is wordt de doseersnelheid getemperd. De daaruit volgende kleinere CO₂-dosering en lagere concentratie worden als onoverkomelijke effecten geaccepteerd.

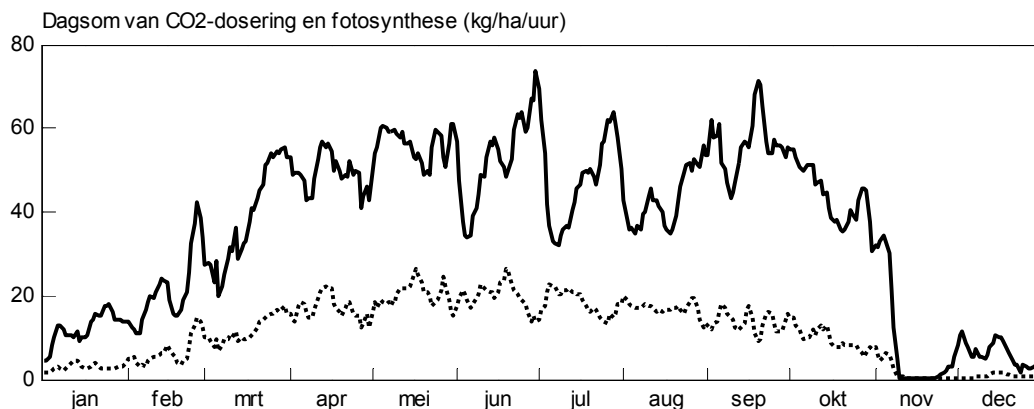
In Figuur 3.2 is de uit bovenbeschreven regeling resulterende CO₂-concentratie weergegeven als gemiddelde waarde tussen 9:00 en 15:00. Nachtelijke concentraties tellen immers niet mee en de concentraties in de ochtenden en avonden zijn minder belangrijk.



Figuur 3.2. Gemiddelde CO₂-concentratie tussen 9:00 en 15:00 uur wintertijd (= tussen 10:00 en 16:00 uur zomertijd).

Figuur 3.2 laat duidelijk zien dat het grote ventilatievoud dat noodzakelijk is om op zomerse dagen de kasluchttemperatuur binnen redelijke grenzen te houden, gecombineerd met de beperkte beschikbaarheid van CO₂, het realiseren van hoge CO₂ concentraties belemmert.

In Figuur 3.3 wordt de CO₂-dosering en de netto CO₂-opname door het gewas getoond. De figuur laat goed zien dat als vuistregel kan worden gehanteerd dat een kwart van de gedoseerde CO₂ in het gewas wordt vastgelegd en dat $\frac{3}{4}$ in de vorm van lekverliezen verloren gaat.

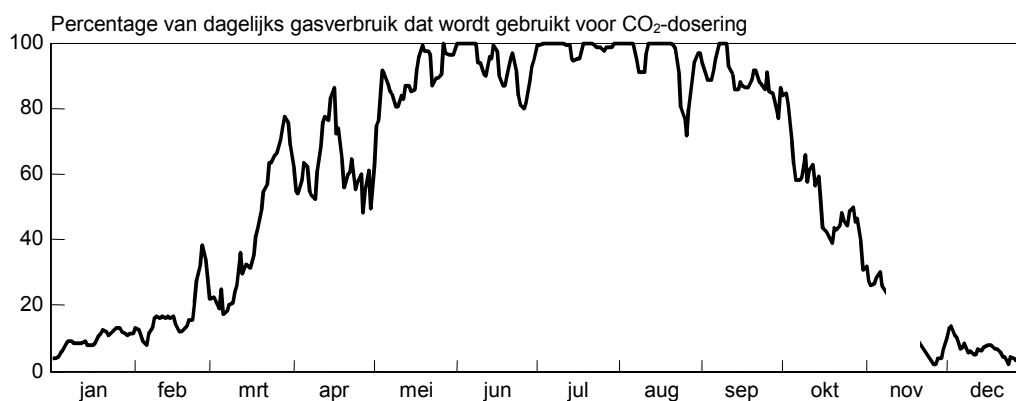


Figuur 3.3. Dagelijkse CO₂-dosering (getrokken lijn) en dagelijkse fotosynthesesom (gestreepte lijn).

Het feit dat $\frac{3}{4}$ van de toegevoerde CO₂ verloren gaat klinkt als een grote verspilling van CO₂. Dit verlies is echter een gevolg van het feit dat de concentratie in de kas hoger ligt dan buiten de kas. Alleen door de kas ofwel volledig luchtdicht te maken, ofwel de gewenste CO₂-concentratie gelijk te maken aan de buitenconcentratie zou dit verlies kunnen voorkomen. Een kas volledig luchtdicht maken vraagt om een bijzonder goed uitgevoerde gesloten kas (die overigens via de altijd aanwezige lek nog altijd 5 tot 10 kg CO₂ per m² per jaar zou verliezen). De gewenste CO₂ concentratie in de kas gelijk maken aan de buitenconcentratie leidt tot een opbrengstderving in de orde van 20%. Het totale lekverlies van CO₂ die via de dosering naar de kas wordt gevoerd is echter nog geen 35% van de totale hoeveelheid CO₂ die op jaarbasis door de verbranding van aardgas vrijkomt. Dit blijkt uit het volgende globale rekensommetje: Het gemiddelde gasverbruik van energiezuinige paprikatelers ligt in de orde van 40 m³ per m² per

jaar ($38.9 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{jaar}$ voor de hier gehanteerde standaardteelt, zie Bijlage I). Hierbij komt dus 72 kg CO_2 per m^2 per jaar vrij. Van deze totale hoeveelheid rookgassen wordt ongeveer 50% ingezet in de vorm van CO_2 -dosering. Dit betekent dus een doseerniveau van zo'n 36 kg per m^2 per jaar, waarvan 10 tot 11 kg per m^2 per jaar door het gewas wordt opgenomen. Het lek- en ventilatieverlies is dus zo'n 25 kg per m^2 per jaar, wat neerkomt op 34% van de totale hoeveelheid CO_2 die per jaar op het bedrijf vrijkomt.

De warmtebuffer speelt in de CO_2 -regeling een heel belangrijke rol. Deze maakt het immers mogelijk dat de warmteproductie in zekere mate kan worden gesynchroniseerd met de CO_2 -behoefte, terwijl de warmtevraag met name in de warmere perioden van het jaar ongeveer antisynchroon loopt met de CO_2 -behoefte. De werking van de buffer komt tot uiting in Figuur 3.4, waarin wordt aangegeven welk percentage van het dagelijks gasverbruik in een standaardkas wordt ingezet voor CO_2 -dosering.



Figuur 3.4. Percentage van het dagelijks gasverbruik dat wordt ingezet voor CO_2 -dosering.

Figuur 3.4 laat zien dat ook in de zomer niet alle gas wordt gebruikt voor CO_2 dosering. Op sommige dagen wordt kennelijk toch nog zo'n 20% 's nachts verstoekt en draagt dus niet bij aan de CO_2 dosering. Dit kan te maken hebben met de beperkingen van de afmeting van de buffer. Vergelijken met resultaten uit het onderzoek naar buffergebruik in de praktijk (De Zwart *et al.*, 1999) is de hier getoonde grafiek echter aanzienlijk beter dan het gemiddelde dat destijds onder de deelnemende paprikatelers werd geregistreerd.

Als in bovenstaande figuur 100% van het dagelijks gasverbruik, wat afhankelijk is van de warmtevraag, wordt ingezet voor CO_2 -dosering, dan betekent een verminderde warmtevraag direct ook een verminderde CO_2 -beschikbaarheid. Als tegelijk met de verminderde warmtevraag ook het ventilatievoud afneemt, hoeft de verminderde CO_2 beschikbaarheid niet altijd tot productiederving te leiden. Echter, als het effect van de verminderde beschikbaarheid zwaarder weegt dan het effect van de verminderde ventilatie leidt de energiebesparing desondanks wel tot productiederving. Uit Figuur 3.4 kan worden afgeleid dat energiebesparing en verminderde CO_2 -beschikbaarheid in de winter geen invloed zullen hebben op de hoeveelheid rookgassen die voor CO_2 -dosering beschikbaar zijn, maar dat een beperking van het gasverbruik in de zomer de CO_2 -voorziening wel in de knel kan brengen.

3.3 Optimalisatie van temperatuur en CO_2 -dosering

In deze paragraaf wordt een globale beschrijving gegeven van de procedure waarlangs de optimalisatie zal verlopen en de uitgangspunten die daarbij gebruikt worden.

3.3.1 Uitgangspunten

1. De na te streven etmaaltemperatuur is voor elke dag van het jaar bekend.
In de simulatie geeft dit uitgangspunt geen enkel probleem. Immers de optimaliserende regelaar wordt vergeleken ten opzichte van de referentie en er kan alleen een eerlijke vergelijking worden gemaakt als de etmaaltemperaturen gelijk worden gehouden. Ten aanzien van het eventueel in het onderdeel 'experimentele validatie' uit te voeren experiment is dit ook geen probleem omdat is vastgelegd dat in het experiment de etmaaltemperatuur die in de referentieafdeling de afgelopen 24 uur heeft gegolden als etmaaltemperatuur doelstelling gebruikt zal gaan worden voor de afdeling met de optimaliserende regeling. Voor de praktijk-situatie zijn er nog geen hulpmiddelen voorhanden voor de vaststelling van de na te streven etmaaltemperatuur. Voor de komkommerteelt wordt deze lacune momenteel ingevuld door het project ' Flexibele meerdaagse temperatuurinstelling op basis van de assimilatenbalans van het gewas' . Voor overige gewassen zal dit voorlopig aan de hand van het tuinbouwkundig inzicht van de tuinder moeten plaatsvinden.
2. De temperatuur mag niet lager worden dan 16°C en niet hoger dan 30°C.
Deze grenzen leggen duidelijke randvoorwaarden aan het besparingspotentieel. Immers, alle warmte die wordt afgelucht is een vorm van energievernietiging. Aangezien bij 30°C als maximum minder hoeft te worden gelucht dan bij lagere temperaturen is deze bovengrens een belangrijke grootheid.
3. Het gegenereerde temperatuurprofiel mag geen negatieve DIF (verschil tussen dag- en nachttemperatuur) hebben.
Dit betekent dat de nachttemperatuur altijd lager of gelijk zal moeten zijn aan de dagtemperatuur.
4. De na te streven productie is een concreet getal.
Productieniveaus in het standaard klimaat en het geoptimaliseerde klimaat worden gelijk gehouden. In de simulatie worden hiervoor de gegevens zoals die in Figuur 3.3 zijn getoond gebruikt. In het onderdeel 'experimentele validatie' zal de na te streven productie berekend worden met behulp van een gewasgroeimodel van Plant Research International dat gevoed wordt met kasklimaatgegevens uit de referentiekas. In de tuinbouwpraktijk zal echter gestreefd worden naar de hoogst mogelijk en bedrijfseconomisch verantwoorde productie. Het energieverbruik zal daarbij alleen vanuit kostenoverwegingen een rol spelen zodat bij lage energieprijzen een veel hoger gebruik zal worden geaccepteerd dan bij lage prijzen.
5. Er wordt uitsluitend gebruik gemaakt van rookgas CO₂.
Dit uitgangspunt leidt ertoe dat het zeer wel mogelijk is dat er op zomerse nachten een minimumbuis moet worden ingezet om het warmteoverschot in de buffer te vernietigen. Immers, indien een energetisch effectief temperatuurprofiel ertoe leidt dat er in kas met het geoptimaliseerde kasklimaat bijna niet hoeft te worden gestookt zal zelfs met een zeer hoge benuttinggraad van het beetje CO₂ dat dan beschikbaar is de productie-doelstelling niet kunnen worden gerealiseerd.
De modelberekeningen en het uit te voeren experiment geven evenwel exact aan hoeveel van de potentiële energiebesparing weer moet worden ingeleverd ten behoeve van de CO₂-dosering. Er kan dus zeer eenvoudig worden aangegeven hoeveel het energieverbruik zou zijn gedaald wanneer kassen over een alternatieve CO₂-bron zouden beschikken waarvan de kosten vergelijkbaar zijn met die van warmtevernietiging.
6. Er wordt uitgegaan van de beschikbaarheid van de weersverwachting voor het komend etmaal, dat elke 6 uur opnieuw wordt aangepast.
In een simulatiemodel met historische data is het weer voor het komend etmaal uiteraard exact bekend en is het bij dat klimaat behorende energieverbruik eveneens precies bekend.
In de praktijk zijn weersverwachtingen voor het komende etmaal, zeker voor wat betreft temperatuur en straling redelijk accuraat. Daarom is in de berekeningen niet de slag gemaakt om het effect van afwijkingen van het werkelijke weer ten opzichte van de weersverwachting door te rekenen.

3.3.2 Globale procedurebeschrijving

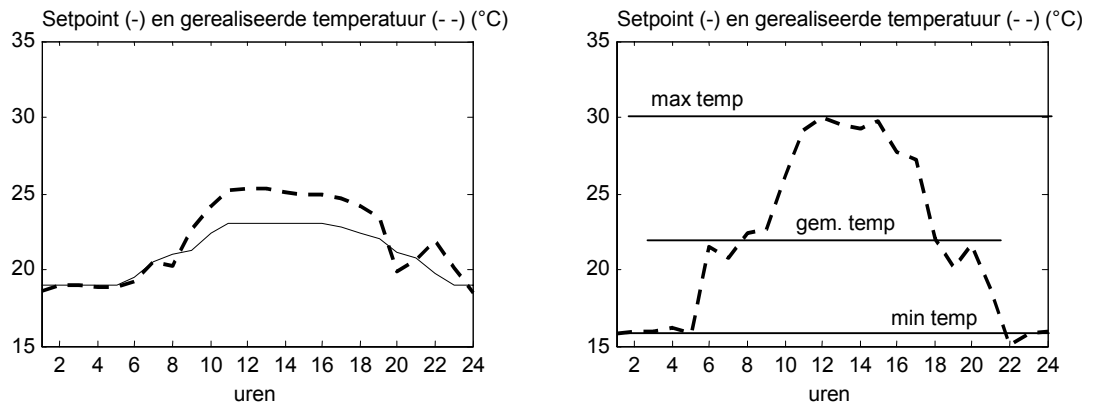
Middels de referentieberekening is voor iedere dag bekend welke etmaaltemperatuur gerealiseerd moet worden. Tevens kan vanuit de referentieberekening een productiedoelstelling worden bepaald. De optimalisatieprocedure zal vervolgens zodanige sturingen moeten bepalen dat iedere dag de productiedoelstelling tegen het laagst mogelijke energieverbruik wordt gerealiseerd. In het project EEK (2002) is de optimalisatie van het kasklimaat gerealiseerd met het direct aansturen van actuatoren (kleppen, ramen en schermstandmotoren). Omwille van het belang van een goede aansluiting bij de praktijk wordt in voorliggend project echter gewerkt met het optimaliseren van de setpoints voor stoken, ventileren en CO₂-doseran. Verwacht wordt dat de 'EEK aanpak' als evolutie vanuit de in dit project voorgestelde aanpak het energiebesparings-effect in de toekomst nog enigszins zou kunnen verbeteren. De hier gehanteerde aanpak negeert namelijk een deel van de dynamica die in werkelijkheid optreedt.

Startpunt van de optimalisatieroutine is de etmaaltemperatuur van de standaard situatie. Het eenvoudigste temperatuurprofiel dat voldoet aan deze etmaaltemperatuur is een vlak verloop van de stook- en ventilatielijn op het niveau van het gemiddelde. Door nu in de nachturen de temperatuur te verlagen en deze verlaging met een verhoging van de temperatuur overdag te compenseren kan worden bepaald of, en in welke mate de relatief dure verwarming 's nachts (zonder ondersteuning door zonlicht) kan worden vervangen door hogere temperaturen overdag (met ondersteuning van zonlicht en daarmee energiezuiniger). Indien echter het gebruik van het energiescherm er toe leidt dat 's nachts stoken door de hogere isolatiegraad gunstiger is dan het stoken overdag, dan zullen er overdag geen uren worden gevonden waarop de temperatuur goedkoop kan worden verhoogd ten gunste van een verlaging in de nacht. Het algoritme besluit dan tot een vlak temperatuurprofiel. (In feite zou in deze situatie het gebruik van negatief DIF zuiniger zijn, maar dit is in de uitgangspunten voor de optimalisatie uitgesloten). Om de effecten van een verlaging of verhoging van het temperatuur-setpoint op de energievraag te bepalen wordt gebruik gemaakt van modelberekeningen. Dit model kan namelijk worden gebruikt om de eisen aan het kasklimaat en de gegeven verwachte buitenomstandigheden te vertalen in een energievraag en een ventilatiebehoefte.

