

# Dynamische beslissingsondersteuning in de paprikateelt

Een verkennende studie, toegespitst op het berekenen van energiezuinige optimale stuurtrajecten voor een gelijkmatig afzetpatroon zonder productieverlies

Fokke Buwalda, Feije de Zwart, Eldert van Henten, Leonie Hogendonk



© 2005 Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vervaelvoudigd, 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 Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V. is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.



**landbouw, natuur en  
voedselkwaliteit**

PPO Projectnummer: 41616094

PT projectnummer: 12185

**Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.**

Sector Glastuinbouw

Adres : Kruisbroekweg 5  
2771 KT Naaldwijk  
Tel. : 0174-636700  
Fax : 0174-636835  
E-mail : [info.ppo@wur.nl](mailto:info.ppo@wur.nl)  
Internet : [www.ppo.wur.nl](http://www.ppo.wur.nl)



# Voorwoord

Voor u ligt het verslag van een verkennende studie. De kernvraag was eigenlijk hoe in de glastuinbouw de mogelijkheden kunnen worden benut die momenteel nog grotendeels blijven liggen omdat de teelt wordt geregeld op basis van teeltrecepten en vaste instellingen.

De beantwoording van verschillende aspecten van deze vraag is uitgewerkt aan de hand van een concreet voorbeeld: de vraag of het mogelijk is om in de paprikateelt door middel van aangepaste teelttemperaturen de typerende zettinggolven te beheersen en tegelijkertijd te komen tot energiebesparing.

Tot nu toe is gebleken dat de meeste telers niet erg geneigd zijn om gebruik te maken van de mogelijkheden die het (tijdelijk) afwijken van de vertrouwde teeltwijze biedt. De belangrijkste struikelblokken lijken hiervoor tot nu toe het gebrek aan praktisch bruikbaar inzicht in die voordelen en onzekerheid over mogelijk averechtse effecten. Eerder is dit vraagstuk actueel geweest in de discussie over kritische grenswaarden voor temperatuurintegratie in het kader van energiebesparing. Natuurlijk zou de tuinbouw nooit zo succesvol zijn geworden als die teeltrecepten gemiddeld genomen niet goed zouden kloppen. Toch kan het in sommige situaties voordelig zijn om van de gangbare instellingen af te wijken, terwijl dat in andere situaties juist geen goed idee is.

Het zijn vooral dit soort veranderlijke, situatie-afhankelijke eigenschappen van een gewas waarop telers met behulp van vaste regels moeilijk grip kunnen krijgen. Is het bijvoorbeeld verstandig om op een donkere dag een hoge temperatuur aan te houden om een bepaalde afleverdatum te halen? Het antwoord zal afhangen van factoren zoals de actuele plantbelasting en de lichtcondities tijdens de voorafgaande dagen.

Om inzicht te krijgen in dit soort kansen en ze te kunnen benutten, en tegelijkertijd de risico's verbonden aan averechts werkende instellingen te vermijden, is dus actuele informatie nodig over de toestand van het gewas. Daarnaast is het nuttig om prognoses beschikbaar te hebben van het te verwachten verloop van de teelt in de komende dagen of weken. Een beslissingsondersteunend systeem waarmee telers de gevolgen van hun keuzes vooraf kunnen evalueren zou die bezorgdheid over mogelijk averechtse effecten misschien kunnen wegnemen. Ook zouden telers die over een dergelijk systeem beschikken, allerlei opties afwegend, waarschijnlijk al snel nieuwe kansen ontdekken.

Om dit te kunnen realiseren moet er iets belangrijks gebeuren: het model dat het rekenwerk uitvoert voor de beslissingsondersteuning moet op basis van locale gegevens aan de actuele situatie op één specifiek bedrijf gaan rekenen, in plaats van op het bureau van een onderzoeker aan een algemene oplossing. Het resultaat van de berekening zal dan ook niet meer in een rapport terechtkomen, maar door de individuele teler worden gecontroleerd en gebruikt. Zodra er verse gegevens beschikbaar komen, volgt weer een nieuwe berekening. Een collega op een ander bedrijf zal misschien de zelfde berekeningen uitvoeren, maar krijgt net een ander antwoord, geldig in de specifieke situatie daar op dat moment.

Met dit perspectief voor ogen is in dit verkennende project gekeken naar mogelijkheden om met een gewasmodel mee te rekenen met een paprikateelt, en op basis daarvan mogelijkheden aan te geven om het kasklimaat zo te sturen dat energiebesparing gepaard kan gaan met een gelijkmatig afzetpatroon, zonder dat dit ten koste gaat van de productie. De vraagstelling is nog wat aangescherpt door niet alleen te kijken naar de kansen voor een gemiddelde paprikateler, maar juist ook naar telers die momenteel al energiezuinig werken.

De uitkomst was dat dit inderdaad mogelijk is. Wel bleek het bewaken van de kwaliteit van de gegevens waarmee het systeem moet rekenen een voorwaarde voor een betrouwbare toepassing. Een beslissingsondersteunend systeem volgens de geschetste principes zou op den duur een aanzienlijk bredere rol kunnen krijgen. Het zou kunnen gaan dienen als een algemeen platform voor het oplossen van vraagstukken op het gebied van systeeminnovatie, energie-efficiëntie, aanvoerprognose, bedrijfseconomische optimalisatie en teeltsturing.

De onderzoeksopdracht is door het team, bestaande uit twee PPO'ers, Leonie Hogendonk en Fokke

Buwalda, en twee onderzoekers van A&F, Eldert van Henten en Feije de Zwart, met veel enthousiasme uitgevoerd. Het project is ook echt een voorbeeld geworden van de meerwaarde die samenwerking tussen verschillende disciplines en instituten kan hebben. Aan het eind van dit verkennende project overheerst het gevoel: 'hier ligt een kans, die niet op de plank mag blijven liggen!'

Wij willen de opdrachtgevers, Anja Jolman namens PT en Leo Oprel namens het Ministerie van LNV, hartelijk bedanken.

Fokke Buwalda (projectleider)	Eldert van Henten
Leonie Hogendonk	Feije de Zwart

# Samenvatting

In dit rapport worden de resultaten gepresenteerd van een verkennende studie. Theoretisch kon worden aangetoond dat het mogelijk is om in de paprikateelt energiebesparing te combineren met het afvlakken van de voor dat gewas typerende oogstfluctuaties. In dit rapport worden de resultaten van die studie gepresenteerd en in een breder perspectief geplaatst.

## *Aanleiding en achtergrond*

De paprikateelt in Nederland staat voor belangrijke vernieuwingen. Deze hebben te maken met ketenomkering, verhoging van productiviteit en kwaliteit door middel van belichting, CO<sub>2</sub>-verrijking en teelt in de gesloten kas, en met arbeidsspreiding en vermindering van energiekosten. Tot nu toe is het ook bij andere gewassen niet altijd eenvoudig gebleken om de potentiële winst van dit soort teeltinnovaties te verzilveren in meer kilo's vruchten, een betere kwaliteit of een betere prijs. In veel gevallen lijken de concrete instrumenten te ontbreken waarmee de teelt naar een bepaald doel kan worden gestuurd of waarmee afwijkingen van een gewenst teeltverloop kunnen worden gecorrigeerd. De teelt van paprika, waarin de eigen dynamiek van het gewas een prominente rol speelt, kan in dit kader dienen als een geschikt voorbeeld aan de hand waarvan deze algemene vragen kunnen worden bestudeerd.

De oogstfluctuaties bij paprika hebben hun oorzaak in de vruchtzetting, die een min of meer regelmatig patroon van golven of vluchten te zien geeft en dus niet in een constant tempo verloopt. Deze zettingsgolven worden veroorzaakt door een samenspel van vraag en aanbod van assimilaten, en de ontwikkelingssnelheid van vruchten en vegetatieve delen. Licht, CO<sub>2</sub> en temperatuur zijn de belangrijkste klimaatfactoren die dit samenspel beïnvloeden. Daarnaast heeft de stand van het gewas zelf dus ook invloed, waarbij de uitgroeiende vruchten en de lichtonderschepping door het blad belangrijk zijn. De wisselende assimilatenvraag van de vruchten die hiermee samenhangt maakt het erg lastig te beoordelen of het gewas met het aantal uitgroeiende vruchten de komende tijd voldoende in balans zal blijven. Ook bij de teelt van andere vruchtgroentegewassen zoals tomaat en komkommer is het handhaven van de juiste plantbalans een belangrijk thema.

Teeltrecepten met vaste regels zijn niet zo geschikt om inzicht te krijgen in het verloop van dynamische gewasprocessen. Uit het hier gerapporteerde onderzoek is gebleken dat het met behulp van een dynamisch gewasmodel wel mogelijk is om de dynamiek van vruchtzetting, plantbelasting en uitgroeiduur bij paprika te beschrijven en te voorspellen. Een dynamisch model is niets anders dan een methode om kennis over de diverse gewasprocessen, invloedsfactoren en de stand van het gewas aan elkaar te koppelen, zodat rekening kan worden gehouden met het verloop in de tijd. Het model bleek in staat om met meerdere teeltregistraties van verschillende rassen en teeltjaren goed mee te rekenen. Doordat het model op basis van afzonderlijke fysiologische processen en gewastoestanden rekent, kan het ook inzicht geven in moeilijker meetbare eigenschappen van het gewas, zoals de verhouding tussen vegetatieve groei en vruchtgroei of de verhouding tussen beschikbaarheid van en vraag naar assimilaten (source / sink). Dit soort eigenschappen speelt waarschijnlijk een belangrijke rol bij het tot stand komen van de plantbalans.

Aan een model op zich zullen telers in de praktijk niet veel hebben. Pas als het model is gekoppeld aan gewas- en klimaatregistraties per individueel bedrijf ontstaat de basis voor een praktisch bruikbaar beslissingsondersteunend systeem. Op basis van klimaat- en gewasregistraties kan een dergelijk systeem met het teeltproces meerekenen en zo inzicht geven in het teeltverloop en de huidige toestand van het gewas. Ook kan door gebruik te maken van lokale weersvoorspellingen en langjarige klimaatgegevens vooruit worden gerekend zodat prognoses beschikbaar komen voor veilingaanvoer, arbeidsbehoefte, vruchtzetting, en energieverbruik.

De goede werking van het teeltbegeleidingssysteem staat of valt bij de invoer van betrouwbare klimaat- en teeltregistratiegegevens. Op basis van verkeerde informatie is het principieel niet mogelijk om correcte prognoses te berekenen. Uit analyse van teeltregistraties van praktijkbedrijven is echter gebleken dat die

gegevens in veel gevallen tegenstrijdigheden bevatten. Voor een praktisch bruikbaar systeem is het dus van groot belang om afwijkingen snel en efficiënt te signaleren en te kunnen corrigeren. Correctiemogelijkheid is ook een voorwaarde voor elk systeem dat in de tijd vooruit moet kunnen rekenen om met de grilligheid van het weer om te kunnen gaan. Als het weer anders wordt dan verwacht, zal ook het teeltverloop af gaan wijken van de prognose. Dit verschil zal eerst moeten worden verrekend voordat een nieuwe prognose zin heeft.

Door een optimalisatieprocedure aan het systeem te koppelen is het zelfs mogelijk om de optimale manier te berekenen om een van tevoren bepaald teeltdoel te realiseren. Verwacht wordt dat het belang van dit soort benaderingen de komende tijd toe zal nemen in verband met de toegenomen rol van de vraag uit de keten. Het zal voor producenten steeds aantrekkelijker worden om het teeltproces zo te sturen dat precies op de juiste dag een van tevoren geplande hoeveelheid product van exact het nagestreefde kwaliteitsniveau kan worden geleverd. De complexiteit van dynamische optimalisatie moet echter niet worden onderschat. De optimalisatieprocedure die in het kader van het hier gerapporteerde project is ontwikkeld heeft alleen achteraf gerekend op basis van complete teeltregistraties, waarin dus het verloop van het klimaat al van tevoren bekend was. In een praktijksituatie is dat niet het geval. Belangrijke vragen die nog moeten worden opgelost voordat dynamische optimalisatie in lopende teelten kan worden toegepast zijn daarom:

- hoe om te gaan met de onvoorspelbaarheid van het weer;
- wat de meest geschikte tijdshorizon is voor de optimalisatieberekeningen.

#### *Casus – energiezuinig realiseren van een gelijkmatig afzetpatroon bij paprika, met behoud van productiviteit*

De vraag die centraal stond in de hier gerapporteerde studie was of het, ook op momenteel al energiezuinig werkende bedrijven, mogelijk is om de teelt zo te sturen dat een gelijkmatig afzetpatroon ontstaat, zonder dat dit productie kost en met minder energieverbruik. Dit vraagstuk vormt een uitstekend onderwerp om te bestuderen in het hierboven geschetste kader. Een eerste vereiste om het probleem hanteerbaar te krijgen is inzicht in de te verwachten ontwikkeling van het gewas, gekoppeld aan een prognose van vruchtzetting, productie en energiekosten. Aangezien het verloop van deze processen afhankelijk is van de toestand van het gewas, is een dynamisch gewasmodel nodig om hieraan te kunnen rekenen. Omdat alle stuuracties en ook toevallige verstoringen zoals variabele lichtcondities van invloed zijn op het verdere verloop van de teelt, is dynamische optimalisatie de aangewezen methode om antwoorden op de onderzoeksvraag te berekenen.

In het kader van dit project werd voor paprika een dynamisch gewasmodel ontwikkeld en getoetst. Het model werd gecalibreerd op basis van een set teeltregistraties van verschillende bedrijven en teeltjaren. Het model bleek goed in staat om het verloop van zettingsgolven, aantal uitgroeiende vruchten en vruchtproductie (zowel aantallen als kg product) zoals geregistreerd in een aantal van de praktijkdatasets te simuleren. Enkele van de gebruikte registraties bleken aanmerkelijke tegenstrijdigheden te bevatten. Over het algemeen gold dat de overeenstemming tussen geregistreerde en gesimuleerde gegevens beter klopte naarmate de geregistreerde dataset zelf meer consistentie vertoonde. Dit onderstreept de noodzaak van een efficiënt foutdetectie en –correctiesysteem. Er waren te weinig gegevens voorhanden om de groei van jonge planten in de periode van uitplanten tot aan de eerste vruchtzetting goed te modelleren. Om die reden is in de optimalisaties deze periode buiten beschouwing gelaten. Bij de gangbare teeltwijze valt deze fase in de winter, de periode waarin het energieverbruik het hoogst is en waarin mogelijk nog extra besparingsmogelijkheden ongebruikt liggen.

Het is mogelijk gebleken om het ontwikkelde gewasmodel in te bouwen in een dynamische optimalisatie-omgeving. Het systeem is algemeen van opgezet zodat inputgegevens en doelfuncties eenvoudig kunnen worden aangepast. Voor het verband tussen kasttemperatuur en energiebehoefte maakt de optimalisatie gebruik van relaties die met behulp van het simulatieprogramma KASPRO zijn berekend.

In de optimalisatiestudie is aangetoond dat dit inderdaad mogelijk is om met behoud van productiviteit een gelijkmatig afzetpatroon te combineren met energiebesparing. Er zijn twee alternatieve benaderingen onderzocht: zettingsgolven afvlakken binnen één afdeling of in twee afdelingen de vluchten precies te laten



afwisselen. Met beide benaderingen bleek een vlak afzetpatroon te kunnen worden gerealiseerd. Op een energiezuinig bedrijf, waarvan het gasverbruik werd geschat op  $36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ jr}^{-1}$ , bleek 10 % besparing op verschillende manieren haalbaar. Met extremere strategieën werden nog aanzienlijk grotere besparingsmogelijkheden berekend, waardoor het jaarverbruik in dit geval inderdaad onder de 'magische' grens van  $30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ jr}^{-1}$  uit zou kunnen komen. De mogelijkheden voor energiebesparing zijn groter bij het laten afwisselen van vluchten in twee afdelingen. Verwacht wordt dat deze benadering in de praktijk ook wat beter beheersbaar zal zijn. Ook op arbeidstechnisch gebied zou het afwisselen enige voordelen kunnen bieden. De mogelijkheid om slimme optimalisatieregels te bedenken lijken overigens nog niet te zijn uitgeput.

Ondanks dat het gewasmodel duidelijk inzicht geeft in de manier waarop de oogstfluctuaties bij paprika ontstaan, moet de handmatige beheersing van het proces als uiterst moeilijk, zo niet onmogelijk worden beschouwd. Een dynamisch stuurmodel lijkt voor dit doel onmisbaar. Dit neemt overigens niet weg dat een beter inzicht in de actuele toestand van het gewas en het te verwachten teeltverloop in de komende dagen en weken op zichzelf voor de teler al bijzonder waardevol kan zijn. Voor de praktijk zal daarom een niet-optimaliserend beslissingsondersteunend systeem een belangrijk tussenstation op weg naar optimale teeltsturing worden. Een levensvatbaar systeem voor de praktijk moet daarbij minimaal de elementen omvatten: kwaliteitsbewaking van gegevensstromen, modelmatig meerekenen met de teelt en prognose van het toekomstige teeltverloop.

#### *Vervolg - stappenplan*

In het ontwikkelingstraject van beslissingsondersteunende systemen zijn verschillende stappen te onderscheiden. Deze zijn: registratie - teeltmonitoring - prognose - sturing - optimalisatie. Na elke stap die is afgerond kan er een werkend product liggen. Het is dus niet zo dat het hele traject moet worden doorlopen voordat de praktijk er baat bij heeft. De eerste versie van een niet-optimaliserend prognosesysteem voor de paprikateelt kan op korte termijn worden gebouwd, zodat het tijdens het eerstvolgende teeltseizoen in de praktijk kan worden getoetst. Een dergelijk systeem kan worden toegepast om voor de komende weken een prognose te berekenen van energiekosten, zetting, plantbalans, aantal en gewicht van de te oogsten vruchten. De prognoses zouden kunnen worden berekend op basis van gemiddeld weer of enkele afwijkende weertypen. Verder kunnen te verwachten effecten worden berekend van veranderde temperatuurinstellingen op de klimaatcomputer of bijzondere teelthandelingen zoals vruchtsnoei of groen oogsten. Om te zorgen dat telers het systeem zelfstandig kunnen bedienen is het nodig dat er een goede gebruikersinterface om het programma heen wordt gebouwd. Behalve een bruikbaar instrument zal er voor de gebruikers ook een duidelijk protocol moeten worden ontwikkeld om goed met het systeem om te gaan.

Er lijkt in de paprikawereld momenteel sprake van een grote behoefte aan allerlei teeltinnovaties: beter  $\text{CO}_2$  doseren, energiebesparing, belichting, (semi)gesloten kas, ... Zodra een werkend beslissingsondersteunend systeem beschikbaar is wordt het mogelijk om effecten van verschillende kasklimaatfactoren op de dynamiek van de gewastoestand goed te monitoren, in onderlinge samenhang te begrijpen en op den duur efficiënt te sturen. Op deze manier kan het systeem bijdragen aan een hoger rendement van proeven op het gebied van teeltinnovatie.

Zodra het systeem uit de kinderziekten is zou het voor de hand liggen om ook voor andere gewassen volgens de zelfde benadering teeltbegeleidingssystemen te ontwikkelen.

#### *Dynamische optimalisatie*

Het hier gerapporteerde onderzoek heeft laten zien dat de klimaattrajecten die een dynamisch optimaliserend systeem berekent om tot het gewenste gelijkmatige afzetpatroon te komen soms nogal kunnen afwijken van de gebruikelijke teeltwijze, en ook niet in regels of recepten zijn te vatten. Het is echter wel een onderwerp dat sterk in de belangstelling staat en dat potentieel ook van grote economische betekenis is. Het lijkt raadzaam om de optie van optimalisatie eerst grondig te testen onder gecontroleerde omstandigheden in kleinschalige proefkassen.



# Inhoudsopgave

Voorwoord .....	3
Samenvatting .....	5
1 INLEIDING .....	13
1.1 Dynamiek van het productieproces bij paprika.....	13
1.2 Dynamische beslissingsondersteuning.....	13
1.3 Vraagstelling .....	14
1.4 Doelstelling .....	14
1.4.1 Algemene doelstelling .....	14
1.4.2 Technische en teeltkundige doelstellingen.....	15
1.4.3 Energiedoelstellingen .....	15
1.4.4 Nevendoelstellingen .....	15
1.5 Inpassing .....	15
2 MATERIAAL EN METHODEN .....	16
2.1 Gewasmodel .....	17
2.2 Registratiegegevens .....	20
2.3 Energieberekeningen .....	20
2.4 Dynamische optimalisatie .....	21
3 RESULTATEN .....	22
3.1 Gewasmodel .....	22
3.2 Dynamische aspecten .....	27
3.3 Registraties.....	29
3.4 Energieberekeningen .....	34
3.5 Optimalisatie .....	38
3.5.1 De referentieteelt.....	38
3.5.2 Optimalisatierun 1 - Energiezuinige teelt met vluchten.....	40
3.5.3 Optimalisatierun 2 - Energiezuinig afvlakken van de oogst binnen één afdeling .....	41
3.5.4 Optimalisatierun 3 - Energiezuinig afvlakken van oogst door teelt in tegenfase.....	42
3.5.5 Optimalisatierun 4 - Nog meer energiebesparing bij teelt met vluchten .....	43
3.5.6 Optimalisatierun 5 - afvlakken van oogst door teelt in tegenfase .....	44
3.5.7 Samenvatting en conclusies van optimalisatieruns.....	45
4 DISCUSSIE .....	46
4.1 Algemeen.....	46
4.1.1 Ketenomkering .....	46
4.1.2 Kansen .....	46
4.2 Model .....	47
4.3 Registraties.....	48
4.4 Energie.....	48
4.5 Optimalisatie .....	49
4.6 Vraagstelling .....	50
5 CONCLUSIES .....	51
6 REFERENTIES.....	53



# 1 Inleiding

## 1.1 Dynamiek van het productieproces bij paprika

Paprika is een gewas dat qua areaal en energiebehoefte tot de belangrijkste van Nederland behoort. Typerend voor paprika zijn de zettingsgolven, waarbij perioden met sterke en zeer geringe vruchtzetting elkaar afwisselen. Omdat de uitgroeiduur van de vruchten tamelijk constant is vertoont het aantal geoogste vruchten per week een zelfde patroon van fluctuaties. Deze sterke eigen dynamiek zorgt dat de reacties van het gewas op klimaatomstandigheden in belangrijke mate worden bepaald door de actuele toestand van het gewas (vooral de vruchtbelasting), die weer het resultaat is van de teelthistorie. Op dezelfde wijze zullen maatregelen die nu worden genomen ook weer gevolgen hebben voor het gedrag van het gewas in de toekomst. De dynamiek van het productieproces bij paprika is nog met veel onzekerheid omgeven. Het voorspellen van de vruchtzetting en van de oogstdatum van uitgroeiende vruchten en het beoordelen of het gewas met het aantal uitgroeiende vruchten voldoende in balans is, zijn aspecten van groot teelttechnisch en bedrijfseconomisch belang.

Paprikatelers proberen het gewas in balans te houden en een regelmatig afzetpatroon te verkrijgen door het instellen van gerichte sturingsacties op de klimaatcomputer. Er zijn echter goede aanwijzingen dat het nemen van dit soort maatregelen vaak niet nodig is, of soms zelfs contraproductief kan werken. Sommige toptuinders zijn in staat de gewastoestand op een juiste manier in hun beoordeling te laten meewegen en zijn daardoor in staat om met minder stuuracties toch een goede productie te realiseren. In een recente analyse van de bedrijfsvoering op één van de meest energiezuinige paprikabedrijven van Nederland bleek zelfs dat de betreffende teler het achterwege laten van stuuracties tot één van de kernpunten in zijn teeltstrategie rekende. Een belangrijke uitdaging is de vraag of juist op deze momenteel al energiezuinig werkende bedrijven een verdere energiebesparing mogelijk is door het klimaat nog efficiënter te sturen.

## 1.2 Dynamische beslissingsondersteuning

Teeltrecepten met vaste regels zijn niet zo geschikt om inzicht te krijgen in het verloop van dynamische gewasprocessen, en bieden slechts beperkte mogelijkheden om prognoses op te baseren. Verondersteld kan worden dat toptelers van belangrijke tuinbouwgewassen als paprika in Nederland langzamerhand het plafond hebben bereikt van wat er mogelijk is op basis van ervaringskennis en teeltrecepten. Als er op energiegebied nog een efficiencyslag kan worden gemaakt, dan zal dat plafond moeten worden doorbroken. Om dit te kunnen bereiken is het nodig om de informatie en kennis met betrekking tot het teeltproces op een nieuwe manier te organiseren.

Een veelbelovende optie is om kwantitatieve informatie over de belangrijkste processen en toestandsvariabelen van het gewas te integreren in een beslissingsondersteunend systeem (BOS). Op basis van klimaat- en gewasregistraties kan een dergelijk systeem met het teeltproces meerekenen en zo inzicht geven in het teeltverloop en de huidige toestand van het gewas. Ook kan door gebruik te maken van lokale weersvoorspellingen en langjarige klimaatgegevens vooruit worden gerekend zodat prognoses beschikbaar komen voor bloeitijdstip, vruchtzetting, arbeidsbehoefte, veilingaanvoer en energieverbruik. Tevens heeft de teler de mogelijkheid om van tevoren een indicatie te krijgen van de te verwachten effecten op energieverbruik en gewasontwikkeling van veranderde instellingen op de klimaatregelaar. De volledige kracht van geïntegreerde dataverwerking en in modellen operationeel gemaakte teeltkundige kennis komt zo beschikbaar voor de gebruiker, zonder dat die daarvoor de controle over de teelt uit handen hoeft te geven. Vooral van telers die hun energieverbruik nu al hebben weten te beperken tot 30-35 m<sup>3</sup> per m<sup>2</sup> per jaar kan worden verwacht dat zij deze nieuwe informatie maximaal zullen benutten om nog efficiënter te

gaan telen. Behalve voor het verkrijgen van inzicht in de dynamiek van het gewas kan het systeem namelijk ook worden gebruikt om de klassieke besparingsopties van temperatuurintegratie uit te buiten: minder stoken bij donker weer, windafhankelijke aanpassing van de kasttemperatuur en CO<sub>2</sub> sparen door minder te ventileren bij hoge instraling.

