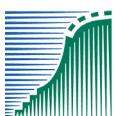


Energiezuinige teeltsturing bij paprika

Proof of Principle

Testen van dynamische optimalisatie als methode om doelgerichte sturing van de teelt te combineren met energiebesparing

Fokke Buwalda, Feije de Zwart, Eldert van Henten, Arie de Gelder, Jochen Hemming, Jan Bontsema, Peter Lagas & Caroline van der Mark



landbouw, natuur en
voedselkwaliteit



Kas als Energiebron



Productschap Tuinbouw
Voor een bloeiende zaak

Rapport 238



Energiezuinige teeltsturing bij paprika

Proof of Principle

Testen van dynamische optimalisatie als methode om doelgerichte sturing van de teelt te combineren met energiebesparing

Fokke Buwalda¹, Feije de Zwart¹, Eldert van Henten¹, Arie de Gelder¹, Jochen Hemming¹, Jan Bontsema¹, Peter Lagas¹ & Caroline van der Mark²

¹ Wageningen UR Glastuinbouw

² Caroline van der Mark Natuureducatie

© 2009 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Wageningen UR Glastuinbouw



**landbouw, natuur en
voedselkwaliteit**



Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 48 60 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

	pagina
Voorwoord	1
Samenvatting	3
1 Inleiding: Proof of Principle	5
1.1 Dynamische processen sturen	5
1.1 Optimaliseren	6
1.2 Welk probleem gaan we aanpakken om dynamisch optimaliseren te testen?	7
1.3 Achtergrond van de zettingsgolven bij paprika en het verband met energie	8
1.4 De uitdaging in deze proef	9
2 Materiaal en methoden	11
2.1 Stuurstrategieën voor een gelijkmatig afzetpatroon	11
2.2 Het modelmatig sturen van de zettingsgolven	12
2.3 Kas en teelt	15
2.4 Technische uitvoering	15
3 Resultaten	19
3.1 Het toepassen van dynamische optimalisatie	19
3.1.1 Weersomstandigheden en kasklimaatberekeningen	20
3.1.2 Klimaat- en energieberekeningen	20
3.1.3 Stuurgedrag en het volgen van de referentielijnen	23
3.1.4 Technisch functioneren van het systeem	24
3.2 Resultaten van de stuurproef	25
3.2.1 Zettingsgolven	25
3.2.2 Productie	25
3.2.3 Energie	27
4 Discussie	29
4.1 Wat betreft de teelt	30
4.2 Wat betreft de energie-efficiëntie	32
4.3 Wat betreft de optimalisatie	34
4.3.1 Hoe of wat?	34
4.3.2 Doelfuncties	35
4.3.3 Grenzen aan de sturing	36
4.4 Hoe verder met dynamische optimalisatie	37
4.4.1 Wanneer beginnen?	38
4.5 Conclusies en aanbevelingen	39
Referenties	41
Bijlage I. Schema van het optimalisatiesysteem	1 p.
Bijlage II. De output van de optimalisator FFSQP op het scherm	1 p.

Voorwoord

Voor u ligt het eindrapport van het project: 'Energiezuinig sturen bij paprika - Proof of Principle'.

Het hier uitgevoerde project rondom teeltsturing en energiebesparing heeft een pionierskarakter.

De glastuinbouw wordt geconfronteerd met steeds hogere eisen aan het productieproces, onder andere met betrekking tot CO₂ uitstoot en energie-efficiëntie. Uit eerdere studie bij paprika is gebleken dat teeltsturing op basis van dynamische optimalisatie theoretisch kan leiden tot een gelijkmatig afzetpatroon met behoud van productie, in combinatie met ca 10% energiebesparing. Ook bleek in kleinschalige experimenten, door af te wijken van de gangbare teelttemperatuur, 10-20% op het energieverbruik te kunnen worden bespaard.

Elke keuze die op een bepaald moment wordt gemaakt heeft gevolgen die nog geruime tijd doorwerken in de teelt. Wat op korte termijn een goede keus lijkt, kan op langere termijn averechte effecten hebben. Zo is er voortdurend onzekerheid over kosten en baten, kansen en risico's. Zoiets is bovendien bedrijfsspecifiek, zowel de stand van het gewas als de klimaat- en weersomstandigheden hebben invloed, en die invloed kan nog langere tijd doorwerken. Modellen kunnen worden gebruikt om de telers meer inzicht te geven in wat er zich afspeelt in de kas en wat er de komende tijd te verwachten is. Door van moment tot moment informatie te verzamelen, door te rekenen en met elkaar in verband te brengen kan modellering inzicht opleveren op basis waarvan telers beslissingen kunnen nemen wat betreft de te nemen maatregelen.

Technisch is het mogelijk om zelfs nog een stap verder te gaan, door het model de maatregelen te laten berekenen waarmee een van tevoren geformuleerde teelt doelstelling zo efficiënt mogelijk kan worden gerealiseerd. Dit is waar het om gaat bij dynamische optimalisatie. Of dit alleen een idee blijft of werkelijk gerealiseerd kan worden behoeft een Proof of Principle. Daarover gaat dit rapport: aan de hand van gestuurde paprikateelt is getracht energie-efficiëntie te koppelen aan een gelijkmatig afzetpatroon en gewaarborgd productieniveau.

Het projectteam is dank verschuldigd aan Gerrit van Straten, Ep Heuvelink en Anne Elings voor hun constructief-kritische bijdragen aan de discussie in de loop van het project, en aan paprikateler Theo van Paassen voor de regelmatige adviezen met betrekking tot klimaatregeling en gewasmanagement in de referentiebehandeling van de teeltproef.

Het project is gefinancierd uit het Energie-transitieprogramma van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Voedselkwaliteit en van het Productschap Tuinbouw, waarvoor onze dank.

Dr. F. Buwalda, projectleider

Wageningen, 25 december 2008

Projectreferenties:

- WUR-projectnummer: 41515023
- PT-projectnummer: 12369
- LNV-DK-programma: B0-03-06 energie in beschermde teelten

Samenvatting

In de tuinbouw worden hoge eisen gesteld aan het productieproces. De noodzaak om efficiënt met energie om te gaan en de uitstoot van CO₂ te beperken wordt niet alleen door de maatschappij aan de sector opgelegd, maar komt ook voort uit de economische realiteit. Tegelijkertijd nemen door technologische ontwikkelingen de mogelijkheden om het kasklimaat en de teelt te beïnvloeden steeds verder toe. Dit stelt de teler meer en meer voor de praktische vraag: hoe kan ik efficiënt sturen? Veelal gaat het hierbij om het afwegen van verschillende doelen, zoals bij vruchtgroenten de groei van de kop tegen de groei van de vruchten, of bij siergewassen teeltsnelheid tegen kwaliteit. In verschillende proeven is aangetoond dat winst valt te behalen door af te wijken van de gangbare teeltrecepten. Hierbij mag de korte termijn winst natuurlijk niet ten koste gaan van de efficiëntie op de langere termijn. Verder blijft altijd de vraag of er niet nog betere keuzes mogelijk waren geweest. En tenslotte is elke keus die een teler maakt gebaseerd op een bepaalde verwachting van de toekomst, waarbij door de onvoorspelbaarheid van het weer en de economische omstandigheden de realiteit steeds weer af zal wijken van de voorafgaande verwachting.

Er bestaat een techniek om onder wisselvallige omstandigheden verschillende doelstellingen tegen elkaar af te kunnen wegen, en daarbij systematisch rekening te houden met de effecten op korte en langere termijn. Deze techniek heet dynamische optimalisatie. De techniek is veelbelovend omdat hiermee in principe energiebesparing kan worden bereikt in combinatie met het efficiënt realiseren van teelt doelstellingen op het gebied van productie, kwaliteit en timing. Dit soort combinaties komt dicht bij de centrale doelstelling van het programma 'Kas als Energiebron'.

Het project waarover deze nota rapporteert had tot doel om in een teeltproef te onderzoeken of deze techniek inderdaad toepasbaar is, en wat daar allemaal bij komt kijken. Het vraagstuk waarop de techniek werd toegepast was het combineren van energiebesparing met het realiseren van een gelijkmatig afzetpatroon in de paprikateelt, met minimaal gelijkblijvende productie. De bijbehorende energiedoelstelling was minimaal 10% energiebesparing. Uit een voorafgaande, theoretische studie was al gebleken is dit in principe mogelijk zou moeten zijn.

Om een gelijkmatig oogstpatroon te verwezenlijken zijn twee verschillende benaderingen getest:

- 1 Tegenfase - zo sturen dat de zettingsgolven in twee afdelingen elkaar precies afwisselen.
- 2 Afvlakken - het realiseren van een gelijkmatige zetting binnen één afdeling.

In het teeltseizoen 2006 is de proef uitgevoerd. De resultaten laten voor beide benaderingen zien dat gedurende een beperkte periode het nagestreefde zettingspatroon kon worden gerealiseerd. Dit betekent dat de vruchtzetting bij paprika inderdaad kan worden gestuurd zoals het model voorspelt. Opbrengstcijfers laten in elk van de gestuurde afdelingen een kleine productieverhoging zien. Bovendien was in de gestuurde afdelingen het energieverbruik minder.

Met deze uitkomsten is gedemonstreerd dat het in principe mogelijk is om vrij complexe teelt doelstellingen te realiseren met behulp van dynamisch optimaliserende sturing en tegelijkertijd energie te besparen. Daarmee is de *Proof of Principle* geleverd: het bewijs dat het in principe mogelijk is. Vaak wordt gedacht dat energiebesparing en beheersing van het teeltproces tegenstrijdige doeleinden zijn die tegen elkaar moeten worden afgewogen. Echter, de resultaten van dit project maken aannemelijk dat het mogelijk is om beide terreinen tegelijk succes te boeken.

Bij dit succes horen natuurlijk ook aanvullende opmerkingen, want voor paprika is het sturen van de zetting met behulp van dynamische optimalisatie nog niet ver genoeg ontwikkeld om al zonder meer in de praktijk te kunnen worden toegepast.

- Onder zomerse omstandigheden (en vooral tijdens de hittegolven van zomer 2006) bleek dat in conventionele kassen met de toegepaste sturing via de klimaatregeling niet voldoende invloed op het teeltproces kon worden uitgeoefend.
- De geconstateerde meerproductie ging ten koste van de grofheid van de vruchten.

- Het 'afvlakken' van de zettingsgolven binnen één afdeling leek tegen de natuur van het gewas in te gaan. Deze strategie was bijzonder instabiel en gevoelig voor afwijkingen in de klimaatgegevens die het model ingingen. Verder bleek, in de 8 weken dat het gelukt is een regelmatige zetting te realiseren, dat steeds één of twee vruchten dominant werden en de uitgroei van de overige vruchten onderdrukten.

De oogst van dit project, wat betreft de techniek van het optimaal sturen:

- Methodologisch inzicht in wat er bij komt kijken om algemene kennis (over fysiologie, kasklimaat) real-time, dat wil zeggen met inzicht op elk moment, toe te passen in specifieke situaties.
- Technische know-how met betrekking tot het real-time integreren van modellen en datastromen.
- Inzicht in de afwegingen die spelen bij het nastreven van verschillende, ongelijksoortige doelstellingen bij het optimalisatieproces, zoals energieverbruik plus een teelttechnisch doel.
- Enige ervaring met het monitoren van het optimalisatieproces en het communiceren daarover.

Tot slot worden voor het vervolg de volgende aanbevelingen gedaan:

- Voor paprika lijkt het zinvol om de proef nog een keer te herhalen onder omstandigheden die meer grip op het zettingsproces toelaten. Te denken valt aan een geconditioneerde kas met verneveling, koeling en belichting, waarbij de factoren licht, temperatuur en CO₂-concentratie veel meer onafhankelijk van elkaar kunnen worden geregeld dan mogelijk is in een conventionele kas. Meer grip op de zetting kan ook ontstaan door op bepaalde momenten licht weg te schermen of te stoppen met CO₂-verrijking, maar dat zal waarschijnlijk ten koste gaan van de totale productie.
- Dynamische optimalisatie zou in de tuinbouw ook op andere afwegingen kunnen worden toegepast, bijvoorbeeld het vinden van de meest energie-efficiënte combinatie van teeltsnelheid en productkwaliteit
- Dynamische optimalisatie hoeft niet persé als on-line sturing te worden toegepast. Het zou nuttig kunnen zijn om ook eens off-line toepassingen te onderzoeken, zoals een 'intelligente' teeltmonitor.

1 Inleiding: Proof of Principle

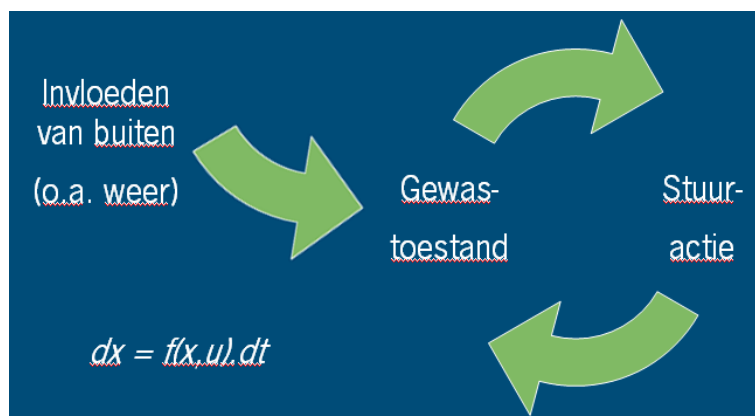
Dynamische optimalisatie is een techniek om bij complexe processen de meest efficiënte besturingstrajecten te berekenen die voldoen aan bepaalde vooraf gestelde criteria. Deze techniek kan interessant zijn voor de tuinbouw bij het afwegen van verschillende doelstellingen, zoals maximale energiebesparing en het sturen van het teeltproces om een bepaald teeltresultaat te realiseren. De voorliggende vraag is nu om in een teeltproef een *proof of principle* te leveren dat deze techniek in de tuinbouw inderdaad toepasbaar is.

Om een eenvoudig voorbeeld te geven: wat is het effect van een duw tegen een schommel? De algemene natuurkundige kennis over slingers is niet zo ingewikkeld. Om die kennis in een concrete situatie te kunnen toepassen is echter nog een stap nodig: je moet n.l. ook iets weten over de toestand van de schommel zelf: als de schommel net naar je toe beweegt werkt een duw remmend, als hij juist van je af beweegt versterkt een duw de schommelbeweging. In de praktijk hoef je geen natuurkundige te zijn om een kind op een schommel te kunnen duwen. Je ziet de slingerende schommel voor je en op basis van ervaring voel je wel aan wanneer de volgende zet moet worden gegeven. Een voorwaarde om deze op praktijkkennis gebaseerde methode toe te kunnen passen is dus dat de toestand van het systeem direct waarneembaar is. In situaties waarin de relevante toestand niet direct waarneembaar is, bijvoorbeeld omdat die nog in de toekomst ligt of omdat het bijvoorbeeld gaat om een moeilijk meetbare fysiologische balans, dan werkt die methode niet. En zijn dan andere middelen nodig om gericht te kunnen sturen. Een methode om in dergelijke gevallen toch de benodigde informatie over de systeemtoestand te krijgen is om de beschikbare algemene kennis te vatten in een model. In het voorbeeld van de schommel kan een model worden gebruikt om het verloop van de schommelbeweging in de tijd te berekenen. Om te kunnen rekenen heeft het model informatie nodig over de lengte van de touwen van de schommel, het gewicht van het kind plus het zitplankje, de toestand van de schommel bij het begin van de berekening (positie, snelheid) en de duwen die eventueel na dat startmoment al zijn gegeven. Een model kan dus theoretische principes vertalen naar praktische gevolgen in concrete situaties. Dit vormt een aanvulling op de praktijkmethode, omdat daarmee niet alleen informatie over positie en snelheid van de schommel op het huidige moment beschikbaar komt, maar ook op momenten in het verleden of in de toekomst.

1.1 Dynamische processen sturen

De afwegingen die gemaakt moeten worden zijn vrij complex vanwege de eigen dynamiek van het gewas: elke keuze die op een bepaald moment wordt gemaakt heeft gevolgen die nog geruime tijd doorwerken in de teelt. Wat op korte termijn een goede keus lijkt, kan daardoor op langere termijn juist averechtse effecten hebben.

De reden hiervoor is dat de reactie van het gewas niet alleen afhangt van uitwendige omstandigheden zoals licht, CO₂ en temperatuur, maar ook van de toestand van het gewas zelf, en met name de actuele plantbelasting (het aantal uitgroeiende vruchten en de verdeling over leeftijdklassen van die vruchten, zie Figuur 1.1). Op een vergelijkbare manier hangt het bij een paprikagewas af van de fase van de zettingscyclus of een heldere dag met hoog CO₂ (een 'duw' extra assimilaten) een groter zetsel geeft of juist extra groei van de bestaande vruchten.



Figuur 1.1. Het gewas is een dynamisch systeem. De reactie van het gewas hangt niet alleen af van uitwendige omstandigheden (stuuracties, andere invloeden van buiten zoals het weer) maar ook van de toestand van het gewas zelf. Door de reactie van het gewas verandert de gewas-toestand.

1.1 Optimaliseren

Bij een optimaal stuurtraject gaat de winst op de korte termijn nooit ten koste van de winst op de langere termijn. Een beproefde techniek om in dergelijke complexe situaties teelttrajecten te berekenen die op korte en ook op langere termijn het meest efficiënt voldoen aan bepaalde vooraf gestelde criteria heet dynamische optimalisatie. Doel van het in dit rapport gepresenteerde project was om deze techniek in een proef uit te testen. Als in deze proef inderdaad de *proof of principle* kan worden geleverd dan is een belangrijke stap gezet om de essentiële waarde van deze techniek op het gebied van teeltplanning en energiebesparing aan te tonen.