Nadat het temperatuurprofiel geoptimaliseerd is, volgt de optimalisatie van de inzet van de beschikbare CO₂. Deze procedure start bij de berekening van de beschikbare hoeveelheid CO₂. Deze hoeveelheid volgt uit het gasverbruik dat behoort bij het eerder bepaalde temperatuurverloop. Hierbij wordt tevens rekening gehouden met de fysieke beperkingen van het doseersysteem en de warmtebuffer. Aangezien het algoritme daar waar mogelijk het ventilatieverlies overdag beperkt door de kasluchttemperatuur te laten oplopen zal de CO₂-dosering in alle gevallen efficiënter kunnen worden ingezet dan in de referentiesituatie. Daarbij beoordeelt de optimalisatieprocedure de efficiëntie van de CO₂-dosering van uur tot uur in termen van de relatie tussen dosering en productie-effect zodat de beschikbare CO₂ zo goed mogelijk over de dag wordt verdeeld. De vergrote benuttingsefficiëntie en de mogelijk gunstiger verdeling over de dag kunnen zelfs bij een beperktere beschikbaarheid van CO₂ leiden tot een productietoename. Op alle momenten dat deze productietoename optreedt wordt deze winst geïncasseerd. Indien het energiezuinige temperatuurprofiel echter zo weinig CO₂ oplevert dat de optimale dosering onder de referentieproductie voor die dag blijft, zal er extra gas verstoekt moeten worden. Dit kan zowel door de warmtevraag overdag, maar ook door de warmtevraag 's nachts te verhogen. Berekeningen met de fotosynthesemodule laten echter zien dat vanuit het oogpunt van de fotosynthese een verhoging van de kasluchttemperatuur bij gelijkblijvende CO₂-concentratie altijd nadelig uitwerkt. Bovendien kan overdag de temperatuur alleen worden verhoogd zolang hij nog niet aan zijn maximale waarde zit en er 's nachts nog mogelijkheden zijn om met een neerwaartse correctie de etmaaltemperatuur in de hand te houden. Dit laatste zal in een periode met korte warme nachten lang niet altijd het geval zijn. Om bovengenoemde redenen wordt de eventueel overtollige warmte die vrijkomt bij de productie van de minimaal vereiste hoeveelheid CO₂ (dus nadat er al maximaal gebruik gemaakt is van een optimale verdeling van de CO₂ en de verminderde ventilatie) vernietigd met een verhoogde minimumbuistemperatuur gedurende de nacht.

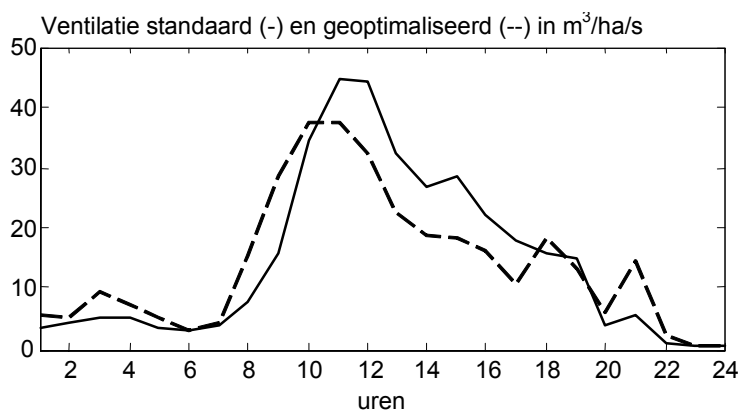
4. Simulatieresultaten

Om de werking van het optimalisatie-algoritme toe te lichten wordt in eerste instantie gewerkt met een 100% bekend verloop van het buitenklimaat. Dit is voor een simulatie een zeer gemakkelijk te realiseren scenario.



Figuur 4.1. Typisch verloop van het kasklimaatsetpoint (getrokken lijn) en de gerealiseerde temperatuur (gestreepte lijn) in de referentie teelt (links) en volgens het energie-zuinige algoritme (rechts) op een dag in het voorjaar (10 april in het SEL-jaar).

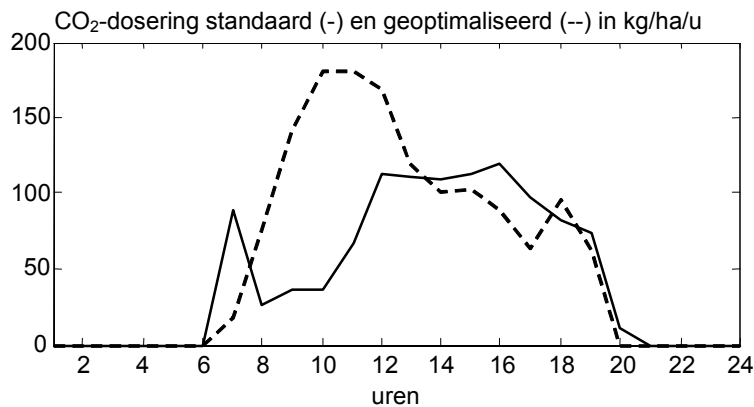
De figuur laat duidelijk zien dat het optimaliserende algoritme de temperatuurruimte benut door overdag met behulp van de zon de temperatuur te laten stijgen en deze 's nachts weer te compenseren om op de gewenste etmaaltemperatuur te komen. Dat de temperatuurverhoging vooral uit zonlicht komt is ook goed te zien in Figuur 4.2, waar het ventilatiedebiet van de beide situaties is getoond.



Figuur 4.2. Ventilatiedebiet in de kas met standaardregeling (getrokken lijn) en in de kas met de optimaliserende regeling (gestreepte lijn) op een dag in het voorjaar (10 april in het SEL-jaar).

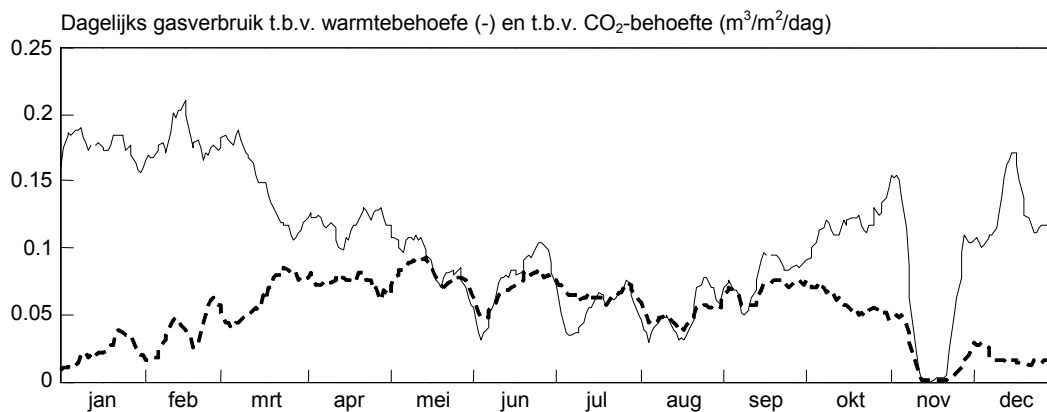
De verminderde ventilatie overdag heeft een gunstig effect op de benuttingefficiëntie van de gedoseerde CO₂. In Figuur 4.3 worden voor één dag de CO₂-doseringniveau's getoond voor de referentiekas en voor de kas met de optimaliserende regelaar. De optimaliserende regelaar legt het zwaartepunt van de dosering op de periode tussen 08:00 en 12:00 uur. De referentie-regeling geeft relatief veel CO₂ in het eerste uur en focust op de periode tussen

12:00 en 18:00 uur. Door de combinatie van verminderd ventilatieverlies, een ander gebruik van de buffer en een andere verdeling van CO₂ over de dag kan de optimaliserende regelaar een hoger productieniveau bereiken.



Figuur 4.3. Verloop van de CO₂-dosering in de standaardkas (getrokken lijn) en in de kas met de optimaliserende regelaar (gestreept) dat nodig is om in beide situaties tot dezelfde fotosynthese te komen.

In Figuur 4.4 is aangegeven hoeveel gas in de kas met de optimaliserende regelaar per etmaal moet worden verbrand om voldoende CO₂ te produceren zodat tenminste het productieniveau dat in de referentiekas behaald wordt gerealiseerd kan worden. Tevens is in deze figuur aangegeven welk gasverbruik per etmaal nodig is om te kunnen voldoen aan de warmtevraag die voortvloeit uit het temperatuurverloop dat op een energiezuinige wijze voldoet aan de etmaaltemperatuur die in de standaardteelt werd gerealiseerd.



Figuur 4.4. Jaarrond verloop van het dagelijks gasverbruik dat nodig is om in de warmtebehoefte te voorzien (getrokken lijn) en om in de CO₂-behoefte te voorzien (gestreepte lijn).

Uit deze figuur blijkt dat het met name in de zomer nogal eens voorkomt dat de behoefte aan CO₂ een groter gasverbruik oplevert dan het gasverbruik voor de invulling van de warmtevraag. Op die dagen zal het optimaliserende algoritme een deel van de energiewinst moeten inleveren om de productiedoelstelling na te komen.

Uit de berekeningen blijkt dat de optimaliserende regeling op jaarbasis 7 % minder energie gebruikt dan de standaardregeling en dat de verbeterde CO₂-dosering de productie, berekend als bruto gewasfotosynthese, met 2.5 % laat toenemen.

5. Conclusies modelberekeningen

Uit de berekeningen van hoofdstuk 4 blijkt dat de optimaliserende regeling op jaarbasis 7 % minder energie gebruikt dan de standaardregeling en dat de productie per jaar met 2.5 % toeneemt. De reductie in het energieverbruik wordt voornamelijk veroorzaakt door het temperatuurintegratie karakter van de optimaliserende regelaar. Immers, de optimaliserende regelaar haalt de energiewinst uit het beperken van de luchting, waardoor zoveel mogelijk zonne-energie wordt gebruikt voor de realisatie van de etmaaltemperatuur. De toename in productie wordt veroorzaakt door een efficiënter gebruik van de hoeveelheid beschikbare CO₂. Zo bleek uit de simulaties voor de referentie-teelten (waar gebruik wordt gemaakt van een standaard buffervulcurve) dat deze vaak CO₂-doseringen potentieel laten liggen. Bovendien geven de gangbare buffervulcurves op veel dagen teveel gewicht aan CO₂-dosering op het midden van de dag, ten nadele van CO₂-dosering in de ochtend en avond.

In vergelijking met een tuinder die intensief gebruik maakt van temperatuurintegratie wordt geen energie bespaard. Dit is eveneens het geval wanneer de resultaten van de optimaliserende regeling worden vergeleken met die van de zuinige tuinder uit het A&F project 'Effecten temperatuurintegratie en energieschermen'. Wel wordt dan nog steeds een zekere productiestijging gerealiseerd (ruim 3%).

Concluderend kan worden gesteld dat uit de modelberekeningen blijkt dat de optimaliserende regelaar de energiebesparingspotentie van de meest energiezuinige tuinders realiseert en tegelijkertijd een productiestijging weet te realiseren door een betere benutting van de beschikbare CO₂.

Experiment

6. Opzet van het experiment

6.1 Proefopzet

Paprikaplanten (ras Solution; rood) zijn geplant op 11 februari 2003 (week 7) in 2 kascompartimenten van 180 m² elk in een Venlo-kas. Lichttransmissie bij diffuus licht van deze kas is ongeveer 50%. De planten werden geplaatst op steenwol (Grodan, type Expert) in een plantdichtheid van 3.4 planten per m². Per plant werden twee stengels aangehouden. De hartvrucht en de eerste 3 vruchten aan de stengel werden weggesnoeid om een gelijkmatige vruchtzetting te realiseren. Aan beide randen van de kascompartimenten werd een enkele rij als randrij geplaatst, binnen de rij dienden de eerste twee en laatste twee planten als randplanten.

6.2 Klimaat

Uitgangspunt in het experiment was dat de referentie een zoveel mogelijk praktijkgetrouwe paprikateelt zou moeten zijn. De kasklimaatinstellingen die daar bij horen zijn regelmatig met een teeltbegeleider van DLV doorgenomen en op de kasklimaatregelaar ingesteld. In de eerste periode na het planten (vanaf 11 februari) betekende dit dat er hoge temperaturen werden ingesteld (dag en nacht 23°C) en intensief werd geschermd. Het scherm liep dan ook pas bij 150 W/m² globale straling open. Het energiescherm zorgde enerzijds voor energiebesparing, maar speelde anderzijds een belangrijke rol in de verhoging van de luchtvochtigheid. Na ruim een week (21 februari) werd de dagtemperatuur een graad verlaagd naar 22°C en de nachttemperatuur met twee graden verlaagd naar 21°C. Tevens werd toen de regeling van het energiescherm veranderd, waardoor het scherm al bij een globale stralingsintensiteit van 20 W/m² werd opengestuurd. Nog eens een week later (27 februari) werd de dagtemperatuur op 20°C gezet en is de nachttemperatuur verlaagd naar 18.5°C. Tenslotte werd half maart het nachttemperatuursetpoint verlaagd naar 18°C en de dagtemperatuur weer iets verhoogd naar 20.5°C. Deze instellingen zijn voor de rest van het experiment ongewijzigd gebleven.

In het experiment werd nauwelijks een minimumbuis temperatuur gebruikt. 's Nachts heeft deze altijd 'uit' gestaan (30°C). Vanaf eind april werd er beperkt gebruik gemaakt van een minimumbuis in de ochtend. Deze was van 2 uur tot zonop ingesteld op 40°C, en de rest van de dag op 45°C. Door de afbouw van de minimumbuis op lichtintensiteit in het zonstralingstraject van 100 tot 300 W/m² was er echter effectief geen minimumbuis gedurende het grootste deel van de dag.

In deze hele eerste periode, waarin het gewas moest wortelen en goed moest aanslaan is het klimaat in de beide afdelingen gelijk gehouden. Pas vanaf 1 april is de beoogde behandeling van de afdeling met de geoptimaliseerde regeling ingezet. Dit betekent dat vanaf dat moment de temperatuur 's nachts in de behandelde afdeling vaak lager lag dan in de referentieafdeling en overdag vaak hoger lag. In het volgende hoofdstuk wordt hier uitgebreid op ingegaan. De optimalisatie van de CO₂-dosering heeft iets langer op zich laten wachten en is 14 april in werking gesteld. Vanaf dat tijdstip werd de CO₂ toevoer naar de optimaal geregelde afdeling niet langer bepaald door een combinatie van gemeten CO₂ concentratie en buffervulling, maar op grond van een optimale verdeling van de beschikbare CO₂ uit ketelrookgassen op grond van de combinatie van straling, temperatuur en ventilatieverlies. De eerste tijd kon voor deze optimalisatie nog geen gebruik worden gemaakt van weerverwachtingen, en werd er gewerkt met de zogenaamde 'lazy man prediction', welke inhoudt dat wordt aangenomen dat het weersverloop van vandaag gelijk zal zijn aan het weersverloop van gisteren. Vanaf 6 mei was echter ook de infrastructuur voor de automatische verwerking van de weersverwachtingen gereedgekomen en werd deze in gebruik genomen.

De programmatuur ten behoeve van de optimalisatie van de CO₂ dosering heeft in het begin van het experiment een aantal malen in de weekenden gehaperd. Deze problemen kwamen voort uit onderhoudswerkzaamheden aan het netwerk waarvan de programmatuur gebruik maakte. Dit heeft er toe geleid dat de optimaal geregelde afdeling in een viertal weekenden minder CO₂ heeft gehad dan bij een functionerend netwerk zou hebben plaatsgevonden.

Behalve problemen van softwarematige aard is er van 17-20 mei in beide afdelingen geen CO₂ gedoseerd door een lekkende CO₂ tank. Daarnaast is er op 30 april en 13 mei onbedoeld weinig CO₂ gegeven doordat de leverancier van CO₂ later dan afgesproken de voorraadtank had bijgevuld.

6.3 Periodieke oogsten

In de weken 7 (paprika's planten), 11, 15, 20, 24 en 28 (eindoogst) werden 10 planten per compartiment destructief geoogst. Om de gewasstructuur intact te houden werden tot week 24 in de ontstane gaten planten geplaatst afkomstig van de uiteinden van de rijen. Daarna werd dit niet meer gedaan omdat het verplaatsen van de grote planten teveel beschadigingen zou veroorzaken. Van de geoogste planten werden lengte en bladoppervlakte bepaald evenals vers- en drooggewichten (gedroogd bij 80 °C) van bladeren, stengels en vruchten. Aan de wortels werden geen waarnemingen gedaan.

Vanaf week 11 werd van 6 planten per afdeling wekelijks geregistreerd op welke posities aan de plant bloemen of vruchten zaten, en op welke posities bloemen geaborteerd waren en vruchten geoogst.

Verder werden vanaf week 18 wekelijks rijpe paprika's rood geoogst. Per dubbele rij werden aantallen geoogste vruchten en het versgewicht hiervan geregistreerd. Van een deel van de vruchten werd ook het drooggewicht bepaald en daarmee het droge stof percentage berekend. De vruchten werden verder beoordeeld op het voorkomen van ziektes als neusrot en inwendig vruchtrot en op vormafwijkingen.