Voorlopig is er geen instrument voorhanden dat dergelijke berekeningen voor een Paprikagewas kan maken. Uit vooronderzoek bij PPO is gebleken dat de dynamiek van vruchtzetting en plantbelasting bij paprika met een relatief eenvoudig model op een robuuste wijze kan worden beschreven. Deze beschrijving kan het uitgangspunt vormen voor de ontwikkeling van een dergelijk beslissingsondersteunend instrument.

Als paprikatelers de beschikking zouden krijgen over een dergelijk instrument dan is te verwachten dat ze het in de eerste plaats zullen willen gebruiken voor het afvlakken van oogstfluctuaties op hun bedrijf. Theoretisch zijn hiervoor twee verschillende benaderingen mogelijk. De eerste mogelijkheid is om te proberen binnen één enkele afdeling een constante gelijkmatige vruchtzetting te realiseren door het klimaat zo te sturen dat alle impulsen die zouden leiden tot een verandering in zettingssnelheid en abortiepercentage worden geneutraliseerd. De tweede mogelijkheid is om de natuurlijke fluctuatie niet op te heffen, maar juist een beetje te stimuleren en daarbij te streven naar zo veel mogelijk beheersing van de regelmaat en omvang van de opeenvolgende zettingsgolven. Als het lukt om in verschillende afdelingen de vluchten elkaar precies te laten afwisselen kan met deze benadering voor het bedrijf als geheel ook een vlak productiepatroon worden gerealiseerd. Voor beide benaderingen zijn goede argumenten te geven, maar voordat een uitspraak kan worden gedaan over de vraag welke benadering het meest effectief en bedrijfszeker is, en wat de consequenties voor productie en energieverbruik zijn, moet eerst onderzoek worden gedaan. In dit verkennende project is alleen modelmatig onderzoek gedaan. In vervolgonderzoek zullen proeven uiteindelijk de beslissing moeten geven.

## 1.3 Vraagstelling

In het kader van het energieprogramma is de onderzoeksvraag als volgt toegespitst:

*Is het mogelijk om door middel van sturing van het kasklimaat op een paprikabedrijf als geheel het afzetpatroon af te vlakken zonder dat dit productie kost en met minder energieverbruik?*

Om hier antwoord op te krijgen moet voor elk van de alternatieve benaderingen voor het realiseren van een vlak afzetpatroon een geoptimaliseerde stuurstrategie worden vergeleken met een in de praktijk waargenomen teeltvoering. Het resultaat van deze vergelijking moet worden beoordeeld op energieverbruik, productieregelmaat en productieniveau.

## 1.4 Doelstelling

### 1.4.1 Algemene doelstelling

Beantwoorden van de vraag of het mogelijk is om door middel van sturing van het kasklimaat op een paprikabedrijf als geheel het afzetpatroon af te vlakken zonder dat dit productie kost en met minder energieverbruik, bij twee alternatieve benaderingen voor het realiseren van een vlak afzetpatroon: zettingsgolven afvlakken of in stabiele tegenfase houden.

## 1.4.2 Technische en teeltkundige doelstellingen

Toetsing, en zonodig verbetering van een dynamisch gewasmodel voor paprika dat in staat is het verloop van zettingsgolven en vruchtproductie (zowel aantallen als kg product) te simuleren, afhankelijk van kasklimaatcondities en van de toestand van het gewas. Het model dient specifiek genoeg te zijn om een voor paprika goede voorspellingen op te leveren en tegelijk generiek genoeg om van waarde te kunnen zijn voor vergelijkbaar onderzoek aan andere gewassen in de toekomst.

Ontwikkeling van een dynamische optimalisatieprocedure voor een energiezuinige sturing van de zettings- en afrijpingsgolven in de paprikateelt. Voor verschillende strategieën weegt het optimalisatie-algoritme de kosten van sturingsacties ten opzichte van de effecten daarvan op productie en productieregelmaat.

## 1.4.3 Energiedoelstellingen

Doorbreken van de grens van 30 m<sup>3</sup> gasverbruik per m<sup>2</sup> per jaar op paprikabedrijven die nu al tot de meest energiezuinige van Nederland behoren.

## 1.4.4 Nevendoelstellingen

Inzicht krijgen in de technische haalbaarheid van een dynamisch beslissingsondersteunend systeem voor paprikatelers in de praktijk.

# 1.5 Inpassing

De ontwikkeling van het hier voorgestelde instrument past in het ontwikkelingsstadium waarin de huidige kasklimaatbesturing zich bevindt. Behalve streef- en grenswaarden voor kasklimaatparameters wordt hierbij steeds vaker de gewasgroei en -ontwikkeling als uitgangspunt genomen. Door een gebrek aan kwantitatieve methoden om de effecten van kasklimaatfactoren (en daarmee energiegebruik) op productie en ontwikkeling van het gewas te kunnen wegen is de stap naar dynamische optimalisatie van het teeltproces voor de belangrijkste gewassen echter nog steeds niet genomen.

Op academisch niveau zijn vorderingen gemaakt in de optimalisatie van de teelt van sla (van Henten, 1995) en chrysant (Körner, 2003). In het lopende project "Meerdaagse Temperatuur Instellingen voor komkommer" wordt gewerkt aan het stabiliseren van de assimilatenbalans. Hierdoor kan in het hier gerapporteerde onderzoek direct alle aandacht worden gericht op de volgende stap: de optimale afweging van het beheersen van de dynamische processen die leiden tot het oscillerende karakter van de vruchtzetting bij paprika tegen energiekosten en productie-effecten.

## 2 Materiaal en methoden

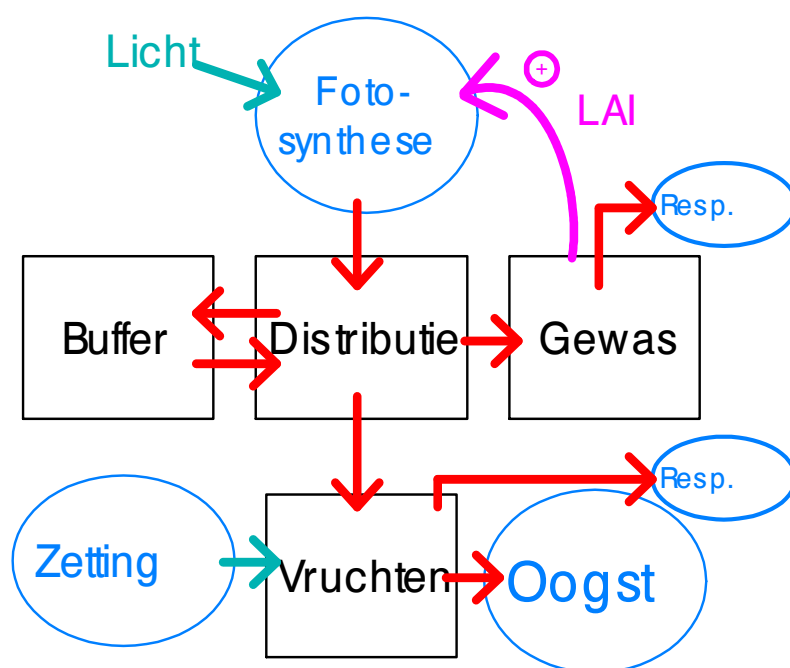
Voor de uitwerking van de gestelde doelen is een eenvoudig gewasmodel ontwikkeld dat gewasgroei, vruchtzetting en de uitgroei tot oogstbare vruchten voor paprika beschrijft. De opbouw en de belangrijkste relaties die in dit model worden gebruikt staan beschreven in paragraaf 2.1.

Het gewasmodel is in staat de ontwikkeling van het gewas te berekenen, maar hoeft dit niet blind te doen. Immers, na verloop van tijd zijn de zichtbare resultaten van de gewasgroei en –ontwikkeling relatief eenvoudig waar te nemen en te registreren. Indien nodig kan het gewasmodel met deze gegevens gedurende de teelt worden bijgestuurd. Hierop wordt nader ingegaan in paragraaf 3.2.

Het gewasmodel is eenvoudig van opzet omdat het wordt gebruikt in een optimalisatieprocedure die voor de berekening van optimale temperatuurtrajecten duizenden malen de modeluitkomsten moet evalueren. Daarbij wordt niet alleen het effect van alle mogelijke temperatuurinstellingen binnen de gekozen bandbreedte op de gewasgroei van vandaag of morgen beoordeeld, maar ook de doorwerking op de lange termijn (de hele productieve periode) meegenomen. Een nadere uitleg van de optimalisatiemethode wordt gegeven in paragraaf 2.4.

Afhankelijk van de gekozen doelfunctie kiest de optimalisatieprocedure een traject van kasluchttemperaturen waarmee bijvoorbeeld het gewas qua ontwikkeling en productie een bepaald nagestreefd patroon realiseert, maar dan met een geminimaliseerd energieverbruik. Praktisch gezien betekent dit dat de optimalisatieprocedure op koudere dagen geneigd zal zijn wat minder te stoken, zolang er verwacht mag worden dat dit op een ander moment gecompenseerd kan worden op dagen dat de kas goedkoper verwarmd kan worden, bijvoorbeeld doordat er meer zon of minder wind is.

Om deze berekeningen te kunnen uitvoeren moet de optimalisatieprocedure beschikken over informatie met betrekking tot de relatie tussen gerealiseerde etmaaltemperatuur en energieverbruik. Deze relatie zal niet alleen van dag tot dag verschillen, maar ook bij iedere tuinder anders zijn. Over de wijze waarop deze relatie in dit project tot stand is gebracht wordt uitgebreid ingegaan in paragraaf 2.3.



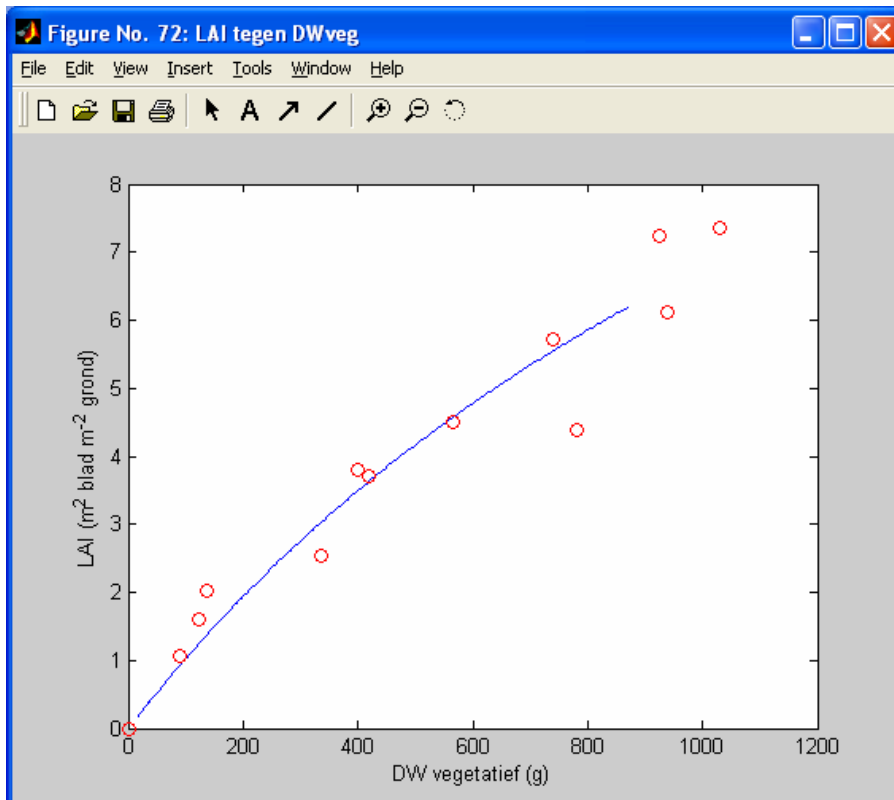
*Figuur 2.1 - Een schema van het gewasmodel. De fotosynthese produceert onder invloed van licht assimilaten. In het distributiepunt wordt de bestemming van de assimilaten bepaald: tijdelijke opslag in een buffer of investering in vegetatieve (gewas) of generatieve (vruchten) groei. Het bestaande gewas verbruikt ook assimilaten om in leven te blijven: de onderhoudsademhaling (resp.). Het aantal vruchten is niet constant maar wordt bepaald door de processen vruchtzetting en oogsten.*



## 2.1 Gewasmodel

Een dynamisch gewasmodel werd geprogrammeerd in Matlab 6.5. Het model rekent in tijdstappen van 1 dag. Het model is modulair opgebouwd, zodat de modelfuncties voor verschillende gewasprocessen eenvoudig kunnen worden vervangen door andere. Er is een aparte parameterfile waarin alle parameters, die de eigenschappen van verschillende processen bepalen, zijn verzameld. Voor de optimalisaties is het nodig om duizenden simulaties achter elkaar te berekenen. Dit vereist een korte rekentijd per simulatie, waardoor het model niet te complex mag worden. Dit heeft consequenties voor het niveau van detaillering waarmee de gewasprocessen kunnen worden beschreven. Er is om die reden ook een vertaling van het model gemaakt naar Fortran, dat sneller werkt dan Matlab.

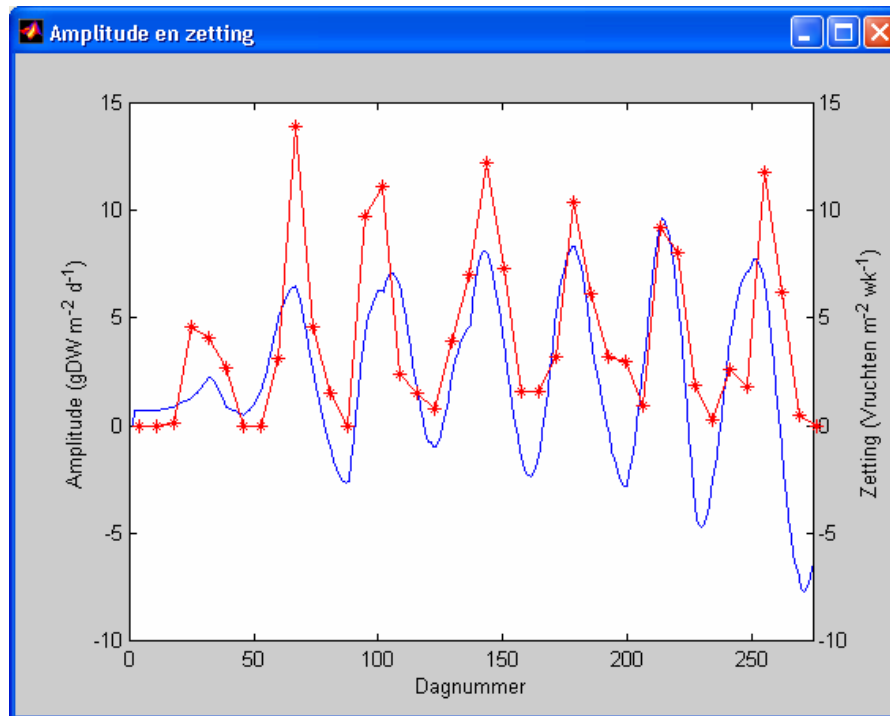
Het belangrijkste doel van het model is het beschrijven van de verdeling van biomassa bij paprika, inclusief de typerende zettingsgolven. Het model onderscheidt vruchten en vegetatieve delen, waarbij inbegrepen stengels en bladeren (fig. 2.1). In deze eenvoudige versie wordt niet apart rekening gehouden met wortelgroei, omzettingsverliezen, constructiekosten, positie-effecten, concentratiegradiënten of transportweerstand en transportkosten. Voor vegetatieve en generatieve biomassa worden wel dagelijkse kosten in verband met onderhoudsademhaling berekend. Wat betreft de vegetatieve delen wordt onderscheid gemaakt tussen structurele en niet-structurele biomassa. Tijdelijk opgeslagen, niet-structurele assimilaten werken als een buffer: dagelijks wordt berekend hoeveel assimilaten er de buffer ingaan en hoeveel er worden afgegeven. Van de vegetatieve delen wordt een fysiologische leeftijd bijgehouden. Jonge delen zijn actief, hebben een grote tijdelijke opslagcapaciteit voor assimilaten, en kosten veel onderhoudsademhaling. Naarmate de vegetatieve delen ouder worden verminderen de respiratielasten en ook de capaciteit voor tijdelijke opslag van assimilaten.



Figuur 2.2 – De bladbedekkingsgraad (LAI in  $m^2_{\text{blad}} m^{-2}_{\text{kas}}$ ) als functie van de totale vegetatieve biomassa. De blauwe lijn geeft de modelfunctie weer; op de achtergrond een set meetgegevens van het rode ras 'Spirit' (rode symbolen).

De assimilatie wordt bepaald op basis van een negatief exponentiële lichtresponskromme (Körner, 2003) met geabsorbeerd licht als input. Het lichtniveau, gemeten op de weertoren werd hiervoor gecorrigeerd met een vaste lichttransmissiefactor van de kas en de lichtonderschepping als exponentiële functie van de bladbedekkingsgraad (LAI in  $m^2_{\text{blad}} m^{-2}_{\text{kas}}$ ; Gijzen, 1992). De LAI is in het model een functie van de totale

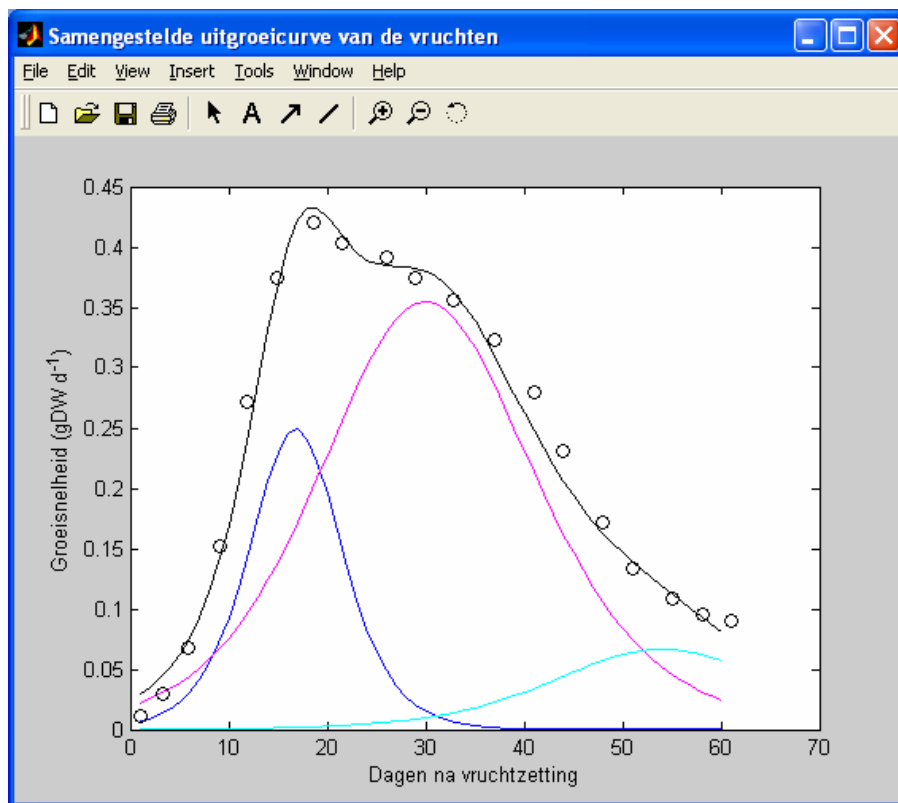
hoeveelheid vegetatieve biomassa (fig. 2.2). Het model is zo gecalibreerd dat de simulatieresultaten redelijk overeenstemden met resultaten van Gijzen et al. (1990), Rijdsdijk & Houter (1993) Heuvelink & Marcelis (1996) en Kläring et al. (1996). Voor het calibreren van temperatureffecten over een groter temperatuurbereik is gebruik gemaakt van een dataset van een temperatuurproef met paprika 'Spirit' die in het jaar 2000 op de voormalige PBG-locatie Klazienaveen is uitgevoerd (Buwalda et al., 2003).



*Figuur 2.3 – het model berekent een fysiologische slingerbeweging (blauw) waarvan de uitslag (amplitude,  $gDW\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) wordt bepaald door de beschikbaarheid van assimilaten en een feed-back signaal van de vruchten. De vruchtzetting reageert op de positieve uitslag van deze slinger; in rood staat de getelde zetting die bij deze dataset hoort ( $vruchten\ m^{-2}\ wk^{-1}$ ).*

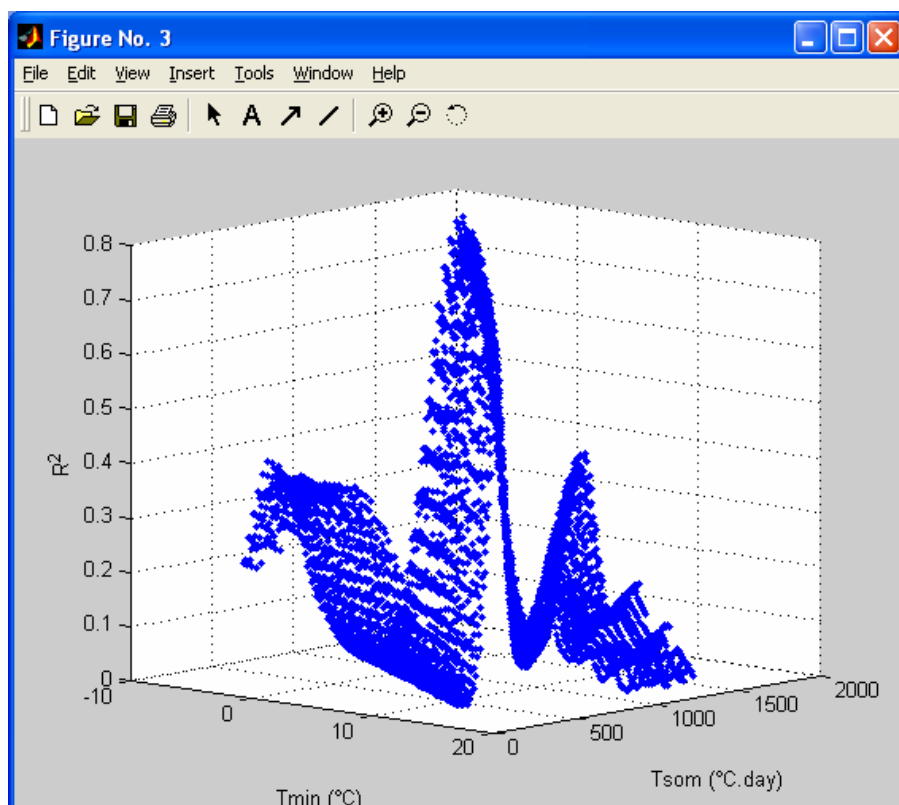
Met betrekking tot de vruchten beschrijft het model het ontstaan door vruchtzetting, de ontwikkeling tot rijpheid en het oogsten. Dagelijks wordt berekend hoeveel nieuwe vruchten er zijn gevormd. De dagelijkse vruchtzetting is afhankelijk een fysiologische slingerbeweging (fig. 2.3), waarvan de uitslag wordt bepaald door het verschil tussen twee de dagelijks beschikbare hoeveelheid assimilaten en een feed-back signaal dat door de uitgroeiende vruchten wordt veroorzaakt. Is het feed-back signaal sterker dan het assimilatensignaal, dan vindt die dag geen vruchtzetting plaats. Op dagen dat het feed-back signaal minder sterk is dan het assimilatensignaal worden wel nieuwe vruchten gevormd.

Zoals in de meeste mechanistische groei/allocationmodellen wordt ook in dit model de verdeling van assimilaten berekend volgens het principe van de relatieve sinksterkte. Over het algemeen vindt er in de plant competitie om de beschikbare assimilaten plaats: elk afzonderlijk uitgroeiend onderdeel (vrucht, blad, stengeldeel, ...) zou sneller kunnen groeien als niet tegelijkertijd alle andere uitgroeiende onderdelen ook bezig waren om assimilaten naar zich toe te trekken. De maximale groeisnelheid die een onderdeel kan bereiken wanneer de beschikbaarheid van assimilaten niet beperkend is wordt de potentiële groei genoemd (zie bijv. Ho, 1988). De assimilatenbuffer heeft ook een sinksterkte, en trekt dus net als de vruchten en de vegetatieve delen aan de beschikbare assimilaten. De opgeslagen assimilaten kunnen ook weer worden onttrokken, zodat de buffer dus tegelijkertijd als source en als sink werkt.



Figuur 2.4 – uitgroeicurve van de vruchten, zoals gemeten door Marcelis en Baan Hofman Eijer in 1998 (cirkeltjes), en de gefitte kromme die in het model wordt gebruikt (zwarte lijn). Deze kromme is samengesteld uit drie verschillende klokvormige krommen (donkerblauw, paars, lichtblauw)

De potentiële groei bepaalt de sinksterkte van het betreffende onderdeel. Onder omstandigheden dat de beschikbaarheid van assimilaten beperkend is voor de uitgroei van de diverse onderdelen van de plant, geldt dat de assimilaten worden verdeeld in evenredigheid met hun sinksterkte op dat moment. De potentiële groei van vruchten is niet constant, maar varieert met het ontwikkelingsstadium (Opara, 2000). Jonge vruchtjes zijn nog klein, waardoor de hoeveelheid assimilaten die ze per dag kunnen absorberen ook beperkt is. Halfwas vruchten kunnen over het algemeen de hoogste groeisnelheid halen; tijdens het afrijpen blijkt de snelheid van gewichtstoename weer af te nemen. Marcelis en Baan Hofman Eijer (1998) hebben voor paprikavruchten de uitgroeicurve bepaald (fig. 2.4). Het blijkt dat er drie klokvormige krommen nodig zijn om het waargenomen verloop te fitten. De eerste, scherpe piek blijkt overeen te komen met de groei van zaden in de vrucht. Anders dan in fig. 2.4 wordt gesuggereerd werkt het model niet met een vaste uitgroeiduur. Ook in de praktijk is bekend dat de uitgroeiduur niet constant is gedurende het teeltseizoen. Voor een deel is dit toe te schrijven aan het feit dat vruchten over het algemeen in voor- en naseizoen in een verder rijpheidstadium worden geoogst dan in het hoogseizoen. Een tweede effect waarmee in het model rekening wordt gehouden is de invloed van temperatuur op de uitgroeiduur. Een optimalisatie van de twee parameters van de functie die het effect van temperatuur op de uitgroei van vruchten beschrijft laat zien dat er verschillende combinaties van parameters worden gevonden die een goede voorspelling van de uitgroeiduur opleveren. Deze goede combinaties blijken samen een soort 'rug' te vormen (fig. 2.5). Aanvullende criteria zijn dus nodig om uit die combinaties de meest geschikte te kiezen. Het bleek dat de ligging van die rug verschilt per ras en verder afhankelijk is van het rijpheidstadium waarin de vruchten worden geoogst. Verder was er sprake van kleine verschillen tussen bedrijven en teeltjaren, die mogelijk samenhangen met de geldende omstandigheden zoals marktsituatie, beschikbaarheid van arbeid, of normen gesteld vanuit het afzetkanaal met betrekking tot bont of doorgekleurd oogsten. In de praktijk zal de kwaliteit van de voorspellingen daarom regelmatig moeten worden gecontroleerd. Technisch is dat in ieder geval mogelijk. De groene lijn (sim RMA) in fig. 3.2 is een voorbeeld van het verloop van de oogst, berekend uit geregistreerde vruchtzetting met behulp van het submodel voor uitgroeiduur, dat was gecalibreerd volgens de hierboven geschetste procedure.