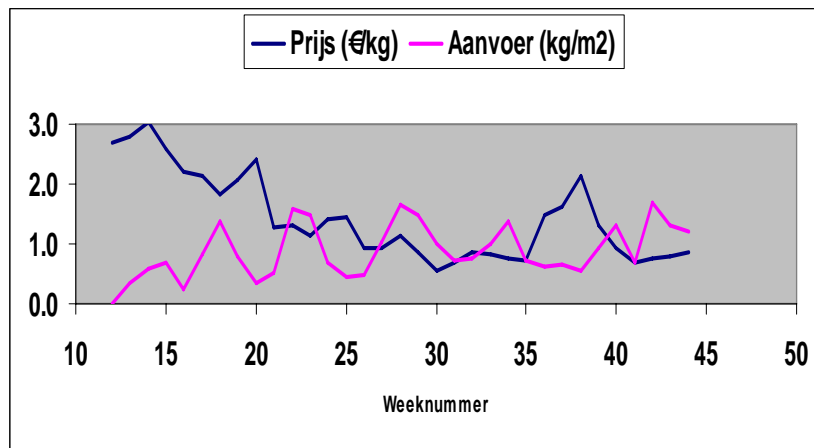
Het volgende voorbeeld maakt duidelijk dat het optimaal beheersen van het teeltproces de teler voor lastige dilemma's plaatst, en dat de ingewikkeldheid van de vraag 'wat is optimaal?' niet moet worden onderschat. Stel in het geval van het gewas in Figuur 1.1 dat een teler de keus heeft uit 10 verschillende temperaturen om in te stellen. De reactie van het gewas op de temperatuur wordt beïnvloed door de toestand van het gewas. Door die reactie op temperatuur verandert de gewas-toestand ook weer, zodat het gewas op de tweede dag een iets andere toestand zal hebben. Omdat de teler uit 10 temperaturen kon kiezen zijn er de volgende dag in principe 10 gewas-toestanden mogelijk (die onderling allemaal een klein beetje verschillen). Als de teler op die tweede dag ook weer de keuze heeft uit 10 temperaturen waarop het gewas afhankelijk van die 10 mogelijke gewas-toestanden ook weer op 10 manieren zal reageren, dan zijn er op de derde dag 100 gewas-toestanden mogelijk, op de vierde dag 1000, enz. De hoeveelheid mogelijke uitkomsten die onderling allemaal een klein beetje verschillend zijn neemt dus razendsnel toe. Welke uitkomst is optimaal? En welke van de oplossingen die op een bepaald moment goed scoren zijn zo te sturen dat ze ook in de toekomst ook nog gewenste resultaten op blijven leveren? En wat gebeurt er als het weer afwijkt van de verwachting (helemaal kloppen doet het weerbericht toch nooit)? Dit is het type vragen waar een antwoord op moet worden gevonden als we modellen willen gebruiken om de teelt optimaal te sturen.

Het principe van dynamisch optimaliseren is dat van heel veel verschillende keuzemogelijkheden een prognose wordt berekend. Al deze scenario's worden beoordeeld volgens criteria die staan geformuleerd in een doelfunctie. Verder kunnen er aan het systeemgedrag grenswaarden worden opgelegd. Doorgaans worden per rekenstap aan alle berekende scenario's strafpunten uitgedeeld: meer strafpunten naarmate ze verder van een streefwaarde af liggen of naarmate grenswaarden verder of vaker worden overschreden. Het scenario dat zo over de hele te optimaliseren periode de minste strafpunten oploopt geldt als optimaal.

De prognoses worden berekend met behulp van rekenmodellen, op basis van de verwachte weersomstandigheden. Omdat het feitelijk gerealiseerde weer zal verschillen van de verwachting, worden de optimalisatieberekeningen regelmatig herhaald, bijvoorbeeld dagelijks op basis van een verse weersverwachting. Omdat ook de rekenmodellen doorgaans niet volmaakt zijn kan de berekende gewas-toestand geleidelijk gaan afwijken van de feitelijke toestand.

Daarom wordt regelmatig op basis van directe waarnemingen de berekende gewastoeestand gecorrigeerd. Afhankelijk van de betrouwbaarheid van de directe waarnemingen bestaan daar verschillende strategieën voor, waarvan Kalman-filtering een bekend voorbeeld is (Bryson & Ho, 1975)

1.2 Welk probleem gaan we aanpakken om dynamisch optimaliseren te testen?



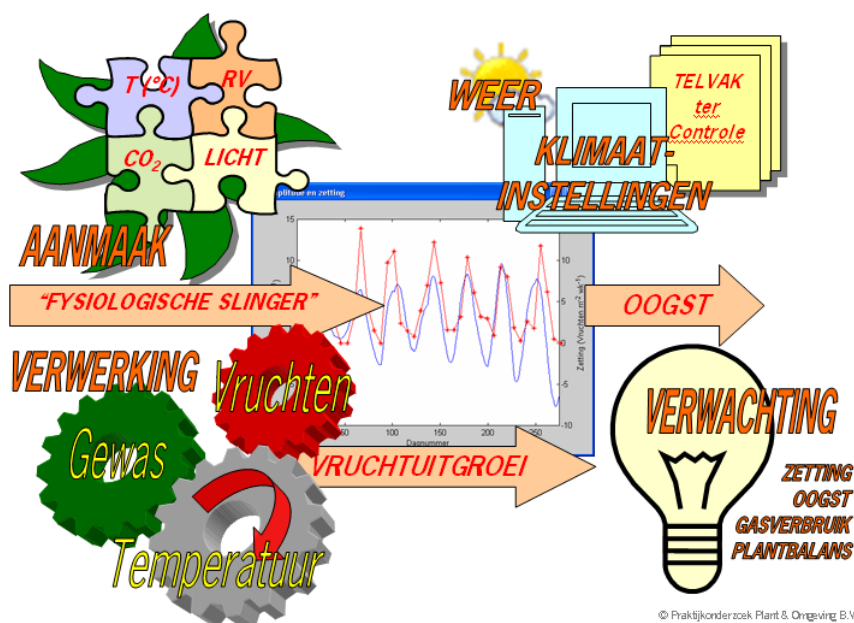
Figuur 1.2. Verloop van de aanvoer van een paprikabedrijf in 2004 ($\text{kg m}^{-2} \text{wk}^{-1}$) en de veilingprijs per kg. Waar de aanvoer beperkt is, is de prijs hoog. Het patroon van 'vluchten' in de aanvoer van dit ene bedrijf is terug te zien in de prijs (bijvoorbeeld hoge prijs bij geringe aanvoer in week 20, 25 en 36-38). Dat de variatie in aanvoer van één bedrijf wordt weerspiegeld in de prijsvorming is te verklaren doordat de productiepieken van verschillende bedrijven samenvallen

Vanuit de paprikateelt is er een duidelijke behoefte aan oogstprognose en sturing, vanwege de zettinggolven, die oogstfluctuaties veroorzaken. Door de variatie in het aantal afrijpende vruchten is arbeidsinzet in verband met oogstwerkzaamheden voor telers lastig te plannen. Omdat deze fluctuaties op verschillende bedrijven de neiging hebben om te synchroniseren geven ze ook aanleiding tot ongewenste schommelingen in aanvoer en prijsvorming (Figuur 1.2).

Meer in het algemeen wordt de glastuinbouw geconfronteerd met steeds hogere eisen aan het productieproces, onder andere met betrekking tot CO_2 uitstoot en energie-efficiëntie. In een convenant met de overheid heeft de sector zich verplicht om aanzienlijke efficiëntieverbeteringen te realiseren op dit vlak. Ook de ontwikkelingen op de energiemarkt laten duidelijk zien dat een gezond toekomstperspectief voor de Nederlandse glastuinbouw tuinbouw samenhangt met een vermindering van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen.

Uit een verkennende studie (Buwalda *et al.*, 2005; Van Henten *et al.*, 2006) is gebleken dat teeltsturing op basis van dynamische optimalisatie theoretisch kan leiden tot een gelijkmatig afzetpatroon met behoud van productie, in combinatie met ca 10% energiebesparing. Dit 'principe' zou in dit project getoetst moeten worden.

1.3 Achtergrond van de zettingsgolven bij paprika en het verband met energie

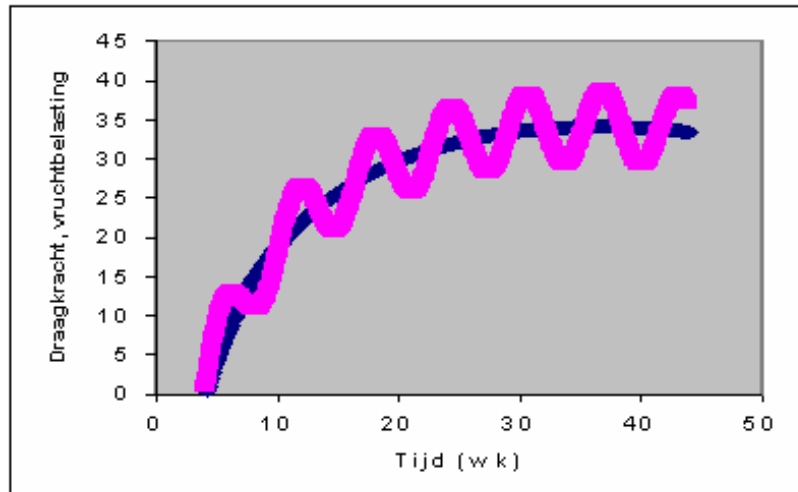


Figuur 1.3. Het gewasmodel berekent de schommeling van de 'fysiologische slinger' in de tijd onder invloed van de aanmaak en verwerking van assimilaten, afhankelijk van de teeltcondities en de actuele plantbelasting (aantal vruchten per leeftijdsklasse).

In dit project wordt een dynamisch gewasmodel gebruikt, dat in staat is gebleken om de bekende oogstfluctuaties van paprika na te rekenen en te voorspellen (Buwalda *et al.*, 2006). Het mechanisme dat bij paprika tot de zettingsgolven of vluchten leidt kan worden beschouwd als een 'Fysiologische slinger' (Figuur 1.3). De slingerbeweging wordt beïnvloed door de toestand van het gewas zelf, maar ook door het kasklimaat. Vooral licht en CO₂ aan de ene kant en temperatuur aan de andere kant hebben invloed. In deze proef wordt niet met assimilatiebelichting gewerkt en om productievermindering te voorkomen wordt er geen licht weg geschermd. Om de zelfde reden wordt in principe ook geen vruchtsnoei toegepast. Temperatuur en CO₂ zijn derhalve de overblijvende factoren waarmee kan worden gestuurd om de vluchten van het gewas te beïnvloeden.

De vruchtzetting bij paprika blijkt een samenspel van vraag en aanbod van assimilaten en de ontwikkelingsnelheid van vruchten en vegetatieve delen. Het produceren van nieuwe vruchten in zettingsgolven is een gevolg van de fundamentele fysiologische eigenschappen van het gewas. De draagkracht van het gewas hangt af van de beschikbaarheid van assimilaten. In de loop van het teeltseizoen ontstaat er een oscillatie van de vruchtbelasting rond de draagkracht (schematisch weergegeven in Figuur 1.4).

Ook het energieverbruik van de teelt wordt sterk door de factoren licht, CO₂ en temperatuur beïnvloed. Door af te wijken van de gangbare teelttemperatuur bleek in kleinschalige experimenten 10-20% op het energieverbruik te kunnen worden bespaard (Buwalda *et al.*, 2003). Paprikatelers in de praktijk blijken echter niet zonder meer geneigd om deze mogelijkheden te benutten, wat waarschijnlijk te maken heeft met onzekerheid over kosten en baten, kansen en risico's (Van den Berg *et al.*, 2001). Op basis van een goed teeltmonitoringsysteem in combinatie met modellen voor kas en gewas kan door het berekenen van prognoses vooraf inzicht worden gegeven in de effecten van klimaatinstellingen op vruchtzetting, productie en energiebehoefte van de teelt. Hiermee zou het voor telers mogelijk worden om de teelt in een gewenste richting te beïnvloeden en tegelijkertijd de meest energiezuinigste opties te kiezen.



Figuur 1.4. Schematisch weergegeven verloop van de draagcapaciteit van het gewas in het teeltseizoen (blauw). De vruchtbelasting (roze) vertoont een schommeling rond de draagcapaciteit.

1.4 De uitdaging in deze proef

Voor de hier gerapporteerde proef is als vraagstuk geformuleerd: 'stuur met behulp van dynamische optimalisatieberekeningen dagelijks het temperatuur-setpoint van de kasklimaatregeling zo dat oogstfluctuaties worden geëlimineerd, waarbij tegelijkertijd het energieverbruik wordt verminderd, zonder dat dit ten koste van de productie gaat'. Deze opgave is ook theoretisch al in de voorstudie (Buwalda *et al.*, 2006) bestudeerd. Er bestaan twee verschillende oplossingsrichtingen: (1) het uitdempen van de fluctuaties binnen één gewas; (2) in meerdere gewassen de fase en uitslag (amplitude) van de fluctuaties zo beheersen dat de oogstpieken elkaar precies afwisselen. In dat geval is de productie van die gewassen samen constant. In het hoofdstuk Materiaal en Methoden wordt in meer detail beschreven hoe dit vraagstuk is uitgewerkt tot een proefopzet, een ICT-structuur en stuurstrategieën.

Welke 'proof' wordt gezocht?

In de originele projectbeschrijving staat als doelstelling geformuleerd om de methode van dynamische optimalisatie te toetsen in een teeltproef. Het is de bedoeling om aan te tonen dat de theoretisch berekende mogelijkheden in een kasproef met paprika inderdaad realiseerbaar zijn. Dat betekent concreet het volgende:

Teeltdoelstelling

- Realiseren van een gelijkmatig oogstpatroon bij paprika, bij minimaal gelijkblijvend productieniveau.

Energiedoelstelling

- Minimaal 10% energiebesparing.

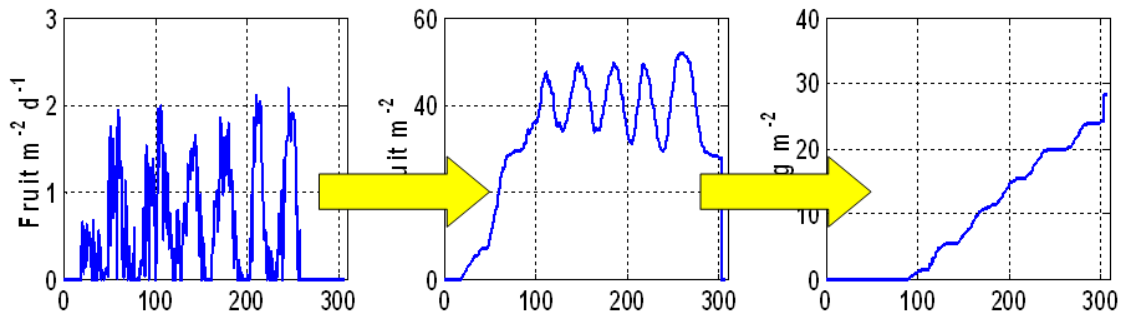
Technische doelstellingen

- Ontwikkelen en experimenteel toetsen van sturing van het teeltproces op basis van een gewasmodel, een klimaatmodel en dynamische optimalisatie.

Nevendoelstellingen

- Substantiële bijdrage aan de meningsvorming, in de sector en in de wetenschappelijke wereld, m.b.t. de toepassingsmogelijkheden van dynamisch optimaliseren van het teeltproces.

2 Materiaal en methoden



Figuur 2.1. Variaties in vruchtzetting (links) en het oogsten van rijpe vruchten (rechts) leiden tot variaties in plantbelasting (midden).

2.1 Stuurstrategieën voor een gelijkmatig afzetpatroon

Het bekende onregelmatige afzetpatroon van paprika ontstaat doordat de vruchtzetting bij dit gewas geen continu proces is. Perioden van sterke vruchtzetting, de zgn. 'vluchten' worden afgewisseld met perioden waarin er nauwelijks nieuwe zetting van vruchten plaatsvindt (Figuur 2.1). Omdat de uitgroeiduur van paprikavruchten tamelijk constant is, zijn de oogstfluctuaties een vrijwel direct gevolg van de zettingsgolven. Het is daardoor in principe mogelijk om de oogstfluctuaties te beheersen door de zettingsgolven te sturen. Voor deze aanpak is in het project inderdaad gekozen. De motivatie hiervoor is als volgt:

- Het gewasmodel dat in dit project is toegepast berekent vruchtzetting afhankelijk van de actuele gewas-toestand en de heersende kasklimaatcondities (licht, CO₂ en temperatuur).
- Regeltechnisch is het gunstig om de 'bron' van de oogstfluctuaties als het aangestuurde proces te kiezen.
- Het resultaat van het proces van vruchtzetting kan direct worden waargenomen door (wekelijks) het aantal nieuw gezette vruchten te tellen.
- De telresultaten kunnen op hun beurt weer worden gebruikt om de gewas-toestandsmatrix in het model te corrigeren.

Het feit dat deze verschillende aspecten zo netjes elkaar grijpen kan bijdragen aan de beheersbaarheid van het te testen systeem.

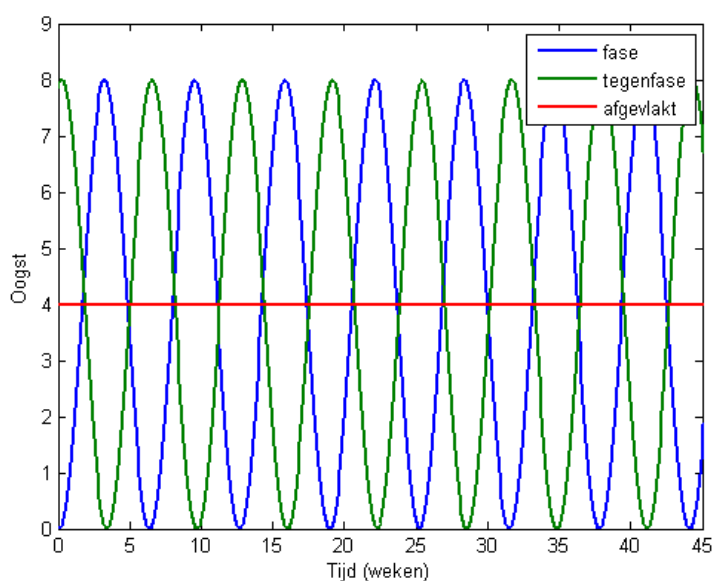
De gestelde uitdaging is uitgewerkt tot het optimalisatievraagstuk dat hieronder staat geformuleerd. Deze formulering is onafhankelijk van welk verloop van de vruchtzetting precies is gewenst.

- (1) Gegeven de kasklimaatinstellingen en de lokale weekweersverwachting, bereken met het kasklimaat / energie-model KASPRO voor de komende week per dag de realiseerbare minimum- en maximumtemperatuur, relaties tussen etmaaltemperatuur en (stook)energiebehoefte en tussen etmaaltemperatuur en CO₂-gehalte tijdens de lichtperiode. Bereken deze relaties ook voor de rest van de teeltperiode op basis van langjarig gemiddeld weer.
- (2) Gegeven de huidige gewas-toestand, bereken het temperatuurverloop tot het eind van de teelt (met bijbehorende CO₂-waarden) dat (a) binnen een bepaalde bandbreedte ligt, en dat (b) zal resulteren in een verloop van de vruchtzetting die zo dicht mogelijk bij het gewenste verloop ligt, en (c) waarbij het energieverbruik minimaal is.
- (3) Herhaal deze berekening dagelijks en geef de berekende temperatuur-setpoints door aan de klimaatcomputer.
- (4) Tel wekelijks de gerealiseerde vruchtzetting in het gewas en corrigeer zonedig de berekende gewas-toestand in het model.