6.4 Fotosynthesemetingen

Netto bladfotosynthese werd gemeten met een draagbare fotosynthesemeter (LCPro, ADC, Verenigd Koninkrijk) aan het zesde blad (van boven geteld) van de plant. Dit is een bijna volgroeid blad, dat niet beschaduwd wordt door hoger gelegen bladeren. De fotosynthesemeter meet de CO₂ concentratie en de dampspanning van de lucht die de bladkamer binnenkomt en van de uitgaande lucht. Op basis van het verschil wordt de netto fotosynthesesnelheid ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) berekend, evenals de geleidbaarheid van de huidmondjes voor CO₂ ($\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en CO₂ concentratie in het blad (ppm).

Om de interactieve effecten van licht, temperatuur en CO₂ op de fotosynthese te kwantificeren werd gedurende het experiment in de weken 14, 20 en 26 de netto fotosynthesesnelheid gemeten bij lichtintensiteiten van 0, 100, 250, 500, 1000, 1500 en 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ PAR (fotosynthetisch actieve straling) bij CO₂ concentraties van 600 en 1100 ppm en een temperatuur van 25 °C. Verder werd in deze weken de fotosynthese gemeten bij temperaturen van 15, 20, 25 en 30 °C bij lichtintensiteiten van 250 en 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en CO₂ concentraties van 350 en 1100 ppm. Tenslotte werd de fotosynthese gemeten bij CO₂ concentraties van 350, 600, 850 en 1100 ppm bij lichtintensiteiten van 500 en 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en een temperatuur van 25°C. Al deze metingen werden uitgevoerd in het kascompartiment met de standaard klimaatregeling.

7. Resultaten klimaat en energieverbruik

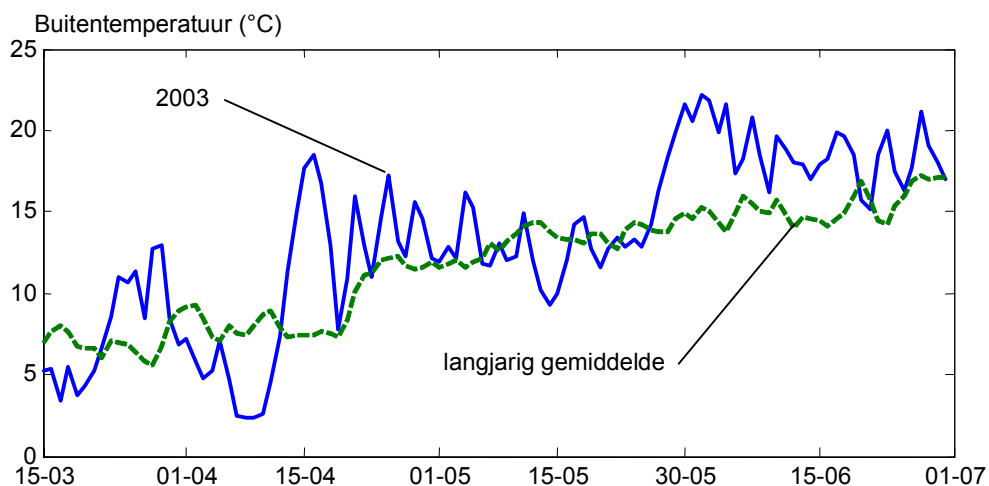
In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van het kasklimaat dat met behulp van de optimaliserende regelaar gerealiseerd is en het energieverbruik dat daarmee gemoeid is geweest. De analyse heeft betrekking op de periode van 15 maart tot 1 juli 2003. In de eerste twee weken van deze periode werd het klimaat in beide afdelingen nog gelijk gehouden. In de rest van de periode heeft de temperatuurregeling onder invloed van een temperatuur-integratieregeling gestaan. Paragraaf 7.1 gaat in op het effect van deze regelaar op kasluchttemperatuur en energieverbruik. Parallel aan de temperatuurregeling is ook de CO₂-regeling geoptimaliseerd. De resultaten hiervan worden in paragraaf 7.2 besproken.

Voor zowel het energieverbruik als de CO₂ dosering wordt een overzicht gegeven van de resultaten van de metingen in de afdelingen die we in dit experiment hebben gebruikt (onderzoekkas), maar ook een overzicht van de implicaties die de toegepaste regeling zou hebben gehad wanneer het gemeten klimaat zou zijn gerealiseerd in een praktijkkas van 4 ha.

7.1 Kasklimaat en energie

7.1.1 Analyse van de metingen in de onderzoekkas

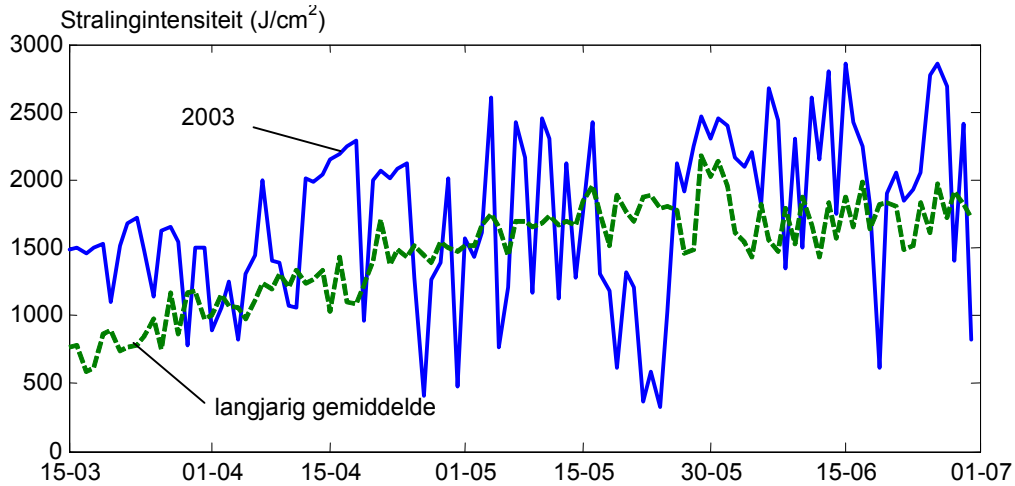
De omstandigheden in de kas worden altijd in belangrijke mate beïnvloed door de buitenomstandigheden. De buitenluchttemperatuur en zonstralingsintensiteit zijn hierbij de belangrijkste grootheden. Deze zijn afgebeeld in onderstaande grafieken, waarbij tevens het gemiddelde voor de temperatuur op de betreffende etmalen in de periode van 1990 tot en met 2001 in de grafieken is geplaatst.



Figuur 7.1. Etmaalgemiddelde buitenluchttemperatuur in 2003 (getrokken lijn), vergeleken met het langjarig gemiddelde over de periode 1990 tot en met 2001 (onderbroken lijn).

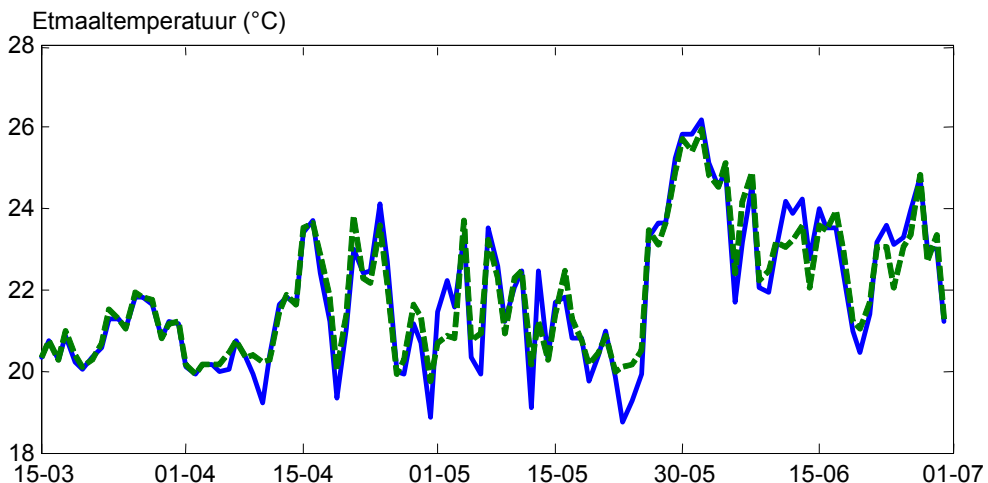
De figuur laat zien dat de beschouwde meetperiode gemiddeld warmer was dan het langjarig gemiddelde, met name in de maand juni. De maand april begon met een koude periode en eindigde met temperaturen die bovengemiddeld waren. De gemiddelde temperatuur over de gehele beschouwde periode was 13.5°C. De gemiddelde temperatuur over deze periode in de jaren 1990 tot en met 2001 was 12.3°C.

In Figuur 7.2 is een soortgelijke vergelijking gemaakt voor de dagelijkse stralingssom. Opvallend in deze grafiek is de grote dagelijks fluctuatie in stralingssommen. Zo wisselden begin mei lichte en donkere dagen elkaar bijna dagelijks af. In totaal was er in de beschouwde periode echter 13% meer licht dan in gemiddeld in deze periode van het jaar.



Figuur 7.2. Dagelijkse stralingssom in 2003 (getrokken lijn), vergeleken met het langjarig gemiddelde over de periode 1990 tot en met 2001 (onderbroken lijn).

De grote temperatuurfluctuaties in het buitenklimaat worden door de kasconstructie met zijn verwarmingssysteem en kasklimaatregelaar sterk afgevlakt. In onderstaande grafiek wordt het verloop van de daggemiddelde temperatuur van de beide afdelingen getoond.

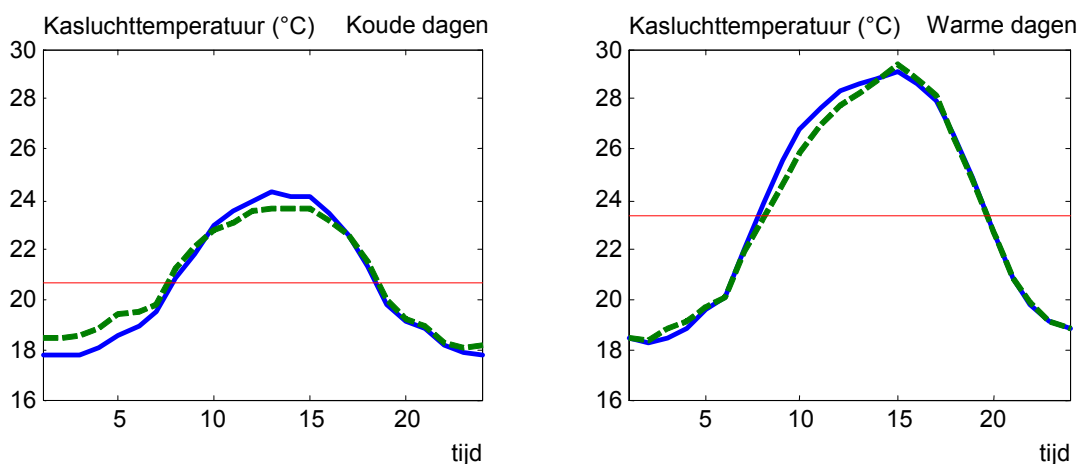


Figuur 7.3. Etmaaltemperatuur in de afdeling met temperatuurintegratie (getrokken lijn) en in de referentieafdeling (onderbroken lijn).

In het project gold de etmaaltemperatuur die in de referentie-afdeling was gerealiseerd als na te streven etmaaltemperatuur voor de optimaal geregelde afdeling. Door deze werkwijze loopt de etmaaltemperatuur in de kasafdeling waarin de integratieregeling wordt toegepast af en toe één of twee dagen achter ten opzichte van de temperatuur in de referentieafdeling. De verschillen in actuele temperatuursom waren echter bijna altijd in de orde

van $+1^{\circ}\text{C}$ of -1°C . Gezien het feit dat de fotosynthese bij temperaturen zoals ze in praktijkkassen voorkomen vrijwel onafhankelijk is van de kasluchttemperatuur, moet worden geconcludeerd dat van het toegepaste algoritme om de na te streven etmaaltemperatuur te bepalen geen effect op de groei verwacht wordt. Over de gehele beschouwde periode verschilde de temperatuursom slechts 3 graaddagen (de temperatuur in de afdeling met temperatuurintegratie had op drie dagen een graad lager moeten zijn).

Door het uitgangspunt dat uitsluitend gebruik wordt gemaakt van temperatuurintegratie over het etmaal kan de analyse van het effect van de temperatuurintegratieregeling op het temperatuurverloop worden uitgevoerd door het etmaalverloop van de geoptimaliseerde kasluchttemperatuur te vergelijken met dat van de referentie. In onderstaande grafiek is hiertoe het gemiddelde verloop van de temperatuur over een aantal etmalen in de beide afdelingen getoond. In de linker grafiek is het getoonde verloop het gemiddelde verloop op de 48 relatief koude dagen in de beschouwde periode. In de rechter grafiek het gemiddelde verloop in de 32 relatief warme dagen.



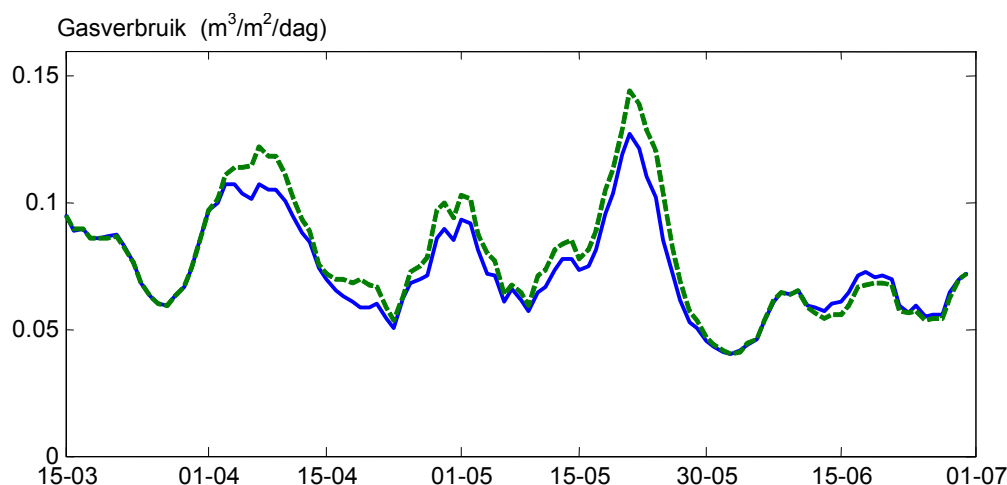
Figuur 7.4. Gemiddeld verloop van de kasluchttemperatuur op 48 relatief koude dagen en 32 relatief warme dagen in de afdeling waar temperatuurintegratie gebruikt wordt (getrokken lijn) en in de referentieafdeling (onderbroken lijn). De horizontale lijn markeert de etmaalgemiddelde temperatuur.

Figuur 7.4 laat zien dat het temperatuurintegratie algoritme op koude dagen de temperatuur 's nachts laat wegzakken en overdag wat laat oplopen. De grafiek betreft hier een gemiddelde, dus het minimum van 16°C , wat in het experiment op 17 dagen gerealiseerd is, komt in deze grafiek niet naar voren.

Op warme dagen kan het temperatuurintegratie algoritme het temperatuurverloop nauwelijks veranderen. Immers, de temperatuur mag overdag niet boven de 30°C komen, zodat er bijna geen ruimte is om de temperatuursom overdag te laten oplopen ten opzichte van de referentieafdeling. Op het moment dat er geen ruimte is om de temperatuursom te laten oplopen kan er ook 's nachts geen afbouw van de temperatuur gerealiseerd worden.

In het algemeen was het in de afdeling waarin temperatuurintegratie toegepast werd, op warme dagen 's ochtends warmer en vochtiger dan in de referentieafdeling. Voor het kaspersoneel dat 's ochtends gewasonderhoud deed en oogstwerkzaamheden uitvoerde was het werkklimaat in de afdeling met temperatuurintegratie (veel) minder aangenaam dan de referentieafdeling waar meer werd gelucht.

Het effect van het temperatuurintegratie algoritme op het energieverbruik staat afgebeeld in Figuur 7.5.



Figuur 7.5. *Dagelijks gasverbruik in de afdeling met temperatuurintegratie (getrokken lijn) en in de referentieafdeling (onderbroken lijn).*

Figuur 7.5 toont dat vanaf 1 april de afdeling waarin het temperatuurintegratie algoritme werd toegepast in koude perioden duidelijk minder verwarming nodig had dan de referentieafdeling. Komt echter het gasverbruik onder waarden rond de $0.07 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ dag})$ dan verschilt het gasverbruik niet meer. Dit komt doordat dit verbruik vrijwel geheel bepaald wordt door de minimumbuis instellingen, die voor beide afdelingen gelijk waren.