*Figuur 2.5 – de voorspellende kracht ( $R^2$ ) van de uitgroeiduurfunctie van het model bij het simuleren van een compleet teeltseizoen op dagbasis, afhankelijk van de gekozen waarden voor de graaddagensom per vrucht en de drempeltemperatuur. Een van de combinaties die de hoogste  $R^2$  opleveren is geselecteerd voor het parameteriseren van het submodel voor uitgroeiduur.*

## 2.2 Registratiegegevens

Van een bedrijfsvergelijkingsgroep van telers van rode paprika werden datasets verkregen met de wekelijkse registraties van 6 bedrijven over de teeltseizoenen 2002 - 2003 en 2003 - 2004. De sets bevatten weekgegevens van stralingsom, ingestelde en gerealiseerde kasttemperatuur, schermen, EC en pH in de mat, watergift en drainpercentage, gerealiseerd gasverbruik, tellingen van zetting en aantal uitgroeiende vruchten in de telvakken, productie in kg van de gehele afdeling, energievraag van de vruchten volgens PROZET, sortering van geoogste vruchten.

## 2.3 Energieberekeningen

Een belangrijk element in dit project is het leggen van een koppeling tussen de kasttemperatuur en het gasverbruik. Deze informatie is nodig voor de energetische en gewaskundige optimalisatie van de te kiezen etmaaltemperaturen. De relaties tussen temperatuursetpoint, gerealiseerde kasttemperatuur en energieverbruik zijn niet constant. Ze worden vooral bepaald door seizoensinvloeden, weersinvloeden, fysieke en technische eigenschappen van de kas en allerlei instellingen op de klimaatcomputer, zoals schermstrategie, CO<sub>2</sub> dosering, etmaalbuffer, vochtbeheersing en nagestreefde verschillen tussen dag- en (voor)nachttemperatuur. Het is van groot belang om rekening te houden met deze invloedsfactoren en deze op betrouwbare wijze in de optimalisatieprocedure te verdisconteren. In dit project is dat gewaarborgd door de te gebruiken relaties tussen etmaaltemperatuur en energieverbruik te berekenen met het uitgebreide kasklimaat simulatiepakket KASPRO.

Als basisinformatie voor de optimalisatieberekeningen zijn uiteindelijk twee datasets samengesteld, bestaande uit de dagelijkse lichtsom, per dag de bereikbare minimum- en maximumtemperatuur, en per dag

in 10 stappen het verband tussen gerealiseerde kasluchttemperatuur en bijbehorende energievraag. Een van de datasets heeft betrekking op een energiezuinig bedrijf (geregistreerd jaarverbruik ca.  $32.5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ ), de andere op een meer conventioneel werkend bedrijf (geregistreerd jaarverbruik ca.  $42.5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ ). Als gevolg van enkele veralgemeniserende aannamen bij de simulaties in KASPRO ligt het jaarverbruik in de datasets waarmee de optimalisatie heeft gerekend iets hoger, nl. op  $36.4$  en  $47.7 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ jr}^{-1}$ . Dit heeft echter geen gevolgen voor de berekende besparingspercentages.

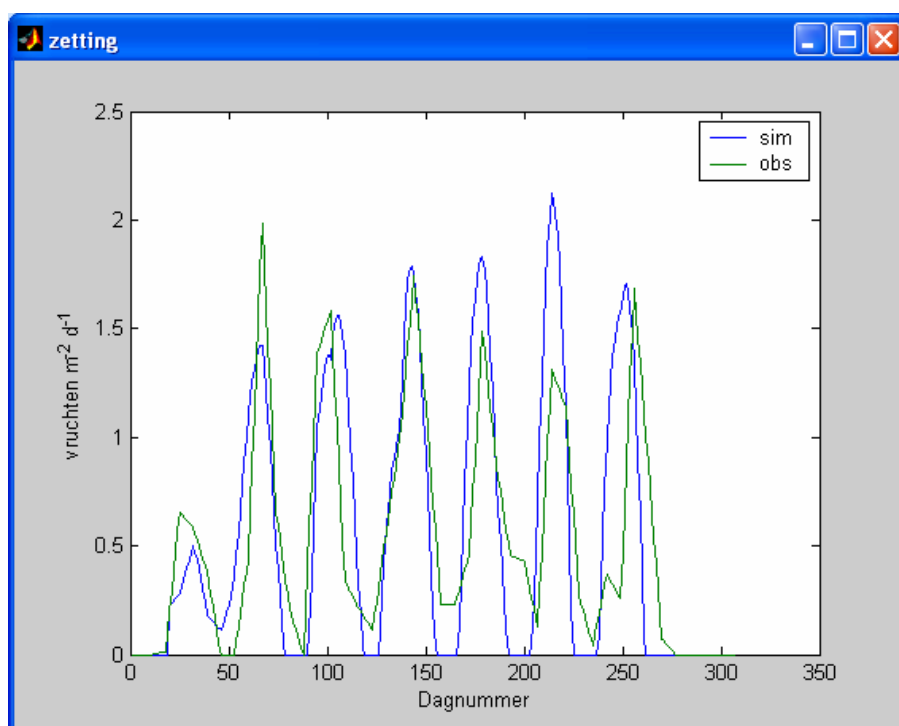
## 2.4 Dynamische optimalisatie

In dit onderzoek zijn temperatuurregimes doorgerekend voor een gehele teelt met volledige voorkennis van het weer. Om dit te realiseren is het seizoen dat ongeveer 350 dagen besloeg opgedeeld in 50 perioden van een week. Gedurende zo'n week werd verondersteld dat de gemiddelde etmaaltemperatuur constant is. Dit is een aanname die niet geheel strookt met de praktijk omdat het in de praktijk gebruikelijk is om op dagniveau al aanpassingen aan de klimaatinstellingen te doen. Maar zoals in paragraaf 3.2 zal worden aangetoond, is het voor de eerste benadering voldoende om op weekniveau het proces te beschrijven. Vervolgens is een doelstelling geformuleerd, zoals bijvoorbeeld 'realiseer een afgevlakt oogstpatroon met zo min mogelijk energie'. De essentie van de optimalisatie is daarna om die combinatie van 50 weektemperaturen te vinden die de geformuleerde doelstelling zo goed mogelijk realiseert. Stel nu dat voor elke weektemperatuur 10 waarden kunnen worden gekozen dan zijn er in principe  $10^{50}$  mogelijke combinaties van temperaturen die moeten geëvalueerd alvorens een uitspraak kan worden gedaan over de beste combinatie. Dat is een heilloze weg. Daarom is in dit onderzoek gebruik gemaakt van een efficiënte zoektechniek die de rekenklus tot hanteerbare proporties reduceert. Het antwoord is vergeleken met de regimes die door een tweetal tuinders waren gebruikt onder dezelfde klimaatomstandigheden.

## 3 Resultaten

### 3.1 Gewasmodel

Het model is gecalibreerd op een dataset van een teelt met 'Ferrari' uit 2004, die regelmatige zettingsgolven liet zien en waarbij alle geregistreerde gegevens onderling goed bleken te kloppen. Dit model bleek ook met enkele andere datasets goed mee te kunnen rekenen, waarbij meestal wel de parameters voor vegetatief begingewicht, dag waarop de eerste zetting wordt toegelaten en kastransmissie moesten worden aangepast. Om met teeltregistraties van andere rassen mee te kunnen rekenen bleek doorgaans ook de uitgroeiduurfunctie opnieuw te moeten worden gecalibreerd.

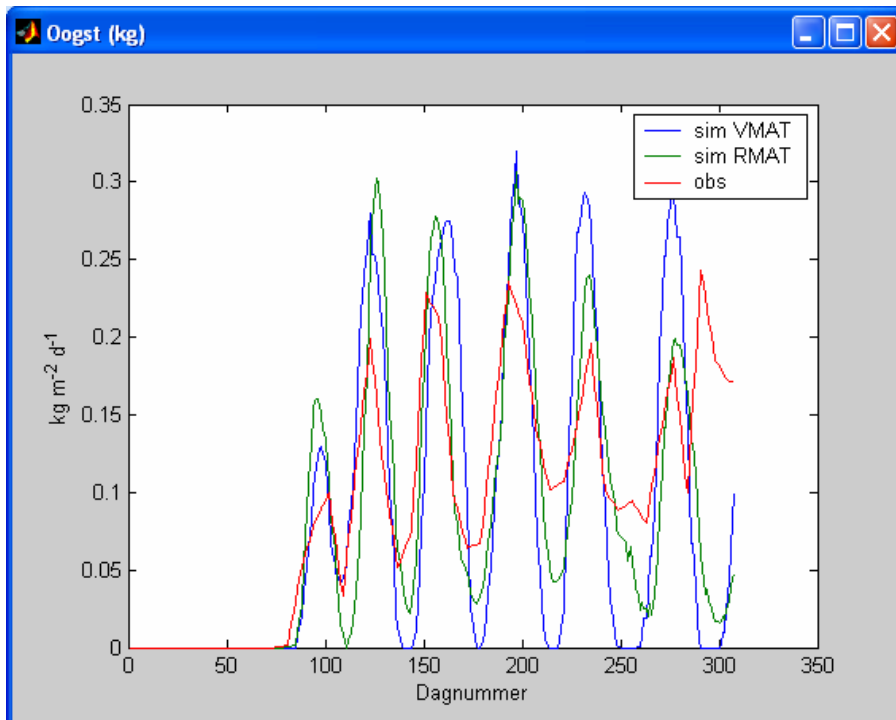


Figuur 3.1 – Vruchtzetting bij het ras 'Ferrari' (aantal  $m^{-2} d^{-1}$ ) zoals geregistreerd op een praktijkbedrijf in 2004 (groene lijn) en nagerekend door het model (blauwe lijn). De tijd is uitgedrukt in kalenderdagen; dag 1 = 1 januari 2004. Het gewas is geplant in week 47 van 2003.

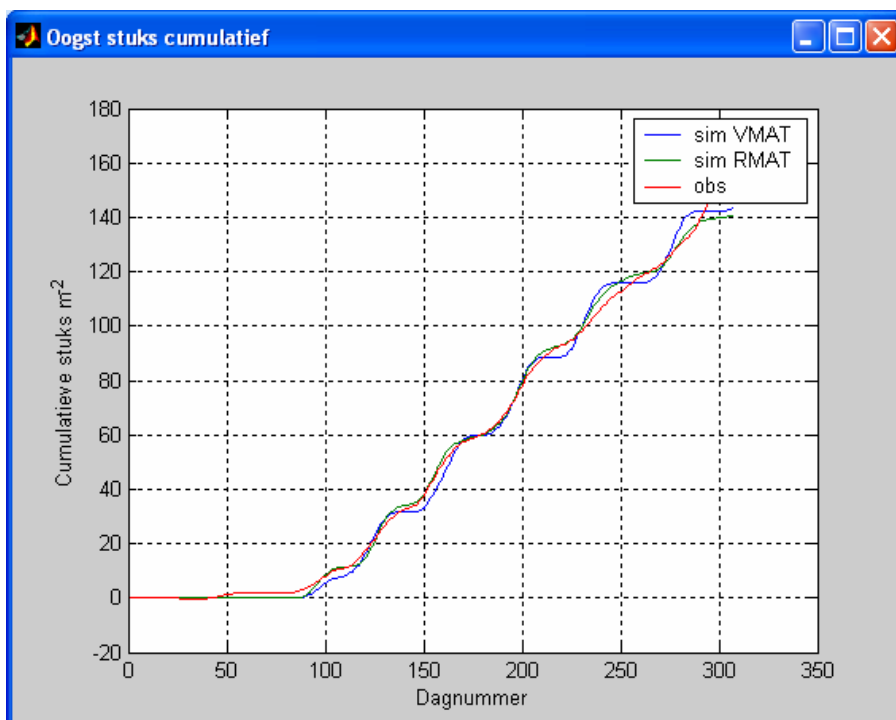
Uit fig 3.1 blijkt dat de opeenvolging van zettingsgolven in de referentieteelt goed kon worden gesimuleerd. Het model berekent dat al vanaf het begin van het jaar in beperkte mate zetting mogelijk is, maar door een speciale instelling wordt vruchtzetting pas toegelaten vanaf dag 19. Dit komt overeen met de vruchtsnoei die telers de praktijk ook toepassen. Zie voor meer informatie over de boekhouding van de aantallen uitgroeiende en geoogste vruchten paragraaf 3.2.

De geregistreerde gegevens bevatten geen informatie over het gemiddelde vruchtgewicht of het aantal geoogste vruchten. Het omrekenen van aantal geoogste vruchten naar productie in  $kg m^{-2}$  kan dus alleen indirect gebeuren. Hierbij werd voor de vruchten een vast gemiddeld versgewicht van  $185 g$  aangenomen en een gehalte aan droge stof van  $8.0\%$ . In fig. 3.2 is te zien dat de geregistreerde productie (rode lijn) fluctuaties vertoont die vergelijkbaar zijn met de zettingsgolven in fig. 3.1. De gesimuleerde productie, berekend uit  $kg$  droge stof  $m^{-2} d^{-1}$ , komt hier behoorlijk goed mee overeen (blauwe lijn). Een verschil is dat de berekende oogstpieken gedurende de hele teelt ongeveer even scherp blijven, terwijl de verschillen tussen pieken en dalen in de teeltregistratie geleidelijk afnemen. Een derde berekening van de productie is

gebaseerd op de geregistreerde zetting, onder aanname van een constant gemiddeld vruchtgewicht (groene lijn). Hierbij wordt dus alleen de modelfunctie voor de simulatie van uitgroei duur gebruikt, niet de zettingsfunctie. De resultaten van deze berekening stemmen overeen met de geregistreerde en de volledig gesimuleerde productiecijfers. Uit fig. 3.3 blijkt dat de berekende cumulatieve aantallen vruchten goed overeen kwamen met de geregistreerde gegevens.



Figuur 3.2 – verloop van de productie van paprika, uitgedrukt in  $\text{kg m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , in de zelfde teelt als getoond in fig. 3.1, zoals geregistreerd (rood), gesimuleerd door het model onder aanname van 8% droge stof in de vruchten (blauw), en berekend uit geregistreerde zetting met behulp van de uitgroei duurfunctie van het model (groen), onder aanname van 185 g vers per vrucht.



Figuur 3.3 – cumulatieve aantallen geoogste vruchten ( $\text{stuks m}^{-2}$ ) in de zelfde teelt als getoond in fig. 3.1, zoals geregistreerd (rood), berekend door het model (blauw), berekend uit geregistreerde zetting met behulp van de uitgroei duurfunctie van het model (groen).

Voor de praktijk zal op korte termijn het berekenen van oogstprognose waarschijnlijk de eerste praktische

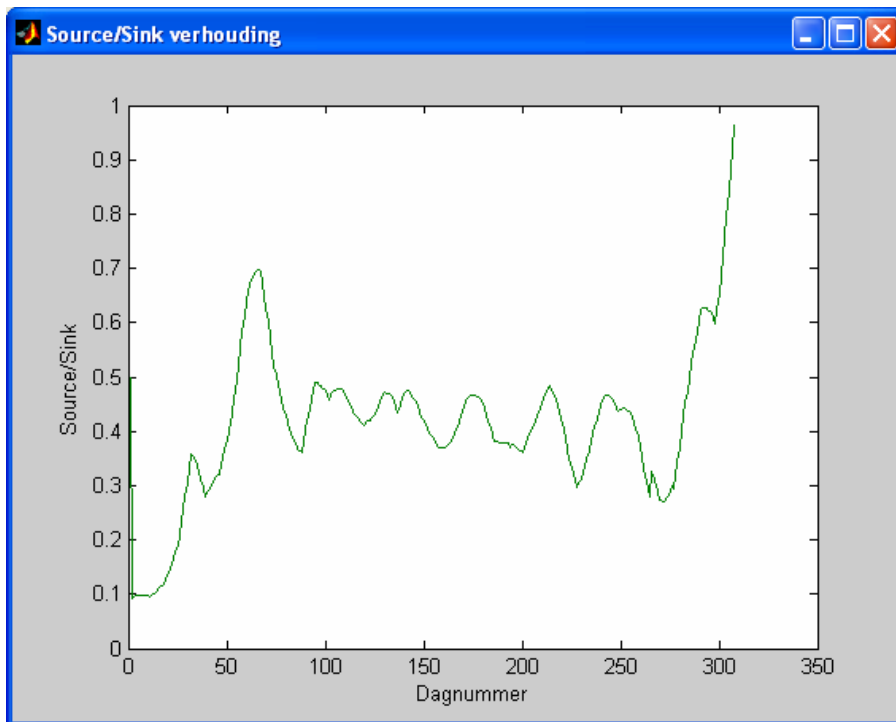
toepassing van het model zijn. Oogstprognoses worden doorgaans berekend op weekbasis. Wanneer voor de referentieteel weergegeven in fig 3.1 t/m 3.3 uit de output van het model gegevens op weekbasis worden berekend blijken deze goed te correleren met de geregistreerde weekgegevens (tabel 3.1). De correlaties in de tabel laten zien dat in de referentie-dataset de overeenkomst tussen de het aantal te oogsten vruchten per week uit de balansberekening van zetting en het aantal uitgroeiende vruchten per week voor 91% overeenkomt met de aantallen berekend uit de kg-productie. In een dergelijk gave dataset is de voorspellende kracht van het uitgroei-duur-model hoog: de wekelijkse oogst berekend uit geregistreerde zetting bleek voor 87% overeen te komen met de aantallen berekend uit de kg-productie, en voor 91% met de aantallen berekend op grond van de balans van zetting en uitgroeiende vruchten. Behalve het submodel voor uitgroei-duur kan ook het complete dynamische gewasmodel een volledig gesimuleerde schatting opleveren van de stuksoogst per week. In dit geval wordt uitsluitend informatie over het gewas aan het begin van de teelt en het geregistreerde kasklimaat gebruikt. De simulatieresultaten, vertaald naar weekbasis, bleken voor 77% overeen te stemmen met het verloop van de stuksproductie berekend uit de balans van zetting en aantal uitgroeiende vruchten per week, en voor 79% met de aantallen berekend uit de geregistreerde kg-productie. De simulatieresultaten van het uitgroei-duur-submodel en het complete dynamische model bleken onderling voor 87% overeenkomst te vertonen.

Correlaties ( $R^2$ ) tussen weekgegevens van te oogsten vruchten per $m^2$ uit verschillende bron			
	balans- berekening	berekend uit kg $m^2\ wk^{-1}$	uit zetting met submodel uitgroei-duur
berekend uit $kg\ m^2\ wk^{-1}$	0.91		
uit zetting met submodel uitgroei-duur	0.91	0.87	
complete simulatie (dynamisch gewasmodel)	0.77	0.79	0.87

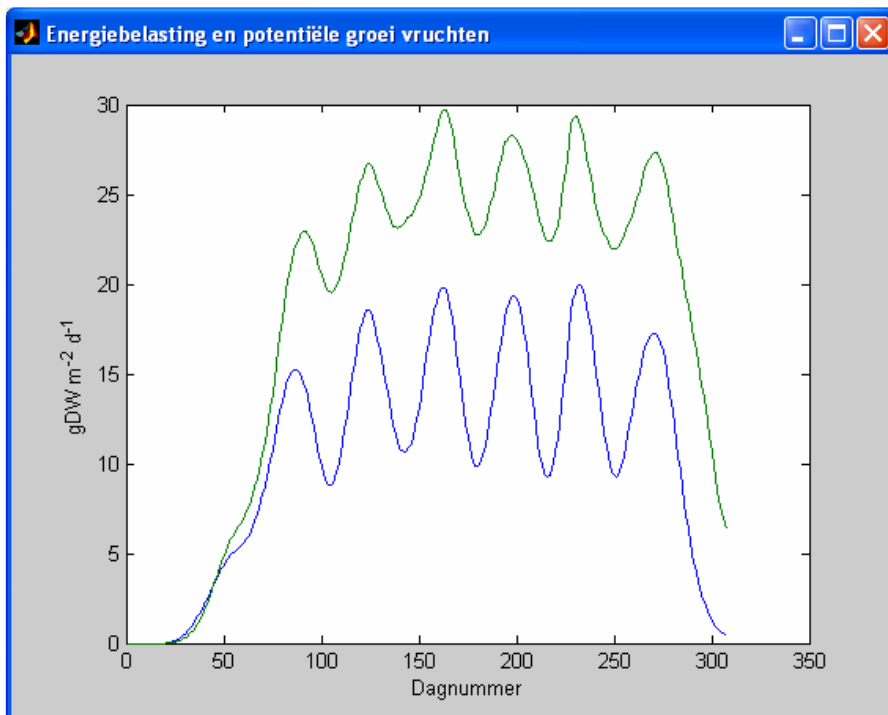
*Tabel 3.1 – Berekende correlaties ( $R^2$ ) tussen gegevens van de stuksoogst op weekbasis, berekend op grond van de balans van weekregistraties van zetting en plantbelasting, stuks geschat op basis van geregistreerde kg-productie, berekend uit geregistreerde vruchtzetting per week met behulp van het submodel voor uitgroei-duur, en compleet gesimuleerd met het dynamische gewasmodel.*

Behalve voor prognoses van vruchtzetting en oogst kan het model ook inzicht geven in verschillende moeilijk direct waarneembare aspecten van de actuele toestand van het gewas. Zaken zoals de verhouding tussen assimilatenbeschikbaarheid en -vraag (source/sinkverhouding), de vraag naar assimilaten door de vruchten, hoeveel de plant in vegetatieve groei (en daarmee in toekomstige productiecapaciteit) investeert, kunnen van groot belang zijn bij het nemen van beslissingen over vruchtdunning, groen oogsten of temperatuurstellingen op de klimaatcomputer. Fig. 3.4 geeft het verloop van de source/sinkverhouding weer. Het model berekent dat het algemene niveau rond de 0.5 ligt, wat betekent dat het gewas aanzienlijk sneller zou kunnen groeien als er meer assimilaten beschikbaar waren.





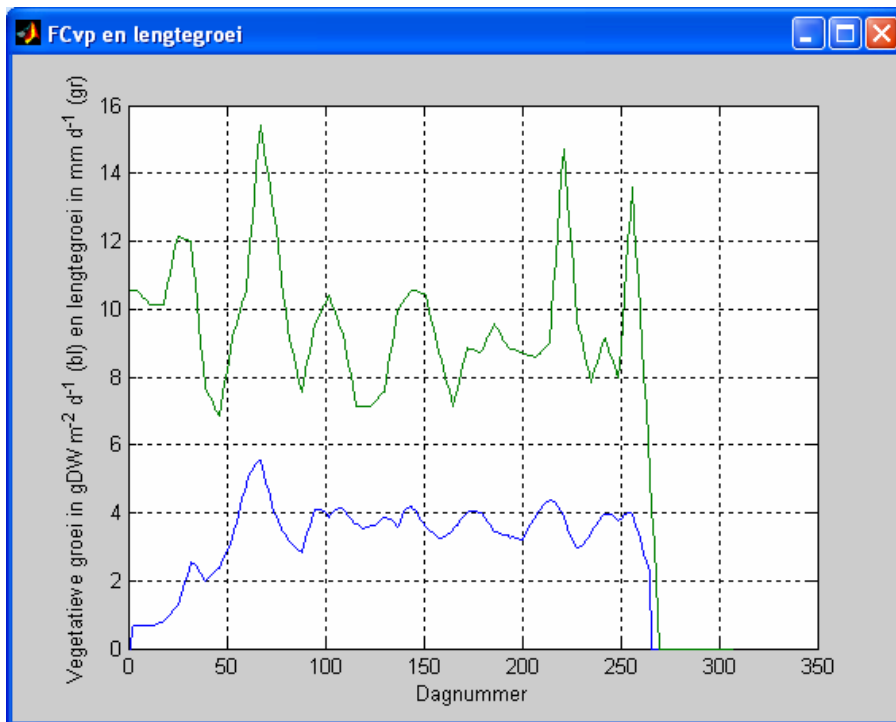
Figuur 3.4 – verloop van de verhouding tussen assimilatenvraag en –aanbod (source/sink). De gegevens komen overeen met die in de voorgaande figuren.