Er zijn twee verschillende methoden denkbaar om de oogstfluctuaties aan te pakken.

- De eerste en misschien meest voor de hand liggende is om het gewas zo te sturen dat er wekelijks een constant aantal vruchten zetten. Als er gedurende 35 weken wordt geoogst en het totaal aantal te oogsten vruchten in een teelt ligt in de buurt van 140 dan zou een constante vruchtzetting van 4 per week tot een normaal belast gewas leiden. Deze behandeling noemen we 'afgevlakt' (Figuur 2.2 rode lijn).
- De tweede methode is om in twee afzonderlijk te besturen afdelingen de zettingsgolven zo uit elkaar te sturen dat ze elkaar precies afwisselen, dus met elkaar in tegenfase zijn (Figuur 2.2 groene en blauwe lijn). De productie van de twee afdelingen samen is dan gelijkmatig.

In beide gevallen is de arbeidsverdeling gelijkmatig: in het geval van afgevlakte zettingsgolven kan er elke week op het hele bedrijf worden geoogst; in het geval van tegenfase wordt afwisselend in de ene en de andere afdeling geoogst. De laatste optie heeft volgens telers het voordeel dat het personeel bij het oogsten altijd maar de helft van de paden in hoeft te lopen en minder hoeft te zoeken.



Figuur 2.2. Een gelijkmatig productiepatroon kan in principe op verschillende manieren ontstaan: door te zorgen voor een gelijkmatige vruchtzetting binnen één afdeling, of door de zettingsgolven in twee verschillende afdelingen zo uit fase te sturen dat de productiepieken elkaar precies afwisselen (blauwe en groene lijn: fase en tegenfase). In dat geval is de productie van de twee afdelingen samen gelijkmatig.

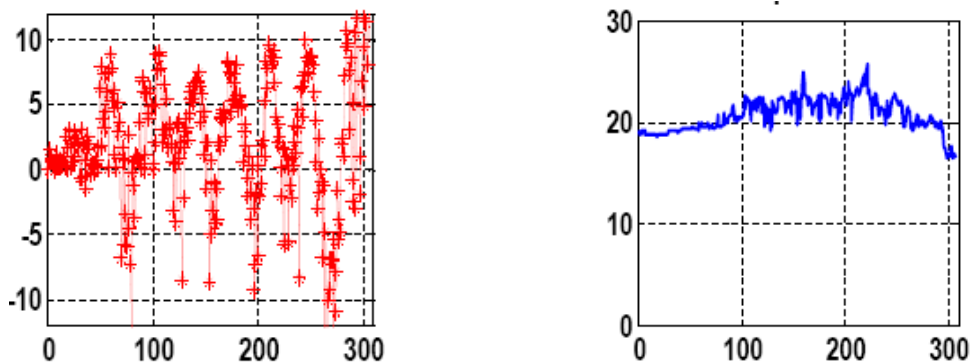
2.2 Het modelmatig sturen van de zettingsgolven

De veronderstelde basis voor de dynamiek van de vruchtzetting bij paprika is een fysiologische slingerbeweging (Buwalda *et al.*, 2006 a, b). Er is een model nodig (zie Figuur 1.3) om inzicht te krijgen in het verloop van de zettingsgolven, omdat die slingerbeweging niet aan de buitenkant van de plant zichtbaar of meetbaar is. Verder is niet alleen informatie nodig over de actuele toestand, maar ook over het verloop in de toekomst (zie ook paragraaf 1.1).

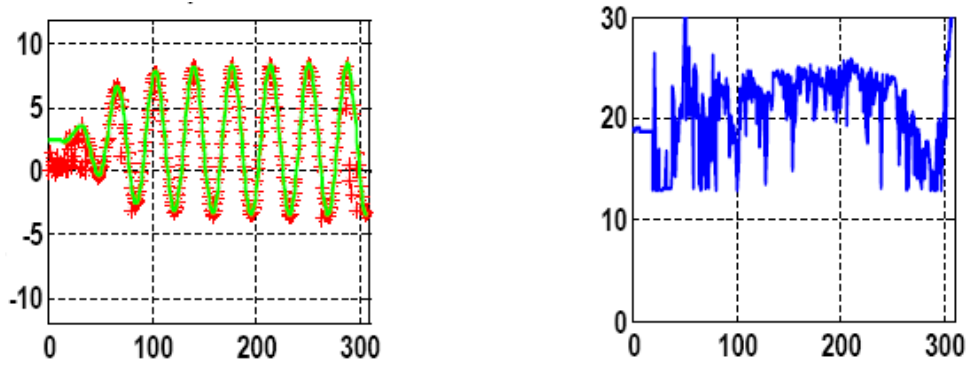
In Figuur 2.3a is het berekende verloop van deze schommeling te zien (links) onder normale, ongestuurde teeltomstandigheden (rechts het temperatuurverloop geregistreerd op een commercieel paprikabedrijf in 2004). De etmaaltemperatuur varieert tussen 19 en 24 °C afhankelijk van de instraling. De schommelbeweging is redelijk goed te herkennen, maar is niet helemaal regelmatig. In dit geval rekent het model dus op basis van geregistreerde licht- en temperatuurgegevens met de teelt mee. De vraag is dat geval: hoe verloopt de schommeling bij deze licht- en temperaturomstandigheden, en komt de vruchtzetting die het model berekent dan overeen met de geregistreeerde?

Het stuurprincipe dat in het hier gerapporteerde project is toegepast is gebaseerd op een omkering van die vraag: als ik bij mijn gewas met een gegeven gewastoeestand bij een bepaald stralingsniveau een gewenste uitslag van de schommeling wil krijgen, welke temperatuur is daarvoor dan nodig? Omdat de vruchtzetting door deze schommeling wordt bepaald is op deze manier de zetting in principe te sturen door de berekende temperatuur die bij de nagestreefde uitslag hoort op de klimaatcomputer in te stellen als streefwaarde. Door een tijdstraject van streefwaarden op te stellen en per dag de - door het model berekende - bijbehorende temperatuur in te stellen op de klimaatcomputer is dus een modelgestuurd verloop van de vruchtzetting te realiseren. Uiteraard wordt hierbij rekening gehouden met het effect van de temperatuurinstelling op de realiseerbare CO₂-concentratie in de kas bij een gegeven CO₂-beschikbaarheid en niveau van instraling. Voor het berekenen van de stookbehoefte en kasklimaat in relatie tot kaseigenschappen, klimaatinstellingen en weersomstandigheden is het model KASPRO gebruikt (De Zwart, 1996). Voor het berekenen van vruchtzetting, groei en productie van paprika is het model Papigrow gebruikt (Buwalda *et al.*, 2007). De lokale weekweersverwachting werd berekend door de meteorologische modellen van Meteoconsult.

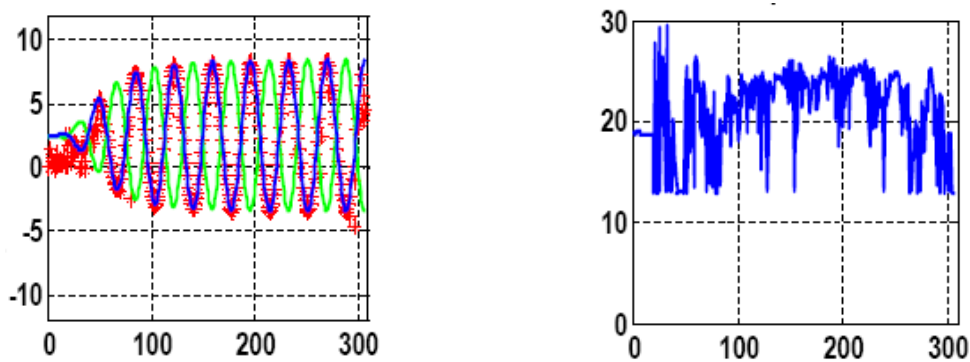
In Figuur 2.3b (links) is in het groen een dergelijk tijdstraject van streefwaarden te zien (referentietraject). Het lijkt wat betreft frequentie en uitslag op het verloop in Figuur 2.3a, maar dan netjes regelmatig gemaakt. Het is aan te nemen dat de frequentie in Figuur 2.3a, die met de frequentie van de opeenvolging van zettingsgolven in een praktijkteelt overeenkomt, de 'natuurlijke frequentie' van dit paprikaras weerspiegelt. Het lijkt verstandig om met het referentietraject niet te ver af te wijken van dit patroon. In Figuur 2.3b (rechts) is het berekende temperatuurtraject te zien dat overeenkomt met het volgen van dit referentietraject. Te zien is dat de temperatuur veel sterker varieert dan in een conventionele kas. Uit eerdere proeven is gebleken dat het gewas paprika dit soort temperatuurbandbreedte uitstekend kan verdragen en dat het geen effecten heeft op productieniveau of productkwaliteit (Buwalda *et al.*, 2003). De toelaatbare temperaturen zijn in de berekening begrensd tussen 13 en 30°C. Uit de grafiek blijkt dat, behalve in de eerste weken, het model berekent dat het referentiesignaal precies kan worden gevolgd (rode sterretjes). Figuur 2.3c laat zien dat het volgen van een ander referentiesignaal ook mogelijk is. Bij het volgen van dit signaal hoort een ander temperatuurverloop. Dit referentiesignaal is 180° in fase verschoven ten opzichte van het signaal in Figuur 2.3b (tegenfase).



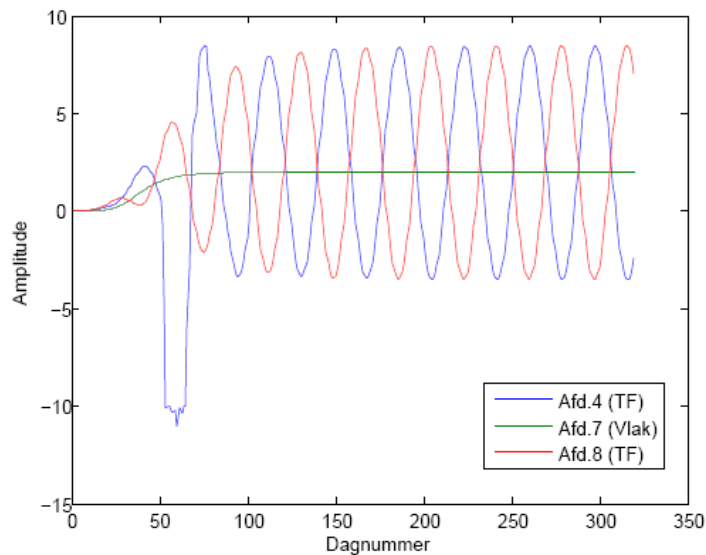
Figuur 2.3a. De schommeling van het feedbacksignaal van de vruchten rond de draagcapaciteit van het gewas in de tijd onder normale, ongestuurde teeltomstandigheden. Rechts het temperatuurverloop geregistreerd op een commercieel paprikabedrijf in 2004.



Figuur 2.3b. Een referentietraject voor het feedbacksignaal van de vruchten (links, groen) en de berekende temperaturen (rechts) die nodig zijn om het gewasmodel dit traject te laten volgen (links, rode sterretjes).



Figuur 2.3c. Een tweede referentietraject (links, blauw) in tegenfase met het traject in Figuur 8b (groen). Rechts de temperaturen die worden berekend om dit tegenfasetraject te volgen (links, rode sterretjes).



Figuur 2.4. Referentielijnen (streefwaarden) voor de optimalisator voor de twee afdelingen in tegenfase (TF; rood, blauw) en voor de afdeling met constante zetting (Vlak, groen). De referentielijn voor afdeling 4 (blauw) is in de periode dag 50 80 aangepast om de zetting uit fase te brengen.

Bij het vertalen van dit stuurprincipe in een werkelijk referentiesignaal voor het model (Figuur 2.4) hebben de volgende overwegingen een rol gespeeld: in een 'normale' paprikateelt met een gangbaar ras rood als 'Ferrari' ligt het gemiddelde van de vruchtzetting op ca. 4 vruchten per m² per week. Met het gewasmodel is nagegaan welke uitslag van de 'fysiologische slinger' er nodig is om dagelijks een vruchtzetting van 0.57 vruchten per m² te krijgen. Bij welke temperatuur die uitslag optreedt, hangt af van de dagelijkse lichthoeveelheid, de CO₂-concentratie en de toestand van het gewas. Dit streefniveau van vruchtzetting werd niet direct vanaf de start van de teelt ingezet, omdat een jong gewas nog niet in staat is om een dergelijke hoeveelheid vruchten te dragen. Er werd daarom een geleidelijke overgang ingesteld van 0 naar de uiteindelijke streefwaarde over een periode van 100 dagen. Om de zelfde reden is voor het sturen van de zetting in fase en tegenfase de uitslag van de fysiologische slinger geleidelijk opgevoerd tot de maximale waarde gedurende de eerste 100 dagen. Omdat het systeem pas in werking werd gesteld na een periode van proefdraaien was in de afdelingen met fase en tegenfase de zetting al spontaan op gang gekomen. Omdat deze zetting in beide afdelingen de zelfde fase had, moest in een van de afdelingen een vrij extreme sturing worden toegepast om het gewenste faseverschil op te wekken (zie Figuur 2.4 blauwe lijn van dag 50-80).

2.3 Kas en teelt

Om de optimaliserende teeltsturing te kunnen testen is in 2006 in Naaldwijk een proef opgezet, waarin werd geprobeerd om bovenstaande doelstelling te realiseren in de kas. De proef werd uitgevoerd in 4 afdelingen van 120 m² elk in het kascomplex 103 van de vestiging Naaldwijk van het toenmalige PPO Glastuinbouw Proefgewassen. De kassen waren van het Venlo-type met standaard buisverwarming (buis/rail en bovennet), CO₂-dosering en nokluchting. Er was geen belichting, verneveling of koeling. De oriëntatie van de nok en van de goten was noord-zuid. Drie van de vier afdelingen lagen aan de zuidzijde van de corridor en hadden ook een buitengevel aan de zuidzijde, terwijl de vierde afdeling aan de noordkant was gelegen, waarbij ook de buitengevel zich aan de noordkant bevond. Deze opstelling was niet ideaal wat betreft onderlinge vergelijkbaarheid wat betreft licht en temperatuur. Toch is voor deze indeling gekozen omdat dit de enige beschikbare afdelingen waren die werden aangestuurd door de klimaatcomputer die technisch met het stuursysteem kon worden gekoppeld.

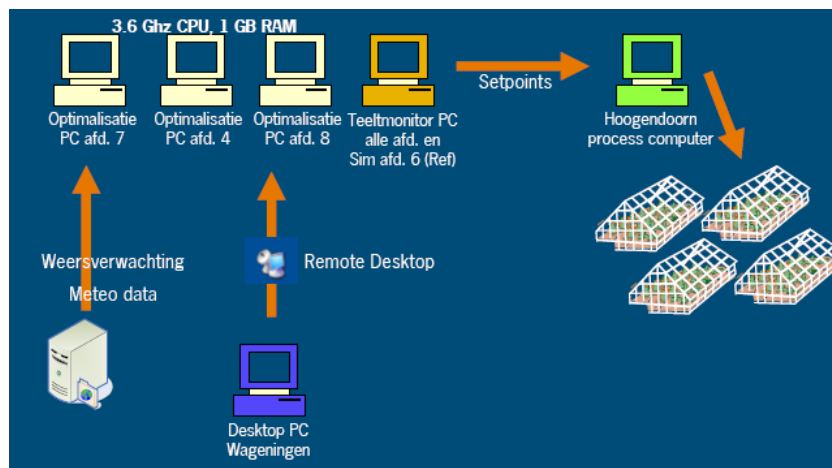
Bij het indelen van de 4 behandelingen hebben de volgende overwegingen een rol gespeeld:

- (1) fase en tegenfase moeten zo veel mogelijk vergelijkbaar zijn qua teeltcondities;
- (2) de referentiebehandeling moet direct vergelijkbaar zijn met minimaal één van de behandelingen.

Er is maar één voor de hand liggende indeling die aan beide criteria voldoet, n.l. fase en tegenfase aan weerskanten van de referentiekas. De behandeling 'afvlakken' bleef daarbij over voor de afdeling aan de noordzijde van de corridor.

2.4 Technische uitvoering

Per modelmatig gestuurde afdeling was er een gespecialiseerde PC die routinematig de optimalisaties uitvoerde. Daarnaast was er een referentieafdeling waarin de teelt alleen werd gemonitord. De PC's waren onderling verbonden via het netwerk van Wageningen UR. De berekende setpoints werden doorgegeven aan een speciale versie van een Hoogendoorn Economic procescomputer, die het klimaat in de vier afdelingen regelde. Anders dan de standaardversie had deze procescomputer de mogelijkheid om op basis van extern bepaalde temperatuursetpoints het klimaat te regelen. De berekende temperatuursetpoints werden door de optimalisator klaargezet en door de Economic overgenomen. De Economic leverde informatie over gerealiseerd klimaat en de lokale weerweersverwachting aan de computers van het besturingssysteem. Vanaf elke computer in het netwerk van Wageningen UR kon via een Remote desktopverbinding worden ingelogd op de computers van het besturingssysteem.



Figuur 2.5. Technische opzet van het besturingssysteem.

Voor de geoptimaliseerde aansturing van het kasklimaat is een regelsysteem gebouwd, dat bestaat uit de volgende elementen (voor een gedetailleerd schema zie Bijlage I):

- een gewasmodel (RefMod 2.5; ook wel bekend als Papigrow);
- een kasmodel (KASPRO);
- een optimalisator (FFSQP 3.7b);
- een doelfunctie;
- een teeltmonitor waarmee modelberekeningen en de realisatie daarvan zichtbaar gemaakt konden worden, en waarmee de toestandsmatrix van het gewas in het gewasmodel kon worden gecorrigeerd aan de hand van verschillen tussen berekende en waargenomen vruchtzetting;
- het locale week-weerbericht Meteoscope, opgesteld door Meteoconsult en geleverd door Hoogendoorn;
- IT infrastructuur;
- een procescomputer (Hoogendoorn Economic NT), uitgerust met de gebruikelijke sensoren (o.a. weertoren, meetbox) en actuatoren (gestuurde regelkleppen voor verwarming, fertigatie en CO₂-dosering, motoren voor scherm- en raamstandregeling);
- databases en uitwisselingsprotocollen.

Overzicht clusters per week

week	berekend aantal	correctie berekend aantal	aantal geregis- treerd	correctie geregis- treerd	ontwik- kelings- stadium
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
5	5	0	4	0	0.058
4	5.2	0	4	0	0.16
3	2	0	2	0	0.26
2	0	0	0	0	0

Correcties verwerk... Sluit dit venster

Figuur 2.6. De gebruikersinterface van het systeem waarmee wekelijks aan de hand van gewastellingen de berekende vruchtzetting kon worden gecorrigeerd.