Over de periode van 1 april tot 1 juli was het gasverbruik in de afdeling waarin temperatuurintegratie werd gebruikt $7.5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ en in de referentieafdeling $8.0 \text{ m}^3/\text{m}^2$. De energiebesparing door de temperatuurintegratie bedroeg dus $0.5 \text{ m}^3/\text{m}^2$, wat procentueel uitgedrukt een besparing van 6% is. In Figuur 7.5 is te zien dat er tussen 12 en 25 juni een paar dagen zijn geweest waarop de optimaliserende regeling tot een hoger energieverbruik heeft geleid dan de referentieregeling. Dit wordt veroorzaakt door onvolkomenheden in de regelaar¹. Wanneer deze problemen niet zouden zijn opgetreden (wat in de praktijk alleszins te voorkomen zou zijn), dan zou de energiebesparing op 0.6 m^3 zijn uitgekomen (7% van het verbruik van de standaard geregelde afdeling over de meetperiode).

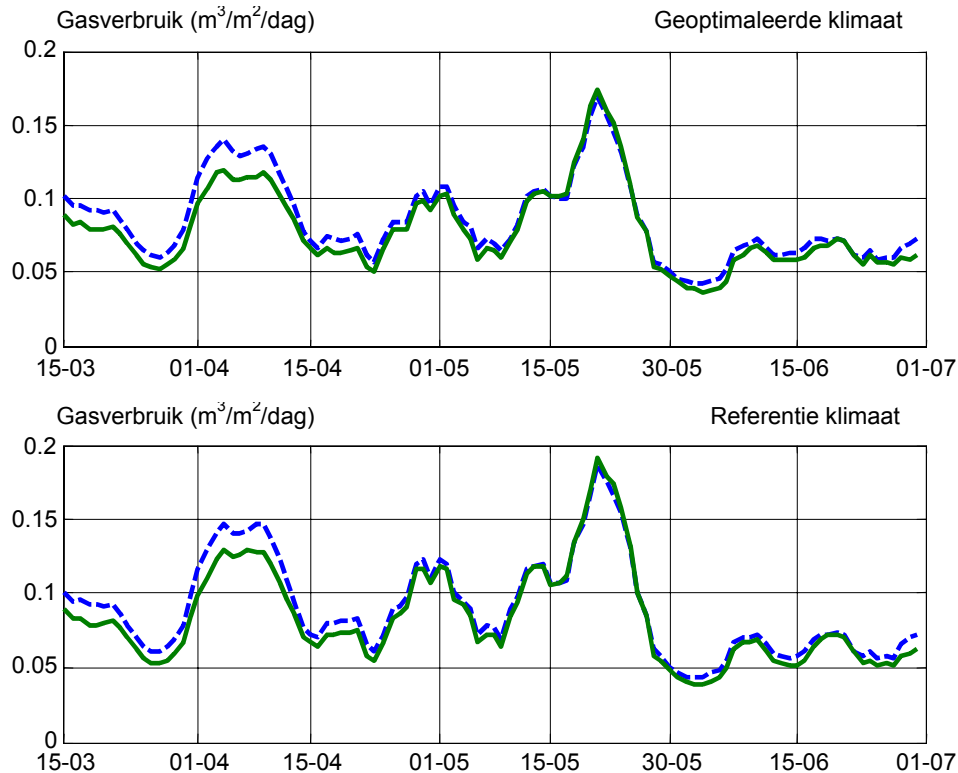
Aan de hand van berekeningen is gekeken in hoeverre de besparing die in de periode april tot en met juni wordt gerealiseerd model kan staan voor de besparing die jaarrond wordt behaald. Voor een gemiddeld Nederlands jaar bleek dit het geval, zodat de in het experiment gerealiseerde besparing van 7% beschouwd kan worden als een ondersteuning van het eerder berekende besparingspotentieel. Overigens is de absolute besparing ($0.6 \text{ m}^3/\text{m}^2$) wel lager dan in een gemiddeld jaar zou zijn opgetreden. Dit komt doordat het absolute verbruik in de proefperiode ongeveer 1.4 m^3 lager lag dan op grond van het SEL-jaar voor deze periode voor een paprikateelt verwacht mag worden. 2003 was dan ook een exceptioneel jaar (het meest zonnige jaar sinds 1901). In een gemiddeld jaar zou de optimaliserende regeling in deze periode $0.6 \text{ m}^3/\text{m}^2$ aardgas hebben bespaard.

7.1.2 Opschaling naar een 4 ha kas

De onderzoekkas waarin het experiment heeft plaatsgevonden kent een relatief groot buitenwand-oppervlak (25% van het teeltoppervlak in plaats van 10%). Dit betekent dat het geleffect van een kleine onderzoekkas leidt tot zo'n

¹ In het experiment heeft altijd voorop gestaan dat de productie niet mocht dalen ten opzichte van de referentie. Daarom kon de optimaliserende regelaar soms niet met minder CO_2 uit en moest de buffer 's nachts met een verhoogde minimumbuis worden geleegd. Dit mechanisme is in de periode van 12 tot en met 25 juni een paar keer doorgeschooten. Er is toen onbedoel een te hoge minimumbuis temperatuur aangehouden.

7% extra energieverbruik². Daarnaast heeft deze onderzoekkas relatief veel verwarmingsbuizen. Wanneer gevelnetten worden meegerekend heeft de kas waarin de metingen werden uitgevoerd effectief 5 buizen per 3.20 kap, terwijl een praktijkkas 4 buizen per 3.20 kap heeft (wat gelijk is aan 5 buizen per 4 meter kap). Het effect van dit grotere aantal buizen op het energieverbruik doet zich gelden in perioden met veel minimumbuis gebruik. Door nu met KASPRO het energieverbruik te laten berekenen wat voor het gemeten binnenklimaat vereist is, tezamen met het energieverbruik met de minimumbuis-instellingen gemoeid is, kunnen bedrijfsuitrustingseffecten van de onderzoekkas worden geëlimineerd. In onderstaande figuur wordt het gasverbruik van de onderzoekkas vergeleken met het gasverbruik dat een grote praktijkkas voor het gemeten klimaat zou hebben gebruikt. Dit wordt getoond voor zowel het gasverbruik in de referentie-afdeling, als in de afdeling waarin het temperatuurregime is geoptimaliseerd.



Figuur 7.6. Dagelijks gasverbruik indien het gemeten klimaat in een grote kas zou zijn gerealiseerd (getrokken lijn) en zoals dat in de onderzoekkas is opgetreden (onderbroken lijn). In de bovenste grafiek staat deze vergelijking afgebeeld voor het geoptimaliseerde klimaat en in de onderste grafiek is dit gedaan voor het referentieklimaat.

Inderdaad is het effect van de kasafmeting vooral van invloed in de koude periode van het experiment (15 maart tot 15 april). Bij de hoge verbruikspiek rond 20 mei komt geen verschil naar voren omdat dit hoge verbruik niet zozeer wordt veroorzaakt door lage buitentemperatuur (waarbij de gevel veel effect heeft), maar vooral door een lage stralingsom (zie Figuur 7.2).

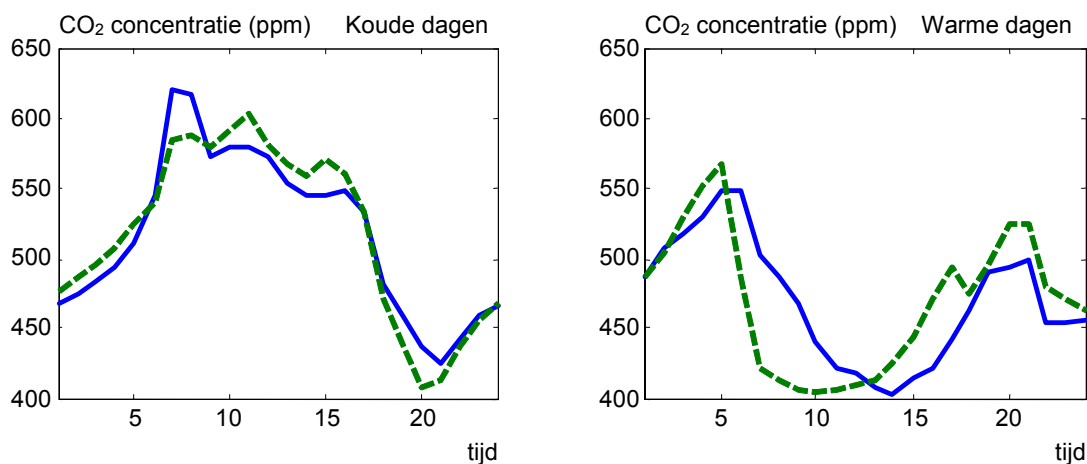
² Uitgangspunten: Een beschutte kas verliest per m² gevel de helft van het warmteverlies aan het dek. De relatieve overschatting volgt dan uit $112.5\%/105\% = 107\%$, zodat de kleine proefaccommodatie een 7% groter verlies via de gevels heeft dan een kas van 4 ha.

Het relatieve verschil tussen het energieverbruik tussen de onderzoekkas en de kas van 4 ha bedroeg in dit specifieke jaar voor de kas waarin de optimaliserende regeling werd gebruikt 8% (de onderzoekkas verbruikte 8% meer) en voor de kas met de referentieregeling 7%. De opschaling van beide kasklimaten heeft dus een vrijwel gelijk effect (7% en 8% door de vermindering van het geveleppervlak en verwarmend oppervlak in het ondernet). Er kan dus geconcludeerd worden dat de behandeling (*i.c.* temperatuurintegratie) in een praktijkkas eenzelfde effect op het energiegebruik zou hebben gehad als in de onderzoekkas is geconstateerd.

7.2 CO₂-dosering en productie

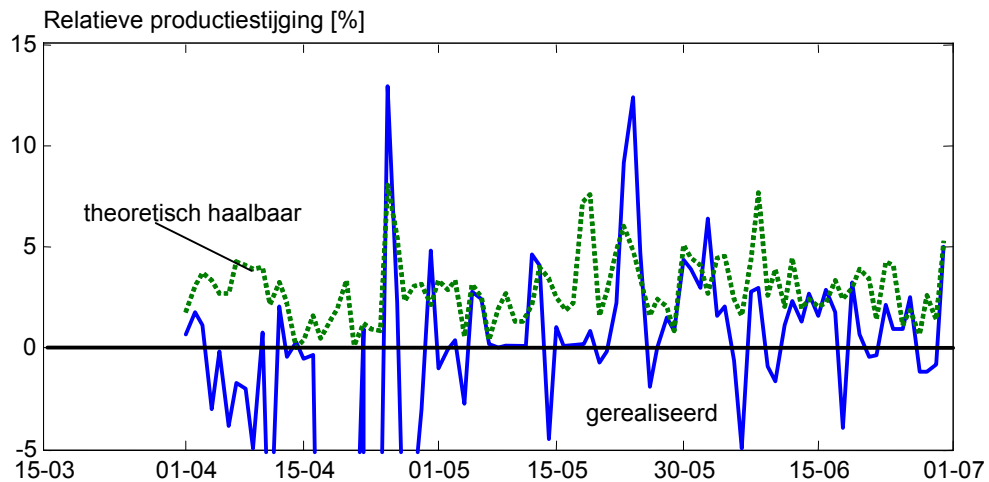
In de eerste stap van de optimalisatieprocedure werd het gewenste temperatuurverloop in de kas zodanig berekend dat de etmaaltemperatuur van de optimaal geregelde afdeling gelijk werd gehouden aan de referentie-afdeling, maar werd een grotere temperatuurf fluctuatie tussen dag en nacht toegestaan. De hogere temperatuur overdag werd daarbij bereikt door minder te luchten dan in de referentieafdeling. Hierdoor was het ventilatievoud in de afdeling met temperatuurintegratie in de regel wat minder, en daarmee ook het verlies van CO₂.

Bij de berekening van het geoptimaliseerde temperatuurverloop kwamen tevens data beschikbaar over het verwachte ventilatieverlies over de dag. Gegeven een bekend stralings- en temperatuurverloop over de dag kan dan voor elk moment op de dag met behulp van een fotosynthesemodel (zie Hoofdstuk 2) worden berekend wat het effect is van een extra eenheid CO₂-dosering in termen van fotosynthese. Op deze manier werd gedurende het experiment elke dag een doseerstrategie bepaald. Het resultaat van deze optimalisatie was dat het zwaartepunt van de dosering ten opzicht van de referentie op warme dagen meer naar de ochtend werd gelegd. Dit is goed te zien aan het gemiddelde verloop van CO₂-concentratie in de beide afdelingen in de rechter grafiek van onderstaande figuur. Net als in Figuur 7.4 is het gemiddeld verloop van de concentratie berekend uit de uurwaarden van 48 relatief koude dagen en 32 relatief warme dagen.



Figuur 7.7. Gemiddeld verloop van de CO₂-concentratie in de kas op 48 relatief koude dagen en 32 relatief warme dagen in de afdeling waar de dosering werd geoptimaliseerd (getrokken lijn) en in de referentieafdeling (onderbroken lijn).

In onderstaande grafiek is de meerproductie die per dag voor de afdeling met de optimaliserende regeling werd berekend ten opzichte van de referentie-afdeling getoond.



Figuur 7.8. Relatieve berekende productietoename in de afdeling waarin de optimaliserende regeling werd gebruikt ten opzichte van de referentie-afdeling (getrokken lijn) en de achteraf berekende theoretisch haalbare relatieve productiestijging (gestippelde lijn). De regeling werd half april geïmplementeerd en functioneerde vanaf mei in softwarematige zin naar behoren.

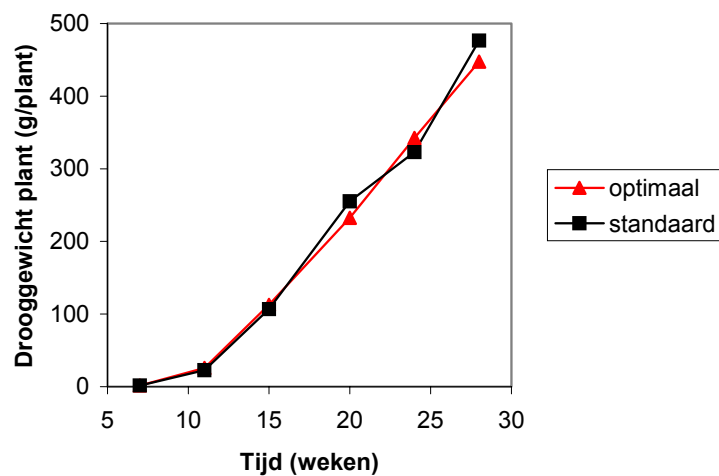
Figuur 7.8 laat zien dat de regeling in de eerste twee weken na implementatie (dus in de 3^e en 4^e week van april) slecht gefunctioneerd heeft. Er is in die periode onnodig weinig of op de verkeerde momenten CO₂ gegeven. Vanaf mei heeft het systeem op een paar uitzonderingen na geen grote fouten meer gemaakt, maar bleef de gerealiseerde verbetering wel vaak achter bij de theoretisch haalbare. Dit komt voor een deel doordat de theoretisch haalbare meerproductie berekend is aan de hand van (achteraf) bekende weersomstandigheden en de gerealiseerde meerproductie voortkomt uit een regeling die gebruik maakt van weersverwachtingen. Een andere reden is dat de theoretisch haalbare meerproductie uitgaat van een CO₂ concentratie die door een model berekend wordt, terwijl de praktisch gerealiseerde meerproductie is berekend aan de hand van gemeten CO₂ concentraties in de onderzoekskas.

Er zijn ook dagen waarop in het experiment een grotere productiestijging werd gerealiseerd dan volgens de berekeningen mogelijk was. Deze situatie kan ontstaan wanneer de regelaar als het ware zijn hand overspeelt, wat in de theoretische berekening per definitie niet gebeurt. Er werd op die dagen (zuivere, want in het experiment was er alleen maar zuivere CO₂ beschikbaar) CO₂ gedoseerd zonder dat de daarbij behorende warmte benut kon worden. In een praktijksituatie, en volgens de theoretische berekening zou deze CO₂ niet toegediend zijn, waardoor de productie in het experiment soms hoger uit kon komen dan theoretisch verwacht mocht worden. Afgezien van de missers schommelt de berekende productiestijging in het experiment rond de 2%, terwijl 2.6% productiestijging theoretisch haalbaar was in deze periode (1 april tot 1 juli).

8. Resultaten gewasgroei

8.1 Plantgroei

Om de gewasgroei gedurende het experiment te volgen, werden 4-wekelijks planten destructief geoogst en werden vers- en drooggewichten van de verschillende organen bepaald. In Figuur 8.1 is het totale drooggewicht van paprika-planten in de 'standaard' kas en in de optimaal geregelde kas in de tijd uitgezet. Het totale drooggewicht bestaat uit de gewichten van stengels, bladeren en (onrijpe) vruchten die nog aan de plant zitten (allen destructief bepaald aan 10 planten per afdeling) en de geoogste rijpe vruchten (gemiddeld over 500 planten per afdeling). In dit totale drooggewicht zijn niet de wortels meegerekend. Uit deze figuur blijkt dat het totale plantgewicht niet wordt beïnvloed door het aangelegde kasklimaat zolang de gemiddelde etmaaltemperatuur gelijk blijft.