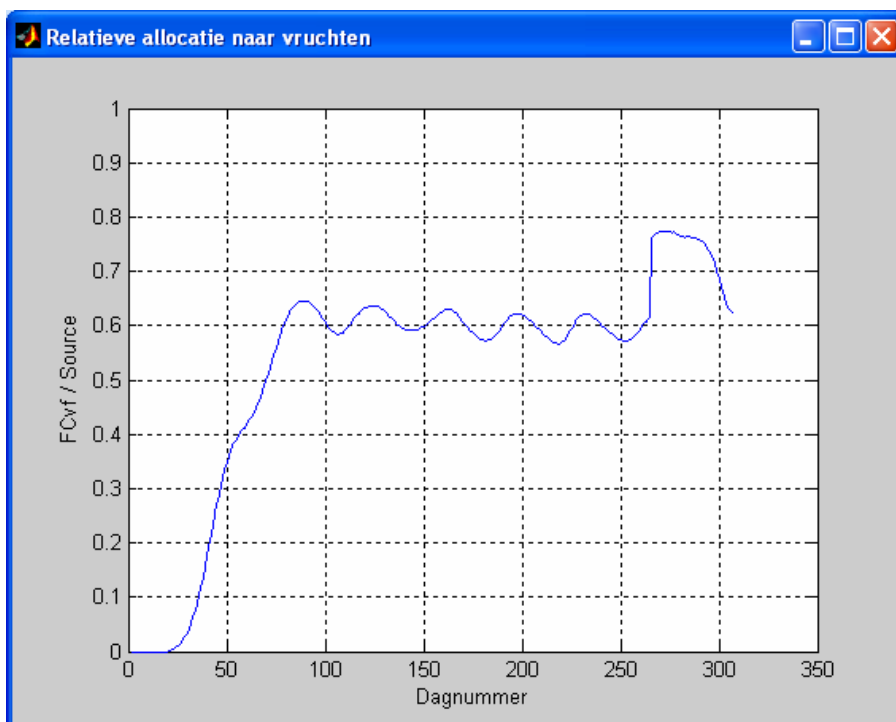
Figuur 3.5 – verloop van de energiebelasting (blauw) en potentiële groei (groen) van de vruchten, uitgedrukt in  $g\ m^{-2}\ d^{-1}$  droge stof.

NB energiebelasting is een term die geen direct verband houdt met gasverbruik. In het programma PROZET wordt het begrip gebruikt voor het effect van uitgroeiende vruchten op de vruchtzetting. Voor het gemak is deze term hier overgenomen.

Fig. 3.6 laat de berekende vegetatieve groei zien, tegelijk met de geregistreeerde lengtegroei van het gewas. Het is duidelijk dat er parallellen bestaan tussen deze waarden. Rond dag 70 vindt de tweede zetting plaats en lijkt de plant groeikracht over te hebben. Dit leidt tot een groot zetsel, waardoor de vegetatieve groei enkele weken later onder druk komt te staan. De plotselinge afname rond dag 270 heeft te maken met het verwijderen van de 'kop' uit het gewas.



Figuur 3.6 – verloop van de geregistreeerde lengtegroei ( $\text{mm d}^{-1}$ , omgerekend uit  $\text{cm wk}^{-1}$ ) en de vegetatieve groeisnelheid ( $\text{g droge stof m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ). De gegevens komen overeen met die in de voorgaande figuren.

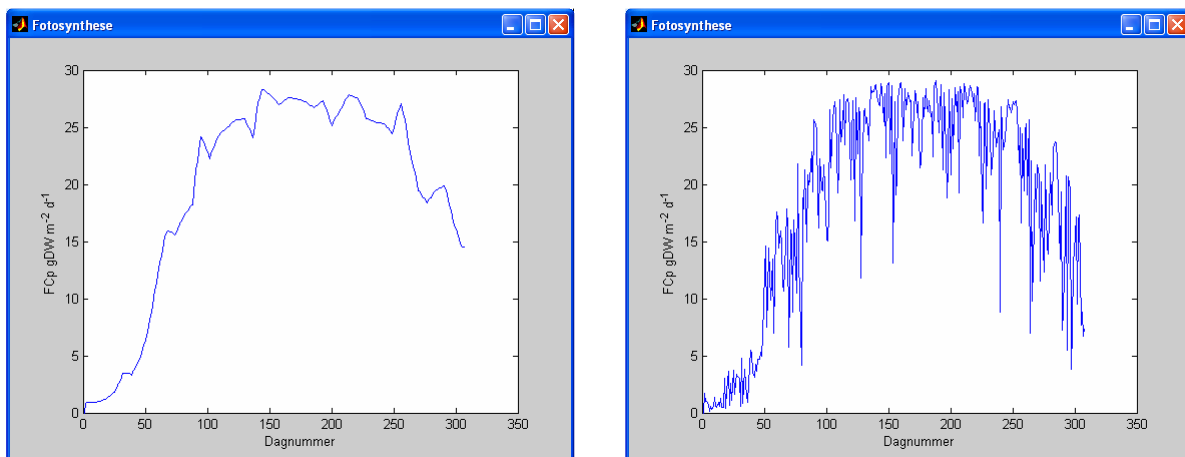


Figuur 3.7 – verloop van de hoeveelheid assimilaten die het gewas in vruchten investeert, relatief ten opzichte van de dagelijks beschikbare hoeveelheid assimilaten. De gegevens komen overeen met die in de voorgaande figuren.

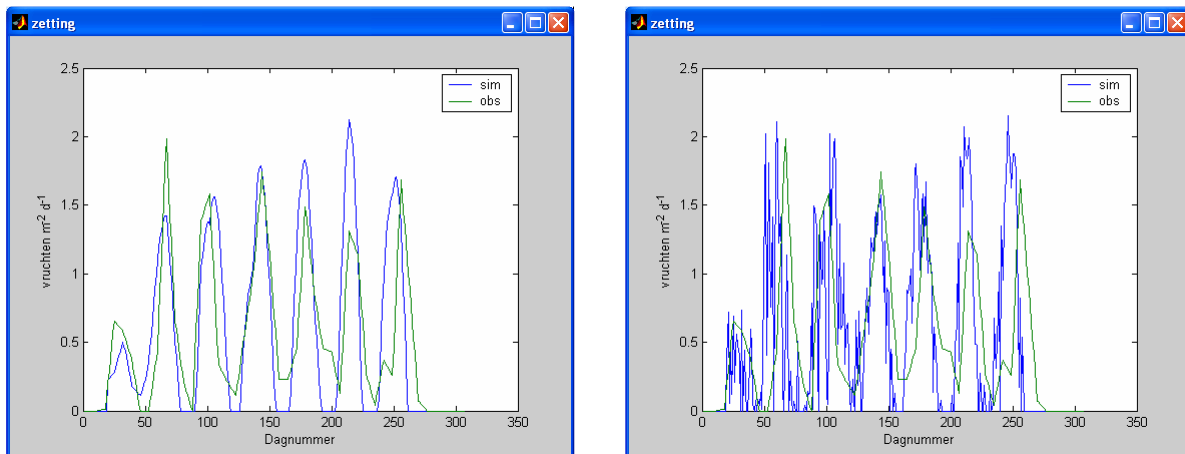
Uit fig. 3.7 blijkt dat het gewas gedurende een groot deel van de teelt rond de 60% van de beschikbare assimilaten in de vruchten investeerde. Bij jonge planten is dat minder, omdat het gewas zich dan nog in de opbouwphase bevindt. Vanaf dag 270 gaat het gewas relatief meer in vruchten investeren, wat samenhangt met het feit dat de vruchten dan geen concurrentie meer ondervinden van de vegetatieve groei.

## 3.2 Dynamische aspecten

Bij de in paragraaf 3.1 gepresenteerde resultaten is uitgegaan van klimaatregistraties per week. Het model rekent echter in tijdstappen van 1 dag. De weekgegevens werden daarom 'uitgesmeerd' tot etmaalgegevens om als input voor het model te kunnen dienen. Deze gegevens bevatten echter veel minder variatie dan echte daggemiddelden. Bij toepassing in een beslissingsondersteunend systeem zal het model waarschijnlijk wel met directe dagwaarden werken. De vraag is hoe gevoelig het model is voor dergelijke korte termijn variaties, en of de voorspellingen dan nog wel correct zullen zijn.



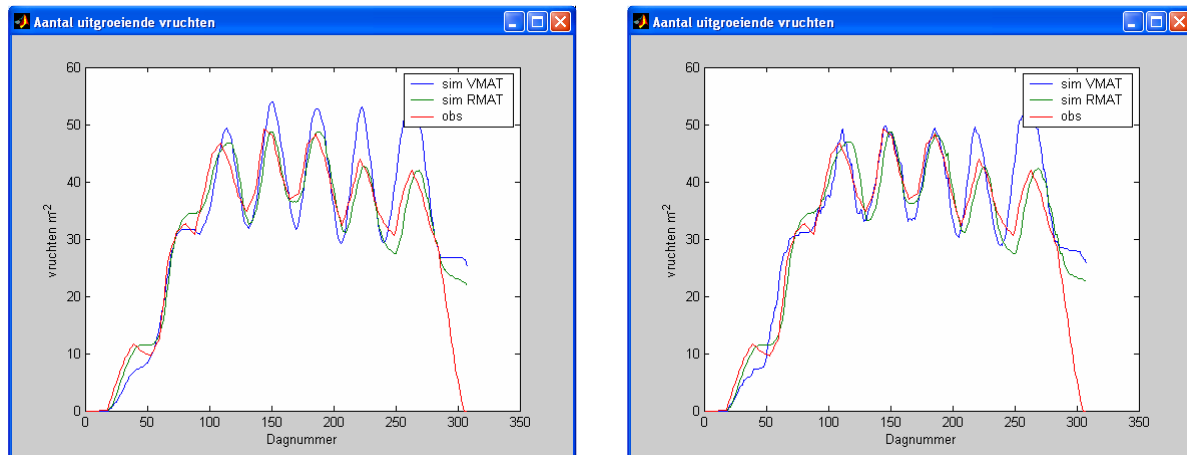
Figuur 3.8 – Verloop van de bruto fotosynthese (in  $g\ m^{-2}\ d^{-1}$  drooggewicht-equivalent) berekend op basis van uitgespreide weekgegevens (links) en echte dagwaarden (rechts).



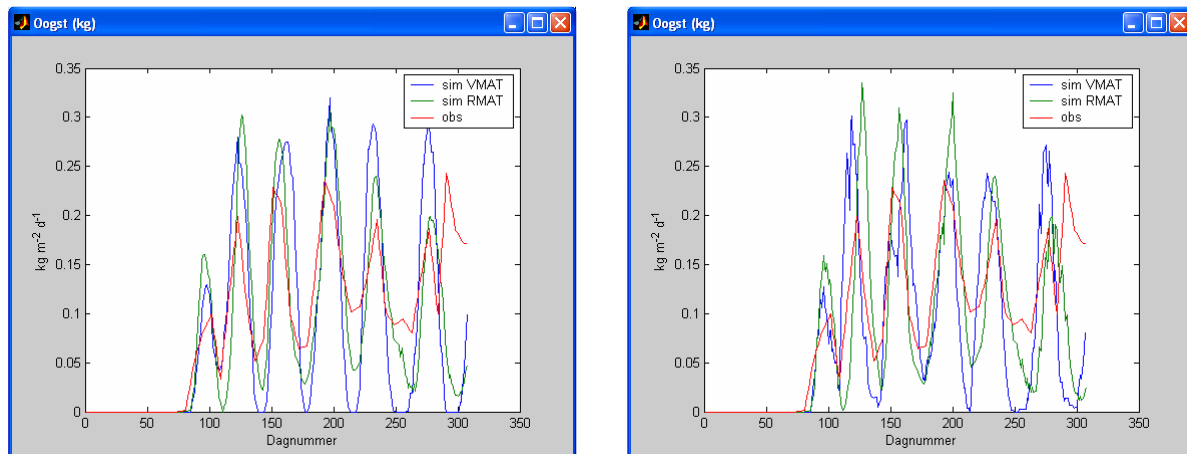
Figuur 3.9 – Verloop van de vruchtzetting (vruchten  $m^{-2}\ d^{-1}$ ), berekend op basis van uitgespreide weekgegevens (links) en echte dagwaarden (rechts).

Figuur 3.8 laat zien dat de dagelijkse fotosynthese flink kan schommelen. Omdat de assimilatieprocessen in de plant vooral lichtafhankelijk zijn is dat niet verwonderlijk: de dagelijkse hoeveelheden licht die in de kas komen kunnen afhankelijk van de weersgesteldheid flinke verschillen vertonen. De door het model berekende dagelijkse vruchtzetting blijkt sterk op deze lichtvariatie te reageren, hoewel de algemene trend niet veel verschilt tussen de linker- en rechtergrafiek (fig. 3.9). In de praktijk is het onderscheid tussen 'gezet' en 'niet gezet' veel minder duidelijk dan het alles-of-niets effect waarmee het model rekent. Omdat

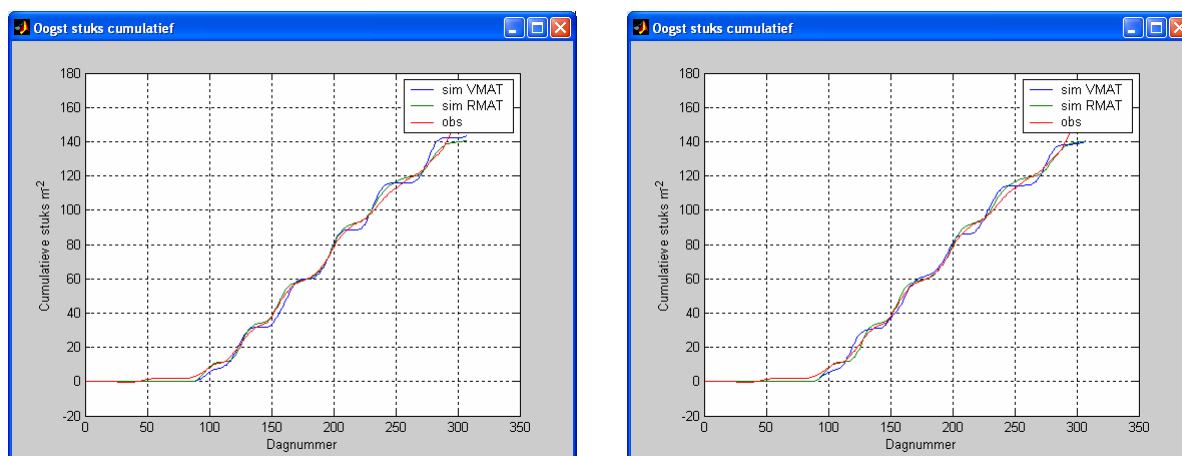
het in de kas vaak wel een week kan duren voordat redelijk zeker is dat een jong vruchtje niet meer zal aborteren, nemen telers de vruchtzetting normaal eens per week waar; vaker is om deze reden niet erg zinvol. De extra variatie in vruchtzetting wanneer met echte daggegevens wordt gerekend wordt weerspiegeld in het verloop van het aantal oogstbare vruchten (fig. 3.11). Ook hier geldt echter dat het verschil niet erg relevant is omdat telers enkele dagen speling hebben bij het oogsten van de vruchten.



Figuur 3.10 – Aantal uitgroeiende vruchten aan de plant ( $\text{vruchten m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ), berekend op basis van uitgespreide weekgegevens (links) en echte dagwaarden (rechts).



Figuur 3.11 – Verloop van de productie ( $\text{kg m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ), berekend op basis van uitgespreide weekgegevens (links) en echte dagwaarden (rechts).



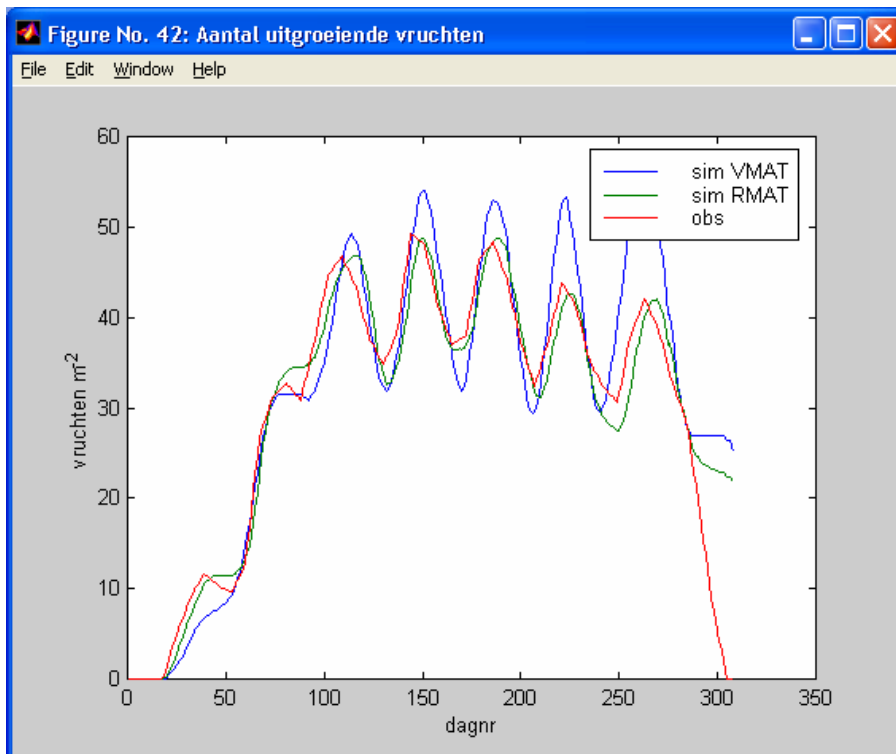
Figuur 3.12 – cumulatieve productie (geogste vruchten  $m^2 d^{-1}$ ), berekend op basis van uitgespreide weekgegevens (links) en echte dagwaarden (rechts).

Er blijkt een duidelijk verschil te bestaan tussen direct reagerende processen zoals vruchtzetting, en waarden die ontstaan als resultaat van een optelling (integratie) van deze snelle processen, zoals het aantal uitgroeïende vruchten aan de plant. Uit fig. 3.10 blijkt dat er in het verloop van het aantal uitgroeïende vruchten vrijwel geen verschil is te zien tussen het rekenen met uitgesmeerde weekgegevens (links) en echte daggegevens (rechts). Ook voor de cumulatieve oogstcijfers (fig. 3.12) blijken de verschillen minimaal te zijn.

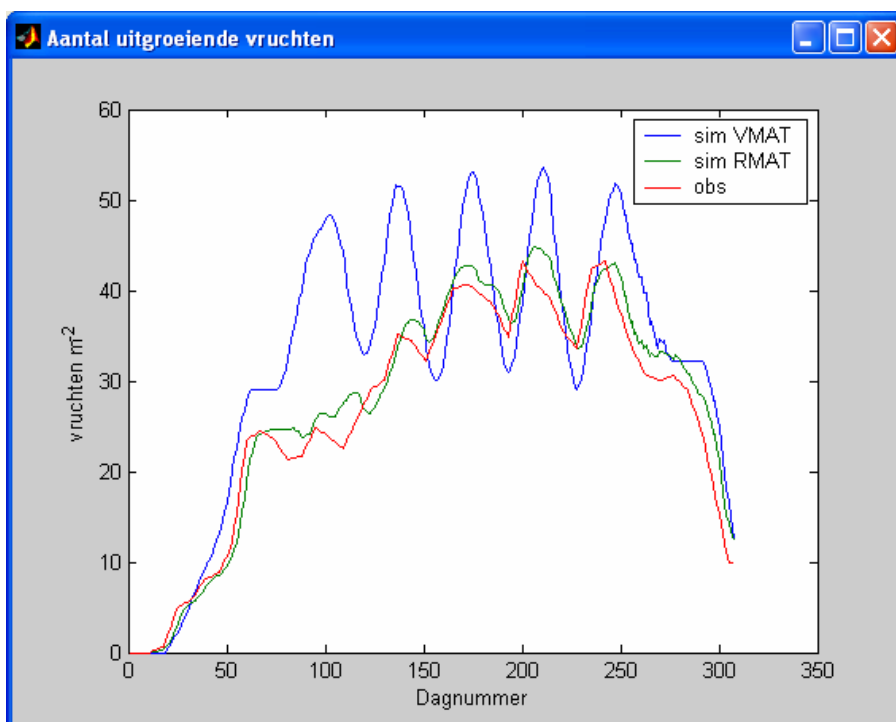
### 3.3 Registraties

Beschikbaar zijn registratiegegevens van enkele praktijkbedrijven. Telers registreren wekelijks klimaat-, gewas- en oogstgegevens en gasverbruik. Uit 2004 zijn er 2 sets beschikbaar van telers die het ras Ferrari hebben geteeld, en vier die een ander rood ras hadden staan. Uit 2003 zijn van dezelfde telers ook datasets beschikbaar. Een belangrijk punt in het project is het beoordelen van de kwaliteit van de datasets. Het te ontwikkelen model moet in principe met correcte inputgegevens een 'gave' dataset na kunnen rekenen. Het model rekent op basis van ingevoerde gegevens met betrekking tot het kasklimaat en informatie over de begincondities van het gewas. De simulaties worden daarna beoordeeld door ze te vergelijken met registratiegegevens van de teelt. Wanneer de klimaatgegevens of de teeltregistraties fouten bevatten zou ten onrechte de conclusie kunnen worden getrokken dat het model niet klopt. Voor toepassing van het model in de praktijk is het in principe mogelijk om het model tussentijds te corrigeren op basis van tellingen in het gewas. Ook hierbij is het van belang om te weten hoe betrouwbaar die tellingen zijn. Zouden die namelijk niet kloppen dan bestaat het gevaar dat het middel (toepassen van correcties) erger is dan de kwaal (afwijkingen in modelberekeningen).

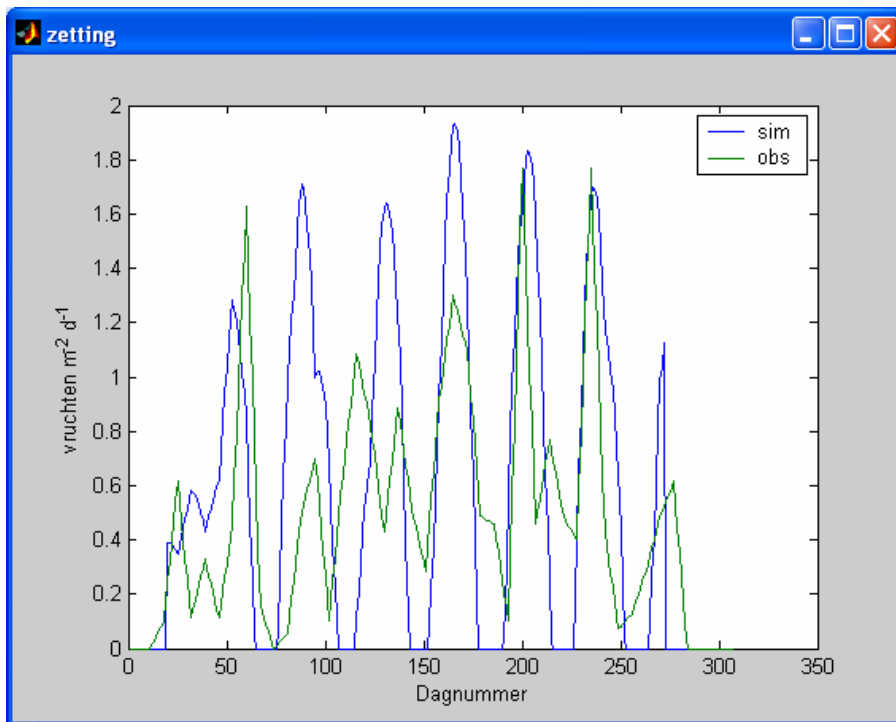
De geregistreerde oogstgegevens ( $kg m^{-2} wk^{-1}$ ) zijn afkomstig uit een complete afdeling, de gegevens van vruchtzetting en plantbelasting worden geregistreerd in een of meerdere telvakken. De vraag is steeds hoe representatief die vakken zijn voor het hele bedrijf. Bij de beslissing of een vrucht rijp genoeg is om te plukken bestaat een bepaalde marge. Hoe vaak de oogsters in een bepaald pad langskomen, hangt deels af van de arbeidsspreiding op het bedrijf, de afzetorganisatie kan bepaalde eisen stellen aan het rijpheidsstadium waarin de vruchten mogen worden aangevoerd. Verder is het belangrijk of er redelijk nauwkeurig wordt geteld. Een indruk van de algemene consistentie van een dataset kan worden verkregen door het verloop van de stuksproductie in het teeltseizoen op verschillende manieren te berekenen. In het ideale geval vallen de gegevens m.b.t. het aantal geogste vruchten uitgezet in de tijd, op verschillende manieren bepaald, precies op elkaar.



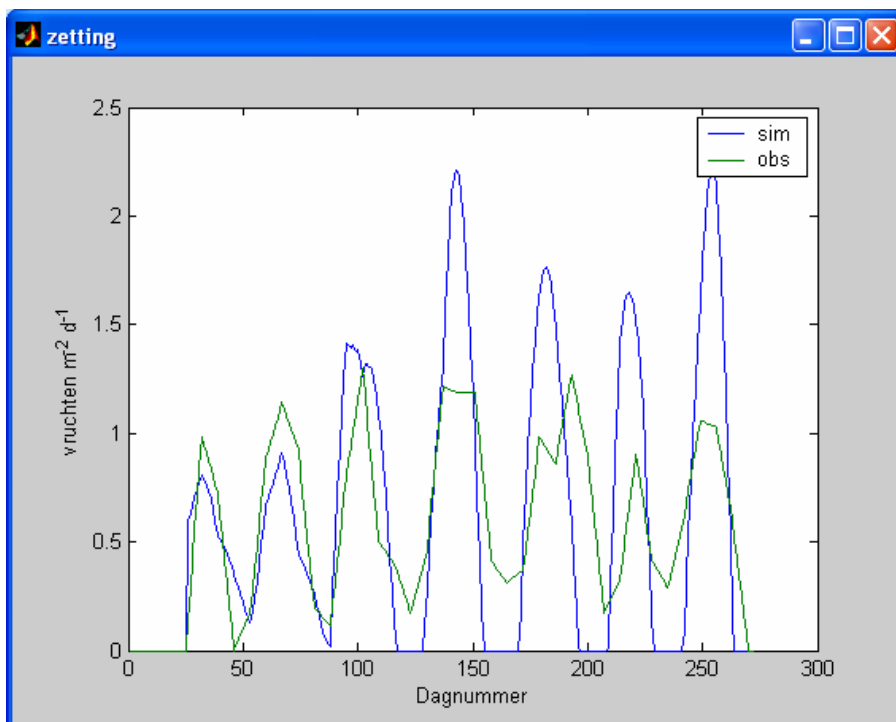
Figuur 3.15 – verloop van het aantal uitgroeïende vruchten per  $m^2$ , zoals geregistreerd door de teler (rood), berekend door het model (blauw), en berekend met de uitgroeïduurfunctie van het model op basis van de geregistreeerde vruchtzetting (groen). De getoonde gegevens komen overeen met die in fig 3.1 t/m 3.3.