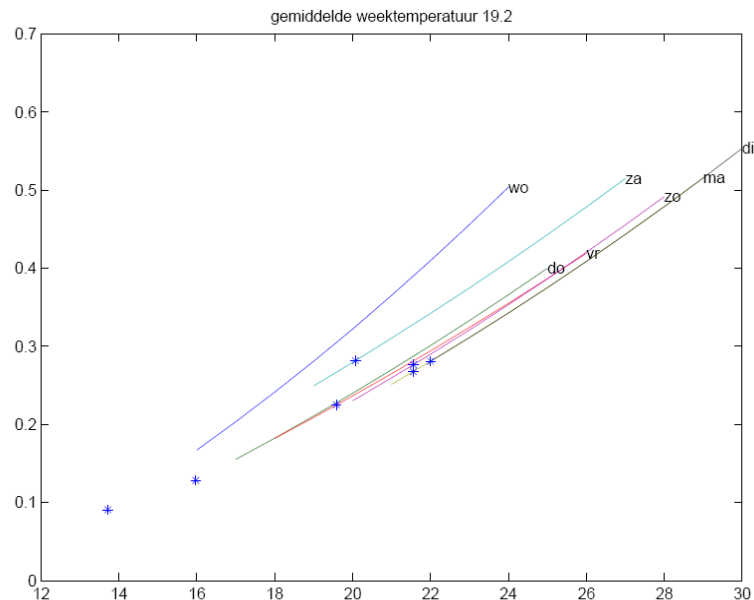
3 Resultaten

De stuurproef heeft twee soorten resultaten opgeleverd. Een deel heeft te maken met de ervaring opgedaan bij het ontwikkelen en toepassen van het optimaliserende besturingssysteem, het andere deel met het de resultaten van de proef zelf: het gewas (zettingsgolven en productie) en het energieverbruik.

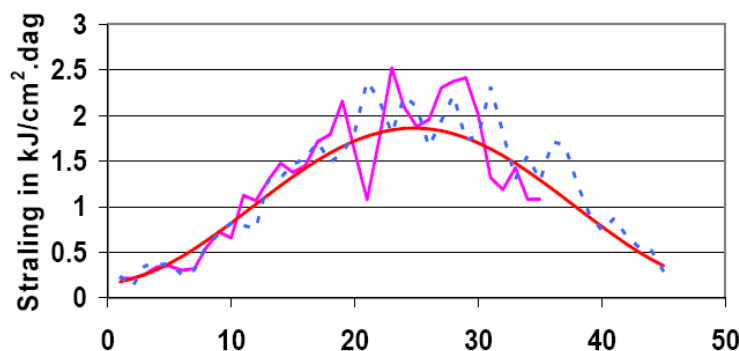
3.1 Het toepassen van dynamische optimalisatie

Kern van het systeem is een set rekenmodellen, waarmee de relatie tussen kasklimaat en energieverbruik kan worden berekend afhankelijk van buitenklimaat en de instellingen van de klimaatregelaar, met daarin het gedrag van het gewas afhankelijk van het kasklimaat. Het buitenklimaat is een gegeven dat niet kan worden beïnvloed, maar wat bepalend is voor wat er realiseerbaar is aan kasklimaat en welke energiekosten daaraan gekoppeld zijn. Het klimaat is weer bepalend voor het gewas. Zoals uitgelegd in paragraaf 1.1 neemt het aantal mogelijke uitkomsten van stuuracties enorm snel toe naarmate verder de toekomst in wordt gekeken. In dagelijks herhaalde berekeningen worden deze mogelijke uitkomsten gewogen aan de hand van de doelfunctie, en de uitkomst die het best aan het doel beantwoordt wordt aan de klimaatregelaar doorgegeven.

De procedure berekent dus een optimaal stuurtraject dat in de toekomst moet worden gerealiseerd, gebaseerd op een verwachting van het toekomstig verloop van het buitenklimaat. De waarde van het berekende stuurtraject is sterk afhankelijk van de kwaliteit van de prognose van het buitenklimaat en van de nauwkeurigheid van de kasklimaat- en gewasberekeningen. Het is dus van groot belang om de uitkomst van deze berekeningen in de loop van de teelt kritisch te blijven volgen en eventuele afwijkingen gaandeweg te corrigeren.



Figuur 3.1. Relatie tussen de etmaaltemperatuur en de energiebehoefte. Deze relatie verschilt per dag afhankelijk van o.a. buitentemperatuur, instraling en windsnelheid. Een voorbeeld van 6 maart 2006 laat zien dat in de betreffende week vooral de woensdag een dure stookdag is. De optimalisator blijkt op die dag inderdaad een lage etmaaltemperatuur te hebben gekozen, zoals te zien is aan de plaatsing van de sterretjes in de grafiek.



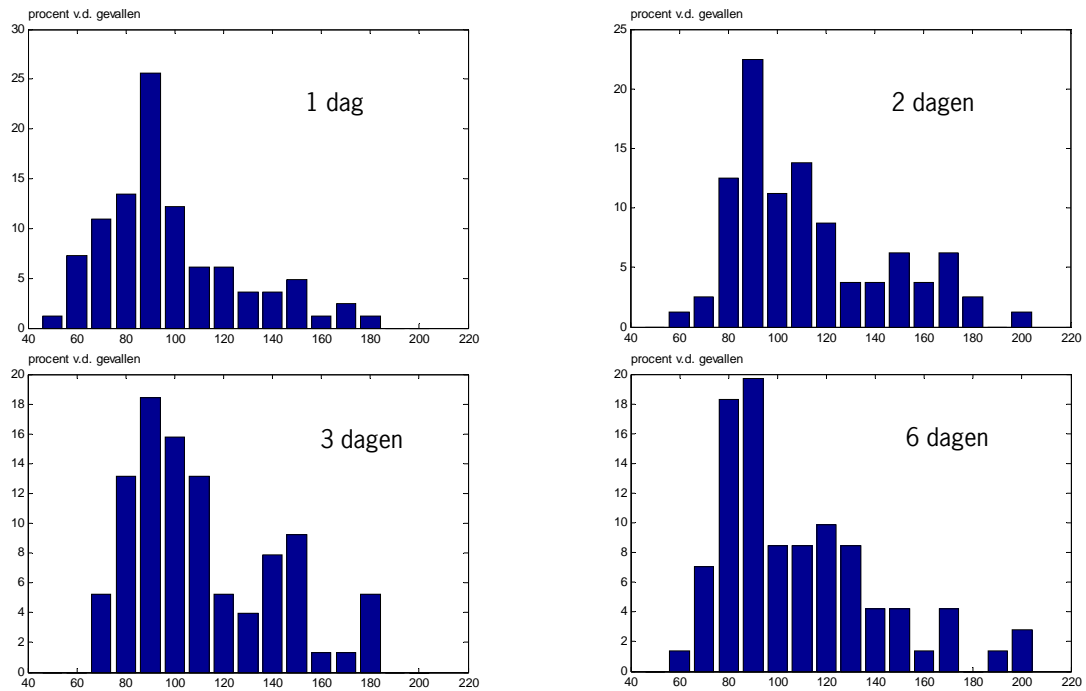
Figuur 3.2. Verloop van de dagelijkse globale straling ($\text{kJ cm}^{-2} \text{d}^{-1}$) in 2006 (roze lijn). Ter vergelijking het langjarig gemiddelde (rode lijn) en het stralingsverloop in 2004 (blauw gestreept). Op de horizontale as staat de tijd in weken.

3.1.1 Weersomstandigheden en kasklimaatberekeningen

Energieverbruik en zetting worden beide sterk beïnvloed door licht en temperatuur. Ook de CO_2 -concentratie in de kaslucht is een belangrijke invloedfactor, die wordt beïnvloed door de beschikbaarheid van CO_2 uit rookgassen en het ventilatiedebiet. Hoeveel er moet worden geventileerd of gestookt om een streef temperatuur te realiseren is weer afhankelijk van het lichtniveau. De temperatuur die de optimalisator kiest bepaalt dus afhankelijk van het lichtniveau ook het energieverbruik én de CO_2 -concentratie. Deze complexe berekening werd dagelijks berekend door het model KASPRO op basis van een langjarig gemiddelde weersverwachting en het lokale weekweerbericht dat dagelijks van Internet werd gedownload. Op basis van deze informatie werd voor de eerstkomende zes dagen, rekening houdend met de eigenschappen en instellingen van de proefkassen, een specifieke berekening gemaakt van de realiseerbare minimum- en maximumtemperatuur, de CO_2 -concentraties die bij een gegeven dosering horen bij de temperaturen in dit traject, en de bijbehorende stookbehoefte. Binnen deze bandbreedte moest de optimalisator per dag een temperatuur kiezen en op basis daarvan het optimale stuurtraject berekenen (Figuur 3.1).

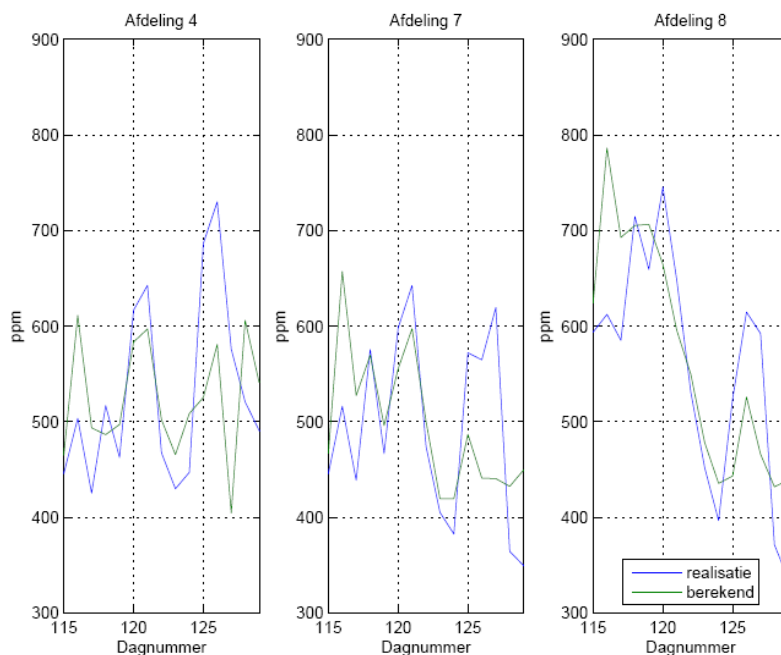
3.1.2 Klimaat- en energieberekeningen

De lichtverwachting is dus een cruciaal gegeven bij het berekenen van geoptimaliseerde stuurtrajecten. Voor de eerste 3 maanden die het stuurprogramma heeft gedraaid is bekeken in hoeverre de verwachte dagelijkse lichtsom overeen kwam met de gerealiseerde. Omdat het een verwachting was voor 7 dagen vooruit, is daarbij onderscheid gemaakt tussen de verwachting voor de komende dag, en die voor over 1, 2 en 5 dagen later (Figuur 3.3). Opvallend is dat in de periode dat de sturing goed heeft gewerkt (week 7-19, 2006) de verwachting van de dagelijkse lichtsom daags tevoren relatief vaak te laag was, terwijl prognoses verder in de toekomst juist vaker hoger waren dan het werkelijke niveau. In de proef gaf dit effect regelmatig aanleiding tot een soort uitgesteld stookgedrag, omdat de optimalisator steeds verwachtte dat later in de week de condities om te stoken gunstiger zouden zijn. Verder viel het gerealiseerde energieverbruik daardoor vaak lager uit dan verwacht (Figuur 3.7). Naarmate het systeem geleidelijk beter werd ingeregeld en de parameterisering van de klimaatberekeningen is geoptimaliseerd, werd een steeds betere overeenstemming bereikt tussen verwachting en realisatie (zie bijvoorbeeld Figuur 3.7 vanaf dagnr. 80) wat betreft temperatuur, CO_2 gedurende de lichtperiode en energieverbruik (zie ook Figuur 3.4 en Figuur 3.5).

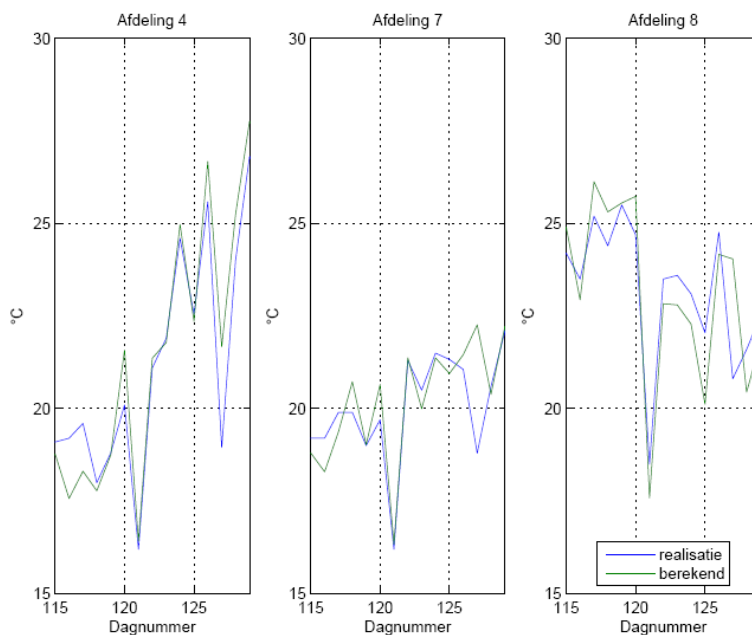


*Figuur 3.3. Overeenkomst tussen de verwachte en gerealiseerde dagelijkse stralingssom, daags te voren (links boven), 2 dagen tevoren (rechts boven), 3 dagen tevoren (links onder) en 6 dagen tevoren (rechts onder). De overeenkomst is berekend als (verwachte straling / gerealiseerde straling) * 100% en uitgezet als percentage van het totale aantal gevallen in klassen van 10% breed (frequentieverdeling).*

De ervaringen met het toepassen van het Kaspro-model in deze softwareomgeving waren in technisch opzicht gunstig. Wel bleek het uiterst belangrijk om de instellingen van het model goed te kalibreren. Het model Kaspro rekent op basis van realistische, grote productiekassen. De fysica van kleine proefkassen is veel ingewikkelder door allerlei schaal- en randeffecten. Om deze reden bleken uiteindelijk op enkele punten empirische kalibratie stappen nodig. Het zelfde gold voor de geconstateerde systematische afwijking in de weersverwachting, waarvoor ook een empirische correctiefactor bleek te moeten worden toegepast. Door de voorspellingen systematisch te vergelijken met de gerealiseerde waarden en op basis van de verschillen de instellingen te optimaliseren bleek het mogelijk om, voor het huidige doel, ruim voldoende nauwkeurigheid te bereiken. Bij eventuele praktische toepassing in de toekomst van Kaspro of een vergelijkbaar model in dit type applicaties hangt dus veel af van de discipline van het juist instellen van de parameters, het invoeren van zuivere sensorgegevens, en het systematisch vergelijken van voorspellingen en realisaties.

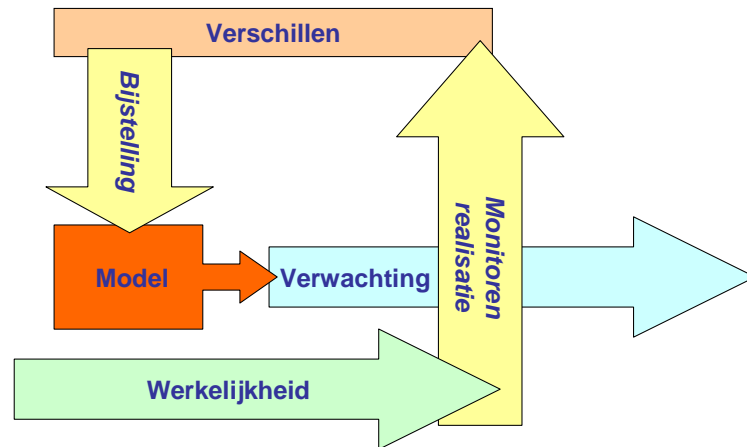


Figuur 3.4. Berekende (groen) en gerealiseerde (blauw) gemiddelde concentratie CO₂ in de kaslucht (ppm) tussen zonsopgang en zonsondergang. Behandelingen: afdeling 4 en 8 tegenfase, afdeling 7 gelijkmatige zetting binnen één afdeling.

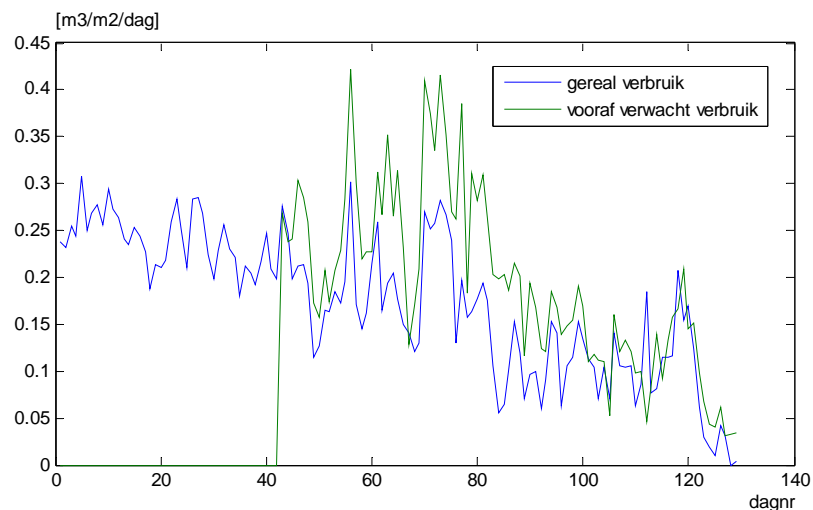


Figuur 3.5. Berekende (groen) en gerealiseerde (blauw) gemiddelde kasluchttemperatuur per etmaal (°C).

De grafieken van berekende en gerealiseerde waarden van kastemperatuur en CO₂ laten zien dat de prognoses van het klimaatmodel behoorlijk accuraat waren (Figuur 3.4 en 3.5). Ook hier geldt dat het enige tijd heeft gekost voordat het systeem goed was ingeregeld. De weergegeven periode valt in de periode van dag 95-130 waarin het energieverbruik ook relatief nauwkeurig werd voorspeld (Figuur 3.7). Gedeeltelijk zijn de goede prognoses te danken aan het anticiperen op de systematische afwijking in de weersverwachting.