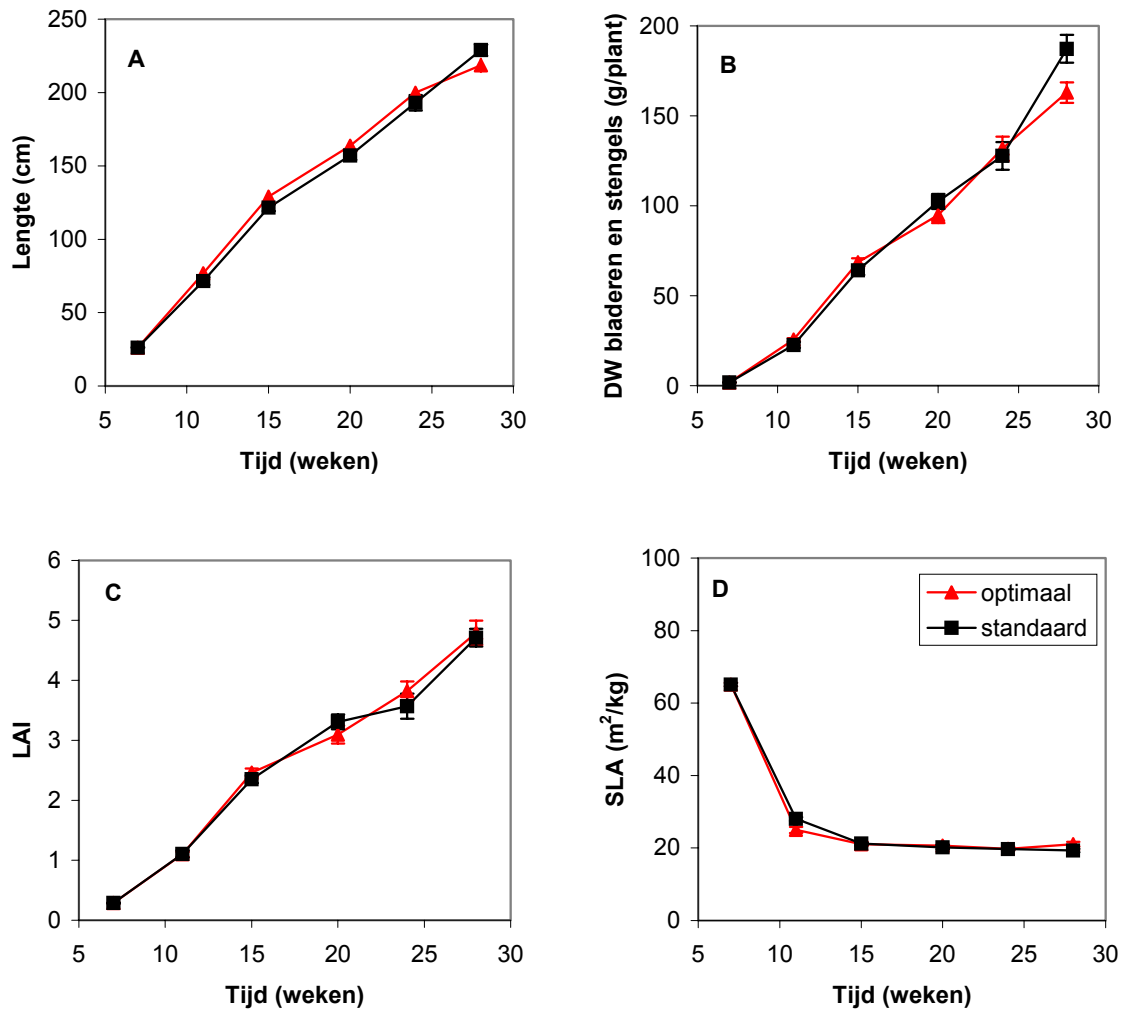
Figuur 8.1. Verloop van het cumulatieve drooggewicht van de totale plant in het optimaal geregelde kasklimaat en het standaard kasklimaat in de tijd. In week 7 zijn de paprika's geplant, in week 14 is de optimale temperatuurbehandeling begonnen en in week 16 is de optimale CO₂ behandeling begonnen.

Op 17 juni (week 25) werd het experiment bezocht door paprikatuinders en de gewasmanager paprika van LTO groeiservice (zie Bijlage III). Hun oordeel was dat het gewas er bijzonder goed bij stond en dat er geen verschil in gewasstand viel te constateren tussen de twee behandelingen.

8.2 Vegetatieve groei

In Figuur 8.2 is een aantal kenmerken van de vegetatieve groei in de tijd uitgezet. Zowel de lengte van de plant (A), het drooggewicht van bladeren en stengels (B), leaf area index (LAI, bladoppervlakte per plant vermenigvuldigd met de plantdichtheid; C) als het specifieke bladoppervlakte (SLA, maat voor de plantdichtheid; D) werd niet beïnvloed door de verschillen in kasklimaat. Bij de eind oogst (week 28) bleek het drooggewicht van de stengels bij de referentieafdeling groter te zijn dan bij de optimaal geregelde afdeling. Niet duidelijk is of dit een verschil is dat enige (fysiologische) betekenis heeft, of dat het wordt verklaard door variatie tussen de planten. Bij de eind oogst bleken bladgewicht (Figuur 8.2B) en bladoppervlakte (LAI, Figuur 8.2C) niet te verschillen tussen de beide behandelingen. De belangrijkste reden voor het feit dat de gewasgroei tussen de beide behandelingen niet wezenlijk verschilt, is dat de lichte hoeveelheden die de planten in beide afdelingen hebben ontvangen hetzelfde is. Ook de temperatuursom is gelijk, aangezien de temperatuurintegratie een integratieperiode van 1 dag heeft, en dus de dagelijkse gemiddelde

temperatuur niet verschilde tussen beide afdelingen. De enige klimaatfactor van betekenis die verschilde tussen de standaard geregelde afdeling en de optimaal geregelde afdeling was de gerealiseerde CO₂ concentratie. Die werd in de optimaal geregelde afdeling weliswaar effectiever ingezet dan in de standaard afdeling, maar resultaten uit eerdere projecten gaven al aan dat het verhogen van de CO₂ concentratie wel de vruchtgroei beïnvloed, maar niet de vegetatieve groei (Esmeijer, 1999; Dieleman *et al.*, 2003).

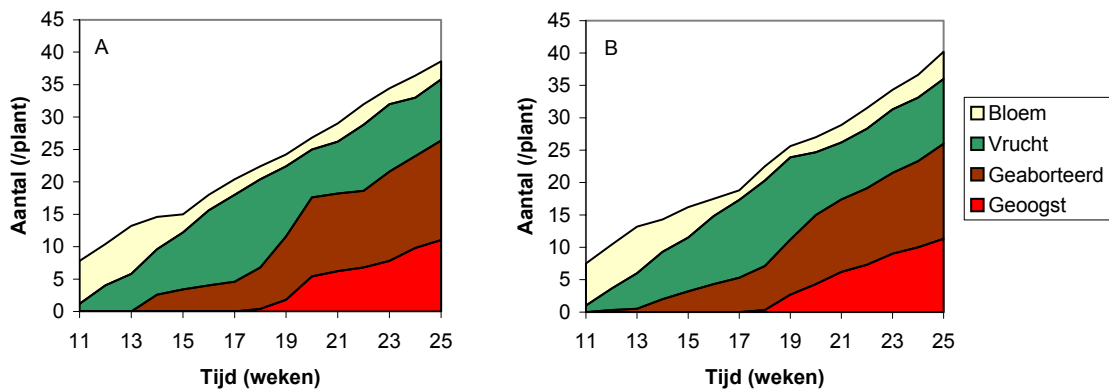


Figuur 8.2. Verloop van de lengte van de plant (A), drooggewicht van bladeren en stengels per plant (B), LAI (leaf area index; C) en SLA (specifiek bladoppervlakte; D) in het optimaal geregelde kasklimaat en het standaard kasklimaat in de tijd. Meetpunten zijn het gemiddelde van 10 planten met de standaardafwijking van het gemiddelde (sem). In week 7 zijn de paprika's geplant, in week 14 is de optimale temperatuurbehandeling begonnen en in week 16 is de optimale CO₂ behandeling begonnen.

8.3 Generatieve groei

8.3.1 Bloemvorming, vruchtzetting en abortie

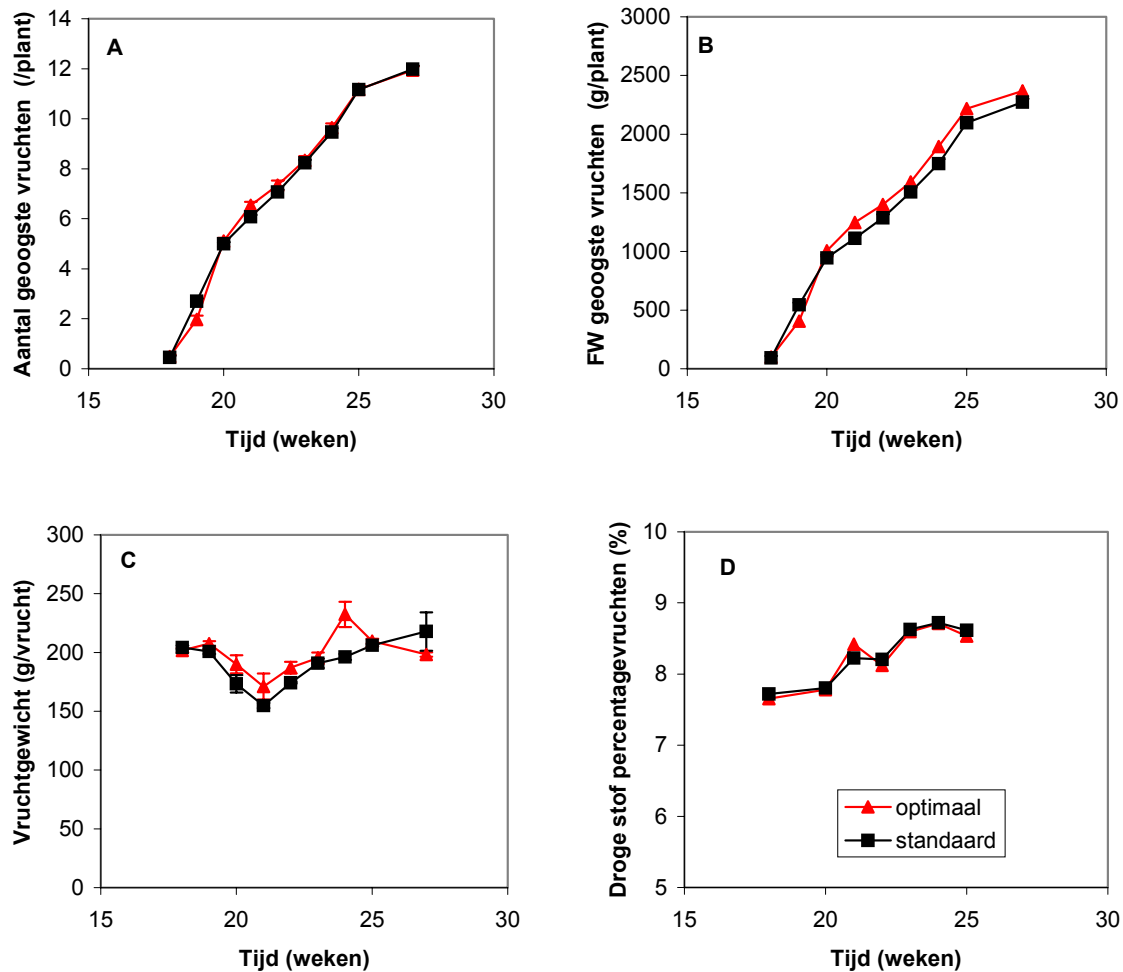
Gedurende het experiment is wekelijks van 6 planten per afdeling de bloemvorming, vruchtzetting en abortie geregistreerd. Zoals reeds werd vermeld in hoofdstuk 6 zijn de hartvruchten en de eerste 3 vruchten per stengel weggesnoeid. Uit de registratie bleek dat vervolgens gemiddeld 3 vruchten per stengel werden gezet, waarna 2-3 vruchten aborteerden. Dit proces van enkele vruchten die zetten, waarna er enkelen aborteren gaat steeds door, reden waarom paprika's in 'vluchten' worden geoogst. Uit onderstaande figuren, waarin het aantal bloemen, gezette vruchten, geaborteerde vruchten en geoogste vruchten per plant voor beide behandelingen is weergegeven, blijkt dat de vruchtzetting voor de optimaal geregelde afdeling en de standaard afdeling niet verschilden.



Figuur 8.3. Verloop van het aantal bloemen, gezette vruchten, geaborteerde vruchten en geoogste vruchten gecumuleerd per plant in het optimaal geregelde kasklimaat (A) en standaard kasklimaat (B) in de tijd. Meetpunten zijn het gemiddelde van 6 planten. In week 7 zijn de paprika's geplant, in week 14 is de optimale temperatuurbehandeling begonnen en in week 16 is de optimale CO₂ behandeling begonnen.

8.3.2 Vruchtoogsten

Gedurende het experiment zijn van de ongeveer 500 planten in de 5 dubbele proefrijen wekelijks rijpe vruchten rood geoogst. De resultaten staan in Figuur 8.4 weergegeven.



Figuur 8.4. Verloop van het cumulatief aantal geoogste vruchten per plant (A), cumulatief totaal versgewicht van de geoogste vruchten per plant (B), gemiddeld vruchtgewicht (C) en het droge stof percentage van de geoogste vruchten (D) in het optimaal geregelde kasklimaat en het standaard kasklimaat in de tijd. Meetpunten zijn het gemiddelde van 5 rijen met elk 100 planten met de sem. In week 7 zijn de paprika's geplant, in week 14 is de optimale temperatuurbehandeling begonnen en in week 16 is de optimale CO₂ behandeling begonnen.

Uit deze figuur blijkt dat er nauwelijks verschillen zijn in vruchtproductie tussen de beide kasklimaten. Het aantal geoogste vruchten per plant (Figuur 8.4A) verschilde niet tussen het standaard en het optimaal geregelde klimaat. Het totale versgewicht van de geoogste vruchten (8.4B) lag voor de optimaal geregelde afdeling iets hoger dan voor de standaard geregelde afdeling, door het hogere gemiddelde vruchtgewicht (8.4C). Deze figuur geeft aan dat de productie van planten in de optimaal geregelde afdeling ten minste gelijk is aan de productie in het standaard klimaat.

Naast de productie in stuks en kilo's is ook gekeken naar de kwaliteit van de vruchten. De vruchten zijn regelmatig gecontroleerd op het voorkomen van inwendig vruchtrot, maar dit werd niet geconstateerd. In de optimaal geregelde afdeling werd bij 1.9% van de vruchten neusrot geconstateerd, tegen 4.8% in de standaard afdeling. Bij 5% van de vruchten in de optimale afdeling en 10% van de vruchten in de standaardafdeling bleek de vorm van de vruchten onregelmatig te zijn. Hieruit blijkt dat de kwaliteit van de vruchten positief werd beïnvloed door het optimaal geregelde kasklimaat.

8.4 Conclusies

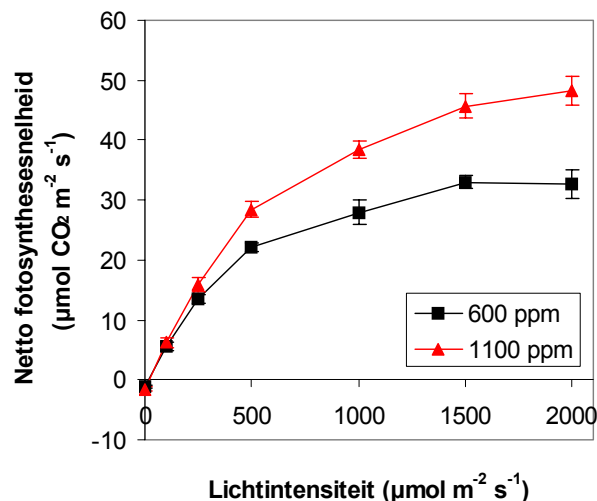
In het experiment werden gewasgroei en –ontwikkeling van paprika in een afdeling die volgens de standaard kasklimaatinstellingen werd geregeld vergeleken met de groei en ontwikkeling in een afdeling die volgens het optimalisatie-algoritme werd geregeld. Hieruit bleek dat er geen verschillen waren in totale gewicht van de plant, vegetatieve karakteristieken en vruchtproductie. Ook de paprikatuinders die het experiment op 17 juni bezochten waren van oordeel dat het gewas er goed bij stond en dat er geen verschillen in gewasstand tussen de beide behandelingen was te constateren.