Figuur 3.16 – een voorbeeld van een afwijkend verloop van het aantal uitgroeïende vruchten per  $m^2$ . De getoonde gegevens hebben betrekking op een andere teelt dan die in fig 3.1 t/m 3.3 en 3.8.



Figuur 3.17 – een voorbeeld van een verschillend verloop van de geregistreeerde (groen) en gesimuleerde (blauw) vruchtzetting. De getoonde gegevens hebben betrekking op de zelfde teelt als die in fig 3.16.



Figuur 3.18 – in een ander geval kwam het verloop van de gesimuleerde vruchtzetting (blauw) redelijk goed overeen met de geregistreeerde waarden (blauw). De getoonde gegevens horen bij die in fig. 3.19 en 3.20.

*Methode 1:* op grond van balansberekeningen van vruchtzetting en aantal uitgroeiende vruchten aan de plant per m<sup>2</sup> per week kan het verloop van het wekelijkse geoogste aantal vruchten per m<sup>2</sup> worden afgeleid.

*Methode 2:* op grond van de geregistreeerde kg-productie per week kan, onder aanname van het gemiddeld vruchtgewicht, een verloop van de stuksproductie worden berekend. Het gemiddeld vruchtgewicht is doorgaand niet constant in het teeltseizoen, maar de lokalisatie van de oogstpieken en -dalen is op deze manier wel goed zichtbaar te maken.

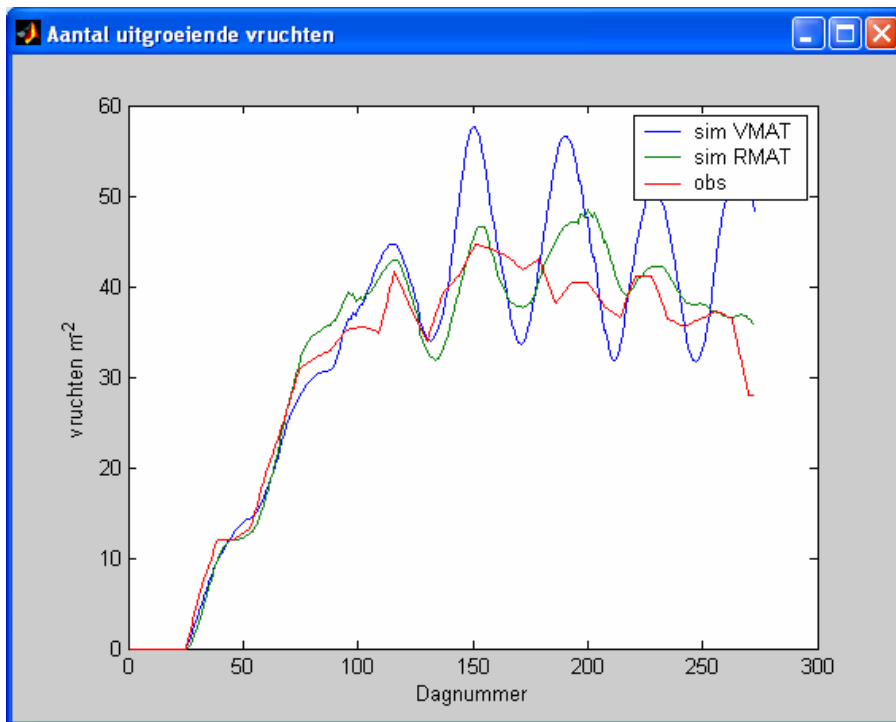
*Methode 3:* op grond van de geregistreerde gegevens van vruchtzetting en kastemperatuur kan met behulp van de uitgroeiduurfunctie van het model een verloop van de stuksproductie per week worden berekend. Een bijkomende mogelijkheid om tegenstrijdigheden in de registraties op te sporen is om de geregistreerde aantallen uitgroeiende vruchten te vergelijken met de gesimuleerde aantallen. Ook hier is er een tussenmogelijkheid waarbij op basis van de geregistreerde zetting en gebruik makend van de uitgroeiduurfunctie van het model het aantal uitgroeiende vruchten wordt berekend. In fig. 3.15 wordt deze berekening weergegeven voor de gegevens die ook in fig. 3.1 t/m 3.3 staan weergegeven. Te zien is dat het verloop van het aantal uitgroeiende vruchten berekend uit zetting en uitgroeiduur goed overeenkomt met de geregistreerde gegevens. Het model volgt het verloop goed, maar overschat het effect van de laatste zettingsgolf. De gesimuleerde fluctuaties in het aantal uitgroeiende vruchten zijn over het algemeen wat groter dan bij de geregistreerde gegevens.

Waarschijnlijk hangt dit samen met variatie tussen individuele planten, en/of met een niet volledige synchronisatie van de zettingsgolven in de praktijk. Fig. 3.15 en 3.16 geven een voorbeeld van een afwijkend patroon: het model verwachtte dat er rond dag 85 een flinke zettingsgolf zou optreden, deze bleef echter gedeeltelijk uit. In plaats van de volgende zetting die in de zelfde kadans rond dag 130 werd verwacht traden er in werkelijkheid twee kleinere zettingsgolven op. Vanaf ongeveer dag 150 komt het gewas toch weer in de regelmaat die het model verwachtte. Dit type verstoring is mogelijk opgetreden als gevolg van een ziekte in het gewas. Om in de periode tussen dag 85 en 150 toch correcte prognoses te krijgen zouden de aantallen waarmee het model rekent tussentijds moeten worden gecorrigeerd.

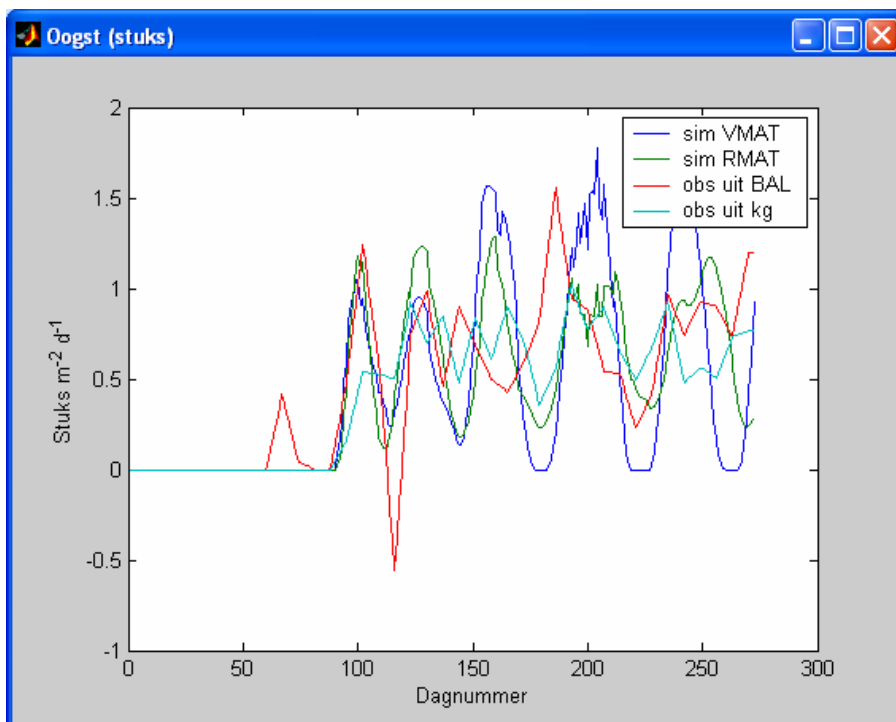
Een tweede voorbeeld van verschillen tussen registratie en simulatie wordt weergegeven in fig. 3.18 t/m 3.20. In deze teelt werd de vruchtzetting behoorlijk goed gesimuleerd (fig. 3.18). Er bleek echter verschil op te treden tussen de getelde en gesimuleerde aantallen uitgroeiende vruchten (fig. 3.19). Het aantal uitgroeiende vruchten, berekend met de uitgroeiduurfunctie van het model op basis van de getelde zetting (groene lijn) bleek vrij goed overeen te komen met het gesimuleerde verloop (blauw). Wanneer de op basis van de registraties van zetting en aantal uitgroeiende vruchten het aantal geoogste vruchten wordt berekend (fig. 3.20), dan blijkt het resultaat (rode lijn) op sommige punten sterk af te wijken van de gesimuleerde aantallen (blauw) en de aantallen berekend uit de kg-productie (lichtblauwe lijn), onder aanname van een vast gemiddeld vruchtgewicht van 185 g. Er lijkt toch een redelijke overeenstemming te bestaan tussen gesimuleerde oogst en de oogstcijfers berekend uit de geregistreerde kg-productie, wanneer wordt aangenomen dat de meeste vluchten in twee keer zijn geoogst. Met name de gesimuleerde pieken rond dag 120, 160 en 200 overlappen steeds vrij nauwkeurig met een vroege en een late piek in de geregistreerde oogstgegevens. De overeenstemming met de groene lijn, berekend uit de geregistreerde zetting met behulp van de uitgroeiduurfunctie van het model, is hiermee vrij goed in overeenstemming. Kennelijk is in dit geval vooral de telling van het aantal uitgroeiende vruchten niet erg nauwkeurig.

Bij toepassing van het model in een beslissingsondersteunend systeem zouden verschillen tussen gesimuleerde en getelde aantallen uitgroeiende vruchten gesignaleerd worden, en aanleiding vormen voor de teler om opnieuw te tellen. Op basis van hertelling kan worden beslist of de registratie moet worden bijgesteld, of dat het aantal vruchten in het model dient te worden bijgesteld. Wat betreft de geconstateerde verschillen tussen geregistreerde en gesimuleerde aantallen geoogste vruchten geldt dat het model uitsluitend kan berekenen wanneer de vruchten het oogstbare stadium hebben bereikt. Het criterium om daadwerkelijk te oogsten is niet helemaal hard: een teler kan besluiten om wat 'bonter' te oogsten of juist de vruchten wat langer te laten hangen, zelfs wanneer ze al volledig zijn doorgekleurd. Het uiteindelijke oogstmoment zal in de praktijk afhangen van de afzetcondities, en de beschikbaarheid van arbeidskrachten op het bedrijf.





Figuur 3.19 – in dit voorbeeld was de overeenstemming tussen geregistreeerde (rood) en gesimuleerde (blauw) aantallen uitgroeïende vruchten minder goed. De groene lijn geeft het verloop van het aantal uitgroeïende vruchten weer dat werd berekend uit de geregistreeerde zetting met behulp van de functie voor uitgroeïduur van het model. De getoonde gegevens hebben betrekking op de zelfde teelt als die in fig. 3.18 en 3.20.



Figuur 3.20 – verloop van het aantal geoogste vruchten (stuks  $m^{-2} d^{-1}$ ) in de zelfde teelt als die in fig. 3.18 en 3.19. Donkerblauw: gesimuleerd; lichtblauw: berekend uit geregistreeerde productie in  $kg m^{-2} d^{-1}$ ; berekend uit registraties van zetting en aantal uitgroeïende vruchten (rood); berekend uit geregistreeerde zetting met behulp van de uitgroeïduurfunctie van het model (groen). In dit voorbeeld is er weinig overeenstemming tussen de verschillende lijnen.

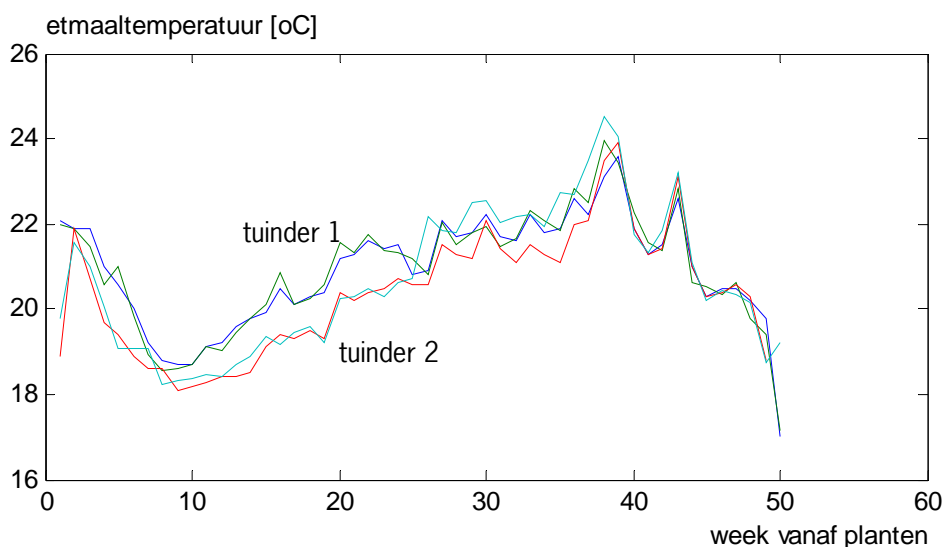
### 3.4 Energieberekeningen

De temperatuur van de kaslucht wordt bepaald door het ingestraalde vermogen uit zonlicht, het toegevoerde vermogen vanuit de verwarming en het energieverlies door de omhulling en via de ventilatie. Op koude, sombere dagen zal een hogere kasluchttemperatuur samen gaan met een grotere verwarmingsbehoefte. Op zonnige dagen zal een verhoging van de kasluchttemperatuur nauwelijks meer verwarmingsvermogen vragen, maar vooral een vermindering van de ventilatie betekenen.

Het gevraagde verwarmingsvermogen en het vereiste ventilatie debiet hebben echter niet alleen met de gewenste temperatuur te maken. Op kasklimaatcomputers kan een heel arsenaal aan instellingen worden aangetroffen waarmee een minimum buistemperatuur of een minimum raamstand kan worden ingesteld. Veel tuinders maken intensief van deze instelmogelijkheden gebruik, bijvoorbeeld ten behoeve van de luchtvochtigheidsregeling of met het oog op een bewuste verhoging van de warmtevraag om over voldoende rookgas CO<sub>2</sub> te kunnen beschikken. Het precieze verband tussen kasluchttemperatuur en energieverbruik wordt ook nog eens beïnvloed door het type kasbedekkingsmateriaal, het schermgebruik en de warmtevoorzieningsinstallatie (type condensor, ketelrendement). Tenslotte is er nog een belangrijke factor die de relatie tussen temperatuur en energieverbruik beïnvloedt, namelijk de ruimte die de tuinder tussen stoken en ventileren toestaat.

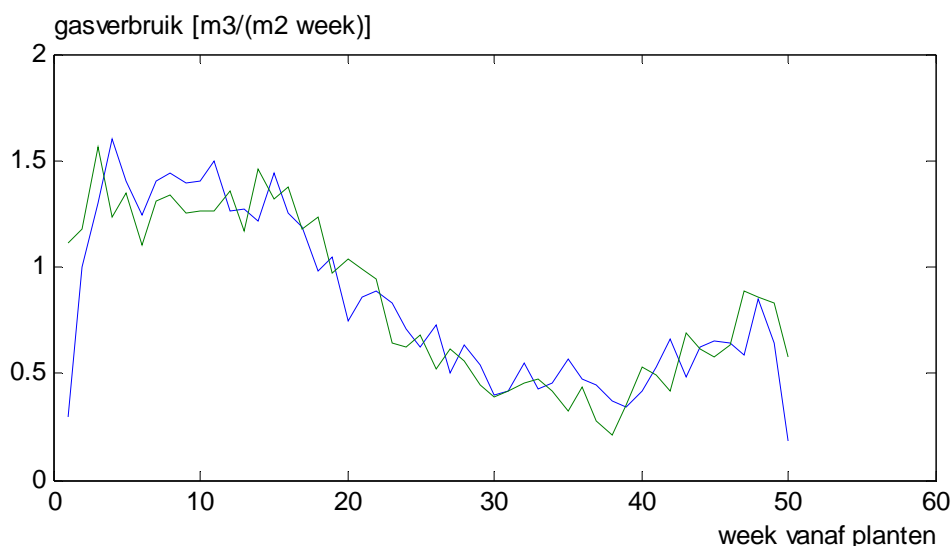
Voor groei en ontwikkeling is vooral de gemiddelde temperatuur van belang (etmaalgemiddelde of langer), waarbij de gemiddelde temperatuur op verschillende manieren tot stand kan worden gebracht. Wanneer het verschil tussen dag- en nachttemperatuur in een kas in de warmere periode van het jaar klein is gekozen dan zal de kas bij een etmaalgemiddelde temperatuur van bijvoorbeeld 20 °C overdag veel moeten ventileren en 's nachts vaak moeten bijstoken. Wanneer een tuinder toestaat dat de temperatuur 's nachts tot bijvoorbeeld 15 °C zakt, dan kan diezelfde etmaalgemiddelde temperatuur tot stand worden gebracht zonder 's nachts te hoeven verwarmen wanneer de kas overdag minder wordt geventileerd.

In onderstaande figuur is van twee tuinders uit de set met registratiegegevens (zie § 2.2) een overzicht gemaakt van de gemiddelde etmaalgemiddelde temperatuur zoals die door de tuinders is geregistreerd en zoals die door het simulatiemodel KASPRO is berekend.

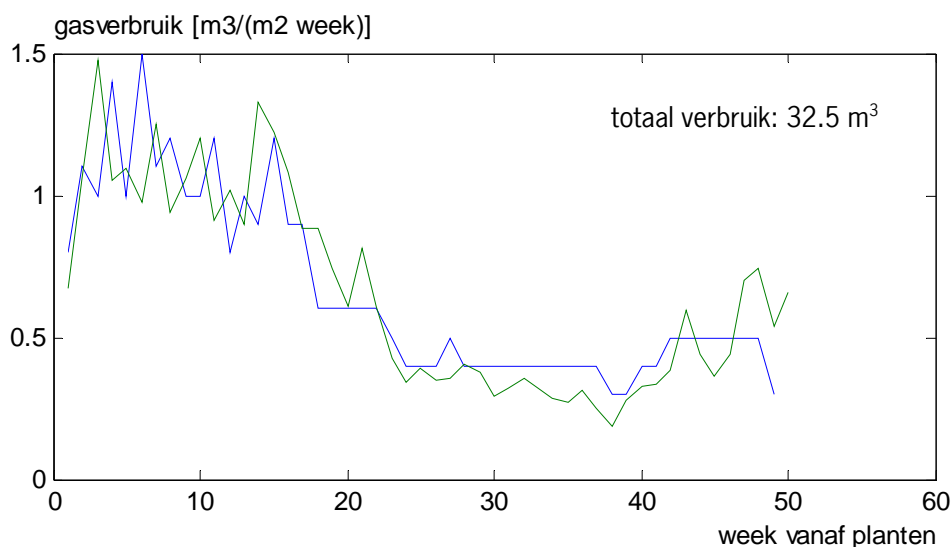


*Figuur 3.21 – Door 2 tuinders geregistreerde (blauw en rood) en door KASPRO gesimuleerde (groen en cyaan) etmaalgemiddelde temperatuur op weekbasis*

Figuur 3.21 laat zien dat tuinder 2 gemiddeld wat kouder teelt dan tuinder 1. Bovendien laat de figuur zien dat KASPRO goed in staat is de gerealiseerde temperaturen te simuleren. Vanuit het door de tuinder ingestelde en gewenste klimaat, inclusief de instellingen voor vochtbeheersing, schermen en minimumbuis kan KASPRO ook het energieverbruik berekenen. In figuur 3.22 wordt het resultaat van deze berekening getoond.



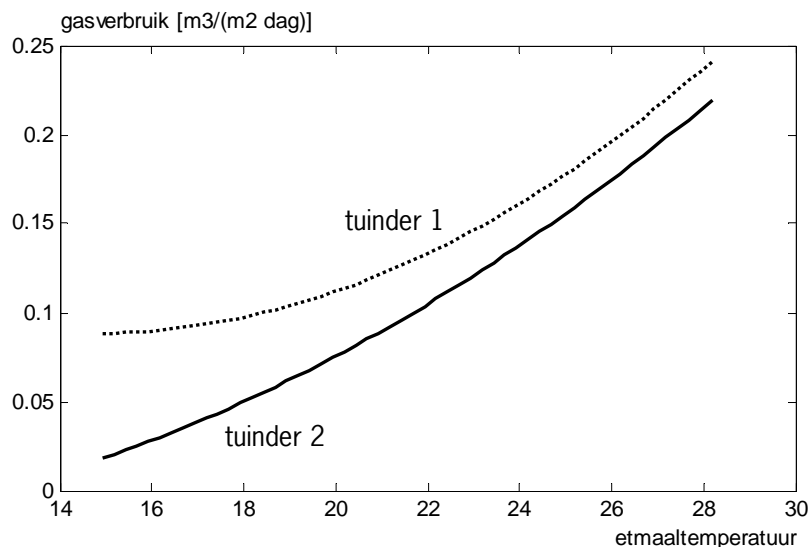
Figuur 3.22 – Door tuinder 1 geregistreerd gasverbruik (blauw) en door KASPRO gesimuleerd gasverbruik (groen)



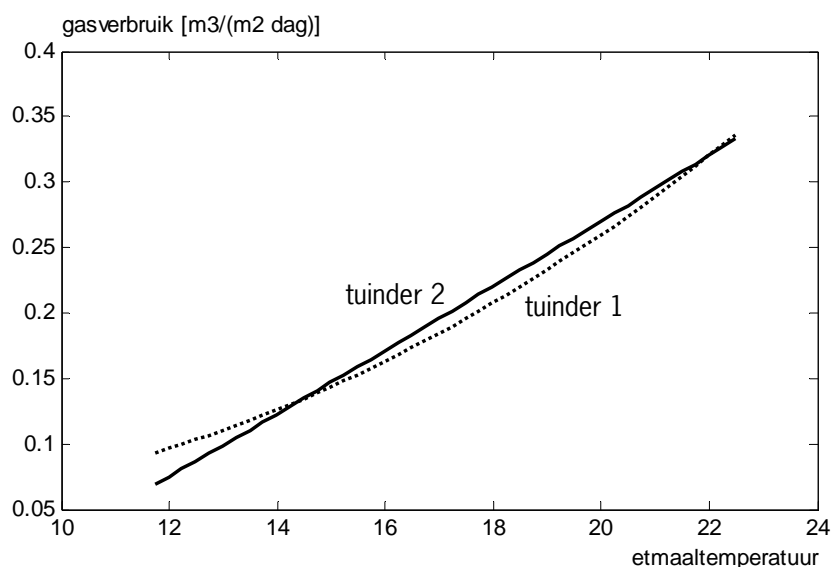
Figuur 3.23 – Door tuinder 2 geregistreerd gasverbruik (blauw) en door KASPRO gesimuleerd gasverbruik (groen)

De input-data waarmee bovenstaande berekeningen tot stand zijn gebracht waren vooral de door de tuinder ingestelde temperatuursetpoints voor dag, nacht en voornacht en daarnaast instellingen voor schermen en minimumbuis. Met name tuinder 2 heeft een erg lage minimumbuis (35 °C van een uur voor zonsopkomst tot 3 uur na zonsopkomst) en heel veel schermuren (3600 uur per jaar). Tuinder 1 gebruikt de minimumbuis wat meer (35 °C overdag, afgebouwd op licht, en 30 °C 's nachts) en schermt 2100 uur per jaar. Naast de gegevens over de instellingen van het kasklimaat is rekening gehouden met het feit dat tuinder 2 slechts één verwarmingsnet heeft waardoor de condensor van de ketel met een lager rendement werkt.

Door het samenspel van bovengenoemde factoren is de relatie tussen kasluchttemperatuur en energieverbruik van dag tot dag verschillend en bij iedere tuinder anders. In figuur 3.24 wordt hiervan een voorbeeld gegeven.



*Figuur 3.24 - Relatie tussen gasverbruik ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) en etmaaltemperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ ) voor twee verschillende tuinders op 30 september 2004.*



*Figuur 3.25 - Relatie tussen gasverbruik ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) en etmaaltemperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ ) voor twee verschillende tuinders op 20 januari 2004*

Door bovengenoemde factoren is de relatie tussen kasluchttemperatuur en energieverbruik van dag tot dag verschillend en bij iedere tuinder anders. In figuur 3.24 wordt hiervan een voorbeeld gegeven.

De figuur laat zien dat tuinder 1 bij elke gekozen etmaaltemperatuur structureel een hoger verbruik heeft dan tuinder 2. Daarbij komt dat bij laag gekozen etmaaltemperaturen het verbruik bij tuinder 1 niet meer afneemt. Dit effect wordt veroorzaakt doordat tuinder 2 geen minumbuis gebruikt en tuinder 2 wel. Op grond van deze curven zou een vuistregel kunnen worden gemaakt dat het gasverbruik met ongeveer

0.016 m<sup>3</sup> (m<sup>2</sup> dag) per graad etmaaltemperatuur stijgt.

Wanneer een soortgelijke grafiek wordt gemaakt voor de winterperiode dan ontstaat er een heel ander beeld (fig. 3.25). In de winter blijkt het juist tuinder 2 te zijn die over het algemeen iets meer gas verbruikt dan tuinder 1, hoewel het verschil klein is. Het instellen van een minimum buistemperatuur speelt in de winter een geringe rol. De verschillen in de winter ontstaan onder andere doordat tuinder 1 een apart condensornet heeft en tuinder 2 slechts één verwarmingsnet gebruikt.