Figuur 3.6. Door systematisch de berekende verwachting te vergelijken met de realisatie komen verschillen aan het licht. Door op grond van deze verschillen de het model bij te stellen kan de kwaliteit van de verachtingen geleidelijk worden verbeterd. Een treffend voorbeeld van dit proces is te vinden in Figuur 3.7, waar vanaf dag 80 de prognose van het gasverbruik geleidelijk werd verbeterd.



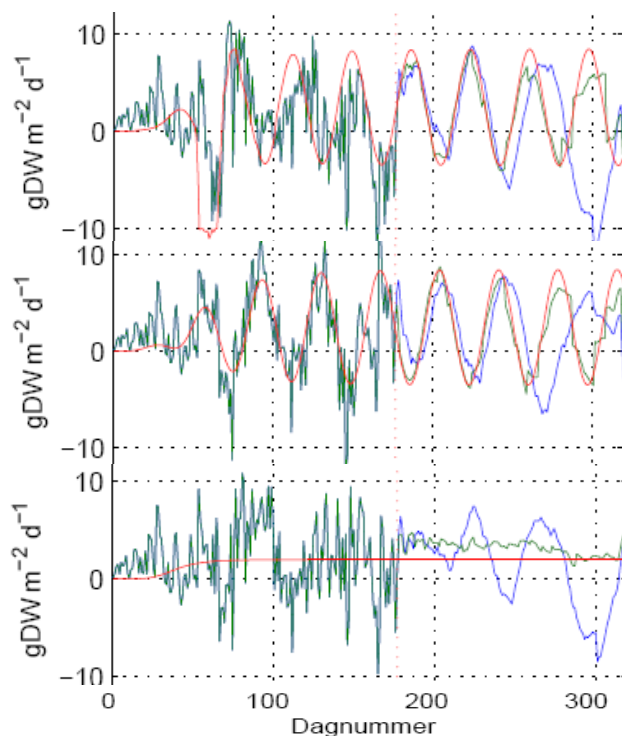
Figuur 3.7. Vergelijking vooraf berekend (groen) en gerealiseerd (blauw) gasverbruik in $m^3 m^{-2} d^{-1}$.

3.1.3 Sturgedrag en het volgen van de referentielijnen

Figuur 3.8 laat het verloop van de sturing zien in de drie geoptimaliseerde afdelingen. In de bovenste grafiek is te zien dat rond dag 60 een sterk negatieve amplitude is ingesteld om een faseverschil met de tweede afdeling op te wekken. In het verdere verloop is te zien dat dit grotendeels is gelukt, maar dat de realisatie toch duidelijk minder goed is geweest dan in de tweede afdeling, waar het gewas de streeflijn aanzienlijk preciezer heeft gevolgd. In de derde afdeling is getracht een constante vruchtzetting te realiseren. Rond dag 100 bleek in deze kas de kalibratie van de kastransmissie niet te kloppen. Nadat deze was gecorrigeerd is het gedurende zeven opeenvolgende weken gelukt om een tamelijk constante amplitude van rond de 4 vruchten per m^2 per week te realiseren.

Rond dag 150 en dag 165 was het weer relatief donker en warm, en bleek het in geen van de drie afdelingen mogelijk om nagestreefde waarde te halen. Ook voor de niet-gestuurde afdeling werd in die periode berekend dat het gewas uit balans was.

De blauwe lijn in Figuur 3.8 laat zien dat oscilleren het natuurlijke gedrag is van dit systeem. Wanneer je stopt met sturen dan zouden de oscillaties gewoon doorgaan. Het oscilleren geeft het systeem ook een zekere eigen stabiliteit. Het afvlakken blijft een moeilijke opgave. Zodra je zou stoppen met sturen komen er onmiddellijk oscillaties op gang (onderste grafiek, blauwe lijn). Ook sterk wisselende weerscondities zorgen voor oscillaties. Voor de praktijk lijkt vlaktrekken binnen één afdeling daarom een minder geschikte strategie dan het toelaten van oscillaties waarbij wel zettingsgolven worden toegestaan en alleen wordt gestreefd naar beheersing van de fase.



Figuur 3.8. Het stuurgedrag van de optimalisator in 3 verschillende afdelingen. Boven en midden: twee afdelingen met zettingsgolven in tegenfase. Onder: afdeling waarin werd gestreefd naar een constant aantal gezette vruchten per week.

De rode lijn geeft het tijdsverloop weer van de nagestreefde amplitude van de 'fysiologische slinger' die in het gewasmodel de zettingsgolven veroorzaakt. De groene lijnen geven de gerealiseerde amplitude aan. De blauwe lijn geeft een prognose van het verloop van de amplitude wanneer vanaf de huidige dag een conventionele klimaatregeling zou worden ingesteld. In deze plaatjes is gestuurd t/m dag 177 (26 juni 2006).

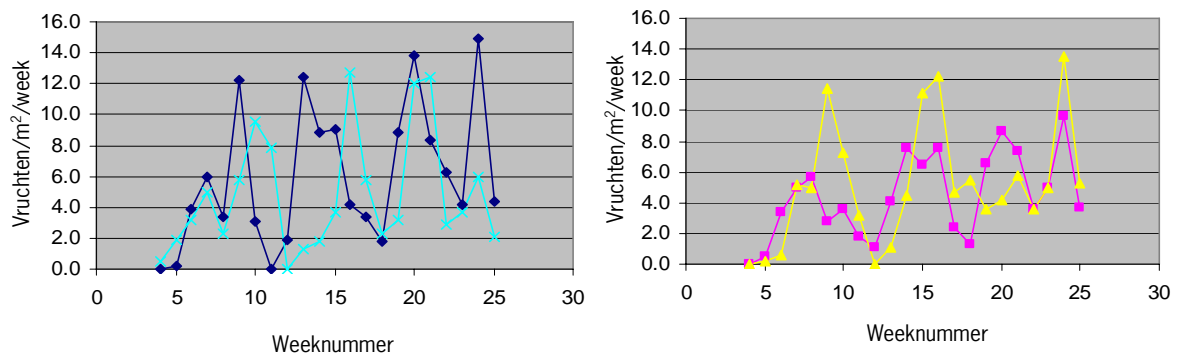
3.1.4 Technisch functioneren van het systeem

Het optimalisatiesysteem heeft, in de periode half februari - half augustus 2006, technisch robuust gedraaid. Het systeem kon in principe volledig autonoom draaien en berekende netjes elke dag bijgestelde optimale stuurtrajecten. Voor het technisch functioneren was het systeem niet afhankelijk van correcties of bijstellingen van de kalibratie van de modellen. In de loop van de proef is het systeem maar één keer vastgelopen, toen bij de overgang van winter naar zomertijd bleek dat er in het taakbeheer een programmeerfoutje was gemaakt. In augustus trad er een storing op in één van de klimaatcomputers waarmee het optimalisatiesysteem meetwaarden, stook- en luchttingssetpoints uitwisselde. Hierdoor konden geen correcte klimaatgegevens meer worden doorgegeven aan de optimalisator, waardoor het niet langer zinvol was om door te gaan met sturen. Toen bleek dat de datacommunicatie niet snel kon worden hersteld is besloten om de proef te stoppen. Deze beslissing werd dus genomen als gevolg van een externe oorzaak; het systeem zelf heeft al die tijd stabiel en technisch betrouwbaar gefunctioneerd.

3.2 Resultaten van de stuurproef

3.2.1 Zettingsgolven

Uit de gewastellingen blijkt dat in twee afdelingen 'Fase' en 'Tegenfase' de zettingsgolven uit fase gestuurd werden (Figuur 3.9 boven) terwijl in de derde afdeling gedurende 7 weken een zetting van ongeveer 4 vruchten per week werd gerealiseerd (Figuur 3.9 onder). De stuuracties zijn gestart in week 7. Vanaf week 9 worden de verschillen zichtbaar. Hierbij moet worden opgemerkt dat een de nieuw gezette vruchtjes eerst een bepaalde minimumgrootte (ca. 12 mm) moeten hebben bereikt voordat ze worden meegeteld. Er kunnen dus enkele dagen verlopen tussen het feitelijke moment van vruchtzetten en het moment van tellen. Hierbij komt het feit dat er maar één keer per week werd geteld. Vruchtjes die bijvoorbeeld 1 dag na een teldag de minimumgrootte bereikten, werden zodoende pas 6 dagen later geteld. Een curieus effect dat aan het licht kwam tijdens de periode van 7 weken met een constante zetting was dat bleek dat steeds een willekeurige vrucht dominant werd en de groei van andere vruchten onderdrukte. Op stengels waar een jonge vrucht dominant werd bleven vruchten op oudere oksels klein en groeiden niet uit. Deze reactie verschilde sterk van het resultaat van eerdere experimenten met parthenocarpe (zaadloze) vruchten, die van nature geen zettingsgolven vertonen (Heuvelink en Körner, 2001). Kennelijk is het zaad zowel de bron van dominantie als de oorzaak van de zettingsgolven. Dit effect vormt een tweede reden waarom het sturen op een constante vruchtzetting voor de praktijk geen geschikte optie vormt.



Figuur 3.9. Getelde vruchtzetting (vruchten per m² per week) in de twee afdelingen in tegenfase (boven) en in de afdeling waarin werd gestreefd naar een constante vruchtzetting (onder; gele lijn). De roze lijn geeft de zetting weer in de referentieafdeling waar op advies van een teler het kasklimaat met behulp van een conventionele klimaatcomputer werd geregeld.

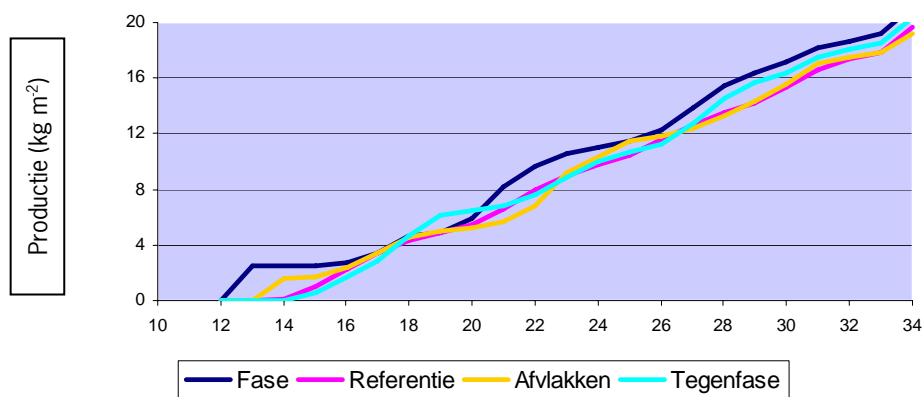
3.2.2 Productie

De productie in de tegenfase-gestuurde afdelingen (Figuur 3.10, lichtblauw, donkerblauw) lag iets hoger dan in de referentieafdeling, terwijl die in de vlak gestuurde afdeling (Figuur 3.10, geel) gelijk was aan de referentiebehandeling (Figuur 3.10, lila). Tegenover de hogere productie stond dat de vruchten in de alle gestuurde afdelingen gemiddeld wat lichter waren dan in de referentiebehandeling (Figuur 3.11). Dit werd waarschijnlijk veroorzaakt door de plantbelasting die in alle gestuurde afdelingen hoger was dan in de referentieafdeling (Tabel 1). De adviserende teler was van oordeel dat een plantbelasting van rond de 35 vruchten per m² in de relatief donkere kasjes het meest wenselijke niveau was om voldoende grofheid te houden en te voorkomen dat het gewas overbelast zou raken. Het lage gemiddeld vruchtgewicht van de oogst in de gestuurde afdelingen is in overeenstemming met deze inschatting.

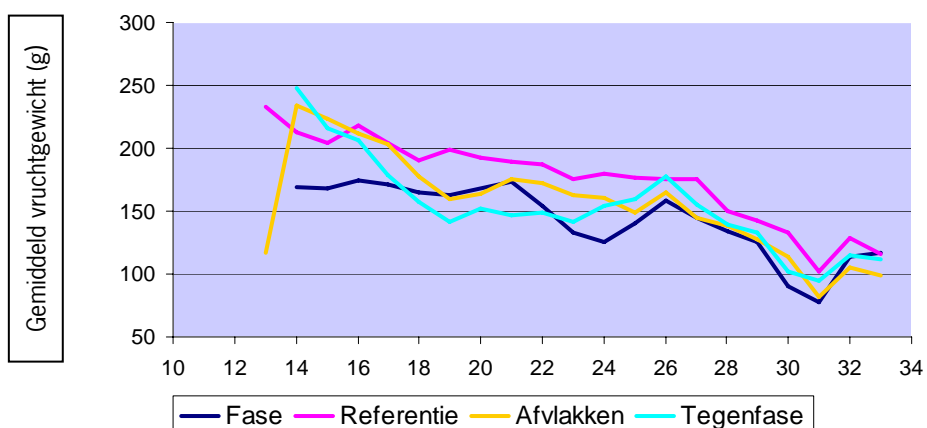
Tabel 1. Gemiddelde plantbelasting (vruchten per m²) tijdens de gestuurde periode van dag 45-145 per behandeling.

Behandeling	Gemiddelde plantbelasting (vruchten per m ²)
Referentie	35
Fase	46
Tegenfase	43
Afvlakken	45

De hoge plantbelasting in de gestuurde afdelingen was niet een gevolg van het optimaliseren op zich, maar meer van de gekozen doelfunctie (streeflijn voor de amplitude van de oscillatie). Het zou mogelijk zijn geweest om in de loop van de proef de doelfunctie aan te passen, maar om proeftechnische redenen is besloten om dat niet te doen. Alleen door consequent door te gaan met de ingezette behandeling is het mogelijk om het resultaat zuiver te beoordelen.



Figuur 3.10. Cumulatieve productie (kg m⁻²) in de gestuurde afdelingen (donkerblauw = fase; lichtblauw = tegenfase; geel = afvlakken) en de conventioneel geteelde referentieafdeling (lila).



Figuur 3.11. Gemiddeld vruchtgewicht (g versgewicht per vrucht) in de gestuurde afdelingen (donkerblauw = fase; lichtblauw = tegenfase; geel = afvlakken) en de conventioneel geteelde referentieafdeling (lila).

3.2.3 Energie

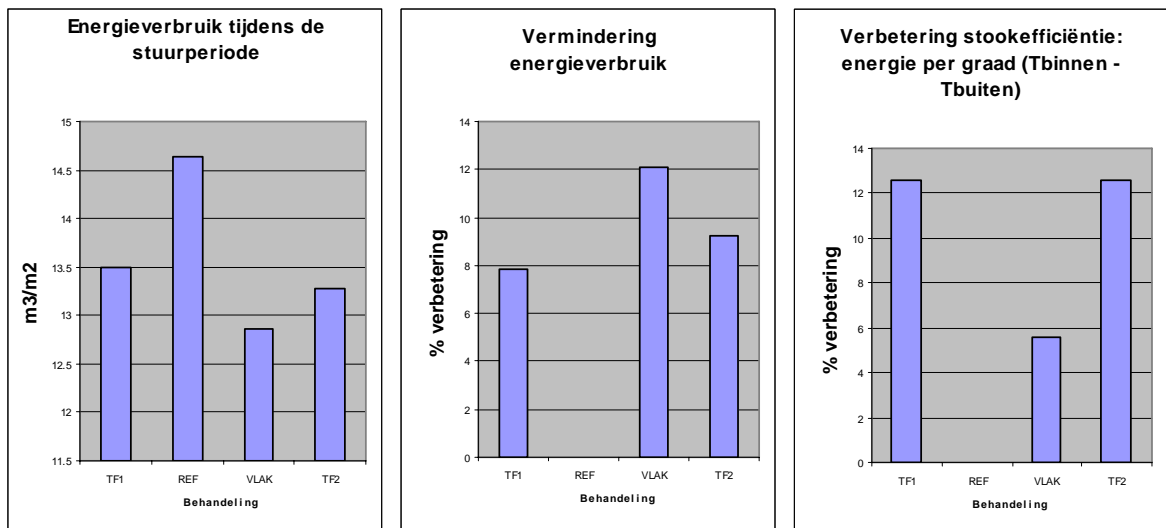
In de gestuurde afdelingen is in de periode 15 februari - 15 augustus een energiebesparing gerealiseerd van rond de 10%. In absolute termen was de besparing in de behandeling met constante zetting het grootst (Figuur 3.12: links, midden). Voor een deel ligt het energieverbruik in de tegenfase-behandelingen aan de sterke stookactie aan het begin van de stuurperiode, toen de zetting in afdeling 4 door het nastreven van een sterk negatieve balans werd uitgesteld.

Uitgedrukt op basis van stoekefficiëntie (m^3 gas per m^2 per graad verschil tussen binnen en buiten) hebben de tegenfase-afdelingen het iets beter gedaan.

In Figuur 3.12 zijn de 3 stuurstrategieën vergeleken met de referentiekas (2e paaltje). Het verband tussen de vermindering van het energieverbruik in de gestuurde afdelingen (Figuur 3.12, Tabel 2) en de effecten op productie (Tabel 1) kan worden uitgedrukt als de energie-efficiëntie van de productie (kg paprika's per m^3 gas). Gecombineerd voor de strategieën fase en tegenfase blijkt de energie-efficiëntie hoger uit te komen dan voor de afvlakstrategie. Ten opzichte van de referentie wordt respectievelijke 15 en 11% efficiëntieverbetering bereikt.

Tabel 2. De resultaten van de stuurproef samengevat, uitgedrukt als % ten opzichte van de referentie. Er is dus in de stuurperiode 9 (tegenfase) tot 12 (afvlakken) % energiebesparing bereikt. Worden de effecten op productie meegenomen, dan was de energie-efficiëntie met 15 (tegenfase) en 11% (fase) verbeterd.

% van Referentie	Stuurstrategie	
	tegenfase	afvlakken
Energie (m^3/m^2)	91	88
Productie (kg/m^2)	105	97
Efficiëntie (kg/m^3)	115	111



Figuur 3.12. Energieverbruik in de 4 experimentele afdelingen tijdens de stuurperiode van 15 februari - 15 augustus 2006. Grafiek links = totaal energieverbruik in $\text{m}^3 \text{m}^{-2}$, midden is de relatieve besparing (referentie = 0%), rechts de relatieve verbetering in stoekefficiëntie (gemiddeld energieverbruik per graad verschil $T_{\text{binnen}} - T_{\text{buiten}}$). In elke grafiek staan de buitenste 2 paaltjes voor de tegenfase-behandelingen, linksmidden is de referentie, rechtsmidden is constante zetting binnen één afdeling.

4 Discussie

Dit project had tot doel om te testen of on-line dynamisch optimaliserend sturen in principe toepasbaar is in de tuinbouw. Het principe werd in dit project getest aan de hand van een concrete vraagstelling, namelijk of het mogelijk is om in de paprikateelt een vlak afzetpatroon te combineren met energiebesparing, zonder dat daarbij productieverlies optreedt.