9. Fotosynthese

9.1 Resultaten

De interacties tussen licht, temperatuur en CO₂ op de fotosynthese van paprikabladeren zijn vastgesteld in het project 'Efficiënt gebruik van CO₂', dat in 2002 door Plant Research International is uitgevoerd (Dieleman *et al.*, 2003). Deze relaties zijn gebruikt om het 'Big-leaf' model te calibreren (Hoofdstuk 2), waarna dit model is gekoppeld aan het kasklimaatmodel KASPRO. Met deze modellen zijn vervolgens de berekeningen beschreven in hoofdstukken 3 en 4 uitgevoerd.

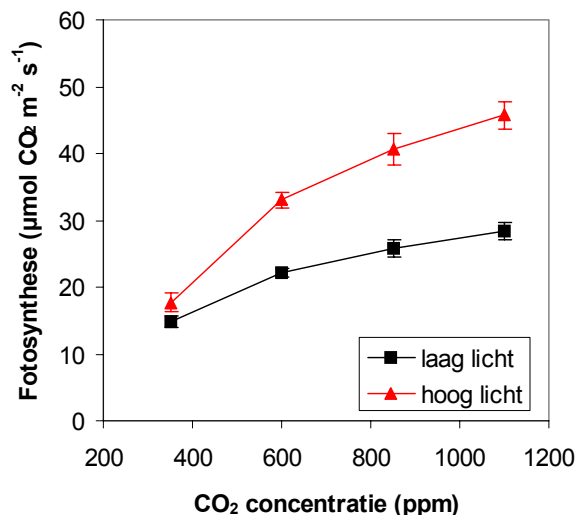
In het experiment zijn deze berekeningen gevalideerd. Onderdeel van deze validatie is dat nagegaan wordt of de relaties tussen licht, CO₂ en temperatuur enerzijds en fotosynthese anderzijds op de juiste wijze in het model zaten. Daartoe zijn gedurende het experiment 3 maal licht-, temperatuur- en CO₂ responscurves gemeten. In de tijd verschilden de metingen nauwelijks van elkaar, daarom zijn ze gemiddeld (Figuur 9.1).



Figuur 9.1. Netto fotosynthesesnelheid van paprikabladeren bij een reeks lichtintensiteiten gemeten bij twee CO₂ concentraties in de bladkamer (zie legenda) en een temperatuur van 25°C. Meetpunten zijn het gemiddelde van 12 meetwaarden met de sem.

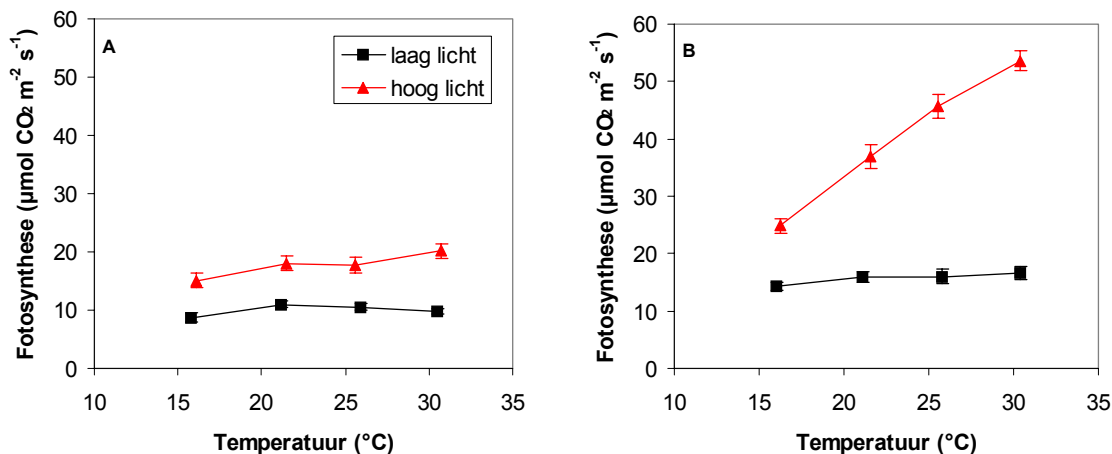
Zowel een hogere lichtintensiteit als een verhoging van de CO₂ concentratie in de bladkamer verhoogde de netto fotosynthesesnelheid. Bij een CO₂ concentratie van de kaslucht van 600 ppm was de fotosynthese rond 1500 µmol m⁻² s⁻¹ lichtverzadigd. Bij een hoge CO₂ concentratie van 1100 ppm werd ook bij 2000 µmol m⁻² s⁻¹ nog geen lichtverzadiging bereikt.

In Figuur 9.2 is te zien dat de fotosynthese toeneemt bij een toename van de CO₂ concentratie in de lucht. Bij hoog licht wordt de fotosynthese meer beperkt door CO₂ dan bij laag licht. Dat verklaart de sterkere toename van de fotosynthese bij toenemende CO₂ concentratie bij hoog licht dan bij laag licht.



Figuur 9.2. Netto fotosynthesesnelheid van paprikabladeren bij een reeks CO₂ concentraties in de bladkamer gemeten bij hoog (1500 µmol m⁻² s⁻¹) en laag licht (250 µmol m⁻² s⁻¹) en een temperatuur van 25°C. Meetpunten zijn het gemiddelde van 12 meetwaardes met de sem.

In Figuur 9.3 is te zien dat bij laag licht de netto fotosynthese nauwelijks beïnvloed wordt door de temperatuur. Bij een hogere temperatuur neemt weliswaar de bruto fotosynthese toe, maar deze toename wordt teniet gedaan door een hogere ademhaling. Bij hoog licht is het effect van temperatuur sterk afhankelijk van de CO₂ concentratie in de lucht. Alleen bij een hoge CO₂ concentratie neemt de bruto fotosynthese bij hoog licht meer toe bij toenemende temperatuur dan de ademhaling (Figuur 9.3B). Dit resulteert in een verhoogde fotosynthese bij hogere temperaturen.



Figuur 9.3. Netto fotosynthesesnelheid van paprikabladeren bij een reeks temperaturen en een CO₂ concentratie van 600 ppm (A) of 1100 ppm (B) in de bladkamer gemeten bij hoog (1500 µmol m⁻² s⁻¹) en laag licht (250 µmol m⁻² s⁻¹). Meetpunten zijn het gemiddelde van 12 meetwaardes met de sem.

9.2 Conclusies

Uit de gemeten interacties van CO₂, licht en temperatuur op de fotosynthese blijkt dat zowel het verhogen van de lichtintensiteit als de CO₂ concentratie de fotosynthesesnelheid verhoogt. Hierbij geldt dat het verhogen van de CO₂ concentratie een groter effect heeft bij hoog licht of hoge temperatuur dan bij laag licht of lage temperatuur. Het verhogen van de temperatuur verhoogt de fotosynthese bij hoog licht en hoge CO₂ concentratie.

De relaties tussen licht, temperatuur, CO₂ en de fotosynthese zoals die zijn vastgesteld in dit project zijn dezelfde als vastgesteld in het project 'Efficiënt gebruik van CO₂' (Dieleman *et al.*, 2003). Dit maakt dat deze relaties goed bruikbaar waren als input voor het Big-leaf model dat gebruikt is als maat voor de berekening van de productie in de modelberekeningen zoals beschreven in hoofdstuk 3.

10. Modelkalibratie en -validatie

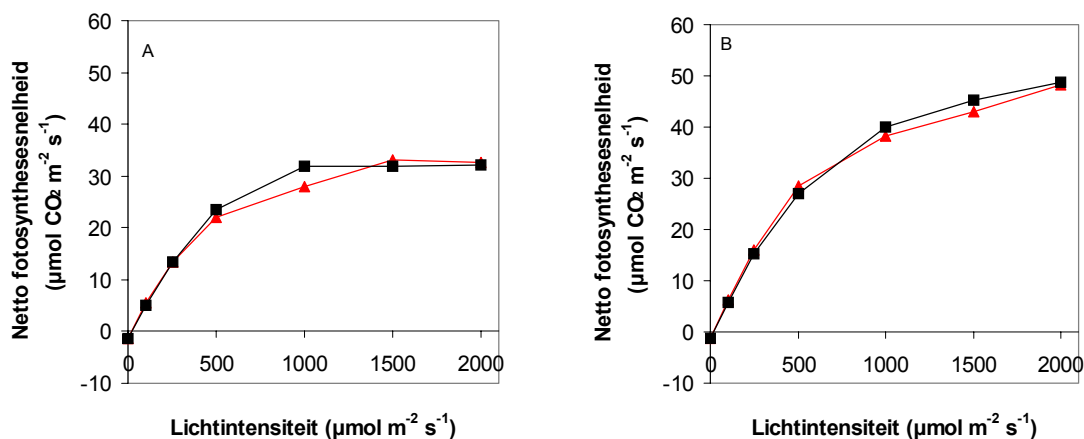
10.1 Modelbeschrijving

De gewasgroeimodellen ontwikkeld door Plant Research International kunnen aan de hand van klimaatgegevens (straling, temperatuur, CO₂ en luchtvochtigheid) en teeltgegevens (o.a. plantdatum, plantdichtheid, lichtdoorlatendheid van de kas) groei en water- en nutriëntenbehoefte berekenen. De modellen zijn mechanistisch van opzet, hetgeen wil zeggen dat ze gebaseerd zijn op processen die in de plant plaats vinden zoals bijvoorbeeld fotosynthese, ademhaling, verdamping, assimilatenverdeling, bloemvorming en vruchtzetting. De groeimodellen zijn het verst ontwikkeld voor vruchtgroentengewassen waarvan de groei, vruchtproductie en verdamping vrij nauwkeurig voorspeld kunnen worden. Deze modellen zijn o.a. beschreven door Gijzen (1992, 1994), Marcelis (1994), Heuvelink (1996) en Marcelis *et al.* (1998).

10.2 Kalibratie van de fotosynthesemodule

In dit project is een generiek gewasgroeimodel gebruikt met specifieke modules voor paprika, dat wordt gekalibreerd op het uitgevoerde experiment. Voor de beschrijving van de bladfotosynthese maakt het gewasgroeimodel gebruik van een biochemisch model, gebaseerd op Von Caemmerer en Farquhar (1981). De belangrijkste parameters van dit model zijn $V_{C_{max}}$ (maximale carboxylatiesnelheid), J_{max} (maximale snelheid van electronentransport), Γ (CO₂ compensatiepunt in afwezigheid van donker-ademhaling), θ (kromming van de lichtresponscurve) en α (efficiëntie van lichtgebruik, initiële helling van de lichtresponscurve) (Gijzen, 1995). Kalibratie is uitgevoerd met optimalisatie-software die gebruik maakt van een genetisch algoritme. In deze optimalisatieprocedure worden resultaten van de modellering van de fotosynthese vergeleken met de meetwaarden en worden de parameterwaarden berekend die het kleinste verschil opleveren tussen de berekende en gemeten waarden van de fotosynthese.

Om de fotosyntheseparameters van het model te calibreren zijn de resultaten van de fotosynthesemetingen (Hoofdstuk 9) gebruikt. In Figuur 10.1 staan de gemeten en de gesimuleerde lichtresponscurves bij 600 en 1100 ppm CO₂ weergegeven. Duidelijk is dat de fit op de resultaten van de metingen bijzonder goed is. Met het gecalibreerde model is de modelvalidatie, beschreven in de volgende paragraaf uitgevoerd.



Figuur 10.1. Lichtresponscurves van de fotosynthese gemeten tijdens het experiment (rood) en berekend met het gecalibreerde model (zwart) bij 600 ppm CO₂ (A) en 1100 ppm CO₂ (B).

10.3 Modelvalidatie

Met het gecalibreerde model is de groei van het gewas berekend, met als invoer de lichtintensiteit buiten en het gerealiseerde kasklimaat (temperatuur, luchtvochtigheid en CO₂ concentratie) in de standaard geregelde afdeling en de optimaal geregelde afdeling. In Tabel 10.1 is voor een aantal belangrijke parameters, te weten drooggewicht van de totale plant (zonder wortels), bladeren en stengel, en vruchten en het versgewicht van de geogoste vruchten weergegeven wat de gemeten en de met het model berekende (gesimuleerde) waarden waren. Het totaalgewicht van de plant werd met het gewasgroeimodel over het algemeen goed berekend (overschatting van 5%).

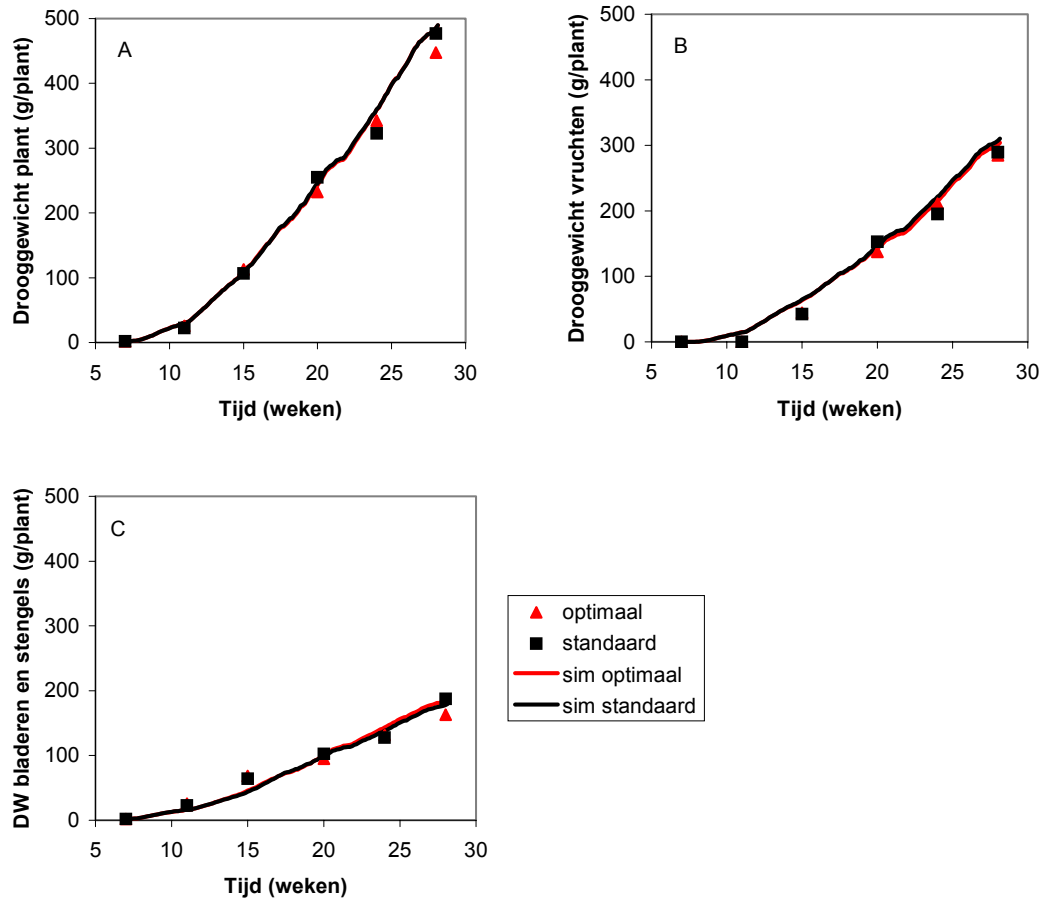
Tabel 10.1. Gemeten en gesimuleerde waarden voor drooggewicht van de totale plant, bladeren en stengel, en vruchten bij het optimaal geregelde kasklimaat en het standaard kasklimaat aan het einde van het experiment.

Klimaat regeling	DW totale plant		DW bladeren en stengel		DW vruchten	
	Meting (g/plant)	Simulatie (g/plant)	Meting (g/plant)	Simulatie (g/plant)	Meting (g/plant)	Simulatie (g/plant)
Optimaal	448	485	163	184	285	301
Standaard	477	486	187	178	289	307

Het effect van het kasklimaat op de groei van paprikaplanten zoals deze door het model wordt berekend, bleek goed overeen te stemmen met de waarnemingen tijdens het experiment (Figuur 10.2). Ook uit de modelberekeningen bleek dat er geen verschil in gewasgroei en vruchtproductie was tussen het standaard kasklimaat en het optimaal geregelde klimaat.