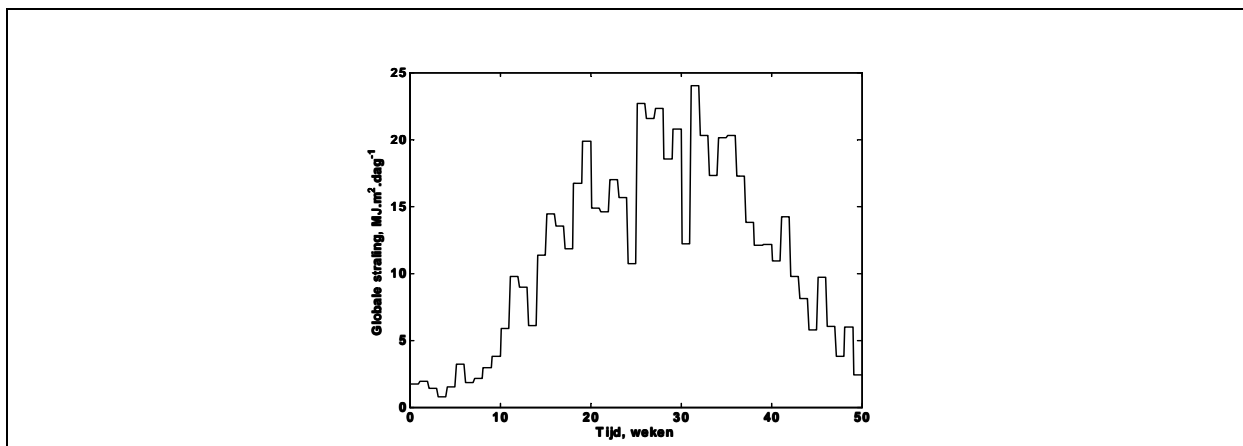
De maximale temperatuur die op deze dag met de beschikbare installatie gehaald kan worden blijkt 22 °C te zijn. In dat geval staat de ketel de hele dag op volle capaciteit (140 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> u<sup>-1</sup> gas). De ondergrens van haalbare etmaaltemperaturen zou voor deze winterdag uiteraard nog een stuk lager kunnen komen, maar is begrensd tot een waarde die door een gemiddelde paprikatuinder al als extreem laag zou worden beoordeeld. Overigens wordt bij deze lage temperaturen bij tuinder 1 het effect van de ingestelde minimum buistemperatuur alweer zichtbaar in een stabilisatie van het verbruik van bij ongeveer 0.08 m<sup>3</sup> m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>. De gemiddelde helling van deze curven is 0.025 m<sup>3</sup> m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>, wat betekent dat in de winter het verhogen van de etmaaltemperatuur met een graad tot een extra verbruik van ongeveer 0.025 m<sup>3</sup> m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup> leidt. Dit is uiteraard aanzienlijk meer dan in de zomer.

## 3.5 Optimalisatie

In deze paragraaf zal worden onderzocht of door het kiezen van een andere temperatuurregime gedurende de teelt van paprika (i) energie bespaard kan worden met behoud van productie, (ii) de oogst kan worden afgevlakt ten behoeve van een betere arbeidsfilm en (iii) zowel de oogst kan worden afgevlakt en energie kan worden bespaard. De optimalisatieruns zijn uitgevoerd voor twee tuinders, respectievelijk tuinder 1 en tuinder 2 genoemd (conform paragraaf 3.4). Tuinder 1 verbruikt meer energie dan tuinder 2. In de navolgende paragrafen worden de resultaten van een aantal optimalisatieruns getoond. Om de resultaten te kunnen interpreteren worden ze vergeleken met de resultaten van de twee temperatuurregimes die de tuinders zelf hebben gebruikt. Deze worden beschreven in paragraaf 3.5.1. De paragrafen 3.5.2 tot en met 3.5.6 tonen de resultaten van de optimalisaties. In paragraaf 3.5.7 worden de resultaten nog een keer samengevat.

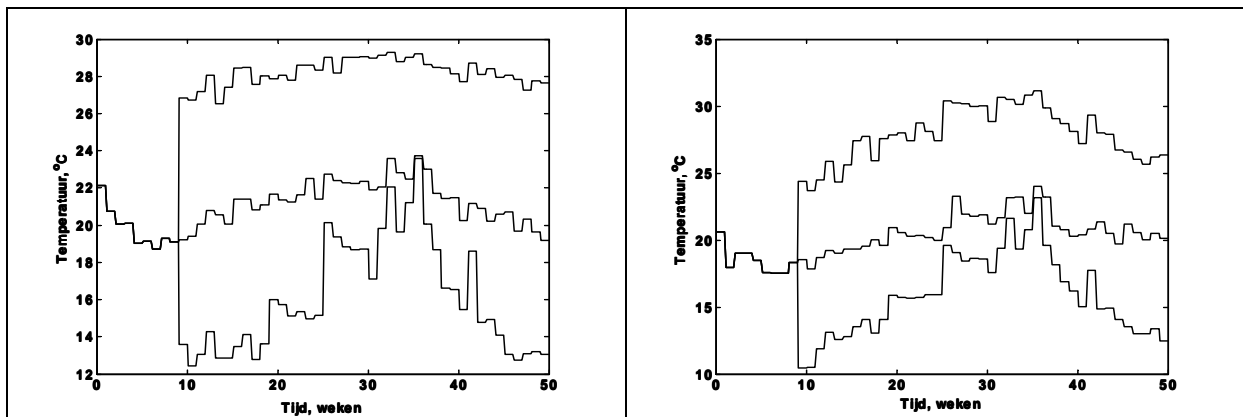
### 3.5.1 De referentieteelt

Figuur 3.26 toont het verloop van de globale straling in het teeltseizoen 2003-2004. Deze is voor beide tuinders gelijk genomen.



Figuur 3.26. Globale straling in het teeltseizoen 2003-2004

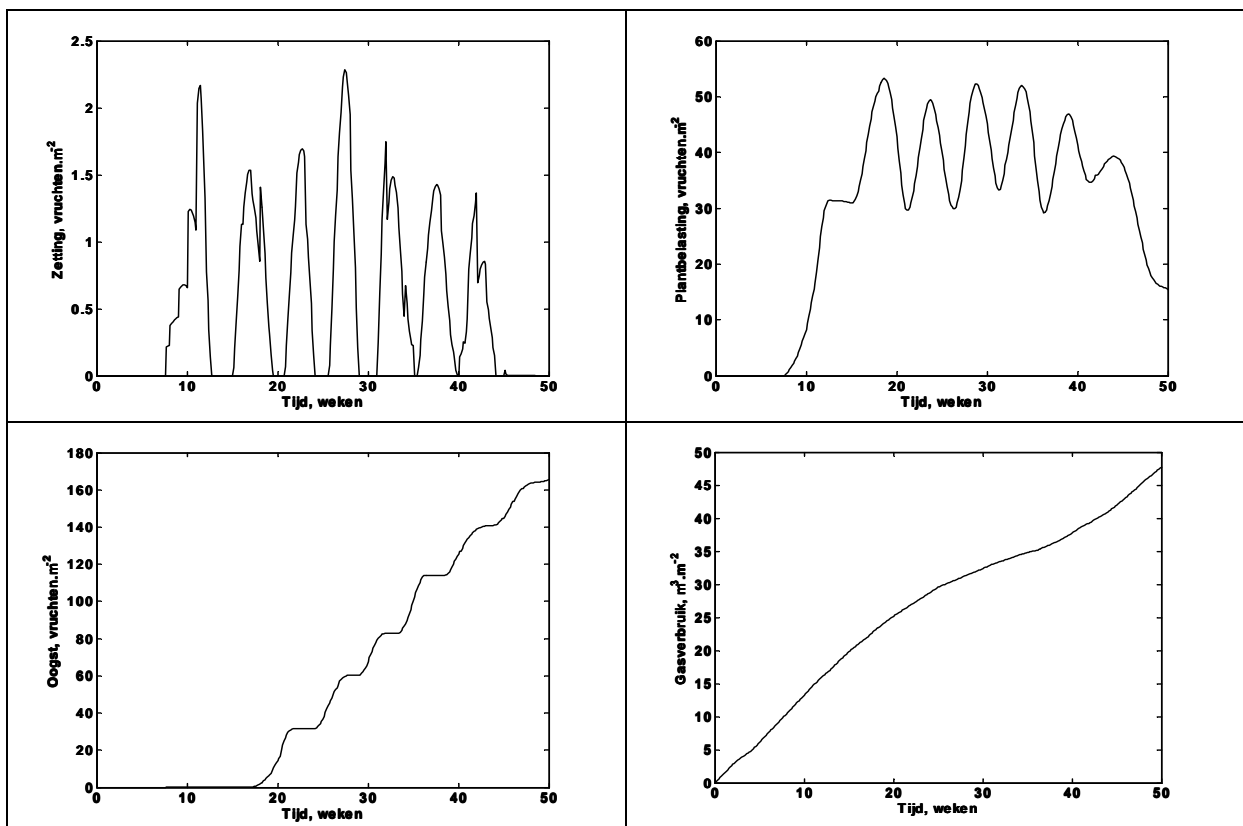
In figuur 3.27 wordt voor tuinder 1 en tuinder 2 het temperatuurregime (doorgetrokken lijn) getoond alsmede de bandbreedte voor optimalisatie van de temperatuur (onderbroken lijn). De bandbreedte wordt bepaald door wat gegeven de technische infrastructuur en klimaatregeling bij iedere tuinder onder gegeven buitenomstandigheden redelijkerwijs gerealiseerd kan worden. Met temperatuur wordt hier gemiddelde etmaaltemperatuur bedoeld. Gedurende de eerste 9 weken wordt er geen ruimte voor optimalisatie gegeven omdat het model in die periode niet met voldoende zekerheid de groei en ontwikkeling van een jong, vegetatief groeiend gewas beschrijft. Hier wordt er vanuit gegaan dat gedurende de eerste negen weken het temperatuurregime van de tuinder wordt aangehouden.



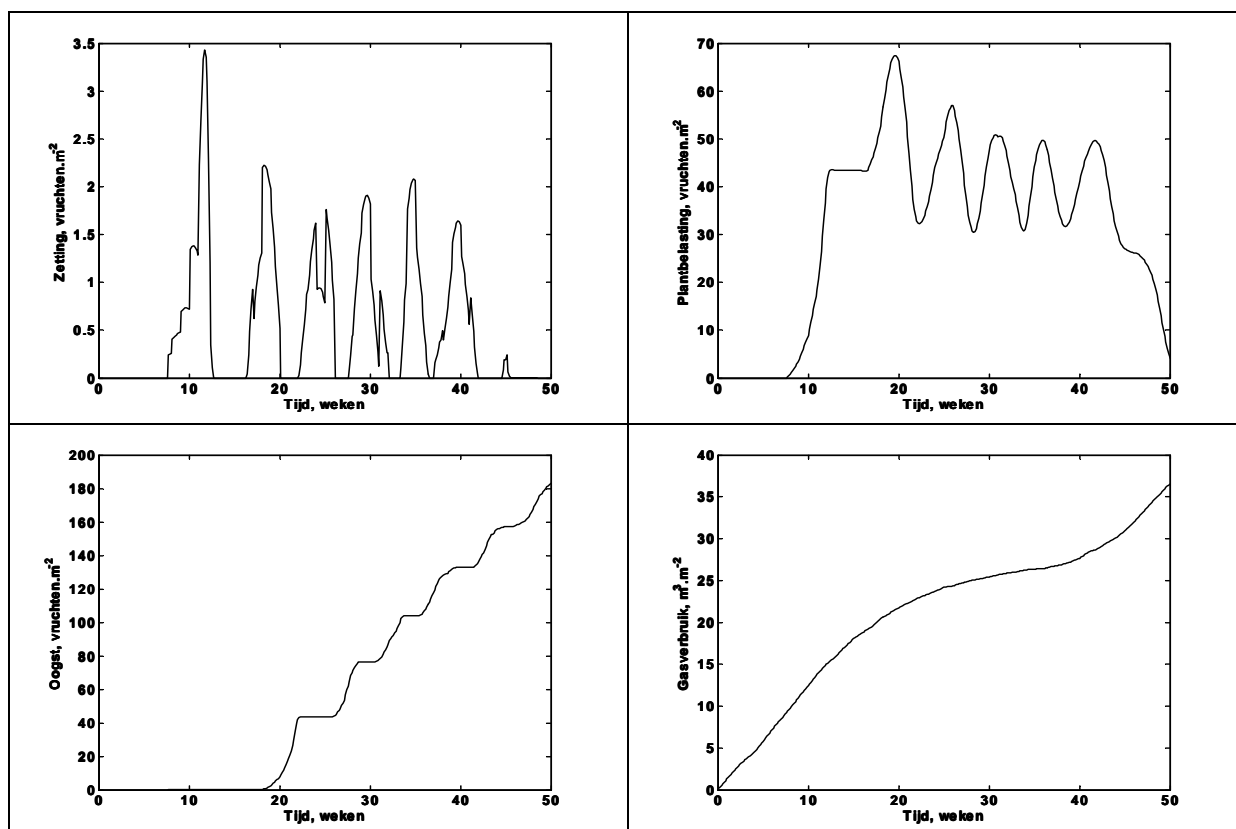
Figuur 3.27. De temperatuur strategie en optimalisatiebandbreedte van tuinder 1 (links) en tuinder 2 (rechts)

Volgens de berekeningen verbruikt tuinder 1 met zijn temperatuurregime 47.7 m<sup>3</sup>. Het laagst mogelijke energieverbruik dat kan worden gerealiseerd binnen de optimalisatie bandbreedte is 35.5 m<sup>3</sup>. Mocht de optimalisatieruimte in de eerste 9 weken ook benut kunnen worden dan zou er ruimte zijn te bezuinigen tot 31.7 m<sup>3</sup>. Voor tuinder 2 komt het energieverbruik van zijn temperatuurregime uit op 36.4 m<sup>3</sup>. Het laagst mogelijke energieverbruik dat binnen de optimalisatiebandbreedte kan worden gerealiseerd is 19.5 m<sup>3</sup>.

Voor de temperatuurregimes van beide telers is de productie gesimuleerd. De figuren 3.28 en 3.29 tonen voor beide tuinders de zetting, plantbelasting, cumulatieve oogst en cumulatief energieverbruik. In beide laat het gewasmodel sterke vluchten zien resulterend in oscillerende plantbelasting.



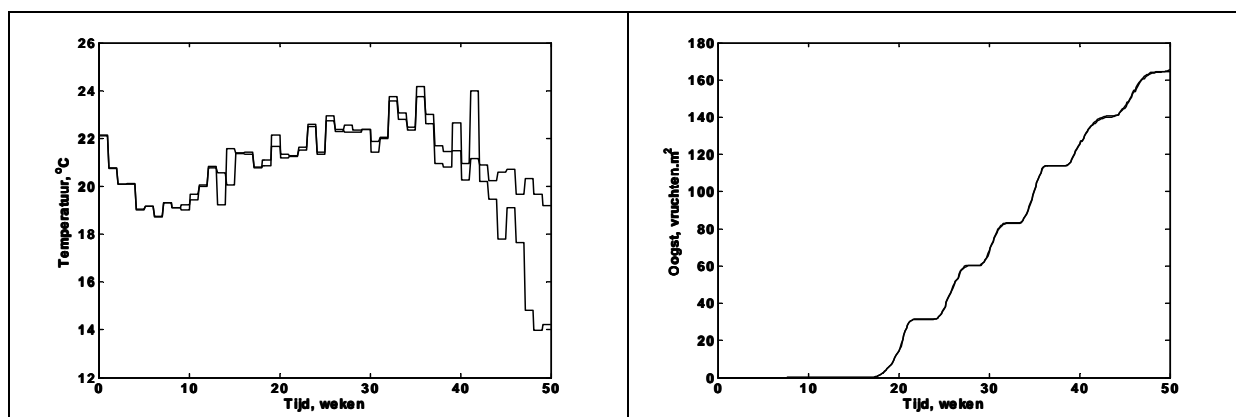
Figuur 3.28 - Referentieteel volgens tuinder 1; linksboven – zetting, rechtsboven – plantbelasting, linksonder – oogst, rechtsonder - energieverbruik



Figuur 3.29. Referentieteelt volgens tuinder 2; linksboven – zetting, rechtsboven – plantbelasting, linksonder – oogst, rechtsonder – energieverbruik

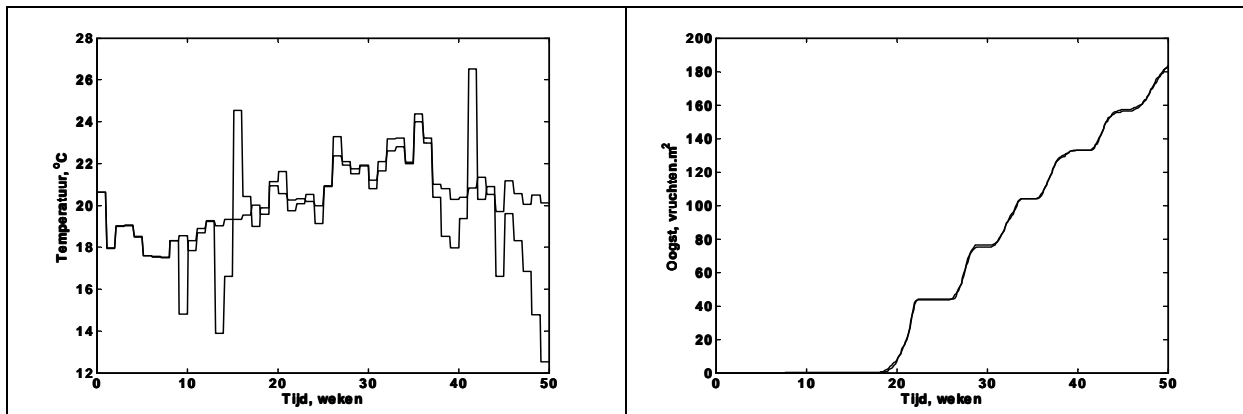
### 3.5.2 Optimalisatie run 1 - Energiezuinige teelt met vluchten

In deze optimalisatie run is onderzocht of de teelt met vluchten zoals die onder het standaard temperatuurregime is gerealiseerd kan worden gereproduceerd maar dan met gebruikmaking van minder energie. De figuren 3.30 en 3.31 tonen de resultaten. In beide gevallen wordt het oorspronkelijke oogstpatroon gerealiseerd en wordt ook minder energie verbruikt. Grote verschillen in temperatuurregime kunnen vooral worden waargenomen in de laatste fase van de teelt. Voor tuinder 1 is het energieverbruik 44.5 m<sup>3</sup> (93%). Voor tuinder 2 is het energieverbruik 32.8 m<sup>3</sup> (90%).



Figuur 3.30. Energiezuinige teelt met vluchten in vergelijking met referentieteelt van tuinder 1; links – temperatuurstrategie (gestreepte lijn: tuinder, doorgetrokken lijn: optimalisatie), rechts – cumulatieve oogst (gestreepte lijn: tuinder, doorgetrokken lijn: optimalisatie)

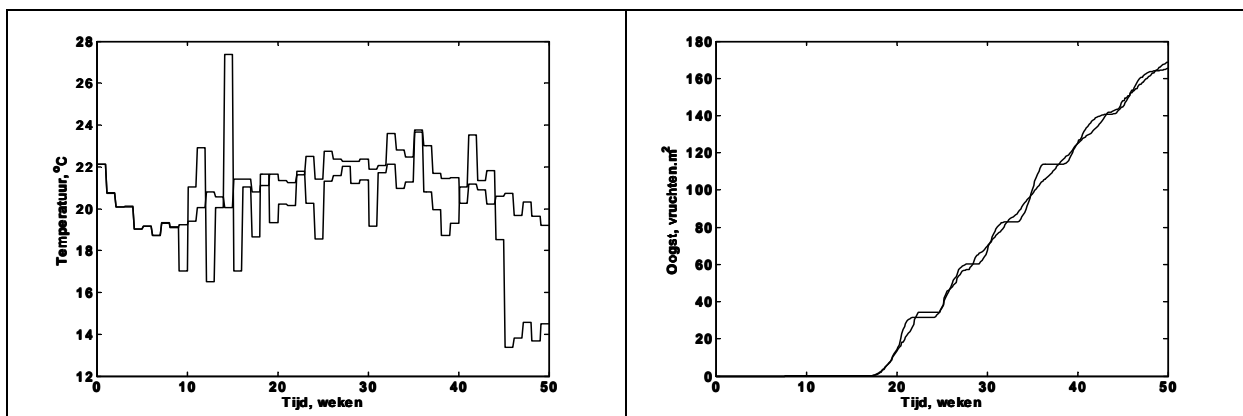




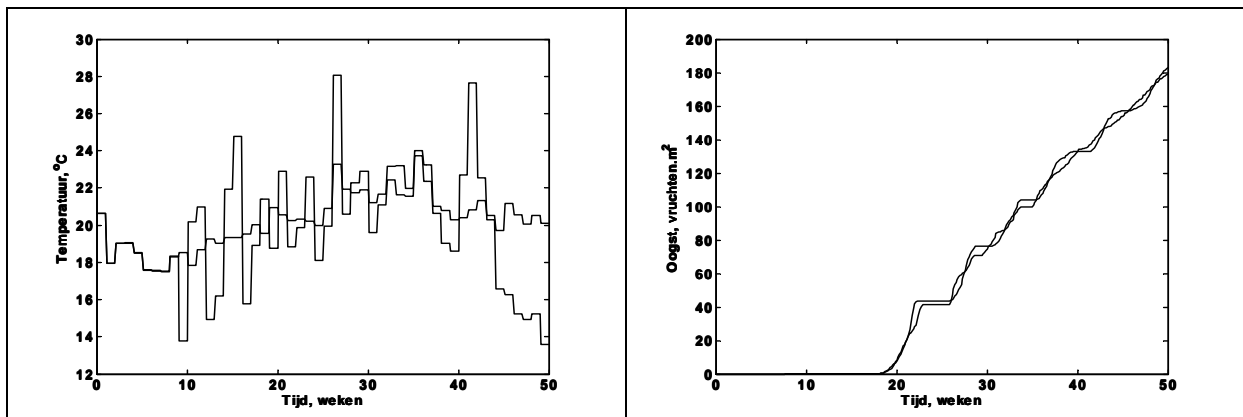
Figuur 3.31. Energiezuinige teelt met vluchten in vergelijking met referentieteelt van tuinder 2; links – temperatuurstrategie (gestreepte lijn: tuinder, doorgetrokken lijn: optimalisatie), rechts – cumulatieve oogst (gestreepte lijn: tuinder, doorgetrokken lijn: optimalisatie)

### 3.5.3 Optimalisatie run 2 - Energiezuinig afvlakken van de oogst binnen één afdeling

In deze optimalisatie run is onderzocht of binnen één afdeling de oogst kan worden afgevlakt met gebruikmaking van zo min mogelijk energie. Dit lukt in beide gevallen zoals te zien is in de figuren 3.32 en 3.33. De oogst wordt afgevlakt, hoewel bij tuinder 1 beter dan bij tuinder 2. Maar daar moet wel wat voor worden ondernomen. Het benodigde temperatuurregime is aanzienlijk grilliger dan het door de tuinders gehanteerde temperatuurregime; er wordt flink gebruik gemaakt van de optimalisatieruimte. Het energieverbruik komt voor tuinder 1 uit op 44.2 m<sup>3</sup> (93%) en voor tuinder 2 op 33.4 m<sup>3</sup> (91%). Ook in dit geval wordt energiewinst geboekt aan het einde van de teelt.



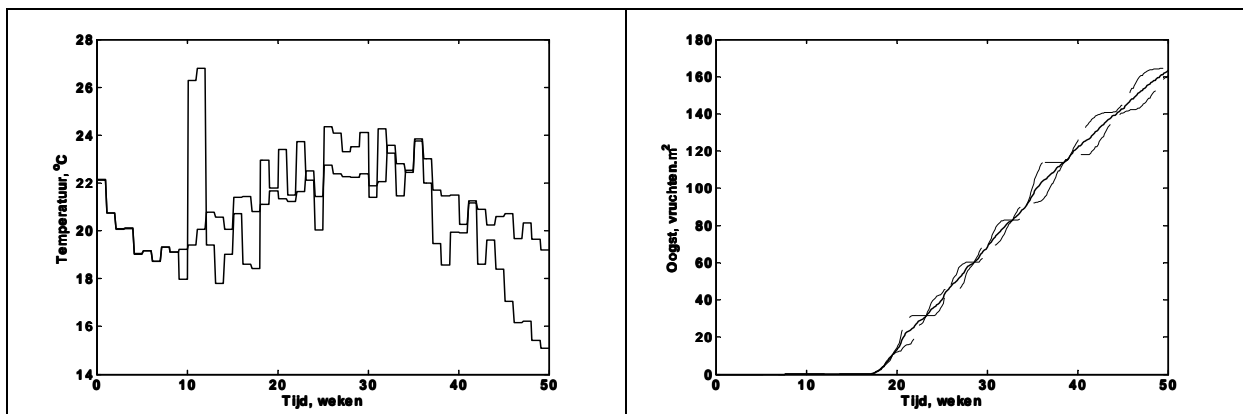
Figuur 3.32. Energiezuinig afvlakken van de oogst in vergelijking met de referentieteelt van tuinder 1; links – temperatuurstrategie (gestreepte lijn: tuinder, doorgetrokken lijn: optimalisatie), rechts – cumulatieve oogst (gestreepte lijn: tuinder, doorgetrokken lijn: optimalisatie)



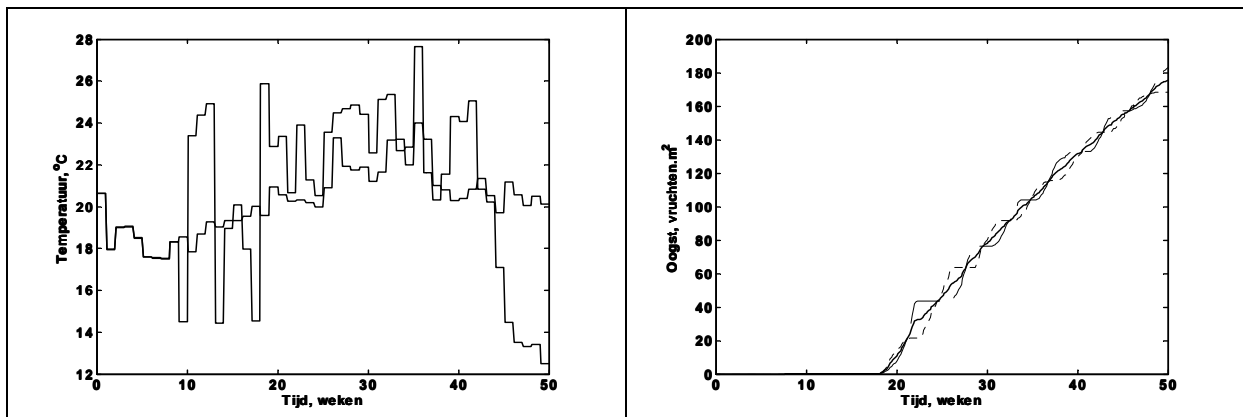
Figuur 3.33. Energiezuinig afvlakken van de oogst in vergelijking met de referentieteelt van tuinder 2; links – temperatuurstrategie (gestreepte lijn: tuinder, doorgetrokken lijn: optimalisatie), rechts – cumulatieve oogst (gestreepte lijn: tuinder, doorgetrokken lijn: optimalisatie)

### 3.5.4 Optimalisatierun 3 - Energiezuinig afvlakken van oogst door teelt in tegenfase

In deze optimalisatierun is onderzocht of het oogstpatroon kan worden afgevlakt door twee afdelingen in tegenfase te sturen. Als uitgangspunt is het oogstpatroon genomen uit optimalisatierun 1 in paragraaf 3.5.2. Vervolgens is een oogstpatroon gegenereerd dat in tegenfase is dat het resultaat van beide oogsten een minder sterk fluctuerend verloop heeft. Het resultaat is te zien in de figuren 3.34 en 3.35. De oogst van de twee in tegenfase gestuurde groepen is duidelijk afgevlakt. Om dit te bereiken, vertoont de temperatuur een sterke dynamiek; de optimalisatieruimte wordt benut. Het totale energieverbruik voor deze teeltwijze komt voor tuinder 1 uit op 47.3 m<sup>3</sup> (99%) en voor tuinder 2 uit op 35.4 m<sup>3</sup> (96%).