Uit de resultaten (hoofdstuk 3) blijkt dat het inderdaad is gelukt om een dynamisch optimaliserend regelsysteem te bouwen, te koppelen aan een klimaatregelaar en succesvol toe te passen in een teeltproef. Het is inderdaad mogelijk gebleken om de zettingsgolven van een paprikagewas uit fase te sturen of af te vlakken zonder dat dit ten koste ging van de productie, terwijl tegelijkertijd energiebesparing is gerealiseerd. Hiermee is de Proof of Principle geleverd.

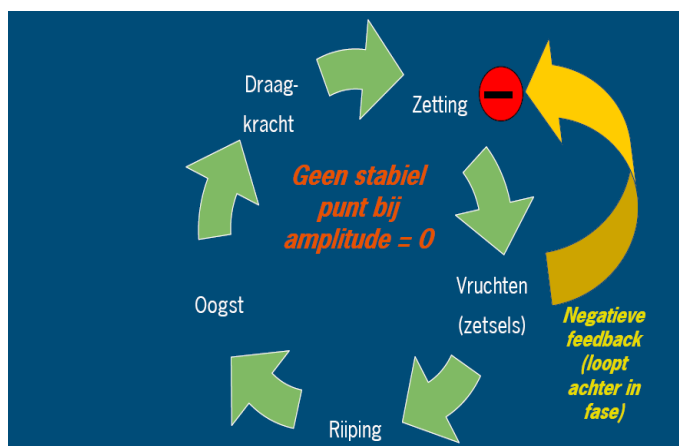
Hoe teeltmanagement of -sturing kan worden gecombineerd met energiebesparing is een vraag die in het energieonderzoek regelmatig terugkeert. Vaak wordt daarbij de benadering gekozen om met de beschikbare kennis vooraf een verbeterd teeltrecept te bedenken en dit vervolgens te toetsen in een proef.

In dit project is gekeken of die vraag ook op een heel andere manier kan worden opgelost: er is een dynamisch optimaliserend systeem gebouwd en dat systeem werd opgedragen om het beste teeltrecept te berekenen en uit te voeren. De beschikbare kennis over de werking van de kas en het gewas, afhankelijk van de buitenomstandigheden en instellingen is aan het systeem gegeven in de vorm van dynamische modellen. Om het systeem in staat te stellen de beste oplossing te kiezen hebben is een streefresultaat opgegeven, in de vorm van een doelfunctie. Vervolgens heeft het systeem instellingen berekend waarmee het nagestreefde doel zo efficiënt mogelijk kon worden bereikt. Met deze instellingen is de klimaatcomputer aangestuurd. Vanwege de wisselvalligheid van het weer en om iets met de verschillen tussen de verwachte en gerealiseerde werkelijkheid te kunnen werd de berekening van het optimale teeltrecept dagelijks herhaald.

We geven dus niet aan het systeem op *hoe* het doel moet worden bereikt, alleen *wat* we willen bereiken en binnen welke randvoorwaarden het moet blijven.

Het is dus gebleken dat deze aanpak *in principe* werkt. Het is natuurlijk heel interessant en leerzaam om te kijken wat voor type oplossingen het systeem voor ons heeft berekend, en waarom het heeft gewerkt. Die vragen komen in de volgende paragrafen aan de orde. Ter afsluiting wordt op een rijtje gezet wat we in het algemeen hebben geleerd over de techniek van het dynamisch optimaliseren, welke perspectieven dit biedt voor de glastuinbouw, en hoe we daarmee aan de slag zouden kunnen.

4.1 Wat betreft de teelt



Figuur 4.1. Dynamiek van de zettingsgolven bij Paprika. Het gewas zet vruchten als daar 'draagkracht' voor is. De vruchten gaan pas na verloop van enige tijd een signaal produceren dat de zetting remt. Hierdoor gaat zetting eigenlijk altijd wat te lang door. De bestaande vruchten moeten eerst verder afrijpen voordat er weer ruimte ontstaat voor nieuwe vruchtzetting. Dit is een cyclus zonder duidelijk evenwichtspunt. Zetting in golven is het natuurlijke gedrag van het gewas.

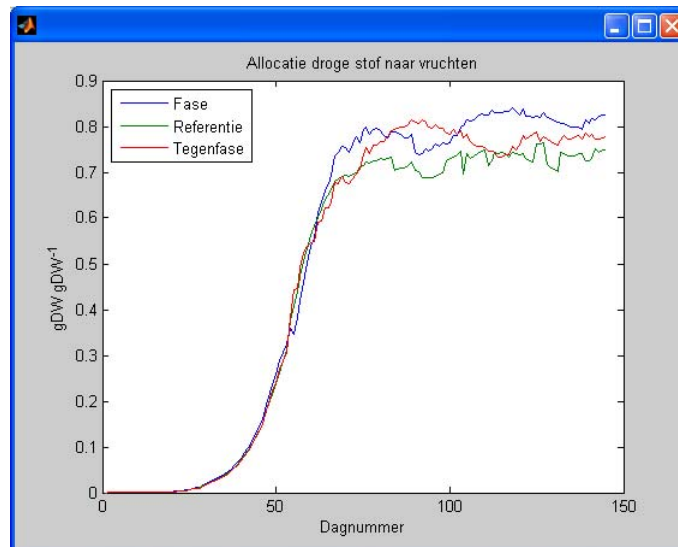
Het feit dat het systeem goed genoeg heeft gewerkt om de vruchtzetting uit fase te sturen en - met wat meer moeite - ook af te vlakken vormt een sterke aanwijzing dat het achterliggende principe van het gewasmodel behoorlijk goed klopt. Tot nu toe was het model alleen toegepast op het narekenen van teeltresultaten. De vraagstelling is in dat geval: 'kunnen we achteraf begrijpen waarom het gewas op een bepaalde manier heeft gereageerd op gegeven teeltomstandigheden?' Door echter de vraagstelling om te draaien: 'hoe kunnen de omstandigheden zo worden gemanipuleerd dat het gewas een opgelegd zettingspatroon gaat volgen?' worden veel hogere eisen aan het model gesteld.

De slingerbeweging ontstaat doordat de plant reageert op het ontstaan van ruimte voor vruchtgroei ('draagcapaciteit') met het aanleggen van relatief veel vruchten. Deze vruchten zorgen er vervolgens enkele weken voor dat het gewas geen ruimte meer heeft om nieuwe vruchten aan te leggen, zodat alle nieuwe vruchtjes die in die periode ontstaan zullen aborteren. Pas als de aangelegde vruchten een bepaald rijpeidstadium hebben bereikt vermindert hun invloed op de draagcapaciteit. Hierdoor ontstaat nieuwe ruimte voor vruchtgroei, zodat de volgende zettingsgolf op gang kan komen. Deze beschrijving van het proces heeft als consequentie dat er geen natuurlijk evenwichtspunt bestaat.

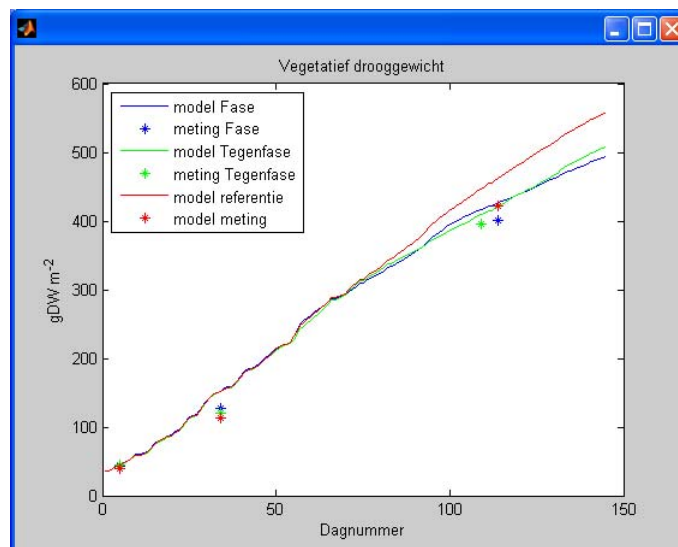
Het is dus in principe mogelijk om door middel van sturing een regelmatig zettingsverloop op te wekken, en dat wordt door de proefresultaten bevestigd. Echter, zodra wordt gestopt met sturen komen de zettingsgolven direct weer op gang. Ook onnauwkeurigheden in voorspellingen, sensordata en modelberekeningen zorgen voor het ontstaan van nieuwe golven. Het gebruik van de term 'fysiologische slinger' is daarom ook niet erg gelukkig: de dynamische eigenschappen van de paprikaplant verschillen fundamenteel van die van een slinger of schommel, die op het laagste punt in rust kan blijven hangen. Het vlaktrekken van de vruchtzetting is dus in feite tegen de natuur van het gewas in.

De planten in een tegenfase sturen is gelukt en kan daarmee een oplossing bieden voor het bereiken van een gelijkmatigere oogst. Het sturen (door het variëren van CO₂ en temperatuur) heeft in een conventionele kas beperkingen: de gewasmodellen werken behoorlijk goed, echter binnen bepaalde temperatuurmarges. Bij meer extreme temperaturen gaan ook andere effecten en processen meespelen, en werken ze niet goed genoeg meer. Ook lopen we in conventionele kassen vrij snel aan tegen de grenzen aan de mogelijkheden om te sturen. Bij veel zon zijn geen lage temperaturen meer mogelijk, net zo min als er geen hoge CO₂ concentratie kan zijn bij veel ventilatie (zie paragraaf 4.3.3 voor een meer uitgebreide discussie over sturingsmogelijkheden).

Uit Figuur 3.10 blijkt dat er door sturing een hogere productie werd gehaald. De hogere productie wordt ook bevestigd door de berekende verdeling van droge stof binnen het gewas, met name het investeren in groei van de vruchten (Figuur 4.2). Vanaf ongeveer dag 70 investeerde het gewas in de gestuurde afdelingen (fase en tegenfase) systematisch een hoger percentage van de beschikbare droge stof in vruchtgroei dan het referentiegewas. Het effect van de tegenfase-stuuracties is goed te zien: afwisselend is de allocatie in de afdeling 'fase' (blauw) en de afdeling 'tegenfase' (rood) het hoogst. Rond dag 130 begon in 2006 de eerste periode met extreem weer en nam de mogelijkheid om het gewas te sturen snel af. Hiermee in overeenstemming is te zien dat het vegetatieve drooggewicht (g m^{-2}) in de gestuurde afdelingen (Fase, Tegenfase) systematisch lager was dan in de referentieafdeling. De behandeling 'Afvlakken' lag tussen deze waarden in (resultaten niet getoond).



Figuur 4.2. Door het gewasmodel berekende fractie van de droge stof beschikbaar voor groei die dagelijks naar de vruchtgroei is gegaan in g (droog). Rond dag 130 begon in 2006 het extreme weer en nam de mogelijkheid om het gewas te sturen snel af.



Figuur 4.3. Het tijdsverloop van het vegetatieve drooggewicht (g m^{-2}) zoals berekend door het model (lijnen) en gemeten door middel van het destructief oogsten van representatieve planten (sterretjes) laat zien dat de vegetatieve groei in de gestuurde afdelingen (Fase, Tegenfase) minder was dan in de referentieafdeling. De behandeling 'Afvlakken' lag tussen deze waarden in (resultaten niet getoond).

Uit Figuur 4.3 blijkt ook dat de door het model berekende groei (lijnen) behoorlijk goed overeen kwam met de gemeten waarden (sterretjes), bepaald door middel van het destructief oogsten van representatieve planten. Een bekend effect van een hogere plantbelasting bij paprika is een vermindering van het gemiddeld vruchtgewicht. Inderdaad was dat effect ook in de hier gerapporteerde proef te zien. Verder lag in de gestuurde afdelingen het percentage eerste kwaliteit vruchten iets lager dan in de referentiekas (Tabel 4.3). Dit lagere percentage is deels toe te schrijven aan het iets lagere gemiddeld vruchtgewicht omdat er daardoor ook wat meer te kleine vruchten waren, die in de tweede sortering terecht zijn gekomen. Een probleem dat wel specifiek wat vaker in de gestuurde afdelingen voorkwam waren necrotische plekken in de vruchten. Deze ontstaan in een vroeg stadium als de jonge vruchtjes, die nog weinig schaduw van bladeren krijgen, direct worden blootgesteld aan felle zon in combinatie met een hoge kasttemperatuur.

Tabel 4.3. Eerste kwaliteit vruchten als percentage van het totale aantal geoogste vruchten voor de verschillende stuurstrategieën (%).

Stuurstrategie	Percentage eerste kwaliteit vruchten (%)
Fase	75
Referentie	80
Vlak	73
Tegenfase	77

Het is de vraag of het iets lagere aandeel eerste kwaliteit vruchten is toe te schrijven aan het dynamisch optimaliseren op zich, waardoor de methode voor de praktijk als minder aantrekkelijk zou moeten worden beschouwd. Deze vraag moet eigenlijk worden uitgesplitst: zijn de effecten het gevolg van het dynamisch optimaliseren op zich, of meer van de in deze proef gekozen stuurstrategieën? Voor de tweede optie valt veel te zeggen. De strategieën zijn voor het model vertaald naar doelfuncties met een te volgen referentielijn en een aantal grenswaarden. Het verlagen van het gemiddelde niveau van de referentielijn zou in principe hebben geresulteerd in een hoger gemiddeld vruchtgewicht. Het beperken van directe instraling bij hoge temperatuur zou prima als extra grenswaarde aan de doelfunctie kunnen zijn toegevoegd; ook zou bijvoorbeeld het toepassen van verneveling de extremen in teeltcondities hebben kunnen ondervangen. In deze proef is gekozen voor de eenvoudigste benadering, om het resultaat overzichtelijk te houden. Verdere proeven zouden nodig zijn om dit soort vervolgvragen te beantwoorden. Voorlopig was de uitkomst nog niet zo slecht: het percentage tweede keus was maar licht verhoogd, en twee voor de hand liggende, algemeen bekende en eenvoudig beheersbare oorzaken lijken de verschillen (in ieder geval grotendeels) te verklaren.

4.2 Wat betreft de energie-efficiëntie

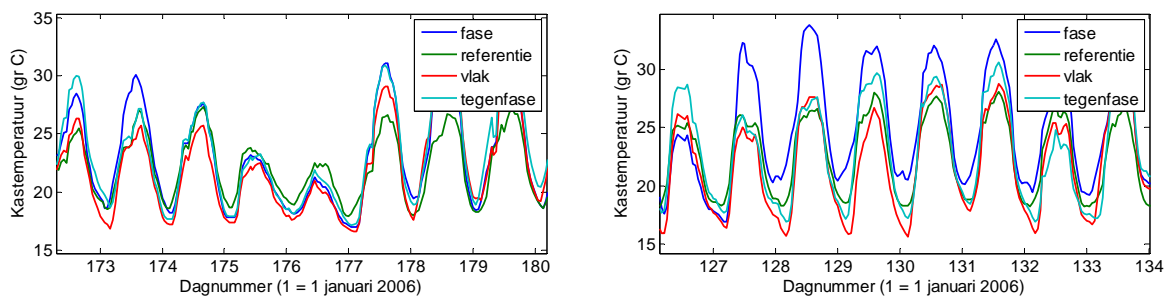
Het bleek dat in de gestuurde afdelingen is in de periode 15 februari - 15 augustus een energiebesparing is gerealiseerd van rond de 10%. In absolute termen was de besparing in de behandeling met constante zetting het grootst (Figuur 3.12: links, midden).

Het is interessant om te kijken waardoor die energiebesparing kan zijn veroorzaakt. De gemiddelde temperatuur van alle gestuurde kassen samen lag een fractie lager (0.23 °C; Tabel 4) dan in de referentiekas, maar op grond van de vuistregel: '1 graad temperatuurverlaging geeft ongeveer 10% energiebesparing' lijkt dit verschil niet genoeg om de bereikte besparing te verklaren. Er is dus waarschijnlijk meer aan de hand geweest. Figuur 4.5 laat het temperatuurverloop gedurende twee typerende weken in de proef zien. Het is duidelijk dat de regeling meer met het weer mee beweegt dan een conventionele kasklimaatregelaar. Zo lag de temperatuur in alle gestuurde afdelingen op de relatief donkere dagen 175 en 176 onder die van de conventioneel geregelde kas, terwijl op zonnige dagen (bijvoorbeeld dag 128 en 172) de temperatuur overdag in alle gestuurde afdelingen hoger waren dan in de referentiekas. Verder liepen over het algemeen de temperaturen overdag verder op terwijl ze 's nachts verder wegzakten. Dit soort

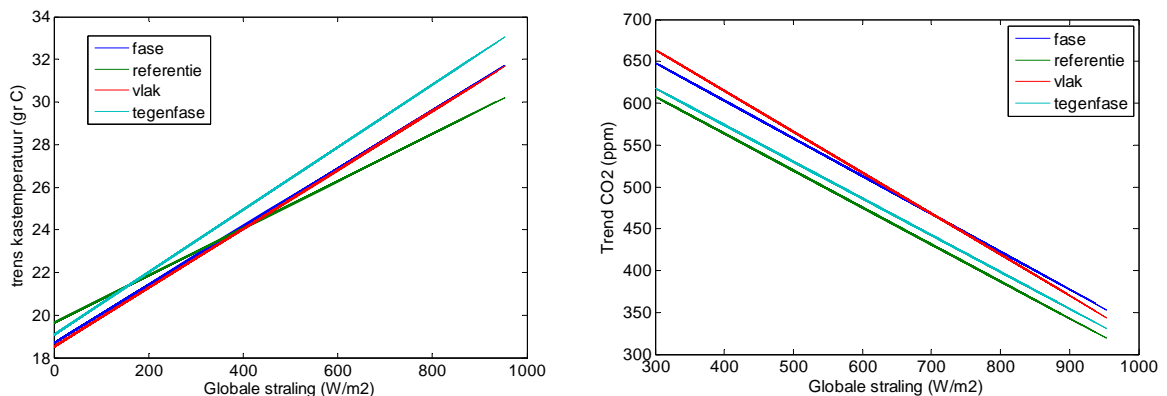
effecten is ook bekend van klimaatregelaars die temperatuurintegratie toepassen (bijvoorbeeld Buwalda *et al.*, 1999; Van den Berg *et al.*, 2001). Dit resulteert over de complete gestuurde periode in een trend dat de bij lage lichtintensiteit de kasttemperatuur over het algemeen lager is dan bij een conventionele regeling, terwijl bij hogere lichtintensiteit de kasttemperatuur ook verder mee stijgt (Figuur 4.6). Energie wordt bespaard doordat meer gebruik wordt gemaakt van zonnearmte. Hierdoor hoeft minder te worden gestookt om een gewenst gemiddeld temperatuurniveau te realiseren.