10.4 Conclusies

Uit de modelberekeningen, waarbij het gerealiseerde kasklimaat in de standaard afdeling en de optimaal geregelde afdeling als invoer werd gebruikt, blijkt dat er geen verschil in gewasgroei en vruchtproductie was tussen de beide gerealiseerde kasklimaten. Weliswaar was in de optimaal geregelde afdeling het verschil tussen dag- en nachttemperaturen groter dan in de standaard afdeling, maar uit eerdere onderzoeken is reeds gebleken dat voor gewasgroei binnen zekere grenzen de gemiddelde etmaaltemperatuur meer van belang is dan de wijze waarop deze is gerealiseerd (Slack & Hand, 1983; Bakker & Van Uffelen, 1988). Zoals in hoofdstuk 7 reeds is genoemd, is het door technische storingen en de warme zomer, waarin uitgesteld luchten nauwelijks mogelijk was, nauwelijks gelukt een structurele verhoging van de CO₂ concentratie in de optimaal geregelde afdeling aan te leggen. Dit is mede oorzaak van het feit dat de producties in de standaard geregelde afdeling en in de optimale afdeling niet aantoonbaar van elkaar verschillen.



Figuur 10.2. Gesimuleerde (lijnen) en gemeten (punten) drooggewichten van de totale plant (A), vruchten (B) en stengels en bladeren (C) in het optimaal geregelde kasklimaat en het standaard kasklimaat in de tijd. In week 7 zijn de paprika's geplant, in week 14 is de optimale temperatuurbehandeling begonnen en in week 16 is de optimale CO₂ behandeling begonnen.

11. Conclusies

In het eerste gedeelte van het project is een optimaliserende kasklimaatregeling ontworpen. In deze regeling wordt eerst het verloop van de temperatuur geoptimaliseerd, waarbij zoveel mogelijk gebruik wordt gemaakt van de (gratis) warmte van de zon. Vervolgens wordt de hoeveelheid beschikbare CO₂ over de dag verdeeld waarbij van elke eenheid CO₂ werd berekend op welk moment van de dag deze het meeste op zou leveren in termen van fotosynthese en dus productie. Uit de berekeningen in het eerste deel van dit project bleek dat de optimaliserende regeling op jaarrond basis 7% minder energie gebruikt dan de standaard regeling en dat de productie (berekend als bruto fotosynthese) met 2% toeneemt.

De ontwikkelde optimaliserende kasklimaatregeling is gevalideerd in een kasexperiment. Hiertoe werd een paprikagewas geplant in twee kasafdelingen. In één afdeling werd het klimaat geregeld volgens de in de praktijk gangbare teeltwijze, in de andere afdeling werd het kasklimaat geregeld volgens het optimalisatie-algoritme. Energieverbruik, gewasgroei en productie werden gedurende het experiment geregistreerd. Optimalisatie van de temperatuur bleek te leiden tot grotere verschillen in dag- en nachttemperaturen voor de optimaal geregelde afdeling ten opzichte van de standaard afdeling. Hierdoor bleek het energieverbruik van de optimaal geregelde afdeling in de periode 1 april – 1 juli 6% lager te zijn dan in de standaard geregelde afdeling (gasverbruik van 7.5 m³/m² ten opzichte van 8.0 m³/m²). Dit besparingspercentage is nagenoeg gelijk aan de energiebesparing die volgens de berekeningen jaarrond gerealiseerd kan worden (7%) met deze optimaliserende regeling. De resultaten in het voorjaar bleken dus representatief te zijn voor de resultaten op jaarrond basis.

Bij de optimalisatie van CO₂ bleek dat het zwaartepunt van de dosering ten opzichte van de standaard afdeling op warme dagen meer naar de ochtend werd gelegd. Uit berekeningen met het kasklimaatmodel bleek dat de productie, berekend als bruto fotosynthese, in de optimaal geregelde afdeling ongeveer 2% hoger was dan in de standaard geregelde afdeling.

Tijdens het experiment werden gewasgroei en –ontwikkeling in beide afdelingen gemeten. Hieruit bleek dat er geen verschillen in groei van het gewas en de vruchtproductie aangetoond konden worden. Ook de paprikatuinders die het experiment bezochten waren van oordeel dat er geen verschillen in gewasstand tussen de beide behandelingen was te constateren. Wanneer het experiment werd nagerekend met een gewasgroeimodel waarbij de klimaatgegevens van de beide afdelingen als invoer werd gebruikt, werd eveneens geen verschil in gewasgroei en vruchtproductie tussen de standaard geregelde en de optimaal geregelde afdeling gevonden.

Concluderend is te stellen dat door temperatuur en CO₂ in de kas optimaal te regelen 6% energie te besparen is bij een tenminste gelijkblijvende gewasgroei, vruchtproductie en vruchtkwaliteit.

12. Discussie en aanbevelingen

12.1 Discussie

Dit project 'Optimaal besturen van temperatuur en CO₂ op basis van fotosynthese en energie' had als doelstelling energieverbruik en CO₂ emissie te reduceren bij tenminste een gelijkblijvende productie. Hiervoor is een optimalisatiealgoritme ontwikkeld, waarmee temperatuurinstellingen en CO₂ dosering over de dag gestuurd worden. Deze optimalisatie stuurt de temperatuur zondanig dat iedere dag de productiedoelstelling (afgeleid uit de referentieteelt) tegen het laagst mogelijke energieverbruik wordt gerealiseerd. Dit leidt tot lagere nachttemperaturen en hogere dagtemperaturen dan in de standaardteelt. Na de optimalisatie van het temperatuurprofiel volgt de optimalisatie van de inzet van de beschikbare CO₂. De optimalisatieprocedure beoordeelt de efficiëntie van de CO₂ dosering van uur tot uur in termen van de relatie tussen dosering en maximalisatie van de fotosynthese zodat de beschikbare CO₂ zo goed mogelijk over de dag wordt verdeeld. Deze methode van optimalisatie van de kasklimaatfactoren temperatuur en CO₂ concentratie leidden zowel in de modelberekeningen als in de experimentele toetsing tot een reductie van het jaarrond energieverbruik van 6-7%.

Met de in dit project ontwikkelde optimalisatie van CO₂ werd een productiestijging (uitgedrukt als bruto gewasfotosynthese) van 2.5% berekend ten opzichte van de referentie. In een experiment werden de regeling en de berekeningen gevalideerd. Omdat het experiment zodanig was opgezet dat beide behandelingen slechts in enkelvoud zijn uitgevoerd (elk in één kascompartiment) was het optreden van deze productiestijging niet statistisch betrouwbaar experimenteel aan te tonen. Wel bleek uit ons experiment dat de productie en vruchtkwaliteit in de optimaal gestuurde afdeling niet onderdeed voor die in de standaard afdeling.

In de afgelopen jaren zijn meerdere regelstrategieën ontwikkeld gericht op optimalisatie van het kasklimaat en reductie van het energieverbruik. De basis hiervoor is veelal de toepassing van (een vorm van) temperatuurintegratie. Door Körner (2003) werd een systeem met een korte en een lange termijn temperatuurintegratie ontwikkeld. De korte termijn integratie (1 dag) heeft brede temperatuurbanden, maar bij de lange termijn (6 dagen) zijn deze beperkt. Dit leverde op jaarbasis 4.5 tot 9% energiebesparing op ten opzichte van de normale temperatuurintegratiestrategie en een 2.5% hogere bruto gewasfotosynthese. Deze besparing werd fors hoger als de temperatuurintegratie werd gecombineerd met een optimaal vochtregime in de kas. Deze berekeningen werden uitgevoerd met tomaat als modelgewas. Voor met name een gewas als paprika, dat in vluchten produceert, is een regelmatige vruchtzetting van belang. Of de door Körner berekende energiebesparing bij paprika te realiseren zou zijn zonder verlies aan productie door een mindere vruchtzetting zou nader experimenteel onderzocht moeten worden. De effecten van het in Denemarken ontwikkelde dynamische kasklimaatmodel IntelliGrow op groei en productie van een paprikagewas zijn in 2000 wel onderzocht (Ottosen *et al.*, 2001). De basis voor deze methode van klimaatregeling is het vermogen van de plant zich aan te passen aan wisselingen in licht, temperatuur en CO₂. Temperatuur en CO₂ worden gedurende de dag aangepast aan de heersende lichtintensiteiten op basis van de interacties tussen licht, temperatuur en CO₂ concentraties op de fotosynthese. In het algemeen kun je de IntelliGrow strategie uitleggen als optimale inzet van CO₂ onder hoog licht omstandigheden voor een optimale productie en een lage temperatuur onder laag licht condities om energie te besparen (Rosenqvist & Aaslyng, 2000). Uit een experiment met paprika bleek het mogelijk met deze strategie tot 20% energie te besparen, maar deze besparing ging wel gepaard met kwaliteitsverlies van de vruchten, waarschijnlijk door te hoge temperaturen gedurende de dag (Ottosen *et al.*, 2001). Dit in tegenstelling tot de resultaten van ons onderzoek, waarin energiebesparing gerealiseerd werd zonder verlies aan vruchtkwaliteit.

12.2 Aanbevelingen

In dit project is aangetoond dat de optimalisatie van het temperatuurverloop gedurende de dag (temperatuurintegratie) leidt tot een energiebesparing van 6-7% op jaarbasis. Ook in een aantal eerdere studies (o.a. in het kader van het energieprogramma) is aangetoond dat temperatuurintegratie met een grotere bandbreedte dan nu in de praktijk gangbaar is toegepast kan worden zonder teeltrisico's. De hulpmiddelen hiervoor zijn in de praktijk beschikbaar: temperatuurintegratiemodules op de klimaatcomputer. Om deze resultaten in de praktijk toe te passen, is het nodig dat tuinders de bereidheid hebben temperatuurintegratie met een grotere bandbreedte toe te passen. In de praktijk blijkt echter dat tuinders nog erg aarzelend zijn temperatuurintegratie toe te passen in verband met de risico's die zij hierin zien met betrekking tot ziektes en productieverlies. Het zou wenselijk zijn deze risico's nauwkeurig in kaart te brengen om ze vervolgens beheersbaar te maken. Wanneer inzichtelijk is wat daadwerkelijk de risico's zijn bij toepassing van temperatuurintegratie, zowel ééndaagse als meerdaagse temperatuurintegratie en zowel smalle als brede bandbreedtes, kan door de tuinder een risicoafweging gemaakt worden. Nu is een goede risicoafweging van het gebruik van temperatuurintegratie niet mogelijk door het gebrek aan informatie.

De arbeidsomstandigheden van het personeel is een factor waarbij rekening gehouden moet worden bij de toepassing van temperatuurintegratie. Temperatuurintegratie leidde er namelijk toe dat op warme dagen de kas 's ochtends warmer en vochtiger was dan wanneer geen temperatuurintegratie werd toegepast. Voor de medewerkers die 's ochtends gewasonderhoud en oogstwerkzaamheden doen is dit werkklimaat (veel) minder aangenaam dan het klimaat in de referentieafdeling waar meer wordt gelucht. In de praktijk betekent dit in de huidige kassen een belemmering voor het realiseren van energiebesparing door temperatuurintegratie. In kassen waarbij nieuwe teeltconcepten, zoals mobiele teeltsystemen worden toegepast, vervalt deze belemmering. De planten worden dan voor gewaswerkzaamheden naar aparte ruimtes in de kas getransporteerd, waar het klimaat voor de mens aangenaam is. Na het gewasonderhoud en de oogstwerkzaamheden worden de planten terug getransporteerd naar de kas waar het klimaat voor het gewas goed is en waarin geen rekening meer gehouden hoeft te worden met het werkklimaat voor de mens.

In dit project is een algoritme ontwikkeld gericht op een efficiënt gebruik van de hoeveelheid beschikbare CO₂ gedurende de dag. Volgens modelberekeningen zou dit algoritme een zekere productiestijging kunnen realiseren in vergelijking tot de wijze waarop thans in de praktijk CO₂ gedoseerd wordt. In de experimentele validatie is vanwege technische storingen en een warme zomer met beperkte luchtingsmogelijkheden deze productiestijging niet gerealiseerd. Toch blijken tuinders zeer geïnteresseerd in de optimalisatie van de inzet van CO₂ in hun kassen. Het verdient aanbeveling de module die in dit project gebruikt is om de inzet van CO₂ te optimaliseren op een aantal praktijkbedrijven uit te testen in samenwerking met fabrikanten van kasklimaatcomputers, gericht op implementatie in de praktijk.

In dit project werd gestuurd op optimalisatie van de groei binnen één dag via optimale fotosynthese, dus assimilatenaanmaak, waarbij de etmaaltemperatuur gelijk gehouden werd aan de referentie. Zoals aangetoond leverde dit een jaarrond energiebesparing op van 6-7%. Deze aanpak kan de eerste stap zijn op weg naar de ideale meerdaagse kasklimaatregeling. In deze ideale regeling wordt niet alleen gekeken naar aanmaak van assimilaten, maar ook naar een optimaal gebruik hiervan door de plant. In deze regeling worden op basis van ontwikkelingssnelheid van de plant, assimilatenbehoefte en assimilatenaanmaak de temperatuur- en CO₂-setpoints voor de komende dagen gegeven. Hierbij kan het principe dat de etmaaltemperatuur gelijk moet blijven losgelaten worden; de waarde voor de na te streven etmaaltemperatuur wordt dan bepaald door de meerdaagse klimaatregeling. Hierbij zijn ontwikkelingsaspecten van groot belang. Omdat de gemiddelde etmaaltemperatuur niet dagelijks meer hetzelfde zal zijn, kan de ontwikkeling van een gewas beïnvloed worden. Voor paprika bijvoorbeeld is een regelmatige vruchtzetting van groot belang voor een gelijkmatige productie. Tot nu toe is de onbekendheid met effecten van meerdaagse temperatuurintegratie op vruchtzetting een reden voor veel paprikatelers geen meerdaagse temperatuurintegratie toe te passen. Wanneer uit onderzoek zal blijken hoe groot deze effecten daadwerkelijk zijn, kan deze barrière mogelijk geruimd worden. Omdat de energiebesparing als gevolg van de optimalisatie binnen één dag en die over meerdere dagen additioneel zijn, zal meerdaagse temperatuurintegratie leiden tot een energiebesparing die substantieel hoger is dan de 6-7% die in dit project is gerealiseerd.

13. Literatuur

- Bakker, J.C. & J.A.M. van Uffelen, 1988.
The effects of diurnal temperature regimes on growth and yield of glasshouse sweet pepper. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 36: 201-208.
- De Zwart, H.F., G.L.A.M. Swinkels & C.J.M. Vernooij, 1999.
Praktijkevaluatie van het gebruik van warmtebuffers in de tomaten- en paprikateelt. IMAG Nota P99-99.
- Dieleman, J.A., E. Meinen, A. Elings, D. Uenk, J.J. Uittien, A.G.M. Broekhuijsen, P.H.B. de Visser & L.F.M. Marcelis, 2003.
Effecten van langdurig hoog CO₂ op groei en fotosynthese bij paprika. Eindrapport van het project 'Efficiënt gebruik van CO₂'. Nota 274, *Plant Research International*, 32 pp.
- Esmeijer, M.H., 1999.
CO₂ in de glastuinbouw. Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, Aalsmeer/Naaldwijk, 126 pp.
- Gijzen, H., 1992.
Simulation of photosynthesis and dry matter production of greenhouse crops. Simulation Report CABO-TT no. 28, Wageningen, 69 pp.
- Gijzen, H., 1994.
Ontwikkeling van een simulatiemodel voor transpiratie en wateropname en van een integraal gewasmodel. Rapport 18, AB-DLO, 90 pp.
- Gijzen, H., 1995.
Short-term crop responses. In: *Greenhouse climate control an integrated approach* (J.C. Bakker, G.P.A. Bot, H. Challa & N.J. van de Braak, eds). Wageningen Pers, Wageningen: 16-35.
- Heuvelink, E., 1996.
Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. Proefschrift Landbouwuniversiteit Wageningen, 326 pp.
- Körner, O., 2003.
Crop based climate regimes for energy saving in greenhouse cultivation. Proefschrift Wageningen Universiteit, 240 pp.
- Marcelis, L.F.M., 1994.
Fruit growth and dry matter partitioning in cucumber. Proefschrift Landbouwuniversiteit Wageningen, 173 pp.
- Marcelis, L.F.M., E. Heuvelink & J. Goudriaan, 1998.
Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74: 83-111.
- Ottosen, C.O., E. Rosenqvist & L. Sorensen, 2001.
Energy saving during the spring production of bell peppers. Department of Horticulture, Danish Institute of Agricultural Sciences, Aarslev, Denmark.
- Rosenqvist, E. & J.M. Aaslyng, 2000.
IntelliGrow – a new climate control concept. *Grøn Viden* 122: 1-8.
- Van de Braak, N.J., J.B. Campen, F.L.K. Kempkes & H.F. de Zwart, 2002.
Effecten combinatie temperatuurintegratie en energieschermen. IMAG rapport P2002-59, 46 pp.
- Von Caemmerer, S. & G.D. Farquhar, 1981.
Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta* 153: 376-387.

Bijlage I.

Kasuitrusting en teeltbeschrijving

Deze bijlage beschrijft de kasuitrusting van een standaard paprikateelt en de klimaatinstellingen daarbij voor zowel een tuinder die wel temperatuurintegratie toepast, als een tuinder die geen temperatuurintegratie toepast. Ook worden de klimaatinstellingen gegeven van de tuinder uit het IMAG project 'Effecten temperatuurintegratie en energieschermen' (Van de Braak *et al.*, 2002) die het laagste energieverbruik realiseerde.