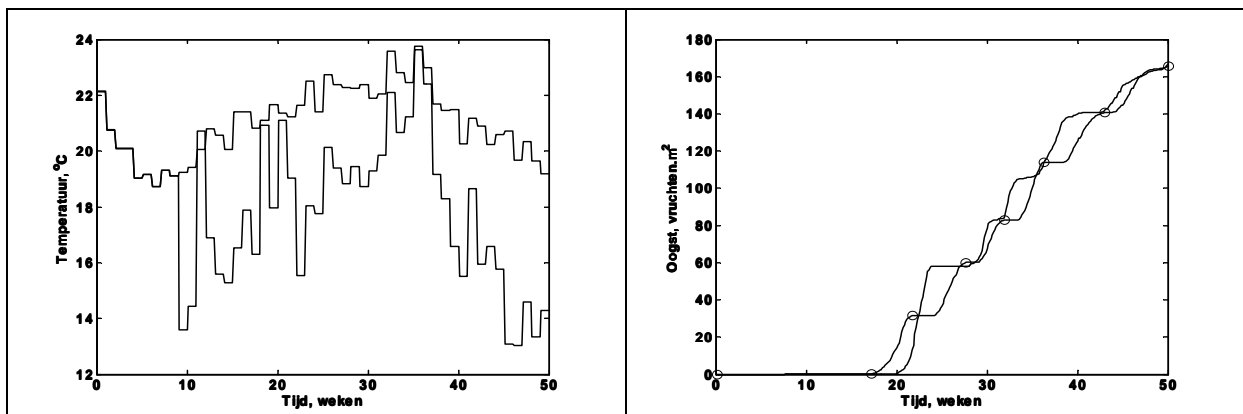
Figuur 3.34. Energiezuinig afvlakken van de oogst door teelt in tegenfase voor tuinder 2; links temperatuurstrategie (gestreepte lijn: tuinder, doorgetrokken lijn: optimalisatie), rechts – cumulatieve oogst (gestreepte lijn: oogst in de twee afdelingen, doorgetrokken lijn: resultaat van twee afdelingen gezamenlijk)



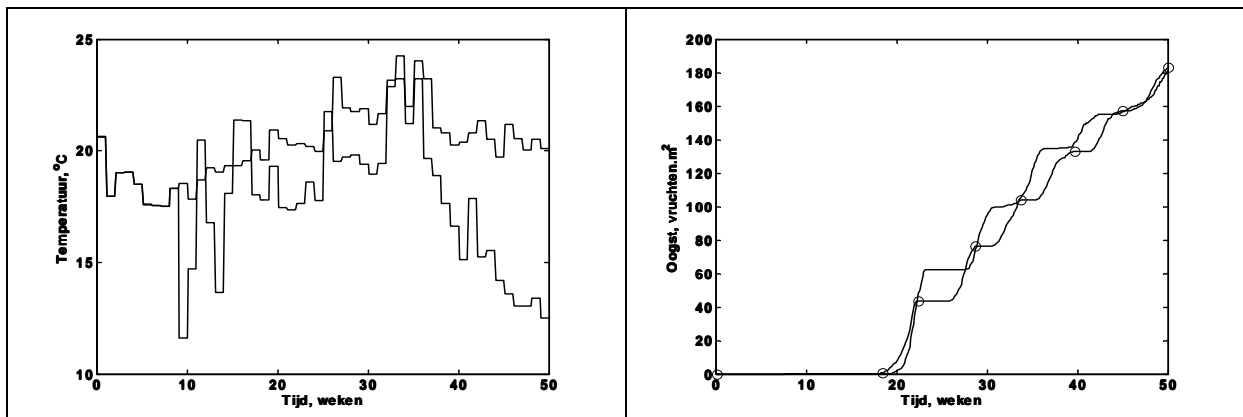
Figuur 3.35. Energiezuinig afvlakken van de oogst door teelt in tegenfase voor tuinder 2; links temperatuurstrategie (gestreepte lijn: tuinder, doorgetrokken lijn: optimalisatie), rechts – cumulatieve oogst (gestreepte lijn: oogst in de twee afdelingen, doorgetrokken lijn: resultaat van twee afdelingen gezamenlijk)

### 3.5.5 Optimalisatie run 4 - Nog meer energiebesparing bij teelt met vluchten

In deze optimalisatie run is onderzocht of nog meer energie kan worden bespaard door het gewas sterk in vluchten te laten produceren maar wel onder de voorwaarde dat op een aantal momenten in het seizoen de oogst gelijk is aan de oogst van de referentieteelt. Resultaten worden getoond in de figuren 3.36 en 3.37. De figuren tonen de cumulatieve oogst van de referentieteelt. De ijkpunten zijn aangegeven met cirkels. In beide gevallen worden de gewenste oogst op de vooraf bepaalde tijdstippen goed gerealiseerd. Dit alles is mogelijk met een behoorlijke energiebesparing. Voor tuinder 1 is het energieverbruik  $37.6 \text{ m}^3$  (79%). Voor tuinder 2 bedraagt dit  $25.0 \text{ m}^3$  (68%).



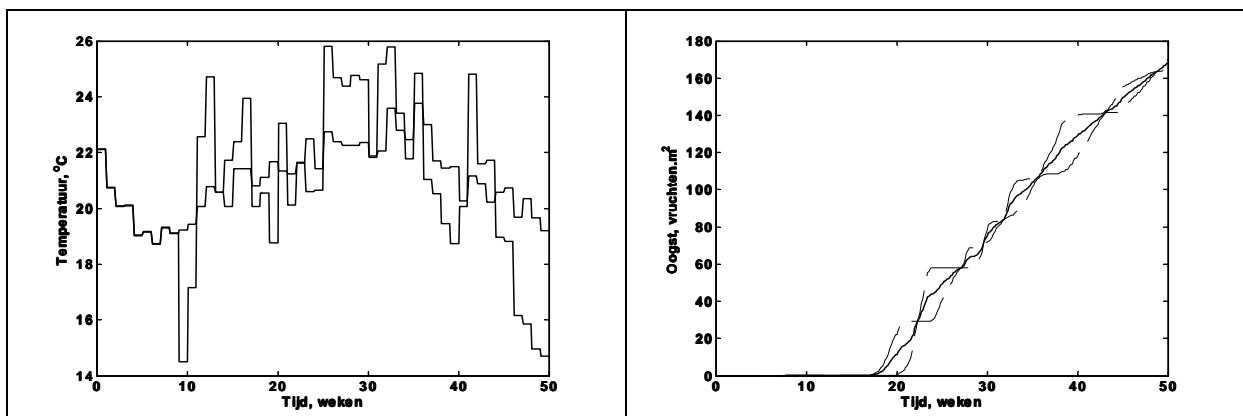
Figuur 3.36. Energiezuinige teelt met vluchten in vergelijking met referentiestrategie van tuinder 1; links temperatuurstrategie (gestreepte lijn: tuinder, doorgetrokken lijn: optimalisatie), rechts – cumulatieve oogst (gestreepte lijn: tuinder, doorgetrokken lijn: optimalisatie, o: ijkpunt voor optimalisatie)



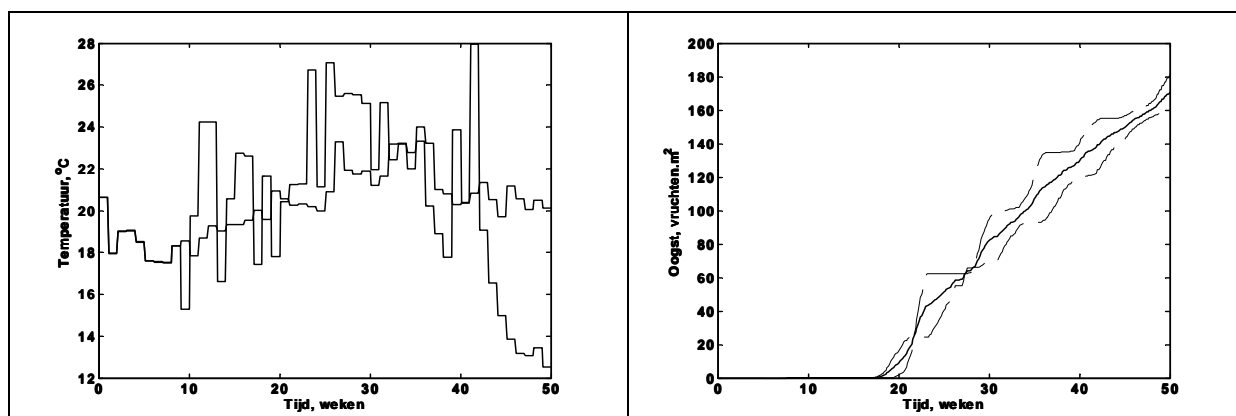
*Figuur 3.37. Energiezuinige teelt met vluchten in vergelijking met referentiestrategie van tuinder 2; links temperatuurstrategie (gestreepte lijn: tuinder, doorgetrokken lijn: optimalisatie), rechts – cumulatieve oogst (gestreepte lijn: tuinder, doorgetrokken lijn: optimalisatie, o: ijkpunt voor optimalisatie)*

### 3.5.6 Optimalisatie run 5 - afvlakken van oogst door teelt in tegenfase

In deze optimalisatie run is gebruik gemaakt van het oogstpatroon verkregen in optimalisatie run 4 uit paragraaf 3.5.5 en de daarmee gepaard gaande hoge energiebesparing. In deze optimalisatie run is een temperatuurregime berekend waarbij de oogst in tegenfase wordt aangestuurd dat twee afdelingen waarbij de temperatuurregimes van run 4 en 5 worden gecombineerd een afgevlakt oogst opleveren. Het resultaat wordt getoond in de figuren 3.38 en 3.39. De oogst uit de twee in tegenfase aangestuurde afdelingen is afgevlakt. Energieverbruik is voor tuinder 1 42.7 m<sup>3</sup> (90%) en voor tuinder 2 30.7 m<sup>3</sup> (84%).



*Figuur 3.38 Energiezuinig afvlakken van de oogst door teelt in tegenfase voor tuinder 1; links temperatuurstrategie (gestreepte lijn: tuinder, doorgetrokken lijn: optimalisatie), rechts – cumulatieve oogst (gestreepte lijn: oogst in de twee afdelingen, doorgetrokken lijn: resultaat van twee afdelingen gezamenlijk)*



Figuur 3.39. Energiezuinig afvlakken van de oogst door teelt in tegenfase voor tuinder 1; links temperatuurstrategie (gestreepte lijn: tuinder, doorgetrokken lijn: optimalisatie), rechts – cumulatieve oogst (gestreepte lijn: oogst in de twee afdelingen, doorgetrokken lijn: resultaat van twee afdelingen gezamenlijk)

### 3.5.7 Samenvatting en conclusies van optimalisatieruns

Het energieverbruik voor de diverse runs wordt in Tabel 3.5 samengevat.

Tabel 3.5. Energieverbruik van diverse runs voor de twee tuinders

	Tuinder 1	Tuinder 2
Referentie	47.7 m <sup>3</sup> (100%)	36.4 m <sup>3</sup> (100%)
Optimalisatierun 1	44.5 m <sup>3</sup> (93%)	32.8 m <sup>3</sup> (90%)
Optimalisatierun 2	44.2 m <sup>3</sup> (93%)	33.4 m <sup>3</sup> (91%)
Optimalisatierun 3	47.2 m <sup>3</sup> (99%)	35.4 m <sup>3</sup> (96%)
Optimalisatierun 4	37.6 m <sup>3</sup> (79%)	25.0 m <sup>3</sup> (68%)
Optimalisatierun 5	42.7 m <sup>3</sup> (90%)	30.7 m <sup>3</sup> (84%)

Uit de optimalisatiestudie kan worden geconcludeerd dat:

1. energie kan worden bespaard bij de teelt van paprika,
2. de oogst kan worden afgevlakt binnen één afdeling en door het sturen van twee afdelingen in tegenfase,
3. de oogst kan worden afgevlakt met besparing van energie.

De optimalisatie resulteert in de meeste gevallen in een temperatuurregime met een aanzienlijk sterkere dynamiek dan op dit moment in de praktijk gebruikelijk is.

Kan op deze wijze de magische 30 m<sup>3</sup> grens worden doorbroken? Een onvoorwaardelijk ja is op grond van deze resultaten niet te geven. Daarvoor bevat het model nog teveel onzekerheden. Dat er mogelijkheden zijn om met behulp van in een model vastgelegde proceskennis energiebesparing te realiseren wordt wel door deze studie aangetoond.

Hier zijn maar een paar voorbeelden van optimalisatieruns getoond. Aangetoond is dat de methode werkt en een potentieel instrument is om in de vorm van een beslissingsondersteunend systeem het energieverbruik in de sector omlaag te brengen. Niet alleen oogstpatroon, maar ook andere aspecten kunnen op deze wijze energiezuinig geoptimaliseerd worden aangestuurd. De optimalisatiemethode is generiek en kan ook bij andere gewassen (vruchtgroenten, snijbloemen, potplanten) worden toegepast mits een model beschikbaar is dat groei en ontwikkeling van het gewas beschrijft.

## 4 Discussie

### 4.1 Algemeen

#### 4.1.1 Ketenomkering

Door de overgang van aanbod- naar vraaggestuurde productieketens staan telers voor steeds hogere opgaven om te voldoen aan de wensen vanuit de markt ten aanzien van omvang, tijdstip van levering en productkwaliteit. Tegelijkertijd stelt de samenleving steeds hogere eisen aan het product en productieproces, onder andere met betrekking tot CO<sub>2</sub> uitstoot en energie-efficiëntie. Sturing van het productieproces en continue borging van kwaliteit worden beschouwd als voorwaarden voor het behoud van een sterke concurrentiepositie van de Nederlandse tuinbouw. Een belangrijke vraag is in hoeverre de teler momenteel al beschikt over de kennis en het instrumentarium om aan die vraag te kunnen voldoen. Op het gebied van teeltplanning, registratie en monitoring hebben de laatste jaren belangrijke ontwikkelingen plaatsgevonden. Op het gebied van het gericht kunnen voorspellen en sturen van het teeltproces en het in onderlinge samenhang optimaliseren van teeltfactoren staat de techniek echter nog in de kinderschoenen. Van verschillende kanten worden de onderwerpen productiemanagement, prognose en sturing daarom aangewezen als speerpunten voor het onderzoek in de komende jaren. In de tuinbouw is het gebruikelijk om het productieproces te plannen en te regelen aan de hand van teeltrecepten, aangevuld met ervaringskennis, vakmanschap en de kennis die een adviseur inbrengt. Door deze benadering systematisch toe te passen en bijstellingen onderling te bediscussiëren in studieclubverband is de Nederlandse tuinbouw groot geworden. In deze context geeft een goed teeltrecept de beste gemiddelde instellingen, en momenteel ook praktisch gezien de beste kans op een goed teeltresultaat.

#### 4.1.2 Kansen

De vraag is of het nog beter zou kunnen, bijvoorbeeld op het gebied van energie-efficiëntie of het realiseren van een vlak afzetpatroon. Wat betreft energiebehoefte is bekend dat er kansen liggen in het afwijken van het beproefde teeltrecept. Zo kan bijvoorbeeld door toepassing van temperatuurintegratie energie worden bespaard door de temperatuur te laten zakken onder omstandigheden dat het energetisch duur is om een hogere temperatuur te realiseren (bij harde wind, lage buitentemperatuur, lage hemeltemperatuur, weinig instraling). Het opgelopen warmtetekort kan worden gecompenseerd op een ander tijdstip, wanneer het realiseren van hogere temperaturen energetisch gunstiger is (Buwalda, Buwalda et al., Van de Braak en De Zwart, 2001). De kasttemperatuur heeft echter ook invloed op het gewas. Deze invloed kan onder bepaalde omstandigheden gunstig zijn, maar in andere gevallen juist ongunstig. Voor veel gewassen geldt dat de effecten daarvan minimaal zijn zolang de afwijkingen maar tijdig worden gecompenseerd (TI refs). Ook voor paprika bleek meerdaagse temperatuurintegratie tot besparingen tussen 10 en 20% te kunnen leiden zonder negatieve effecten op productie of kwaliteit (Buwalda et al., 2003). In de praktijk bleken paprikatelers echter terughoudend (Van den Berg et al., 2001).

Bij de ontwikkeling van toepassingsmogelijkheden van temperatuurintegratie voor energiebesparing heeft de nadruk tot nu toe gelegen op het tijdig compenseren van afwijkingen, waardoor meetbare effecten op het gewas worden vermeden. De vraag die hiermee blijft liggen is wat er zou gebeuren als afwijkingen NIET tijdig worden gecompenseerd. Er is dan waarschijnlijk wel een meetbaar effect te verwachten. Als deze effecten kunnen worden voorspeld dan is in principe de mogelijkheid geopend om ongewenste effecten te vermijden, maar ook om wenselijke effecten juist te benutten. Als de wenselijke effecten van het afwijken van de gangbare teeltwijze door het gebruik van prognosefuncties gericht kunnen worden ingezet om een

bepaald doel te bereiken, dan is daarmee de basis gelegd voor vraaggestuurd teeltmanagement.

Een van de belangrijkste vragen in de paprikateelt is hoe de typerende oogstfluctuaties kunnen worden gestuurd. In het kader van het hier gepresenteerde onderzoek is de vraag of het doelgericht afwijken van het gangbare teeltrecept mogelijkheden biedt om die fluctuaties te beheersen en te besturen. Net als bij het energieverbruik geldt ook hier dat het effect van een dergelijke afwijking niet constant is, maar afhangt van een aantal andere factoren. Zo zal een vol belast gewas anders reageren op een temperatuurverandering dan een gewas dat toevallig net ruimte heeft voor nieuwe vruchten, en ook zal een jong gewas anders reageren dan een ouder gewas. Verder zal de reactie op een zonnige dag anders zijn dan op een donkere dag. Voor het effect van temperatuurafwijkingen geldt dus voor het gewas het zelfde als voor de energiebehoefte: het verband is niet constant, maar hangt af van andere factoren en zal dus ook mee veranderen met veranderingen in die invloedsfactoren.

Voorwaarde om doelgericht te kunnen sturen is dus dat het toekomstige verloop kan worden voorspeld, waarbij rekening wordt gehouden met de invloed van die extra factoren. Heel belangrijk hierbij is dat effecten die op een bepaald moment worden veroorzaakt nog lang daarna van invloed kunnen zijn. Dit betekent bijvoorbeeld dat wanneer een temperatuurafwijking op de huidige dag een effect heeft op het gewas, het gewas hierdoor een beetje verandert. Door deze verandering zal het gewas anders reageren op de temperatuur van morgen dan wanneer die verandering er niet zou zijn geweest. Hoe het gewas op dag 3 reageert hangt dus niet alleen af van constante gewaseigenschappen, maar ook van wat er gebeurd is op die dag 1 en dag 2. Zou bijvoorbeeld door de afwijkingen in deze periode een bepaalde vrucht net wel succesvol zetten die anders zou zijn geaborteerd, dan blijft het effect van die afwijking zelfs wekenlang doorwerken en een invloed houden op het effect klimaatcondities op het gewas. Helaas zijn menselijke denkprocessen niet zo geschikt om zich dit soort dynamische effecten in detail voor te kunnen stellen. Om buiten de gebaande paden te kunnen treden en daar de kansen te benutten en tegelijk de risico's te vermijden zijn dus nieuwe instrumenten nodig. Een van deze instrumenten is dynamische beslissingsondersteuning. In het verlengde daarvan ligt dynamisch geoptimaliseerde teeltsturing.

## 4.2 Model

Met behulp van een dynamisch gewasmodel is het in principe mogelijk rekening te houden met deze doorwerking van gevolgen in de toekomst. Een dynamisch model is niets anders dan een methode om kennis over de diverse gewasprocessen, invloedsfactoren en de stand van het gewas op een geïntegreerde manier aan elkaar te koppelen, zodat rekening kan worden gehouden met alle relevante wisselwerkingen en dynamische effecten. Het model dat in het kader van dit project is ontwikkeld is met opzet zo eenvoudig mogelijk gehouden. Toch lijkt het de belangrijkste processen die de productie bepalen en die zorgen voor de oogstfluctuaties goed te beschrijven. Het model bleek in staat om met meerdere teeltregistraties goed mee te rekenen. In dit rapport ligt de nadruk op één 'gave' dataset en enkele sets die typerende afwijkingen vertonen. Er bestaan echter meerdere teeltregistraties waarmee het model correct bleek te kunnen meerekenen. Doordat het model met afzonderlijke processen en gewastoestanden rekent, kan het ook inzicht geven in moeilijker meetbare eigenschappen van het gewas, zoals de verhouding tussen vegetatieve groei en vruchtgroei of de verhouding tussen beschikbaarheid van en de vraag naar assimilaten (source/sink). Telers houden de 'kop' van het gewas vaak goed in de gaten, omdat daar de jongste groei plaatsvindt. Het gewas dat hier ontstaat, vertegenwoordigt weer de toekomstige productiecapaciteit van het gewas. De groei van de 'kop' wordt bepaald door de concurrentieverhoudingen met de vruchtgroei. Zowel een te sterke als een te geringe vegetatieve groei wordt door telers beschouwd als ongewenst.

## 4.3 Registraties

Aan een model op zich zullen de meeste telers niet veel hebben. Pas als het model is gekoppeld aan de belangrijkste informatiestromen op het bedrijf ontstaat de basis voor een praktisch bruikbaar beslissingsondersteunend systeem. Uit een analyse van enkele teeltregistraties uit de praktijk is gebleken dat die gegevens in sommige gevallen fouten en tegenstrijdigheden kunnen bevatten. Ofwel er zijn bij het tellen zelf fouten ingeslopen, of de telvakken zijn niet helemaal representatief voor de gehele kas. Het model zelf kan echter ook een bron zijn van fouten. Door positieve terugkoppeling (paragraaf 4.1) hebben dynamische modellen vaak een structurele neiging om te ontsporen. Een geval als weergegeven in figuur 3.15 en 3.16, waarbij het model op den duur vanzelf weer in de normale trend terugkomt, moet worden beschouwd als een uitzondering. Voor een praktisch bruikbaar teeltbegeleidingssysteem is het dus van groot belang om afwijkingen snel en efficiënt te signaleren en te kunnen corrigeren.

Corrigeerbaarheid is ook een voorwaarde voor elk systeem dat in de tijd vooruit moet kunnen rekenen om met de grilligheid van het weer om te kunnen gaan. Gelukkig is uit de simulaties gebleken dat het gemiddelde weer over een week een redelijke voorspelling geeft van de cumulatieve effecten van dagelijks variërende weersomstandigheden (zie paragraaf 3.2). Dergelijke afwijkingen zullen dus weinig effect hebben op de prognoses als het teeltbegeleidingssysteem vooruit rekt op basis van gemiddeld weer voor de betreffende periode. Wanneer het weerbeeld grotere afwijkingen laat zien, zoals een zonnige periode van enkele weken of juist een bewolkte en regenrijke maand, dat zal het gerealiseerde verloop waarschijnlijk toch af blijken te wijken van de prognoses. Het is daarom van belang een on-line lokaal weekweerbericht bij de voorspellingen te gebruiken, en om de gebruiker de gelegenheid te geven om via een keuzemenu ook voorspellingen op te vragen van het te verwachten verloop voor het geval dat het de komende weken buitengewoon zonnig / bewolkt / koud / ... zal worden.