Tabel 4.4. De gemiddelde kasttemperatuur (°C) tijdens de stuurperiode (links) en concentratie CO₂ tijdens de lichtperiode (rechts) voor de verschillende stuurstrategieën.

Stuurstrategie	Gemiddelde temperatuur (°C)	Gemiddelde concentratie CO ₂ (ppm)
Fase	21.5	532
Referentie	21.9	495
Vlak	21.4	538
Tegenfase	22.1	505



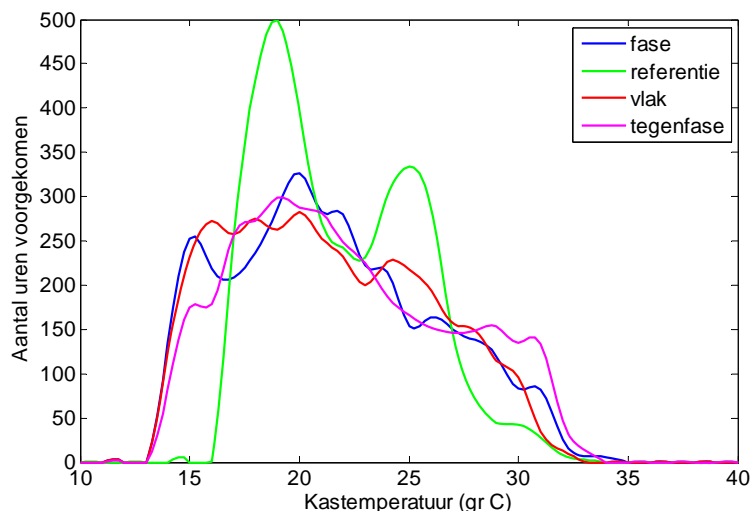
Figuur 4.5. Twee voorbeelden van het temperatuurverloop.



Figuur 4.6. Trends in de relatie tussen globale straling en kasttemperatuur (links) en de relatie tussen globale straling boven 300 W/m² (dat is wanneer CO₂ telt) en de concentratie CO₂ in de kas.

Van dit type stookgedrag is bekend dat ook de concentratie CO₂ in de kas hoger uitkomt, vooral onder hogere lichtomstandigheden, precies wanneer het gewas daar het meest van kan profiteren. Ook in deze proef blijkt dat het geval te zijn geweest: in alle geoptimaliseerde afdelingen lag de gemiddelde concentratie CO₂ hoger dan in de referentiekas (Tabel 4). Wanneer we trendlijnen fitten op data van globale straling boven 300 W/m² in combinatie

met CO₂ in de kas dan blijkt dat in alle gestuurde afdelingen de CO₂-concentratie bij elk lichtniveau boven die in de referentiekas te liggen. Naast de hogere plantbelasting (Tabel 1, Figuur 4.5) vormt de hogere CO₂-concentratie een aanvullende verklaring voor het positieve effect van de stuurstrategieën op de productie.



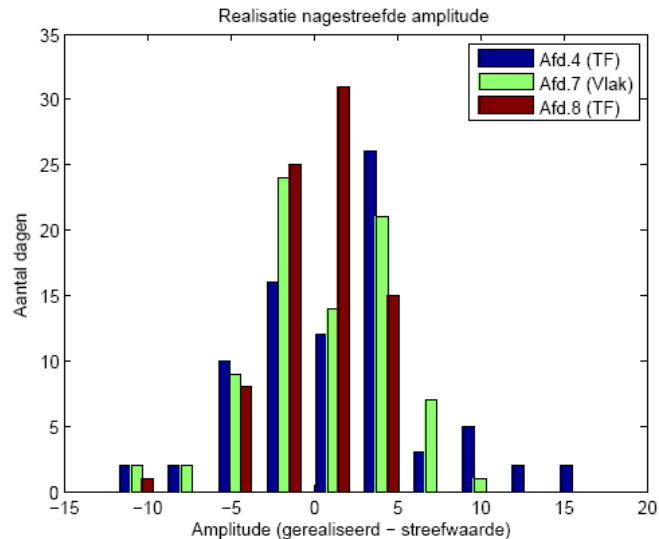
Figuur 4.7. In het frequentiespectrum is het aantal uren te zien dat elke temperatuur is voorgekomen.

Behalve energiezuinig de als optimaal berekende temperatuur te realiseren had de optimaliserende regeling natuurlijk het doel om de zettingsgolven op een gewenste manier te sturen. Zo werd in de periode van dag 127-133 in de afdeling 'fase' duidelijk een stuuractie met hoge temperatuur uitgevoerd, terwijl in de periode direct daaraan voorafgaand in die kas juist een lagere temperatuur werd nagestreefd dan in de afdeling waarin de 'tegenfase'-strategie werd uitgevoerd. De combinatie van met het weer mee regelen en sturen zorgde in alle gestuurde afdelingen voor een duidelijk grotere bandbreedte van de kastemperatuur dan in de conventionele afdeling (Figuur 4.7). In de ongestuurde behandeling (referentie) is de nachttemperatuur van 19 °C goed te zien, terwijl het overdag vaak rond de 25 °C was. In alle drie de gestuurde heeft de temperatuur veel sterker gevarieerd, waarbij extremen rond de 15 en 30 °C aanzienlijk vaker voorkwamen dan in de referentiekas.

4.3 Wat betreft de optimalisatie

4.3.1 Hoe of wat?

De methode van het dynamisch optimaliseren vertegenwoordigt feitelijk een omkering van de conventionele werkwijze op basis van teeltrecepten. Normaal staat het 'HOE' voorgeschreven: hoe de klimaatinstellingen moeten zijn per periode, terwijl het teeltresultaat (het 'WAT') uiteindelijk maar moet blijken. Bij dynamisch optimaliseren staat het WAT voorop: wat moet er met de teelt worden bereikt. Het 'hoe' wordt aan het optimaliserende systeem overgelaten. We leggen dat systeem - in de vorm van formules en modellen - de essenties van de werking van kas en gewas uit en geven de gewenste uitkomst op. Typerend voor dynamisch optimaliserend regelen is dat van te voren nog niet gesnapt hoeft te worden welke mogelijkheden allemaal bestaan, waar de 'kansen' liggen. Zo leveren zulke modellen dan ook regelmatig verrassende stuuracties op.



Figuur 4.8. Frequentiediagram waarin het verschil is weergegeven tussen de nagestreefde en de gerealiseerde amplitude van de plantbelasting, in de periode vanaf het begin van de sturing tot aan de eerste hittegolf.

Hoewel een goed ontworpen optimaliserend systeem in principe autonoom kan regelen blijkt het toch erg belangrijk om tussentijds routinematig de werking van het systeem kritisch te evalueren. In deze proef bleek bijvoorbeeld de weersverwachting een systematische afwijking te vertonen, bleek voor een van de vier afdelingen de lichttransmissie sterk af te wijken van de rest, en bleken de berekeningen van het kasmodel voor deze kleine compartimenten (120 m²) in eigenschappen af te wijken van grootschalige praktijkkassen. Mede door deze afwijkingen en door onvolkomenheden in het gewasmodel zelf kwam de berekende vruchtzetting eigenlijk nooit precies overeen met de getelde. Er was in het systeem gelukkig voorzien in een correctiemogelijkheid van het gezette aantal vruchten, zodat het model nooit helemaal kon ontsporen en een afwijking niet werd meegenomen in de daarop volgende berekeningen. Door systematisch het systeem bij te stellen naar aanleiding van geconstateerde afwijkingen nam in de loop van de proef de nauwkeurigheid van de berekeningen geleidelijk toe (zie bijvoorbeeld Figuur 3.7). Uiteindelijk blijkt dat het stuursysteem een groot deel van de tijd de uitwijking van de 'fysiologische slinger' behoorlijk dicht in de buurt heeft weten te houden van de streefwaarde (Figuur 4.8).

Er wordt wel eens als kritiek aangevoerd op het dynamisch optimaliseren dat het een 'black box'-benadering zou zijn die niet bevorderlijk is voor het zelf denken over - en verantwoordelijkheid nemen voor - de teelt. De ervaring uit dit project wijst juist compleet de andere kant op: door het proces van het ontwikkelen, kalibreren en koppelen van de modellen, het formuleren van de doelfunctie en het tussentijds volgen van het regelgedrag is er meer en grondiger dan ooit nagedacht over teelt, kasklimaat en energie. Een voorwaarde daarbij is wel dat het systeem transparant genoeg moet zijn om het regelgedrag goed te kunnen monitoren en te begrijpen wat er gaande is. Deze gebleken noodzaak tot inzichtelijkheid en de soms verrassende uitkomsten maken de toepassing van dynamisch optimaliserend regelen juist een bijzonder leerzaam proces in plaats van een weinig intelligente 'black box'-benadering.

4.3.2 Doelfuncties

Een belangrijke ontdekking in dit project is het belang van een goede doelfunctie. De modellen voor kas en gewas waren relatief complex van aard en waren elk in staat om rekenresultaten van tientallen verschillende variabelen op te leveren, zoals waarden van systeemtoestanden en snelheden waarmee allerlei processen zich afspeelden. Welke daarvan kies je dan om het teeltdoel in uit te drukken? Welke daarvan kies je om te dienen als grenswaarde? Hoe weeg je de invloed van de verschillende prestatiecriteria onderling? Geef je de eerstkomende week (waarvoor de weersverwachting bekend is) extra gewicht ten opzichte van de rest van de teelt? Hoe leg je het verband tussen de grootte van de overschrijding van een grenswaarde en het aantal strafpunten dat daardoor wordt opgelopen? Er zijn

kortom nogal wat knopen door te hakken, omdat het systeem veel vrijheidsgraden heeft. Hoe kom je tot een beslissing hierin, en hoe weet je of dat de beste beslissing is? Ondanks dat het doel van de proef duidelijk was: beheersing zettingsgolven plus energiebesparing, geen productieverlies - heeft de complexiteit van deze vraag het projectteam eigenlijk nogal verrast. Toen het systeem eenmaal technisch klaar was bestond het gevoel dat we wel vrij snel daarna zouden kunnen starten, alleen nog even het doel van de proef in de doelfunctie zetten. Pas toen bleek dat de hierboven opgesomde serie beslissingen nog moest worden genomen. Uiteindelijk is ervoor gekozen om het starten met sturen nog maar even uit te stellen en eerst in een scenariostudie vooraf een inschatting te maken van de gevolgen van verschillende keuzes voor het regelgedrag van het systeem en de te verwachten resultaten. Hierbij bleek bijvoorbeeld dat het zwaarder wegen van energiebesparing boven een gegeven niveau ten koste ging van de beheersing van de fase, en ook dat het instellen van een veilige, niet te ruime bandbreedte tussen grenswaarden voor bijvoorbeeld temperatuur ten koste ging van zowel de beheersing van de fase als ook de energiebesparing. Het proces deed een beetje denken aan het instellen van een kasklimaatregeling: er zijn meerdere regelstrategieën mogelijk, er moeten allerlei keuzes worden gemaakt, verschillende wegen leiden naar Rome. Als dynamisch optimaliseren ooit op een schaal van enige omvang zal worden toegepast in de tuinbouw, dan zal op dit terrein op den duur ook wel praktijkkennis ontstaan, met de bekende verschillende stromingen en modes of hypes. De keuzevrijheid in het bepalen van het teeltdoel zal in ieder geval steeds denkwerk en afweging blijven vragen, en zo de discussie over hoe het werkt en hoe het beter kan op korte en langere termijn blijven voeden.

4.3.3 Grenzen aan de sturing

Het toepassen van het gewasmodel binnen een brede temperatuurbreedte heeft laten zien dat het gewas binnen een bandbreedte van 20 °C nog even productief blijft. De extreme temperaturen liggen echter wel buiten het bereik waarin het model getoetst is, waardoor de onzekerheid over de waarde van de berekeningen toeneemt. Tijdens de hittegolven van zomer 2006 verdwenen de eerder opgewekte faseverschillen geleidelijk, ondanks dat het model meende dat er nog wel enige sturende invloed mogelijk was. Dit duidt erop dat niet alleen de grenzen van de bestuurbaarheid van het gewas door middel van stoken en ventileren in een conventionele kas waren bereikt, maar ook dat de kwaliteit van de modelberekeningen onder die extreme omstandigheden terugloopt. Het betere zomer-klimaat in moderne, hoge kassen en vooral ook het meer onafhankelijk kunnen sturen van de klimaatfactoren licht, CO₂, temperatuur en RV vergroten de sturingsmogelijkheden van het zettingsproces. De ervaring die de afgelopen jaren met verneveling zijn opgedaan zijn in dit opzicht ook bemoedigend; hiermee kan vooral het klimaat bij hoge instraling aanmerkelijk beter worden beheerst. In de context van deze proeven is dat erg interessant; vooral de combinatie van een wat lager temperatuur en hoger CO₂ bij sterke instraling heeft in de huidige proef ontbroken. Het zou daarom interessant zijn om de proef nog eens over te doen in een moderne, hoge kas met verneveling, belichting, of wellicht in een semi-gesloten kas.

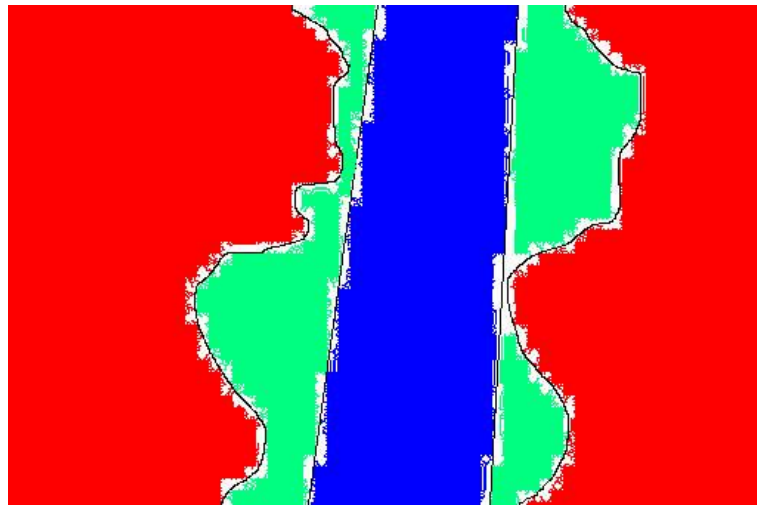
In discussies achteraf is wel geopperd dat het geen verrassing is dat de sturing vooral in het voorjaar heeft gewerkt, onder omstandigheden van veel instraling met een relatief nog lage buitentemperatuur. Na de langste dag zou er minder sprake zijn van regelmaat in de zetting en zou het afnemende licht eigenlijk structureel voor een overbelast gewas zorgen. De praktijkgegevens die de afgelopen jaren zijn verzameld laten echter zien dat op veel bedrijven de paprika's ook in de tweede helft van het teeltseizoen regelmatige zettingsgolven te zien geven. Modelberekeningen wijzen uit dat deze golven met het zelfde model op basis van de zelfde parameters te verklaren zijn als die in het begin van de teelt; de situatie is wat dat betreft niet wezenlijk anders. Wel is het zo dat met relatief minder licht en hogere temperaturen de effectiviteit van de in dit project toegepaste stuurmogelijkheden structureel vermindert; met name de combinatie van veel licht/CO₂ en lage temperatuur die een zettingsgolf op gang moet brengen is in die periode moeilijker te realiseren.

De definitieve oplossing voor het probleem van de oogstfluctuaties bij paprika zal waarschijnlijk komen van nieuwe, zaadloze rassen, die de 'hozerige' eigenschap structureel kwijt zijn (Heuvelink & Körner, 2001). Tot die tijd zou het sturen in tegenfase de paprikatelers kunnen helpen om een regelmatige aanvoer te krijgen. Dit is echter alleen realistisch als we aanzienlijk meer 'grip' op het zettingsproces kunnen krijgen. Het meest kritisch zijn perioden met afwijkend weer, zoals hele donkere of juist lichtrijke perioden en perioden met extreem hoge buitentemperaturen. Als er in dergelijke perioden geen sturing mogelijk is dan zullen de zettingsgolven in alle gewassen weer worden gesyn-

chroniseerd. In deze proeven is uitsluitend met temperatuur gestuurd, waarbij CO₂ passief volgde. Hierbij werd volgens vaste criteria CO₂ gedoseerd; CO₂ was daarmee geen stuurfactor. In principe zou er meer sturingsmogelijkheid ontstaan wanneer in perioden dat de zetting actief moet worden onderdrukt minder of zelfs helemaal geen CO₂ te doseren, eventueel in combinatie met het wegnemen van licht met behulp van een zonweringsscherm. Dit zijn echter maatregelen die productie kosten, waarmee ze voor het doel van de huidige proef niet in aanmerking kwamen. In een concrete bedrijfssituatie zou dat echter geen bezwaar zijn zolang de economische voordelen van een goed gespreide arbeidsfilm en een regelmatige afzet opwegen tegen een geringe productiederving. Andere maatregelen die in dit verband zijn te overwegen zijn en die momenteel al binnen het bereik van productiebedrijven liggen zijn: verneveling, assimilatiebelichting, koeling met LBK's en het inblazen van koele buitenlucht.

4.4 Hoe verder met dynamische optimalisatie

Door de recente ontwikkelingen in simulatiemodellen is het voor een aantal gewassen mogelijk geworden om de effecten van het tijdelijk afwijken van de gangbare teeltwijze te voorspellen. Door ongunstige effecten te vermijden en de gunstige effecten juist te benutten ontstaat hierdoor de mogelijkheid om efficiënter te telen dan mogelijk is door de conventionele teeltwijze te volgen (Figuur 4.9). Een bekend voorbeeld is temperatuurintegratie: door wat meer bandbreedte toe te laten kon bij de gewassen roos en gerbera zeker 10% energie worden bespaard, met behoud van kwaliteit en productiviteit (Buwalda *et al.*, 1999). Bij paprika werd in een experiment bij PPO - Horst met verschillende stuurstrategieën tot 20% energiebesparing gerealiseerd. De resultaten van een praktijktest met meerdaagse temperatuurintegratie waren echter wisselend (Van den Berg *et al.*, 2001). In een proef met Kalanchoe is het inderdaad gelukt om door middel van een modelgebaseerde stuurstrategie met de zelfde hoeveelheid energie aanzienlijk zwaardere en rijker bloeiende planten te telen bij het zelfde ruimtebeslag, of de standaardkwaliteit met 8% energiebesparing (Buwalda *et al.*, 2005).



Figuur 4.9. Soms kan het gunstig zijn om af te wijken van de 'gouden middenweg' (blauw) van de gangbare teeltwijze. De benutbare ruimte in de marge is echter niet constant. Modellen kunnen nuttig zijn om te weten waar de benutbare ruimte (groen) zit, en welke afwijkingen beter kunnen worden vermeden (rood).