Kas

Paprikatuinders gebruiken venlo-kassen. De oorspronkelijk kapmaat van 3.20 meter is op modernere kassen gegroeid naar 4.00 meter, zodat in dit onderzoek de 4-meter kap als uitgangspunt wordt genomen. Door twee van deze kappen op een tralie te leggen wordt een pootafstand van 8 meter verkregen. In de andere richting staan de poten 4.5 meter uit elkaar. Een repeterende eenheid is daarmee $4.5 \times 4 = 18 \text{ m}^2$. Elke repeterende eenheid heeft één luchtraam. De helft van de luchtramen zit aan de ene zijde en de andere helft aan de andere zijde. Hierdoor heeft altijd elke 36 m^2 kas één raam aan de windzijde en één raam aan de luwe zijde. Anders gezegd, elke vierkante meter kas heeft 0.028 raam aan de luwe zijde en 0.028 raam aan de windzijde. Het ruitoppervlak van elk luchtraam is $2.25 \text{ breed} \times 1.2 \text{ hoog} = 2.7 \text{ m}^2$.

Per tralie van 8 meter liggen 10 buizen (51 mm diameter) vlak boven de vloer, die zowel voor transport-doeleinden als voor de verwarming worden gebruikt (de buis-rail verwarming). Daarnaast hangen er per tralie 5 dunnere buizen (28 mm) die als condensornet worden gebruikt, maar in koude perioden ook als secundair net fungeren. Het boven-net geeft dus in principe de condensorwarmte af, maar indien het ondernet verwarmingsvermogen tekort komt wordt warm water in het bovennet bijgemengd.

Vrijwel alle paprikatelers beschikken over een beweegbaar scherm wat van de ene naar de andere tralie kan worden gesloten. In geopende toestand is het scherm strak opgevouwen zodat het slechts 2% licht onderschept.

Teeltperiode

In de maand november wordt het oude gewas opgeruimd en een nieuw paprikagewas geplant. In dit project is de plantdatum gesteld op 25 november. Op 7 november in het volgend jaar loopt de teeltperiode af.

Scherm

Er wordt een transparant beweegbaar scherm gebruikt dat in de standaard teeltbeschrijving continu gesloten is van 25 november tot 5 december. Van 5 december tot 6 januari is het scherm overdag geopend als de zonnestraling meer dan 100 W.m^{-2} bedraagt. Na 6 januari is het scherm overdag altijd geopend. Het scherm is 's nachts dicht, mits de buitentemperatuur lager is dan 10°C . In de periode juni tot en met september wordt er niet geschermd. Wanneer de RV 0.5 % boven het setpoint komt wordt het scherm op een kier getrokken.

De energiezuinige tuinder sluit zijn scherm 's nachts al als de buitentemperatuur onder de 12°C zakt. Ook gebruikt deze tuinder geen vochtkier, maar laat de luchtvochtigheid gewoon oplopen. Overdag laat deze tuinder zijn scherm echter nooit dicht.

Temperatuursetpoints

In het begin van de ontwikkeling van een paprikagewas worden hoge temperaturen aangehouden en wordt een hoge luchtvochtigheid nagestreefd. Verderop in de teelt wordt het temperatuursetpoint wat verlaagd, vooral in de nacht.

In onderstaande tabel worden de temperaturen vermeld zoals die volgens de standaard teeltbeschrijving voor een paprika worden gebruikt. Tevens worden de temperaturen genoemd zoals die door een zeer energiezuinige teler zijn opgegeven

Datum	Standaard instellingen (°C)		Instellingen energiezuinige tuinder (°C)	
	Dag	Nacht	Dag	Nacht
27-11	22.5	22.5	22	22
16-12		20		
06-01	22	18		
15-01			20.5	19.5
27-01	21	19		
15-02				18.5
01-07			12	12
01-09			20	17.5
07-11	Einde teelt			

De tabel laat zien dat de instellingen bij de energiezuinige tuinder stelselmatig ongeveer een halve graad lager liggen. Tevens blijkt uit de tabel dat de energiezuinige tuinder in juli en augustus praktisch niet stookt op temperatuur.

In de standaard teeltbeschrijving voor de paprika wordt het temperatuursetpoint overdag lichtafhankelijk verhoogd met 2 graden over het zonstralingstraject van 100 tot 300 W/m² (buiten de kas gemeten). De energiezuinige tuinder doet dit in veel geringere mate. Hij heeft een lichtafhankelijke setpointverhoging van slechts 0.8°C. Kennelijk verhoogt hij de temperatuur niet actief, wat mogelijk extra energie kost, maar wacht af wat de zon doet en benut alleen gratis temperatuurverhoging m.b.v. de temperatuurintegratie regelaar.

Temperatuurintegratie

De berekeningen zijn gemaakt voor een standaard teelt zonder en met temperatuurintegratie.

Daar waar in temperatuur integratie aan de standaard teeltbeschrijving voor de paprika wordt toegevoegd worden voorzichtige waarden gebruikt. Er wordt weliswaar een vrij ruime bandbreedte toegestaan (2°C naar boven en naar beneden ten opzichte van respectievelijk de ventilatielijn en de stooklijn), maar er wordt slechts gebruik gemaakt van etmaal integratie. De energiezuinige tuinder hanteert een kleinere bandbreedte (1°C boven de luchtlijn en 1°C onder de stooklijn), maar hanteert een integratieperiode van 1 week.

De simulaties zonder temperatuur integratie worden echter als maatgevend voor de huidige paprikateelt beschouwd.

Minimumbuis

Het energieverbruik wordt niet alleen op grond van temperatuurcriteria bepaald. Ook de minimumbuisinstellingen spelen een belangrijke rol. De minimumbuis temperatuur bedraagt jaarrond dag en nacht 35°C. In het zonstralingstraject 100 tot 300 W/m² wordt de minimumbuis temperatuur echter afgebouwd naar de actuele kastemperatuur.

Ventilatie

In het begin van de teelt staat de ventilatielijn ruim boven de stooklijn (+5°C). Op 15 februari wordt deze door de energiezuinige tuinder op 2.5°C gezet. In de standaard teeltbeschrijving wordt de ventilatielijn omstreeks deze tijd 2°C boven de stooklijn ingesteld.

Luchtvochtigheidsbeheersing

Op het moment dat de luchtvochtigheid van de kas boven de 85% RV stijgt worden de lijzijdige ramen met 2% raamopening per procent luchtvochtigheidsoverschrijding geopend.

Buffer/CO₂

CO₂-dosering vindt plaats met rookgassen van de ketel van zonopkomst tot een uur voor zonsondergang en zolang de buffer nog niet geheel gevuld is. De branderstand tijdens de CO₂-dosering is 100 m³/ha/uur. Loopt de buffer-temperatuur sneller op dan toegestaan volgens de buffervulcurve dan wordt de brander getemperd. De buffer wordt 's nachts niet actief geleegd.

Resultaat

	Zuinige tuinder	Standaard met TI	Standaard
Gasverbruik [m ³ /m ² /jaar]	34	36.1	38.9
Gemiddelde kasluchttemperatuur (°C)	20.4	21.1	21.2
Productie t.o.v. standaard (%)	98.9	99.9	100

De tabel laat zien dat de zuinige tuinder inderdaad tot het laagste verbruiksniveau komt, maar ook op een wat lager productieniveau uitkomt.

Bijlage II.

Verslag van de go/no go bijeenkomst

Verslag van de go/no go bespreking op 4 maart 2003

Aanwezig: Derk Bol (Productschap Tuinbouw), Leo Oprel (EC-LNV), Feije de Zwart, Gert Jan Swinkels, Theo Gieling (IMAG), Pieter de Visser, Anja Dieleman (PRI).

1. Inleiding

Stand van zaken van het project: de berekeningen zijn afgerond en de voorbereidingen voor het experiment (kassen gereed maken, paprika's planten) zijn getroffen. De go/no go bespreking wordt gevoerd op basis van het rapport over de berekeningen van het project, dat op 21 februari naar de opdrachtgevers is verstuurd.

2. Simulatieberekeningen

Feije de Zwart geeft een toelichting op de wijze waarop de optimalisatie heeft plaatsgevonden en op de resultaten hiervan.

Opmerkingen bij de presentatie en n.a.v. de rapportage:

Legenda moet bij alle figuren in rapportage duidelijk aangeven worden. Dit zal in een volgende versie van het rapport worden aangepast.

Er zal in de volgende versie van het rapport naast het histogram in Figuur 2-2 een soortgelijk histogram van de temperatuurverschillen voor de geoptimaliseerde kas worden gemaakt, zodat zichtbaar wordt dat het een vergroting van het gemiddelde verschil is dat zorgt voor de energiebesparing.

In Figuur 2-3 is het verschil tussen de lijnen de lek van de kas (inclusief luchten).

Figuur 2-4: 100% betekent dat alle CO₂ die vrijkomt bij de warmteproductie ook wordt benut voor de CO₂ dosering.

Paragraaf 2.3.2: optimalisatie convergeert tot optimum, niet tot sub-optimum.

Figuur 3-4: op dagen dat de CO₂ behoefte groter is dan de warmtebehoefte wordt in de geoptimaliseerde regeling het temperatuurverloop van de standaardregeling overgenomen om voldoende CO₂ te hebben om de productie op peil te houden. Anders gezegd: op die dagen wordt er even geen energie bespaard door de optimaliserende regeling. In het uiteindelijke rapport zal worden aangegeven om hoeveel misgelopen energiebesparing het hier gaat. Conclusie: er wordt 7% energie bespaard t.o.v. de standaard zonder TI, en 5% meer productie gehaald.

Met betrekking tot het experiment:

Het experiment wordt uitgevoerd in de kassen van het IMAG en niet 'in de praktijk'. Dit omdat het resultaat zoals berekend eerst moet worden aangetoond onder omstandigheden die goed in de hand te houden zijn, waar uitgebreide metingen gedaan worden en waar de infrastructuur zich er voor leent op korte termijn hiermee te beginnen. Op een praktijkbedrijf zou de klimaatcomputer eerst uitgebreid aangepast moeten worden om CO₂ en temperatuur-optimalisatie zoals in het eerste gedeelte van het project is ontwikkeld mogelijk te maken.

3. Conclusie

Conclusie uit de rapportage over de berekeningen en deze bespreking is:

- Project wordt vervolgd met het experiment zoals beschreven in het huidige projectvoorstel. Aanvullend worden in mei/juni paprikatuinders (via de gewascommissie paprika) uitgenodigd om het project aan toe te lichten en mee te bespreken. Mocht deze groep van oordeel zijn dat juist de maanden juli en augustus bijzonder kritisch zijn, wordt door de opdrachtgevers overwogen de financiering van dit project uit te breiden.

- In het rapport over de berekeningen worden de optimalisatieprocedure en simulatieresultaten iets duidelijker beschreven. De aangepaste rapportage wordt elektronisch aan Derk Bol en Leo Oprel gestuurd. De rapportage over de berekeningen zal aan het einde van het project opgenomen worden in de rapportage over het gehele project.

4. Discussie

- Resultaten van de berekeningen zouden in de pers gebracht moeten worden.
- Wat betekenen deze resultaten voor onderzoek naar temperatuurintegratie? Kennis van temperatuurgrenzen blijft heel belangrijk; energiebesparing zou heel anders uitgevallen zijn als grenzen niet 16 en 30°C geweest waren, maar bijvoorbeeld 18 en 28°C. Discussie met de praktijk moet op dit punt wel aangegaan worden.
- Ook de gewenste sink-source verdeling in het gewas (in afhankelijkheid van seizoen) bepaalt temperatuurgrenzen. Hoe kijkt een tuinder aan tegen de gevolgen van e.e.a. voor de stand van het gewas, vooral als het gewas de moeilijke periode ingaat na de langste dag. Optimalisatie zou nog veel verder kunnen gaan en dit meenemen, evenals de (verwachte) prijzen voor paprika's.

Bijlage III.

Verslag van de bijeenkomst met de gewascommissie paprika

Verslag van de bijeenkomst met de gewasmanager paprika van LTO en twee paprikatuinders op 17 juni 2003

Aanwezig: P. Tammes (LTO), T. van Tuijl (tuinder), N. van der Burg (tuinder), L. Marcelis (PRI), F. de Zwart (IMAG), T. Gieling (IMAG)

1. Inleiding

Leo Marcelis gaf een toelichting bij de doelstellingen van het energieprogramma en dit project en schetste kort de voorgeschiedenis van het project. Hij gaf aan dat het project in twee onderdelen was opgedeeld en dat we thans bezig zijn met het testen van de berekeningen in een kasproef.

2. Kasklimaatregeling

Feije de Zwart lichtte de ontworpen regeling toe, die is gebaseerd op een optimalisatie van de temperatuur en de CO₂ dosering binnen een etmaal. Deze optimalisatie berust op twee pijlers: temperatuurintegratie die kan leiden tot energiebesparing en het plannen van de CO₂ verdeling over de dag dat kan leiden tot een toename van de productie. Deze regeling wordt nu in een kasproef getest: 1 kascompartiment met een standaardregeling en 1 kascompartiment met de optimaliserende regeling. Bij de optimaliserende regeling varieert de temperatuur gedurende een etmaal veel sterker dan bij de standaardregeling. Registratie van het gasverbruik laat zien dat tot nu toe (17 juni) ongeveer 1 m³/m² bespaard is sinds de start van de optimaliserende regeling op 1 april.

3. Bezoek aan het experiment

In het experiment worden paprika's geteeld in twee kascompartimenten: een met een standaardregeling en een met de optimaliserende regeling. Gedurende de proef worden metingen uitgevoerd aan klimaat, gewasgroei en bladfotosynthese. Op basis hiervan wordt het energiegebruik berekend en effecten op gewasgroei en ontwikkeling. Met betrekking tot gewasgroei is het vooral belangrijk om vast te stellen of de temperatuurvariatie niet tot negatieve effecten op gewasontwikkeling geven en zo mogelijk om vast te stellen of de berekende productiewinst ook daadwerkelijk behaald wordt (echter volgens de modellen is de verwachte productiewinst 5%; een dergelijke productiestijging is zeer moeilijk om statistisch in een proef aan te tonen). De productiecijfers tot 10 juni geven aan dat de optimaliserende regeling 5-10% meer productie geeft (statistisch is dit waarschijnlijk niet significant; dit wordt later nog nagegaan). De teeltproef lijkt daarmee de berekeningen te bevestigen. Ook zijn geen verschillen tussen gewasstand als gevolg van de regeling waargenomen.

4. Discussie

- In algemeen was er een zeer goede en kritisch opbouwende discussie. De projectaanpak werd inhoudelijk goed geacht.
- Met betrekking tot de stand van het gewas en de teelt in algemeen was men bijzonder goed te spreken. Weliswaar waren in het begin de vruchten niet op breukvlak gesneden waardoor fytophthora op de snijvlakken begint te ontwikkelen. Dit probleem was inmiddels onderkend. Het heeft de proef zeker niet beïnvloed en stond los van de behandeling. Conclusie was dat er geen verschil in gewasstand is tussen de twee behandelingen.

- De tuinders waren van mening dat de variatie in temperatuur van de optimaliserende regeling niet veel verder gaat dan wat zij zelf al doen en dat dit onderdeel dus maar beperkte bijdrage voor hen geeft. (Deze constatering was mogelijk mede ingegeven doordat overleg plaatsvond tijdens een zeer warme periode, op welke momenten er weinig verschil tussen de 2 regelingen plaatsvindt. Volgens de DLV voorlichter die de proef begeleidt wordt in dit onderzoek wel een behoorlijk grotere variatie in temperatuur aangehouden dan in de praktijk.)
- De CO₂ regeling vonden ze vernieuwender en daarvoor zagen ze daarom meer perspectief. De opmerking, dat deze methode volledig geautomatiseerd kan worden en niet afhankelijk is van de kennis en kunde van de tuinder, werd met instemming ontvangen.
- Er was één groot kritiekpunt op dit onderzoek. De planten zijn 11 februari geplant en de regeling is pas op 11 april ingegaan. Naar mening van tuinders had dit niet gemogen: er had 10 december geplant moeten zijn en meteen met de behandelingen begonnen moeten zijn. Echter dit was niet mogelijk omdat na honorering van het project in december eerst de regeling ontworpen moest worden, waardoor de daadwerkelijke proef in de kas pas later kon starten. Daarom waren in onderling overleg met opdrachtgevers deze aanvangsdata gekozen.

5. Conclusies

Conclusie is dat de proef goede resultaten opgeleverd heeft. De resultaten zijn op dit moment duidelijk, Langere voortzetting van proef zal niet tot andere conclusies leiden en is daarom niet nodig. Proef zal dan overeenkomstig projectplan eind juni beëindigd worden.