Kortom: mensen kunnen fouten maken, meetinstrumenten kunnen afwijken, telvakken zijn niet altijd representatief, het weer is grillig, modellen hebben vaak de neiging om te ontsporen. Het ligt voor de hand dat het model op basis van verkeerde informatie niet in staat is om correcte prognoses te berekenen. Toch zijn fouten en afwijkingen een praktisch gegeven, en een beslissingsondersteunend systeem kan in de praktijk alleen wat waard zijn als het hier op een goede en overzichtelijke manier mee om kan gaan. Technisch zijn daar verschillende mogelijkheden en strategieën voor, die in een vervolgonderzoek samen met enkele telers en voorlichters uitgetest zouden moeten worden

## 4.4 Energie

Voor de berekening van energiekosten werd het simulatiepakket KASPRO gebruikt. Dit pakket is in de loop van de tijd steeds verder verfijnd en gevalideerd. Het beslissingsondersteunende programma 'Energie op Maat', dat via internet beschikbaar is gesteld voor telers die de technische installaties op hun bedrijf willen doorlichten op energie-efficiëntie, maakt ook gebruik van KASPRO voor het berekenen van energieverbruik en besparingsmogelijkheden. KASPRO heeft zich daarmee de laatste tijd ontwikkeld tot een generieke standaard voor dit type berekeningen. Het zou ook zeker geschikt zijn voor het berekenen van de energiekosten die samenhangen met bepaalde sturingsacties en klimaatinstellingen die telers overwegen. Voor berekeningen waarbij een enkel traject wordt gesimuleerd zou het mogelijk zijn om de berekeningen on-line te laten uitvoeren. In gevallen waarbij snelheid noodzakelijk is lijkt het vooraf berekenen van de het verloop van de bandbreedte van toegankelijke of wenselijke temperaturen, met daarbinnen voor elke dag bij 10 tussenliggende temperaturen het verband tussen gerealiseerde kastemperatuur en energiekosten, een meer geschikte methode. De berekeningen konden worden geverifieerd omdat de beschikbare datasets door het teeltseizoen heen informatie bevatten over het verloop van stookinstellingen, gerealiseerde temperatuur, instraling en schermgebruik. De berekeningsmethode bleek voor de onderzochte bedrijven aan de vereiste specificaties te voldoen. Bij routinetoepassing kan de eventuele noodzaak tot bijstelling van de parameters voor energieberekeningen eenvoudig worden gecontroleerd door berekende prognoses van energieverbruik en kastemperatuur regelmatig achteraf te vergelijken met de gerealiseerde waarden.



## 4.5 Optimalisatie

Optimaliseren is een begrip dat nogal eens - niet helemaal terecht - wordt gebruikt in de zin van 'verbeteren'. In die zin kan bijvoorbeeld een dynamisch model worden gebruikt om te toetsen of een bepaalde temperatuurstrategie bij paprika een beter resultaat geeft dan de normale temperatuur voor deze teelt. Een paprikagewas, met zijn karakteristieke zettingsgolven, is typisch een voorbeeld van een systeem dat een bepaalde eigen dynamiek heeft. Deze eigen dynamiek beïnvloedt de reactie van het gewas op omgevingsfactoren zoals temperatuur en licht. Toch is het probleem in het bovengenoemde voorbeeld relatief eenvoudig op te lossen. Het model heeft informatie nodig over de eigenschappen van het gewas aan het begin van de berekening. Het verloop van de factor licht is in dit voorbeeld ook een vast gegeven. Vervolgens mag het model rekenen met het normale temperatuurverloop en met de veronderstelde betere temperatuurstrategie. De berekende teeltresultaten worden vergeleken en de conclusie kan worden getrokken. Nauwkeurige informatie over de begintoestand van het gewas is hierbij erg belangrijk. Een andere begintoestand leidt in een dynamisch systeem tot een ander resultaat. Als de begintoestand onbekend is, zijn er in principe eindeloos veel mogelijke uitkomsten. Welke het meest realistisch is, valt in dat geval niet te zeggen.

Dit is typisch het soort berekeningen dat routinematig zal worden uitgevoerd door het teeltbegeleidingssysteem, waarvoor het hier gerapporteerde project een voorstudie was. Een vraag kan bijvoorbeeld zijn: 'stel dat het weer zich voor de tijd van het jaar gemiddeld gedraagt, wat is dan de komende 3 weken het te verwachten teeltverloop bij ongewijzigde klimaatinstellingen? Hoeveel zetting is te verwachten, hoeveel vruchten kunnen er worden geoogst?' Ook kan de gebruiker gaan puzzelen met allerlei alternatieven: 'stel dat ik de nachttemperatuur met 0.8 °C verlaag, hoe zal het dan de komende weken gaan, en welk effect heeft dat op het energieverbruik?' Of: 'Stel dat het de komende 2 weken 30% minder lichtrijk is dan normaal, wat heeft dat voor invloed op mijn zetting, en zou het dan eventueel helpen als ik de temperatuur verlaag?' Bij dit soort berekeningen is er steeds een begintoestand, een bepaald verloop van de klimaatomstandigheden, en het resultaat is ook steeds één bepaald verwacht verloop van de teelt. Het eerder genoemde voorbeeld maakt duidelijk waarom het zo belangrijk is om het model tot aan de huidige dag met het gewas mee te laten rekenen. Op basis van registraties en tellingen kan zo worden gecontroleerd of de actuele gewastoestand waarmee het model rekt goed overeenkomt met de feitelijke toestand in de kas (of het telvak). Net als in bovengenoemd voorbeeld geldt bij de berekeningen van het beslissingsondersteunende systeem dat de rekenresultaten afhangen van de begintoestand. Als de begintoestand niet klopt kunnen de prognoses ook niet kloppen. Zoals in paragraaf 4.3 is uiteengezet zijn er daarnaast nog allerlei bronnen van fouten, onzekerheden en verstoringen. Het is daarom verstandig om de berekeningen regelmatig te herhalen, bijvoorbeeld zodra een nieuwe telling, weersverwachting of overzicht over het gerealiseerde klimaat beschikbaar komt. Een belangrijk punt is dat het met deze benadering wel mogelijk is om verbeteringen ten opzichte van de gangbare teeltwijze te ontdekken, maar dat het praktisch gesproken ondoenlijk is om de *optimale* temperatuurstrategie te vinden. Hoeveel van de talloze verschillende mogelijkheden de gebruiker ook doorrekent, het is theoretisch onmogelijk om uit te sluiten dat er toch nog een betere strategie denkbaar is. In die zin wordt dus het optimum nooit gevonden.

In de hier gerapporteerde verkenning is het begrip dynamisch optimaliseren ook in een meer strikte zin toegepast. Het begrip wordt ook gebruikt in de fysica, de techniek en bij bedrijfskunde en economie. Waar het bij dynamisch optimaliseren om gaat is om een systeem, waarvan de belangrijkste eigenschappen zijn vervat in een dynamisch model, zo goed mogelijk te sturen naar een opgegeven doel, ondanks de onzekere veranderingen in de omgeving (zoals in de paprikateelt de marktontwikkelingen en de grilligheid van het weer). Het systeem kan bijvoorbeeld een elektronisch apparaat zijn of een schip, een chemische installatie of een volledige fabriek, maar ook een onderneming of een levend systeem zoals een vruchtgroentegewas. Dit is een probleem van een heel andere orde dan het afwegen van alternatieve opties met behulp van een eenvoudig beslissingsondersteunend systeem, omdat er eindeloos veel verschillende manieren zijn om

vanuit een gegeven beginsituatie een gewenst doel te bereiken. Om een simpel voorbeeld te geven: er zijn oneindig veel verschillende manieren om van punt A naar punt B te lopen: langs allerlei routes, waarbij talloze omwegen mogelijk zijn. Welke van deze mogelijkheden is optimaal? Om dit te kunnen beslissen zijn aanvullende criteria nodig. De kortste weg zal over het algemeen via een rechte lijn gaan, maar bijvoorbeeld in de bergen zal de meest efficiënte weg vaak via de hoogtelijn lopen, en als het buiten regent zal een overdekt traject misschien de voorkeur krijgen.

In het geval van de optimalisaties, beschreven in paragraaf 3.5, was steeds de vraag: 'vanuit een bepaalde beginsituatie en een gegeven het geregistreerde lichtverloop, hoe had een teler zijn kasttemperatuur kunnen sturen om een bepaald teeltdoel te bereiken?' Ook hier bestonden er steeds talloze manieren om elk van de nagestreefde doelen te bereiken. Net als in het voorbeeld van het lopen van A naar B waren ook hier dus aanvullende criteria nodig om uit al deze mogelijkheden te kiezen. In de meeste gevallen was het aanvullende criterium: 'met minimaal energieverbruik'. Vaak brengen dynamische optimaliseringsvraagstukken erg zwaar rekenwerk voor de computer met zich mee, omdat er enorm veel geldige temperatuurtrajecten moeten worden berekend, waaruit dan volgens bepaalde criteria de optimale wordt geselecteerd. Net als bij de relatief eenvoudige beslissingsondersteuning is het ook hier zaak om de optimale temperatuurtrajecten regelmatig opnieuw te berekenen op basis van bijgewerkte inputgegevens. Het berekende optimum is onder praktische omstandigheden dus nooit een absoluut optimum, al was het alleen maar vanwege de onvoorspelbaarheid van het weer. Paprikatelers, die in de praktijk ruime ervaring hebben met dit type onzekerheid, zullen daar waarschijnlijk in het dagelijks gebruik weinig moeite mee hebben.

## 4.6 Vraagstelling

Uit deze voorstudie is duidelijk geworden dat het mogelijk is om energiebesparing te combineren met het afvlakken van de voor paprika typerende oogstfluctuaties. De mogelijkheden om deze twee doelen te combineren bleken aanzienlijk ruimer te zijn wanneer de fluctuaties in twee afdelingen tegen elkaar in werden gestuurd dan wanneer in één enkele afdeling werd geprobeerd om het klimaat zo te sturen dat de fluctuaties werden voorkomen. Om binnen één afdeling een gelijkmatige zetting te krijgen bleek het nodig te zijn om voortdurend bij te sturen. Ondanks dat er in het modelsysteem duidelijk sprake is van een fysiologische slingerbeweging, bestaat er kennelijk niet een evenwichtssituatie waarin het gewas uit zichzelf minder geneigd is om te fluctueren, zoals de slinger van een klok die op het laagste punt rustig stil kan blijven hangen. De belangrijkste bron van stabiliteit lijkt daarom de slingerbeweging zelf te zijn: is de plantbelasting laag, dan is de kans groot dat er een toename zal volgen, bij een zwaar belast gewas is juist de kans op een afname het grootst. Willen dergelijke stuurstrategieën in de praktijk kans van slagen hebben, dan zal die stabiliteit hard nodig zijn, gezien de natuurlijke variatie tussen individuele planten en de horizontale temperatuurverschillen die in de meeste kassen voorkomen. Een mogelijke verklaring voor de betere mogelijkheden voor energiebesparing bij sturing van twee afdelingen in tegenfase is dat de warmtebehoefte van het gewas vooral door het afrijpen van de vruchten wordt bepaald. In het geval van het opheffen van de fluctuaties binnen één enkele afdeling zijn er doorlopend afrijpende vruchten en zal er ook doorlopend sprake zijn van een warmtebehoefte. In het geval van twee afdelingen in tegenfase is dat, vooral wanneer in de periode dat er nieuwe zetting moet plaatsvinden, waarschijnlijk minder het geval. Een laatste aspect heeft niet met energie maar met arbeid te maken: bij het sturen van twee afdelingen in tegenfase zijn er steeds perioden van enkele weken waarin in een bepaalde afdeling geen oogstwerkzaamheden nodig zijn, omdat alle rijpe vruchten dan in de andere afdeling hangen. De oogsters hoeven dus steeds maar de helft van alle paden bij te houden. Dit zal waarschijnlijk een arbeidsbesparing opleveren ten opzichte van de situatie waarin binnen één afdeling een gelijkmatig afzetpatroon is gerealiseerd, daarbij elke week in alle paden moet worden geoogst.

## 5 Conclusies

Door middel van sturing van het kasklimaat is het mogelijk op een paprikabedrijf als geheel het afzetpatroon af te vlakken zonder dat dit productie kost en met minder energieverbruik.

Met beide alternatieve benaderingen: zettingsgolven afvlakken binnen één afdeling of in twee afdelingen de vluchten in stabiele tegenfase houden, kan een vlak afzetpatroon worden gerealiseerd.

Met beide benaderingen kan energiebesparing worden bereikt, maar de mogelijkheden hiervoor zijn groter bij twee afdelingen in tegenfase. Arbeidstechnisch biedt de tegenfasebenadering ook enige voordelen.

Het dynamische gewasmodel voor paprika dat in de loop van dit project verder is ontwikkeld en getoetst bleek in staat om het verloop van zettingsgolven, aantal uitgroeiende vruchten en vruchtproductie (zowel aantallen als kg product) te simuleren, afhankelijk van kasklimaatcondities en van de toestand van het gewas. Hierbij moet worden aangetekend dat het niet mogelijk was om de nauwkeurigheid van de voorspellingen in een breed temperatuurbereik te verifiëren, doordat het model alleen is gecalibreerd op praktijkdatasets.

Verwacht mag worden dat het ontwikkelde model zonder grote aanpassingen op andere gewassen zal kunnen worden toegepast. De functies voor groei, ontwikkeling, vruchtrijping, onderhoud en assimilatenverdeling in de plant zijn volgens algemeen gebruikte en breed geaccepteerde principes ontwikkeld. De ontwikkelde functie voor vruchtzetting is specifiek voor paprika; iets vergelijkbaars was voor zover wij weten tot nu toe ook nog niet bekend. Voor andere gewassen zal hiervoor waarschijnlijk een aangepaste functie moeten worden ontwikkeld.

Er waren te weinig gegevens voorhanden om de groei van jonge planten in de periode van uitplanten tot aan de eerste vruchtzetting goed te modelleren. Om die reden is in de optimalisaties deze periode buiten beschouwing gelaten. Bij de gangbare teeltwijze valt deze fase in de winter, de periode waarin het energieverbruik het hoogst is en waarin mogelijk nog extra besparingsmogelijkheden ongebruikt liggen.

Het is mogelijk gebleken om het ontwikkelde gewasmodel in te bouwen in een dynamische optimalisatie-omgeving. Het systeem is generiek van opgezet zodat inputgegevens en doelfuncties eenvoudig kunnen worden aangepast. Voor het verband tussen kastemperatuur en energiebehoefte maakt de optimalisatie gebruik van relaties die met behulp van het simulatieprogramma KASPRO zijn berekend.

Dynamische optimalisatie kan worden gebruikt om voor een complex systeem in een veranderlijke omgeving de best mogelijke manier te bepalen om een van tevoren gesteld doel te realiseren. Een paprikagewas met de kenmerkende oogstfluctuaties in combinatie met de grilligheid van het weer is een goed voorbeeld van een dergelijk complex systeem en de beheersing van die fluctuaties is typisch een probleem dat met deze benadering kan worden aangepakt.

Ondanks dat het gewasmodel duidelijk inzicht geeft in de manier waarop de oogstfluctuaties bij paprika ontstaan, moet de handmatige beheersing van het proces als uiterst moeilijk, zo niet onmogelijk worden beschouwd.

Optimalisatieberekeningen laten zien dat ook bij momenteel al energiezuinig werkende telers met verschillende teeltstrategieën energiebesparing kan worden bereikt. Op een energiezuinig bedrijf, waarvan het jaarverbruik op  $36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ jr}$  werd ingeschat, lijkt 10 % besparing op verschillende manieren haalbaar. Met extremere strategieën blijkt het verbruik nog aanzienlijk verder worden beperkt, waardoor het verbruik in dit geval inderdaad onder de  $30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ jr}^{-1}$  uit zou kunnen komen. Hierbij moet worden opgemerkt dat de mogelijkheid om slimme optimalisatieregels te bedenken nog niet lijken te zijn uitgeput. Verder kan er wellicht in de teeltfase voorafgaand aan de eerste vruchtzetting nog energiewinst worden geboekt.

Voor toepassing in de praktijk lijkt een niet-optimaliserend, beslissingsondersteunend systeem op korte termijn haalbaar. Een dergelijk systeem kan worden toegepast om mee te rekenen met de teelt, en om op basis daarvan voor de komende weken een prognose te berekenen van energiekosten, zetting, plantbalans, en verder aantal en gewicht van de te oogsten vruchten. De prognoses zouden kunnen worden berekend op basis van gemiddeld weer voor de periode of enkele afwijkende weertypen. Verder kunnen de te verwachten effecten worden berekend van veranderde temperatuurinstellingen op de klimaatcomputer of bijzondere teelthandelingen zoals vruchtsnoei of groen oogsten.

Er bleek nogal wat onzekerheid aanwezig te zijn in de gegevens waarmee het teeltbegeleidingssysteem moet rekenen. Sommige registraties bleken ruis te bevatten, de calibratie van sensoren kan afwijken, het model zelf kan op den duur af gaan wijken, en het weer blijft grillig. Op een robuuste, efficiënte en transparante manier met deze onzekerheid om kunnen gaan lijkt een basisvoorwaarde voor het slagen van een teeltbegeleidingssysteem onder praktijkomstandigheden.

Als uitbreiding zou in een later stadium het dynamisch optimaliseren aan het systeem kunnen worden toegevoegd. Omdat de berekende temperatuurtrajecten behoorlijk kunnen afwijken van de gangbare teeltwijze, verdient het aanbeveling om dit eerst onder goed gecontroleerde omstandigheden in proefkassen te toetsen.

## 6 Referenties

- Buwalda F (1997) - Mogelijkheden voor energiebesparing door temperatuurintegratie bij siergewassen - Effecten van lichtniveau, temperatuurniveau en wachttijd op de integratiecapaciteit van Ficus, Kalanchoe, Gerbera en roos. PBG rapport 120.
- Buwalda F, Eveleens B, Wertwijn R (2000) - Ornamental crops tolerate large temperature fluctuations: a potential for more efficient greenhouse heating strategies. *Acta Hort.* 515: 141-149.
- Buwalda F, Haghuis P, Kempen J, van Gorp H, Bouten P, Baas R (2003) - Integratie van gewasontwikkeling in kasklimaatregeling bij vruchtgroenten. PPO Rapport 576.
- Buwalda F, Rijdsdijk AA, Vogelezang JVM, Hattendorf A, Batta LGG (1999) - An energy efficient heating strategy for cut rose production based on crop tolerance to temperature fluctuations. *Acta Hort.* 507: 117-125.
- Buwalda F, Rijdsdijk AA, Van Leeuwen GJL, Hattendorf A, Vogelezang JVM (1999) - Mogelijkheden voor energiebesparing door temperatuurintegratie bij siergewassen. Toetsen van een meerdaags integrerende temperatuurregeling onder realistische teeltomstandigheden. PBG Rapport 176.
- Buwalda F, Wertwijn R, Eveleens B (1996) - Mogelijkheden voor energiebesparing door temperatuurintegratie bij siergewassen - Een inventarisatie bij zes sierteeltgewassen. PBG Rapport 119.
- De Koning ANM (1990) - Long-term temperature integration of tomato. Growth and development under alternating temperature regimes. *Sci. Hort.* 45: 117-127.
- Gijzen H (1992) - Simulation of photosynthesis and dry matter production of greenhouse crops. Simulation report CABO-TT 28.
- Gijzen H, Vegter JG, Nederhoff EM (1990) - Simulation of greenhouse crop photosynthesis: validation with cucumber, sweet pepper and tomato. *Acta Hort.* 268: 71-80.
- Heuvelink E, Marcelis LFM (1996) - Influence of assimilate supply on leaf formation in sweet pepper and tomato. *J. Hort. Sci.* 71: 405-414.
- Ho LC (1988) - Metabolism and compartmentation of imported sugars in sink organs in relation to sink strength. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 39: 355-378.
- Kläring HP, Heissner A, Fink M (1996) - Growth of a sweet pepper crop – measurements for modelling. *Acta Hort.* 417: 107-112.
- Körner O (2003) – Crop based climate regimes for energy saving in greenhouse cultivation.
- Marcelis LFM, Baan Hofman-Eijer LRM (1997) - Effects of seed number on competition and dominance among fruits in *Capsicum annuum* L. *Ann. Bot.* 79: 687-693.
- Opara LU (2000) - Fruit growth measurement and analysis. *Hort. Reviews* 24: 373-431.
- Rijdsdijk, A.A. & G. Houter (1993) - Validation of a model for energy consumption, CO<sub>2</sub> consumption and crop production (ECP-model). *Acta Hort.* 328: 125-131.
- Rijdsdijk AA, Vogelezang JVM, Van Leeuwen GJL, Van Noort FR, Heij G, Mulderij GE, De Hoog J, Jasperse H (1998) - Temperatuurintegratie op etmaalbasis. PBG rapport 135.

Van den Berg GA, Buwalda F, Rijpsma, E (2001) - Praktijkdemonstratie Meerdaagse Temperatuurintegratie. PPO rapport 501.

Van de Braak, N.J. de Zwart, H.F.(2001) - Analyse energiebesparing door temperatuurintegratie. IMAG-DLO Rapport P 2001-98.

Van Henten EJ (1994) - Greenhouse climate management: an optimal control approach. Thesis Wageningen.

## Bijlage 1 - vervolgtraject

In deze voorstudie is theoretisch aangetoond dat het mogelijk is om energiebesparing te combineren met het afvlakken van de voor paprika typerende oogstfluctuaties. Deze resultaten werden behaald door een gewasmodel te gebruiken voor dynamische optimalisatie. De berekende stuurtrajecten op de klimaatcomputer bleken behoorlijk af te wijken van de gangbare teeltwijze en zouden eerst grondig moeten worden getoetst voordat duidelijk is of de praktijk er verantwoord mee aan de slag kan.

Voor de korte termijn is een veel minder radicale toepassing van het model al mogelijk, namelijk als beslissingsondersteunend systeem. Door op basis van bedrijfsregistraties met de teelt mee te rekenen zal een dergelijk systeem in staat zijn om te verwachten zetting en plantbelasting te berekenen en voor de komende weken een prognose te geven van energiekosten en te oogsten vruchten. Verder krijgt de gebruiker de mogelijkheid om de te verwachten effecten van gewijzigde klimaatinstellingen, afwijkende weerbeelden en teeltmaatregelen zoals groen oogsten of vruchtsnoei van tevoren zichtbaar te maken.

Energiebesparing vormt een belangrijke toepassingsmogelijkheid van het prognosesysteem. Door inzicht vooraf in de eigen dynamiek van zetting en plantbelasting (wat gaat het gewas vanzelf al doen als er niet wordt ingegrepen) kunnen overbodige stookacties worden vermeden. Ook kan de teler van tevoren zien onder welke omstandigheden een lagere – meer energiezuinige – temperatuur kan leiden tot een beter teeltresultaat. Daarnaast biedt het systeem natuurlijk andere toepassingen, zoals aanvoerprognose en het bewaken van de plantbalans. Verder zou het systeem in principe ook met belichte teelten mee kunnen rekenen of kunnen worden toegepast in de (semi-) gesloten kas.

Belangrijke elementen in de benadering zijn inzichtelijkheid, detectie van fouten of tegenstrijdigheden in geregistreerde en berekende gegevens, en eenvoudige mogelijkheden voor correctie. Zo kan een robuust praktijksysteem ontstaan, dat om kan gaan met fouten in de invoergegevens, vergissingen van gebruikers of afwijkingen in de modelberekeningen (bijvoorbeeld bij toepassing op nieuwe rassen).

### **Fasering van het onderzoek en perspectief**

*Werkende kern* - De belangrijkste onderzoekstaak voor de korte termijn is om het model dat we nu hebben te integreren met de gewas- en klimaatregistraties op praktijkbedrijven. Op basis hiervan kunnen de foutdetectie- en correctiemogelijkheden worden geprogrammeerd en getoetst. Hieraan kunnen dan verschillende extra elementen worden gekoppeld, zoals de klimaat- en weerscenario's en de energie- en teeltprognosefuncties. Zo ontstaat de werkende kern van een beslissingsondersteunend systeem, die op een beperkt aantal bedrijven kan worden uitgetest.

*Toetsen compleet prototype* - Als vervolg op deze basismodule zou het teeltbegeleidingssysteem wat breder moeten worden getoetst in de praktijk. In dat geval is het nodig dat er een goede gebruikersinterface om het programma heen wordt gebouwd, zodat telers het systeem zelfstandig kunnen bedienen. In deze fase kan ook worden gedacht aan het toevoegen van extra voorzieningen zoals toegang tot een on-line lokaal weekweerbericht en geautomatiseerde uitwisseling binnen bedrijfsvergelijkingsgroepen. Testgebruikers worden op regelmatige basis begeleid bij het gebruik van het systeem. Aan het eind van het teeltseizoen wordt het systeem geëvalueerd.

*Vlak afzetpatroon* - Behalve als onderdeel van het beslissingsondersteunende systeem is er een andere toepassing van het model mogelijk, namelijk als onderdeel van een dynamisch optimaliserend systeem dat zorgt voor een vlak afzetpatroon. Het doel van de optimalisaties kan ook worden uitgebreid tot: een vlak afzetpatroon bij een verminderd energieverbruik. De klimaattrajecten die het systeem berekent om tot het gewenste patroon te komen kunnen soms nogal afwijken van de gebruikelijke teeltwijze, en zijn ook niet in regels of recepten te vatten. Het is echter wel een onderwerp dat sterk in de belangstelling staat en dat potentieel ook van grote economische betekenis is. Het lijkt raadzaam om dit systeem eerst grondig te

testen onder gecontroleerde omstandigheden in kleinschalige proefkassen.

*Demonstratieproject* - Bij gebleken succes zou de optimalisatiemodule kunnen worden geïntegreerd met het teeltbegeleidingssysteem en als demonstratieproject kunnen draaien.

*Nieuwe voorstudies* – Er lijkt in de paprikawereld momenteel sprake van een grote behoefte aan allerlei teeltinnovaties: beter CO<sub>2</sub> doseren, energiebesparing, belichting, (semi)gesloten kas, ... Door de dynamiek van de vluchten is paprika een lastig gewas, waardoor het optimaal leren benutten van die kansen niet vanzelf gaat. Zodra een werkend beslissingsondersteunend systeem beschikbaar is wordt het mogelijk om effecten van verschillende kasklimaatfactoren op de dynamiek van de gewastoestand goed te monitoren, in onderlinge samenhang te begrijpen en op den duur efficiënt te sturen. Het resultaat is dan niet alleen een betere teelt of proef, maar meteen de sturingsopties erbij! Dit wordt echter pas mogelijk zodra er een praktisch werkend systeem beschikbaar is, en daar zal eerst nog werk voor moeten worden verzet.

Wat op korte termijn al *we*/tot de mogelijkheden behoort is om voor verschillende vraagstukken alvast net zulke voorstudies uit te voeren als de hier gerapporteerde voor energie en oogstfluctuaties. Zodra er een praktisch werkend systeem beschikbaar is zou dan voor het betreffende onderwerp een 'vliegende start' kunnen worden gemaakt.