Doelgericht telen biedt een basis voor afwegingen zowel op korte als op lange termijn:

'Als ik besluit te profiteren van een bepaald korte termijn voordeeltje, snijd ik mezelf dan niet op de langere termijn in de vingers?' Kunnen voorspellen lijkt dus nuttig en belangrijk. De reactie van het gewas op een stuuractie is niet constant, maar wordt mede bepaald door de toestand van het gewas zelf en door omstandigheden zoals het weer. Met als concreet voorbeeld uit dit project: extra vruchtzetting bij paprika geeft kans op overbelasting en kwaliteitsverlies (kleinere vruchten) later in de teelt.

Het afwegen van effecten op korte en lange termijn is een lastig probleem, zoals ook bediscussieerd door Elings *et al.* (2006). De vraag naar het meest wenselijke scenario kan moeilijk zonder meer worden beantwoord, omdat er in principe eindeloos veel keuzemogelijkheden zijn. Echter, door verschillende scenario's door te rekenen kan een idee worden verkregen van de verschillende opties. Ook zonder toepassing van dynamische optimalisatie kunnen modellen worden gebruikt om meer inzicht te krijgen in de processen die zich tijdens de teelt afspelen en de resultaten die te verwachten zijn afhankelijk van klimaatinstellingen, gewasmanagementacties of weersomstandigheden. Dit is ook nuttig gezien andere mogelijke voordelen, want behalve de potentie voor verbetering van de energie-efficiëntie van het teeltproces, biedt het ook mogelijkheden om meer marktgericht te telen (Buwalda, 2008); dus energie-efficiëntie combineren met verbeterd economisch rendement. Zo kunnen er ook nog andere factoren bij betrokken worden, o.a. arbeid, ruimtebeslag, eindkwaliteit en tijdigheid.

De in dit project bereikte resultaten hadden waarschijnlijk voor een groot deel ook wel door een zeer vakkundige teler kunnen worden bereikt zonder dynamische optimalisatie. Enkele jaren geleden is een excursiegroep van top-telers op handmatige sturing ongeveer even ver gekomen met het uit fase sturen van de zettingsgolven. Door de kasttemperatuur en de CO₂-dosering meer lichtafhankelijk in te stellen of met behulp van een temperatuurintegratie-programma is de hier behaalde energiebesparing zonder twijfel ook wel te bereiken. Wat is dan de meerwaarde van het toepassen van dynamische optimalisatie? Die meerwaarde is vooral gelegen in de mogelijkheid om verschillende teeltdoelstellingen optimaal te combineren, zoals energiebesparing én teeltsturing, of maximaal gebruikmaken van de winst op korte termijn zonder op langere termijn in de problemen te lopen.

4.4.1 Wanneer beginnen?

Een model is een vereenvoudigde afspiegeling van de werkelijkheid. Hoewel een goed model de belangrijkste processen in een kas of gewas kan nabootsen, kan het per definitie nooit perfect worden. Een model kan ook worden opgevat als een methode om de bestaande kennis van een systeem te organiseren en operationeel te maken. Kennis groeit en evolueert, en als het goed is groeit en evolueert het model dan mee. Kritische analyse, georganiseerde twijfel dus, is een belangrijke drijvende kracht achter de ontwikkeling van kennis. Modellen mogen daarom nooit boven discussie verheven zijn omdat ze dan belemmerend kunnen werken voor de ontwikkeling van nieuwe kennis. Veel modellen laten inderdaad een doorlopende ontwikkeling zien. Doordat ze verbanden inzichtelijk maken kunnen modellen ook werken als katalysator voor het proces van kritische analyse en kennisontwikkeling. Door allerlei moeilijk meetbare fysische en fysiologische processen in onderlinge samenhang inzichtelijk te maken dragen modellen bij aan de transparantie van het teeltproces.

De techniek van het dynamisch optimaliseren maakt gebruik van dit soort nooit-klare modellen. Behalve voor bepaalde eenvoudige, goed begrepen en goed gedefinieerde processen zal dynamisch optimaliseren voor telers dus niet snel een kant-en-klare oplossing bieden waar de gebruiker verder geen omkijken naar heeft. Integendeel, de ervaring met het hier gerapporteerde project laat zien dat de toepassing van dynamisch optimaliseren een spannend proces is, gebaseerd op transparantie van het teeltproces en kritische analyse van de stuuracties. Een proces waar telers, teeltadviseurs en onderzoekers gezamenlijk actief mee aan de slag moeten. Het zal ook een proces worden waar een zeker doorzettingsvermogen voor nodig is. Deze aanpak past waarschijnlijk het beste in de traditie van de excursiegroepen, waarbij deelnemers elkaar stimuleren en bij de les houden. Het is daarbij zeker niet nodig om te wachten met toepassen van modellen tot ze meer zekerheid bieden. Telers zijn gewend aan onzekerheid. De benadering vraagt veel meer om het effectief omgaan met onzekerheid dan het streven naar maximale zekerheid. Hierbij zal het in de meeste gevallen aan te raden zijn om de optimalisatie niet meteen te koppelen aan de klimaatregelaar, maar in de vorm van een off-line adviesstelsel mogelijkheden en alternatieven zichtbaar te maken. Het soms verrassende regelgedrag van dynamisch optimaliserende systemen kan onvermoede nieuwe kansen aan het licht brengen en daardoor een doorlopende, leerzame uitdaging vormen waaraan bestaande zekerheden kunnen worden gespiegeld.

4.5 Conclusies en aanbevelingen

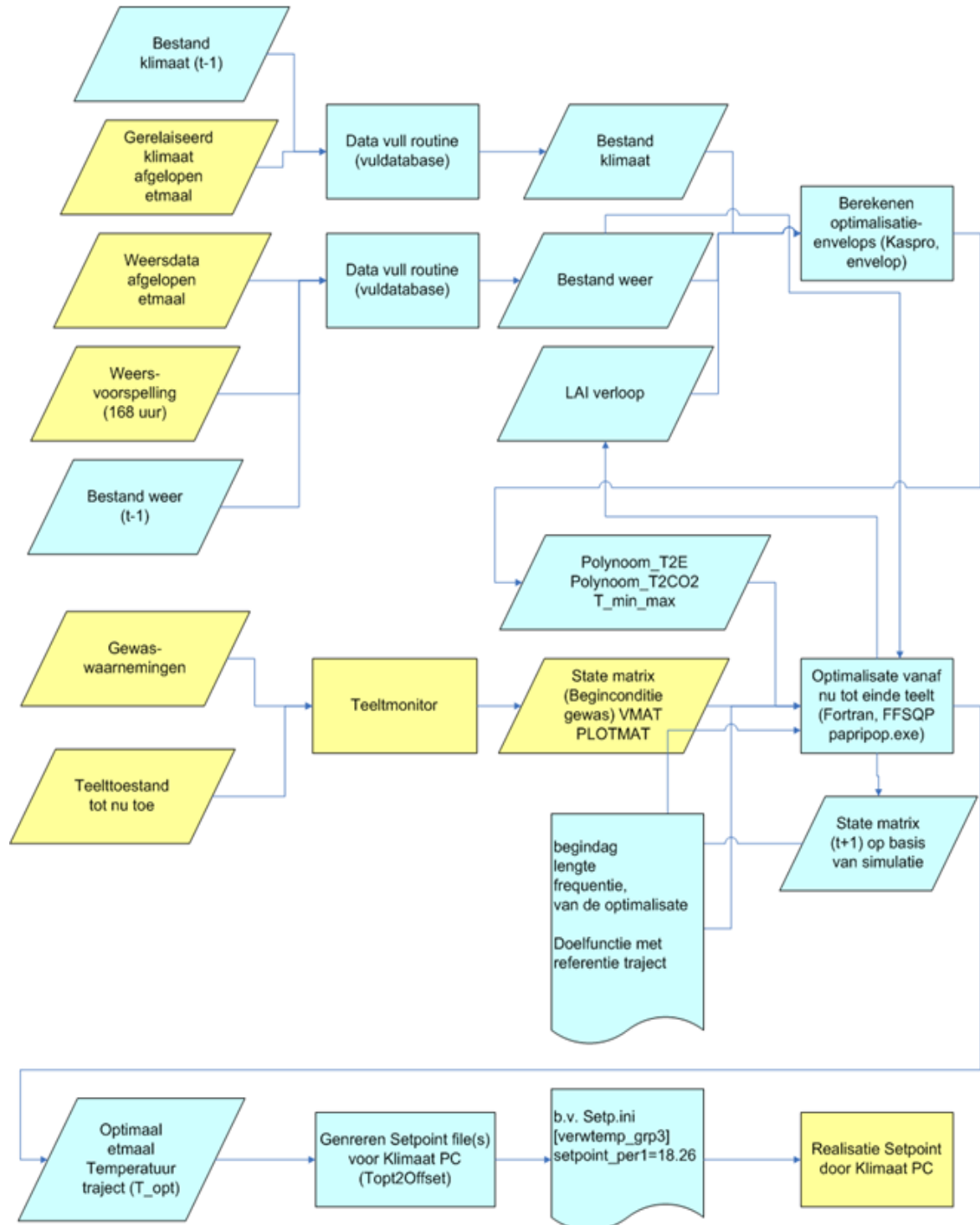
1. De techniek van het dynamisch optimaliseren is toepasbaar in de tuinbouw. De techniek maakt het mogelijk om ongelijksoortige of mogelijk tegenstrijdige belangen op een gestructureerde manier tegen elkaar af te wegen, zoals energiebesparing tegen het realiseren van korte en langere termijn teeltdoelstellingen. Voorwaarden zijn:
 - dynamische modellen die de te optimaliseren processen goed genoeg beschrijven;
 - een optimalisatiesysteem dat voldoende inzicht biedt in de processen (transparante teelt);
 - een methode om afwijkingen te detecteren en te corrigeren;
 - een alerte, kritische instelling bij de gebruikers, plus de bereidheid om er vrij veel tijd in te steken.
2. Dynamisch optimaliseren is daarmee meer een proces dan een product.
3. In de meeste gevallen zal het raadzaam zijn om te beginnen met off-line toepassingen, waarbij het optimalisatiesysteem geen directe invloed heeft op het teeltproces. Eerder een Tomtom dan een automatische piloot dus.
4. Ook op basis van niet-perfecte modellen kan het proces interessante en leerzame resultaten opleveren, en een impuls vormen voor vernieuwing.
5. Bij dynamisch optimaliseren is een goede doelfunctie even belangrijk als een goed model. Er blijkt een enorme keuzevrijheid te bestaan bij het formuleren van de doelfunctie.
6. Om een proces te kunnen sturen is het noodzakelijk om er voldoende invloed op uit te kunnen oefenen. In het geval van een zomerklimaat kan in een conventionele kas met verwarming en ventilatie nauwelijks meer worden gestuurd. De technologische ontwikkelingen van de laatste jaren op het gebied van geconditioneerd en (semi-) gesloten telen, het toepassen van verneveling en het inblazen van buitenlucht, vergroten de sturingsmogelijkheden aanzienlijk. Het concept van de transparante teelt kan laten zien waar de kansen liggen, dynamische optimalisatie kan een methode zijn om deze kansen gestructureerd te benutten.
7. Door middel van dynamische optimalisatie is het mogelijk gebleken om de vruchtzetting van paprika gericht te sturen. Twee afdelingen in tegenfase sturen werkte daarbij aanmerkelijk beter dan het realiseren van een gelijkmatige vruchtzetting binnen één afdeling. Gelijktijdig met de sturing van de zetting kon circa 10% energiebesparing worden gerealiseerd, zonder dat dit ten koste ging van de productie. Aan de teeltdoelstelling van het project is daarmee voldaan. Er bleek wel een beperking te zijn: in de zomer bleek in de gebruikte conventionele kassen de beïnvloedbaarheid van het proces door middel van stoken en luchten te beperkt, waardoor het bereikte faseverschil niet meer te handhaven was. Het zou daarom interessant zijn om de stuurproef bij paprika een keer te herhalen in geconditioneerde kassen, zodat er ook in de zomer meer 'grip' is op het zettingsproces.
8. De teeltdoelstellingen die in dit project aan de orde zijn geweest zouden afzonderlijk waarschijnlijk ook zonder dynamisch optimaliseren wel kunnen zijn gerealiseerd. De meerwaarde van dynamisch optimaliseren zit hem in het gelijktijdig realiseren van meerdere doelstellingen, die soms ook onderling tegenstrijdig kunnen zijn. Ook bij het afwegen van het benutten van kansen op de korte termijn tegen de realiseerbaarheid van de teeltdoelen op langere termijn bewijst deze techniek zijn nut.
9. Behalve het sturen van de zetting bij paprika is dynamisch optimaliseren op veel meer gebieden toepasbaar, bijvoorbeeld:
 - optimaal beslissen tussen afluchten of wegkoelen van warmte in semi-gesloten kassen;
 - kostenefficiënt CO₂ doseren of belichten;
 - afwegen van kwaliteit, ruimtebeslag en energiebehoefte in de potplantenteelt;
 - energiezuinig aansturen op een vooraf bepaalde afleveringsdatum;
 - ...

Referenties

- Berg, G.A. van den, F. Buwalda & E.C. Rijpsma, 2001.
Praktijkdemonstratie meerdaagse temperatuurintegratie. Naaldwijk: Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, sector Glastuinbouw, PPO Rapport 501.
- Bryson, A.E. & Y.-C. Ho, 1975.
Applied Optimal Control; optimization, estimation and control, Halsted Press (John Wiley & Sons), New York, 481 pages, ISBN 0-470-26774-7.
- Bryson, A.E., 1998.
Dynamic optimization. Addison Wesley.
- Buwalda, F., A.A. Rijdsdijk, G.J.L. van Leeuwen, A. Hattendorf & J.V.M. Vogelesang, 1999.
Mogelijkheden voor energiebesparing door temperatuurintegratie bij siergewassen. Toetsen van een meerdaags integrerende temperatuurregeling onder realistische teeltomstandigheden. PBG Rapport 176.
- Buwalda, F., 2003.
Grenswaarden voor temperatuurintegratie; een definitiestudie. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Naaldwijk. PPO Rapport GT 12053.
- Buwalda, F., P. Haghuis, J. Kempen, H. van Gorp, P. Bouten & R. Baas, 2003.
Integratie van gewasontwikkeling in kasklimaatregeling bij vruchtgroenten; Temperatuurintegratie met grenswaarden op basis van gewaskundige criteria. Rapport Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V. Sector Glastuinbouw.
- Buwalda, F., H.F. de Zwart, E.J. van Henten & L. Hogendonk, 2005.
Dynamische beslissingsondersteuning in de paprikateelt: een verkennende studie, toegespitst op het berekenen van energiezuinige optimale stuurtrajecten voor een gelijkmatig afzetpatroon zonder productie-verlies - Praktijkonderzoek Plant & Omgeving. Sector Glastuinbouw, (PPO Publicatie 41616094) - p. 56.
- Buwalda, F., E.J. van Henten, A. de Gelder, J. Bontsema & J. Hemming, 2006.
Toward an optimal control strategy for sweet pepper cultivation - 1. A dynamic crop model. Acta Hort. 718:367-374.
- Elings, A., H.F. de Zwart, J. Janse, F. Buwalda & L.F.M. Marcelis, 2006.
Flexibele meerdaagse temperatuurinstelling op basis van de assimilatenbalans van het gewas. Wageningen: Plant Research International (PRI Nota 383) - p. 68.
- Heuvelink, E. & O. Körner, 2001.
Parthenocarpic Fruit Growth Reduces Yield Fluctuation and Blossom-end Rot in Sweet Pepper. Annals of Botany 88: 69-74.
- Zhou, J.L., A.L. Tits & C.T. Lawrence, 1997.
Users guide for FFSQP version 3.7: A FORTRAN code for solving constrained nonlinear (minimax) optimization problems, generating iterates satisfying all inequality and linear constraints.
<http://www.aemdesign.com/download-ffsqp/ffsqp-manual.pdf>.
- Zwart, H.F. de, 1996.
Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. PhD Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.

Bijlage I.

Schema van het optimalisatiesysteem



Bijlage II.

De output van de optimalisator FFSQP op het scherm

```

c:\ Command Prompt - papriipop.exe
PARAM(90)= 1.0000000000000000
PARAM(91)= 8.0000000000000000
PARAM(92)= 0.6000000000000000
PARAM(17)= 19.0000000000000000
PARAM(100)= 1.0000000000000000
PARAM(101)= 0.2200000000000000
PARAM(110)= -1.3200000000000000E-005
PARAM(111)= 5.9400000000000000E-004
PARAM(112)= -2.6400000000000000E-003
PARAM(113)= 4.0000000000000000E-003
PARAM(114)= 7.0000000000000000E-003
PARAM(115)= 7.3200000000000000E-005
PARAM(116)= 20.0000000000000000
PARAM(117)= 2.0000000000000000
PARAM(118)= 1.7000000000000000E-008
PARAM(119)= 0.6800000000000000
PARAM(120)= 40.0000000000000000
PARAM(121)= 400.0000000000000000
PARAM(122)= -4.5000000000000000E-004
PARAM(123)= 1.5000000000000000E-002
PARAM(124)= 0.8750000000000000
PARAM(125)= 18.5000000000000000
PARAM(126)= 82.5000000000000000
compartment=4
day_start= 2
file_dir_input=D:\Data\test\
file_dir_output=D:\Data\test\

...end of INI file read

Read: D:\Data\test\I_4.dat
Read: D:\Data\test\PolyCoeff_4.dat
Read: D:\Data\test\Iglob.dat
D:\Data\test\C02_4.dat is not available calc from PolyCoeff
Read: D:\Data\test\Reference_B1_4.dat
Read:D:\Data\test\UMAT_4.dat
Read:D:\Data\test\PLOTMAT_4.dat
Write: D:\Data\test\plotmatSIM_4.dat
Write: D:\Data\test\umat_4.opt003
Energy consumption simulation: 47.0464141039999
before first call deflate: nparam= 0
after first call deflate: nparam= 51

FFSQP Version 3.7b (Released January 1998)
Copyright (c) 1989 --- 1998
J.L. Zhou, A.L. Tits,
and C.T. Lawrence
All Rights Reserved

The given initial point is feasible for inequality
constraints and linear equality constraints:
x      0.1820000000000000E+02
      0.1820000000000000E+02
      0.1820000000000000E+02
      0.1830000000000000E+02
      0.1830000000000000E+02
      0.1830000000000000E+02
      0.1830000000000000E+02
      0.1830000000000000E+02
      0.18285714285714E+02
      0.1830000000000000E+02
      0.18414285714286E+02
      0.19342857142857E+02

```

